



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

교육학박사학위논문

열역학 제2법칙과 가역과정에 대한
학생의 이해와 효과적인 지도 방안

Students' Understanding of the Second Law of
Thermodynamics Including Reversible Processes
with Suggestions for Effective Instruction

2012년 8월

서울대학교 대학원

과학교육과 물리전공

이 주 현

열역학 제 2 법칙과 가역과정에 대한 학생의 이해와 효과적 지도 방안

Students' Understanding of the Second Law of
Thermodynamics Including Reversible Processes
with Suggestions for Effective Instruction

지도교수 송진웅

이 논문을 교육학박사학위논문으로 제출함.

2012년 4월

서울대학교 대학원

과학교육과 물리전공

이 주 현

이주현의 박사학위논문을 인준함.

2012년 7월

| | | |
|------|------------------------------------|---|
| 위원장 | <u> 홍 훈 기 </u> | 인 |
| 부위원장 | <u> 박 종 원 </u> | 인 |
| 위원 | <u> 유 준 희 </u> | 인 |
| 위원 | <u> 이 봉 우 </u> | 인 |
| 위원 | <u> 송 진 웅 </u> | 인 |

초 록

다입자계를 다루는 열역학 및 통계역학 분야에서는 비가역성이 나타나며 이는 열역학 제2법칙의 핵심이다. 하지만 이에 대한 학생의 이해 및 교수학습방법에 대한 연구는 부족하다. 이에 본 연구에서는 열역학 2법칙과 가역과정에 대한 교과서 분석과 학생의 이해 조사를 통해, 일반물리학 수준에서의 열역학 제2법칙에 대한 효과적인 지도 방안을 제안하는 것을 목적으로 하였다.

본 연구는 총 4단계로 구성되어 있다. 연구 1에서는 열역학 제2법칙에 대한 일반물리학 교과서 설명을 분석하였다. 연구 2에서는 열기관 상황에서의 열효율과 가역과정의 관계에 대한 학생의 이해를, 연구 3에서는 비가역 단열과정에서 열역학적 평형상태로의 이동에 관한 학생의 이해를 조사하였다. 연구 4에서는 교과서 분석결과와 학생의 이해 조사 결과를 고려하여 열역학 제2법칙에 대한 지도 방안을 제안하였다.

연구 1에서의 열역학 제2법칙과 엔트로피에 대한 교과서 설명의 전체 흐름 및 수식의 도입 방식, 가역과정과 카르노 순환의 설명에 대한 분석 결과는 다음과 같다. 내용 전개 과정을 살펴본 결과, 열역학 제2법칙과 엔트로피에 대한 정성적 설명이 풍부한 교과서, 식 $dS = \delta Q/T$ 의 정량적 계산에 초점을 둔 교과서, 식 $S = k \ln \Omega$ 을 중심으로 기술된 교과서 등으로 구분할 수 있었다. 식 $dS = \delta Q/T$ 의 도입방법은 단순히 식만 제시하는 경우, 카르노 순환을 이용한 역사적 접근 방식을 취하는 경우, 통계학적인 온도로부터 식을 유도하는 경우 등 다양하였다. 식 $S = k \ln \Omega$ 의 도입에 있어서는 주로 일상생활 맥락이 활용되었으나, 고체 모형을 이용하는 경우도 있었다. 한편, 가역과정과 카르노 순환에 대한 설명에 있어서는 가역과정의 조작적 정의를 알기가 어려웠고, 가역적으로 작동하는

카르노 기관의 구체적 작동과정에 대한 설명이 부족하였으며, 열역학 제 2법칙과 엔트로피의 관계를 보여주는 예제 문항이 적은 편이었다.

연구 2에서는 ‘두 열원 사이에서 가역적으로 작동하는 열기관의 경우 그 효율은 모두 동일하다.’는 서술과 ‘이상적인 스텔링 기관은 가역적으로 작동한다.’는 서술, 그리고 ‘이상적인 스텔링 기관의 효율은 카르노 기관보다 낮다.’는 세 서술 사이의 모순 관계를 해결하기 위한 이론적 논의를 하고, 이를 학생들이 어떻게 해결하는지를 살펴보았다. 연구 참여자는 열 및 통계물리 과목을 수강하는 24명의 물리교육 전공 대학생들이었다. 스텔링 기관의 열효율에 대한 설명 분석에 따르면, 스텔링 기관은 재생기의 도움 없이는 두 열원 사이에서 가역적으로 작동할 수 없으며, 이 경우에 스텔링 기관의 열효율은 카르노 기관보다 낮다. 하지만 재생기를 도입하면 스텔링 기관과 카르노 기관의 효율이 동일함을 증명할 수 있다. 학생들은 스텔링 기관과 카르노 기관이 가역적으로 작동하는지의 여부를 결정하기 위해 계의 엔트로피에 대해 주로 논의하였으나, 엔트로피와 가역과정 사이의 관계에 대해서 잘 알지 못하였다. 위에서 언급한 모순 관계에 대해서도 단순히 스텔링 기관은 비가역적으로 작동한다고 답하거나 잘 모른다고 응답한 경우가 많았는데, 이는 열역학적 과정에 대한 이해가 불충분하기 때문인 것으로 생각되었다.

연구 3에서는 비가역 단열과정에서의 열역학적 평형상태로의 이동에 관한 과학고 학생들의 사고과정을 조사하였다. 연구 참여자는 일반물리학 수준의 열역학을 배운 140명의 과학고 학생들이었다. 밀폐된 공간에서 좌우로 자유롭게 움직이는 피스톤의 운동에 대한 문항과 수직으로 놓여있는 주사기에서 피스톤 위에 물체를 갑자기 올려놓거나 치웠을 때의 피스톤의 운동에 대한 문항이 제시되었다. 문제 상황을 해결하기 위해 학생들은 주로 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’이라는 수식을 사용하였는데, 학생들은 이 수식이 가역과정에서만 성립함을 알지 못하였다. 또한 단열과정에서 피스

톤은 멈추지 않고 영원히 진동할 것이라고 생각하였는데, 이는 열역학적 상황을 역학적 에너지 보존 법칙으로 설명하려고 했기 때문에 생기는 문제이다. 열역학 제2법칙은 수많은 입자들이 충돌하는 상황에서 적용된다는 것을 인지하지 못하였으며, 가역과정과 비가역과정에 대한 구별을 잘 하지 못하였다. 또한 비가역적인 상황에서 계의 최종상태를 예측하는 데 어려움을 겪었다.

연구 4에서는 지금까지의 연구결과를 기반으로 열역학 제2법칙의 효과적인 지도 방안을 제안하였다. 먼저 ‘고립계에서 엔트로피는 감소하지 않는다.’는 서술을 학생들이 인지할 수 있도록 다양한 상황에서의 엔트로피를 이용한 열역학 제2법칙의 적용을 강조하였다. 또한 역학과 열역학의 비교를 통한 열역학 제2법칙을 적용할 수 있는 상황에 대한 논의가 필요하며, 가역과정의 제시 순서에 대해 고려하였다. 가역과정을 설명함에 있어서 정량적 계산과 정성적 설명을 모두 제공하고자 하였으며, 카르노 기관의 작동과정에 대한 자세한 설명을 통해 가역과정에 대한 이해를 증대시키고자 하였다. 또한 각 수식을 사용할 수 있는 구속조건을 강조함으로써 문제 상황에 맞게 수식을 사용할 수 있도록 안내하였다.

결론적으로 본 연구는 열역학 제2법칙과 관련된 주요 개념에 대한 다양한 설명방식을 제시하였으며, 학생의 이해와 관련해서는 열역학 제2법칙, 가역과정, 구속조건과 관련된 어려움을 확인하였고, 역학과 열역학의 비교 및 가역과정에 대한 자세한 설명을 통해 이러한 어려움을 극복할 수 있는 지도 방안을 제안하였다.

주요어: 열역학 제2법칙, 가역과정, 엔트로피, 학생의 이해, 일반 물리, 열기관, 단열과정

학 번: 2007-30916

차 례

| | |
|---------------------------------|------|
| 초 록 | i |
| 차 례 | iv |
| 표 차례 | viii |
| 그림 차례 | x |
| | |
| 1. 서 론 | 1 |
| 1.1. 연구의 동기와 목적 | 1 |
| 1.2. 연구 문제 | 4 |
| 1.3. 연구 과정의 개요 | 5 |
| 1.4. 용어의 정의 | 8 |
| 1.5. 연구의 한계 | 11 |
| | |
| 2. 선행연구와 이론적 논의 | 12 |
| 2.1. 관련 물리 개념 | 12 |
| 2.1.1. 거시 세계와 미시 세계 | 12 |
| 2.1.2. 열역학 제2법칙 | 13 |
| 2.1.3. 가역과정과 비가역과정 | 14 |
| 2.1.4. 엔트로피 | 20 |
| 2.2. 학생의 물리개념 조사 | 27 |
| 2.2.1. 학생의 물리개념 조사 방법 | 27 |
| 2.2.2. 문제풀이와 개념이해의 관계 | 30 |
| 2.2.3. 학생과 전문가가 갖고 있는 물리개념의 차이점 | 32 |

| | |
|---|----|
| 2.3. 열역학 제2법칙 교육에 대한 선행연구..... | 35 |
| 2.3.1. 학생의 열역학 개념 이해에 대한 연구..... | 35 |
| 2.3.2. 열역학 제2법칙 학습에서 학생들이 겪는 어려움 | 37 |
| 2.3.3. 열역학 제2법칙 및 엔트로피 개념의 교수학습방법 | 39 |
| | |
| 3. 연구 1: 일반물리학 교과서에서의 열역학 제2법칙과 엔트로피 에 대한 설명 분석..... | 43 |
| 3.1. 연구의 필요성 및 목적..... | 43 |
| 3.2. 연구 대상 및 조사 내용 | 44 |
| 3.3. 연구 결과 및 논의..... | 45 |
| 3.3.1. 열역학 제2법칙과 엔트로피 개념에 대한 교과서의 서술 | 45 |
| 3.3.2. 열역학 제2법칙에 대한 다양한 서술들 사이의 관계..... | 48 |
| 3.3.3. 엔트로피에 대한 내용 전개 순서..... | 52 |
| 3.3.4. 클라우지우스 식과 볼츠만 식의 도입 방식 | 55 |
| 3.3.5. 교과서에 제시된 예제 | 61 |
| 3.3.6. 가역과정에 대한 정의..... | 63 |
| 3.3.7. 카르노 기관의 작동과정에 대한 설명..... | 70 |
| 3.4. 결론 및 시사점..... | 72 |
| | |
| 4. 연구 2: 열기관에서 열효율과 가역과정의 관계에 대한 대학생 의 이해..... | 77 |
| 4.1. 연구의 필요성과 목적..... | 77 |
| 4.2. 스텔링 기관의 열효율에 대한 설명방식 | 78 |
| 4.2.1. 카르노 기관의 효율이 스텔링 기관보다 높다는 서술에 대한 설명방식..... | 79 |

| | |
|--|------------|
| 4.2.2. 카르노 기관과 스텔링 기관의 열효율은 같다는 서술에 대한 설명방식..... | 85 |
| 4.3. 연구 대상 및 설문 문항..... | 87 |
| 4.4. 학생 응답 결과 분석..... | 89 |
| 4.4.1. 이상기관의 조건..... | 90 |
| 4.4.2. 스텔링 기관의 열효율 크기..... | 91 |
| 4.4.3. 스텔링 기관과 카르노 기관의 가역성 여부..... | 93 |
| 4.4.4. 스텔링 기관의 열효율이 카르노 기관보다 낮은 이유..... | 102 |
| 4.5. 결론 및 시사점..... | 109 |
| | |
| 5. 연구 3: 비가역 단열과정에서 열역학적 평형상태로의 이동에 관한 과학고 학생들의 이해..... | 113 |
| 5.1. 연구의 필요성 및 목적..... | 113 |
| 5.2. 연구 대상 및 설문 문항..... | 115 |
| 5.3. 학생 응답 결과 분석..... | 120 |
| 5.3.1. 열역학 제2법칙에 대한 학생의 기본 이해..... | 120 |
| 5.3.2. 밀폐된 공간에서 좌우로 이동하는 피스톤 운동의 예측..... | 132 |
| 5.3.3. 수직으로 놓인 실린더에서 피스톤 운동의 예측..... | 140 |
| 5.3.4. 성공적인 문제풀이를 위한 개념적 지식들..... | 147 |
| 5.4. 결론 및 시사점..... | 156 |
| | |
| 6. 연구 4: 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해를 고려한 효과적인 지도 방안..... | 160 |
| 6.1. 연구의 필요성 및 목적..... | 160 |
| 6.2. 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해..... | 162 |

| | |
|---|-----|
| 6.3. 교과서 분석을 통해 살펴본 교수학습에서 고려해야 할 측면들 | 166 |
| 6.3.1. 교과서에 제시된 다양한 설명방식에서 나타나는 논쟁점들 | 166 |
| 6.3.2. 학생의 이해에 기반한 교과서 설명 고찰 | 170 |
| 6.4. 열역학 제2법칙의 효과적인 지도 방안 | 180 |
| 6.4.1. 열역학 제2법칙과 관련된 개념적 지식의 조직화 | 180 |
| 6.4.2. 열역학 제2법칙의 교수학습 흐름도 | 184 |
| 6.5. 결론 및 시사점 | 197 |
| | |
| 7. 결론 및 제언 | 200 |
| 7.1. 요약 | 200 |
| 7.2. 결론 및 시사점 | 204 |
| 7.3. 후속 연구 과제 | 207 |
| | |
| 참고문헌 | 209 |
| [부록1] 열기관에서의 열효율과 가역과정의 관계에 대한 설문 | 223 |
| [부록2] 비가역 단열과정에 대한 설문 | 227 |
| [부록3] 과학고에서의 열역학 제2법칙에 대한 수업 내용 | 233 |
| ABSTRACT | 237 |

표 차례

| | |
|--|-----|
| 표 3.1 본 연구에서 분석한 일반물리학 교과서..... | 44 |
| 표 3.2 열역학 제2법칙에 대한 서술들..... | 46 |
| 표 3.3 엔트로피에 대한 정의..... | 46 |
| 표 3.4 교과서에 제시된 예제들..... | 61 |
| 표 3.5 교과서에 나타난 가역과정의 조건..... | 66 |
| 표 3.6 가역등온팽창과정에 대한 그림들 | 71 |
| 표 4.1 카르노 순환과 스텔링 순환의 열효율 비교 | 79 |
| 표 4.2 카르노 순환과 스텔링 순환에서 유입된 열과 해준 일의 크기... 80 | 80 |
| 표 4.3 일반물리학 교과서(Halliday <i>et al.</i> , 1993; 2008)에서의 스텔링 기관에 대한 서술 비교..... | 84 |
| 표 4.4 설문지 내용..... | 88 |
| 표 4.5 이상기관의 조건에 대한 학생의 생각..... | 90 |
| 표 4.6 스텔링 기관과 카르노 기관의 열효율 크기에 대한 학생의 생각.... 92 | 92 |
| 표 4.7 스텔링 기관이 이상기관인지의 여부에 대한 학생의 응답 | 95 |
| 표 4.8 스텔링 기관이 가역적으로 작동하는지의 여부에 대한 학생의 생각... 95 | 95 |
| 표 4.9 카르노 기관이 가역적으로 작동하는지의 여부에 대한 학생의 생각... 98 | 98 |
| 표 4.10 스텔링 기관과 카르노 기관에서의 학생들의 가역과정을 판단하 는 기준 비교 | 100 |
| 표 4.11 스텔링 기관이 카르노 기관보다 효율이 낮은 이유에 대한 학생 의 응답..... | 103 |

| | |
|--|-----|
| 표 4.12 스티어링 기관의 가역성과 효율 사이의 관계에 대한 학생의 생각.. | 107 |
| 표 5.1 열역학 제2법칙과 관련된 기본 문항들..... | 117 |
| 표 5.2 비가역 단열과정에 관한 주요 문제들..... | 118 |
| 표 5.3 비가역 단열과정 문제에 대한 학생의 응답 빈도..... | 118 |
| 표 5.4 열역학 제2법칙에 대한 학생의 설명방식..... | 121 |
| 표 5.5 엔트로피에 대한 학생의 설명방식..... | 122 |
| 표 5.6 학생들이 생각하는 가역과정의 대표적인 예 | 124 |
| 표 5.7 학생들이 생각하는 비가역과정의 대표적인 예..... | 125 |
| 표 5.8 학생들이 생각하는 고전역학과 열역학의 공통점과 차이점..... | 128 |
| 표 5.9 학생들 스스로 생각하는 열역학 제2법칙과 엔트로피 개념에 대한 이해의 어려움..... | 129 |
| 표 5.10 문제 1에 대한 학생의 응답: 피스톤이 최종적으로 멈추는지의 여부..... | 135 |
| 표 5.11 문제 2에 대한 학생의 응답: 추를 피스톤 위에 올려놓는 상황.... | 143 |
| 표 5.12 문제 2에 대한 학생의 응답: 피스톤 위에 올려놓은 추를 제거한 이후 기체가 처음상태로 되돌아가는지의 여부 | 146 |
| 표 6.1 학생의 이해에 기반한 교과서 설명의 개선방향..... | 178 |
| 표 6.2 열역학 제2법칙의 교수학습 흐름도..... | 186 |

그림 차례

| | |
|---|-----|
| 그림 1.1 연구 과정의 개요 | 6 |
| 그림 2.1 클라우지우스 서술과 켈빈-플랑크 서술의 동등성..... | 14 |
| 그림 3.1 교과서에 나타난 열역학 제2법칙의 다양한 서술들 사이의 관계.. | 50 |
| 그림 3.2 교과서별 열역학 제2법칙 서술들의 연결 형태 비교..... | 51 |
| 그림 3.3 클라우지우스 엔트로피에 초점을 둔 교과서의 전개 방식..... | 53 |
| 그림 3.4 Halliday <i>et al.</i> (2008)의 교과서의 전개 방식 | 54 |
| 그림 3.5 볼츠만 엔트로피에 초점을 둔 교과서의 전개 방식..... | 55 |
| 그림 3.6 여러 개의 카르노 사이클로 표현된 임의의 순환과정 | 57 |
| 그림 3.7 마찰 없이 수직으로 진동하는 피스톤..... | 66 |
| 그림 3.8 가역과정의 예로서의 단진자 운동..... | 68 |
| 그림 3.9 역학 과정에 대한 예시..... | 68 |
| 그림 4.1 가역기관이 두 열원 사이에서 작동하는 기관 중, 최고효율을 갖는 기관임을 보여주는 그림..... | 82 |
| 그림 4.2 재생기 | 86 |
| 그림 4.3 공학 교과서에 제시된 스텔링 기관의 $p-V$ 그림과 $T-S$ 그림 (Çengel & Boles, 2006)..... | 86 |
| 그림 4.4 스텔링 기관에서의 $p-V$ 그림 | 94 |
| 그림 5.1 문제 1의 계에 대한 변수들..... | 133 |
| 그림 5.2 시간에 따른 피스톤의 위치에 대한 시뮬레이션 결과 (Gislason, 2010) | 134 |
| 그림 5.3 피스톤의 운동을 설명하기 위한 용수철 모형..... | 136 |

| | |
|---|-----|
| 그림 5.4 피스톤이 왼쪽으로 x 만큼 이동하였을 때의 계의 상태..... | 137 |
| 그림 5.5 문제 1에 대한 풀이를 설명하기 위한 $U-x$ 그래프..... | 137 |
| 그림 5.6 문제 2의 계에 대한 변수들: 피스톤 위에 추를 올려놓는 상황 | 141 |
| 그림 5.7 문제 2의 계에 대한 변수들: 피스톤 위의 추를 제거하는 상황 | 142 |
| 그림 5.8 가역단열과정에서의 $p-V$ 그림 | 152 |
| 그림 6.1 열역학 제2법칙에서의 구속조건을 포함한 개념들 간의 관계도 | 182 |
| 그림 6.2 수평으로 놓여있는 실린더에서의 피스톤의 운동 | 195 |

1. 서 론

1.1. 연구의 동기와 목적

“고립계에서 엔트로피는 절대 감소하지 않는다.” – R. Clausius, 1865-

열역학을 역학, 전자기학, 양자역학과 구분해주는 가장 핵심적인 표현은 주변에서 일어나는 사건들에 방향성이 있음을 나타내는 열역학 제2 법칙에 관한 서술일 것이다.

지난 수십 년 동안 구성주의 심리학의 기초 아래 물리교육 분야에서는 학생의 선개념에 대한 연구 및 학생의 개념변화를 위한 인지갈등 전략에 대한 연구가 활발하게 이루어져 왔다. 그 결과 역학이나 전자기학 분야에서는 상당한 성과를 거두었는데 이는 FCI(Force Concept Inventory)나 CSEM(Conceptual Survey of Electricity and Magnetism), BEMA(Brief Electricity and Magnetism Assessment)와 같은 평가도구의 개발로 이어졌다(Ding *et al.*, 2006; Hestenes *et al.*, 1992; Maloney *et al.*, 2001). 또한 물리학 수업을 단순히 계산하는 수업이 아닌 논리적으로 사고하고 고찰하는 수업으로 변화시키기 위한 노력이 이루어졌다(김익균, 2002). 하지만 다입자계를 다루는 열역학 및 통계역학 분야에 대한 학생의 이해 및 교수학습방법, 평가에 대한 연구는 상대적으로 부족한 편이며, 특히 고등학교 고학년 이상에서 다루는 열역학 제 2 법칙과 관련된 연구는 매우 부족한 편이다(Christensen *et al.*, 2009; McDermott & Redish, 1999).

열역학은 열과 일, 에너지의 전달과 전환에 관한 학문이다. 계를 온도,

부피, 압력과 같은 거시적 변수들로 표현한 뒤 열역학 제1법칙인 에너지 보존 법칙과 열역학 제2법칙인 엔트로피 증가 법칙을 이용하여 계의 최종상태를 예측하며, 이러한 과정을 통해 물리학, 화학, 생명과학 등 자연 현상을 설명해내고 실제 생활에서 사용하는 여러 기관들의 에너지 효율의 한계를 결정하는 기초 학문이다. 열역학 제1법칙이 역학에서 이야기하는 에너지 보존법칙의 확장이라고 한다면, 열역학 제2법칙은 다입자계를 다루는 학문적 특성을 보여주는 열역학의 핵심으로서, 고전역학보다 더 넓은 범위의 현상들을 다루는 데 기여한다. 고전역학에서는 물체의 처음 상태(위치와 운동량)에 대해 알고 있다는 전제 하에 물체에 보존력이 작용하는 경우 시간에 따른 물체의 이동경로를 완벽하게 예측할 수 있는 반면, 열역학에서는 계를 구성하는 입자 개개의 처음 상태에 대한 정보가 불완전하고 입자 수가 많아서 입자들의 운동을 통계적으로 다룰 수 밖에 없으며, 이 과정에서 확률개념과 비가역성 등을 포함하는 열역학 제2법칙이 등장하게 된다. 이러한 측면에서 열역학은 역학과 구분되며, 따라서 열역학 제2법칙에 대한 학생의 개념 이해 연구는 기존의 역학 개념에 대한 연구와는 구별되는 새로운 결과를 보여줄 것으로 예상된다.

열역학 제2법칙은 여러 가지 형태로 표현되는데, 대표적인 표현으로는 켈빈-플랑크 표현과 클라우지우스 표현이 있다. 켈빈-플랑크는 ‘열원에서 열을 뽑아 100% 일로 전환되는 것은 불가능하다.’고 표현하였으며, 클라우지우스는 ‘열은 저절로 저온에서 고온으로 이동하지 못한다.’고 표현하였다. 이러한 표현들은 ‘엔트로피’ 개념을 통해 일반화할 수 있으나, 직관적으로 엔트로피 개념을 이해하는 것은 어려운 것으로 여겨져 왔다 (Müller, 2007, p. 77).

물리교육에서 열역학 제2법칙과 관련된 연구로는 초, 중등학생들이 생각하는 에너지 개념의 특징을 조사한 연구(Duit & Kesidou, 1988; Kesidou

& Duit, 1993), 대학생들의 열역학 제2법칙 및 엔트로피 개념에 대한 이해 조사 연구(이주현, 송진웅, 2007; Christensen *et al.*, 2009; Cochran & Heron, 2006), 일반물리학 수준에서의 열역학 교육 방법에 대한 연구(Baierlein, 1994; Reif, 1999) 등이 있으나 각 부분에 대해 연구가 많이 이루어진 편은 아니다.

대학생들의 엔트로피 개념 이해의 어려움과 관련해서는 주로 엔트로피가 무엇인지 학생들 스스로 정의를 해 보게 하거나 간단한 상황에 대해 계의 엔트로피 변화 여부를 정성적으로 예측해 보는 연구가 진행되었다(Christensen *et al.*, 2009; Cochran & Heron, 2006). 그 결과 ‘무질서도’라는 비유가 엔트로피를 이해하는 데 있어서 혼란을 가중시킬 수 있다는 연구가 상당 수 보고되었다(Bindel, 2004; Johnstone *et al.*, 1977; Lowe, 1988; Rodewald, 1990; Styer, 2000; Wright, 1970). 열역학 제2법칙과 관련된 간단한 문제를 제시하고 학생의 어려움을 조사한 연구에서는 학생들이 계의 엔트로피 변화량 계산에 어려움을 느끼며 엔트로피를 이용해 열역학 제2법칙을 잘 설명하지 못하는 것으로 나타났다(이주현, 2007; Christensen *et al.*, 2009; Granville, 1985; Sözbilir, 2007; Thomas & Schwenz, 1998). 선행연구에서 사용된 문제상황들은 주로 일반물리학에서 제시하는 예제 수준의 문항이었다. 즉, 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해가 다양한 상황에서 조사되지 않았으며, 주로 기본 개념을 갖추고 있는지의 여부를 확인하는 문항들로 구성되어 있었고, 열역학적 과정에 대한 것보다는 엔트로피 개념에 초점이 맞춰져 있었다. 또한 열역학 제2법칙의 비가역성에 초점을 둔 연구도 찾아보기 어려웠다.

열역학 교육 방법에 관한 연구의 경우, 교수방법에 대한 물리학자들의 생각 및 본인의 실천경험을 나열한 논문들이 주를 이루었는데, 기존의 역사적 관점에 따른 교육방식을 탈피하고 미시적인 관점으로 열역학을

가르치자는 의견이 대부분이었다(Baierlein, 1994; Reif, 1999). 하지만 이 연구들은 주로 학생들이 엔트로피를 직관적으로 이해할 수 있도록 돕기 위한 방안을 모색하는 논문들이며, 열역학적 과정에 대한 이해의 중요성과 교수방법에 대한 논의는 찾아보기 어려웠다.

본 연구는 열역학을 배우는 학생들의 열역학 제2법칙에 대한 개념 이해 증진 및 문제해결능력의 향상을 위한 기초자료를 제공하고, 효과적인 지도방안을 제시하는 것이 주요 목적이다. 우선, 열역학 제2법칙이 현재 일반물리학 수준에서 어떻게 다루어지고 있는지를 살펴보기 위해 일반물리학 교과서에서의 열역학 제2법칙, 엔트로피, 가역과정에 대한 설명방식을 분석하였다. 다음으로 가역적으로 작동하는 열기관 상황과 비가역 단열과정에서의 학생들의 문제 풀이 과정을 살펴보고, 이 때 나타나는 문제점들을 열역학 제2법칙과 관련된 원리 및 공식, 개념 이해의 측면 등에서 분석하였다. 마지막으로 지금까지 찾아낸 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해와 교과서 분석 결과를 종합하고, 열역학 제2법칙에 대한 효과적인 지도 방안을 모색하였다.

1.2. 연구 문제

본 연구의 연구 문제는 다음과 같다.

첫째, 일반물리학 교과서에는 열역학 제2법칙, 엔트로피, 가역과정에 대한 내용이 어떻게 기술되어 있는가?

둘째, 문제풀이과정에서 나타나는 열역학 제2법칙과 가역과정에 대한 학생의 이해는 어떠한가?

- 학생들은 두 열원 사이에서 작동하는 스텔링 기관과 카르노 기관의 열효율 차이를 엔트로피 변화량 및 과정의 가역성 여부와 어떻게

연결시키는가?

- 학생들은 비가역 단열과정에 대한 문제를 어떻게 해결하며, 성공적인 문제 풀이를 위해 필요한 개념적 지식은 무엇인가?

셋째, 열역학 제2법칙과 가역과정에 대한 학생의 이해 및 교과서 분석 결과를 고려할 때, 효과적인 지도를 위해서는 열역학 2법칙과 관련된 지식들을 어떤 방식으로 설명할 수 있는가?

1.3. 연구 과정의 개요

본 연구에서는 열역학 제2법칙에 대한 교과서 분석 결과와 학생의 열역학 제2법칙과 가역과정에 대한 이해를 토대로 열역학 제2법칙에 대한 효과적인 지도 방안을 탐색하였다. 구체적인 연구과정의 개요는 그림 1.1과 같다.

연구는 크게 네 부분으로 나뉘어진다. 연구 1은 일반물리학 교과서 분석으로서 열역학 2법칙, 엔트로피, 가역과정에 대한 설명방식을 조사하였다. 연구 2와 연구 3은 학생의 이해에 대한 조사 부분으로서, 연구 2에서는 열기관에서의 열효율과 가역과정의 관계에 대한 학생들의 이해를 살펴보았으며, 연구 3에서는 비가역 단열과정에서 열역학적 평형상태로의 이동에 관한 학생들의 이해를 조사하였다. 연구 1에서 연구 3까지의 결과를 종합하여 연구 4에서 열역학 제2법칙에 대한 효과적인 지도방안을 제시하였다.

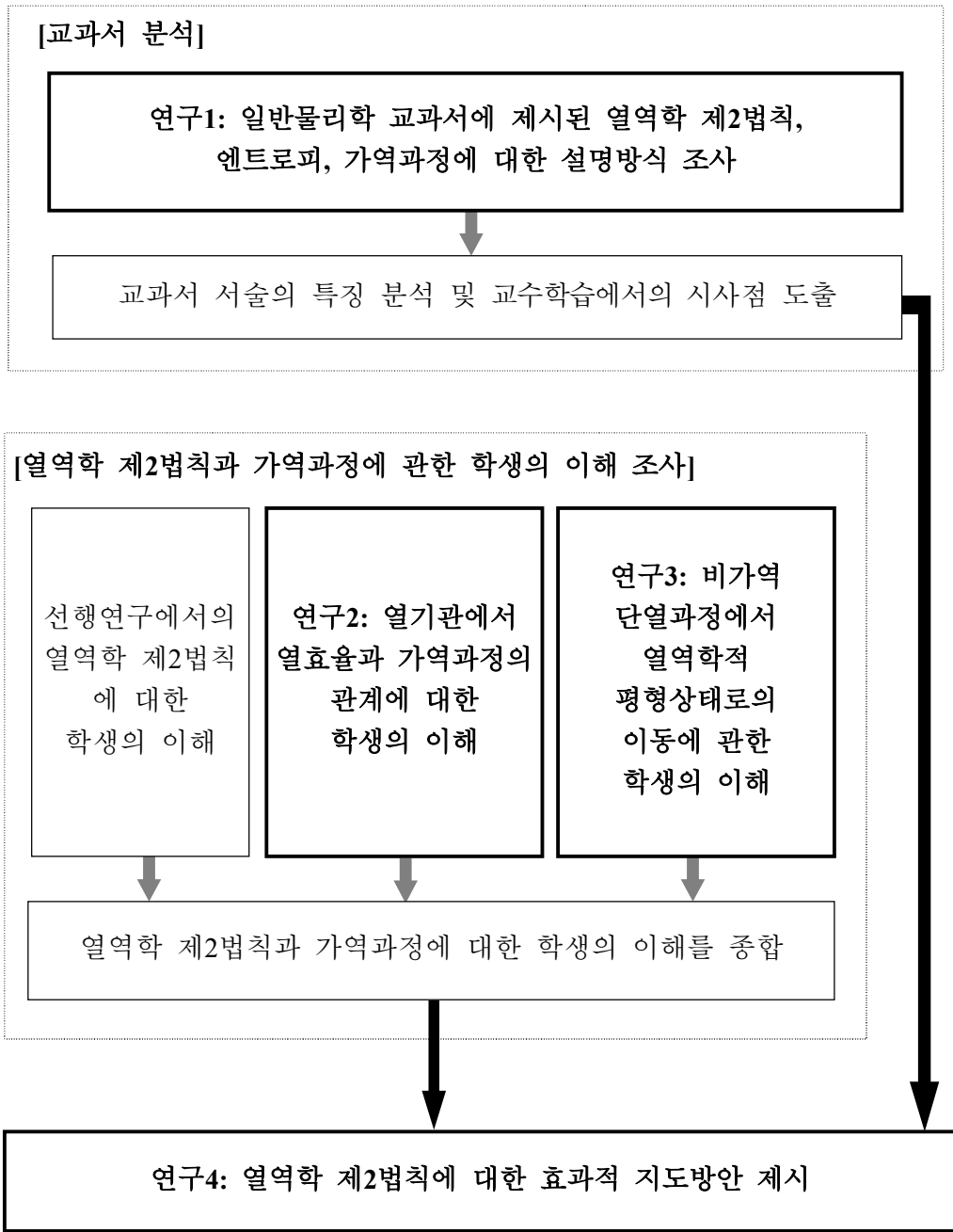


그림 1.1 연구 과정의 개요

먼저 열역학 제2법칙과 관련된 학생의 이해와 교수학습방안에 대한 선행 연구 결과들을 살펴보았다. 주로 엔트로피와 관련된 논의가 이루어지고 있었으며, 이를 토대로 기존에 잘 다루지 않았던 열역학 제2법칙과 열역학적 과정에 초점을 맞추어 연구 설계를 하였다.

열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해를 증진시키고 교수학습방법을 개선하기 위한 자료를 제공하기 위해서는 교과서 서술을 분석할 필요가 있다. 연구 1에서는 일반물리학 교과서에 나타나있는 열역학 제2법칙, 엔트로피, 가역과정에 대한 내용들을 분석하였다. 구체적으로 열역학 제2법칙에 대한 다양한 서술들, 엔트로피에 대한 설명방식 및 내용 전개 순서, 가역과정에 대한 정의와 카르노 순환에 대한 서술, 교과서에 등장하는 예제들의 종류에 관해 살펴보았다.

연구 2와 연구 3에서는 열역학 제2법칙과 가역과정에 대한 학생의 이해를 조사하기 위해 문제 상황을 제시하고 학생들의 문제풀이과정을 살펴보았다. 연구 2에서는 가역적으로 작동하는 스티링 기관에 대한 열효율을 계산한 후 이를 카르노 기관과 비교하는 활동을 제시하였다. 열 및 통계물리학 강좌를 수강하는 대학교 4학년 학생 24명을 대상으로 스티링 기관에 대한 p - V 그림과 두 열원 사이에서 작동하는 기관 중 가역적으로 작동하는 카르노 기관의 효율이 최대임을 보여주는 증명을 제시하여, 스티링 기관의 각 과정이 가역적인지의 여부를 결정하게 하였다. 연구 3에서는 비가역 단열과정 상황에서 피스톤의 운동 및 계의 나중 상태를 예측해보는 활동을 제시하였으며, 과학고 2학년 학생 140명이 참여하였다.

마지막으로 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해와 교과서 분석 결과를 바탕으로 성공적인 개념이해와 문제풀이를 위해 교수학습에서 고려해야 할 점들을 도출하였다. 열역학 제2법칙에 대해 학생의 이해 조사 결과와 이에 대한 교과서 서술을 비교하였으며, 학생의 오개념을 줄이고 어려움

을 극복할 수 있는 방안을 모색하였다.

1.4. 용어의 정의

개념적 지식 (conceptual knowledge)

본 연구에서 사용하는 개념적 지식이란, 개념(concepts)에 대한 이해 뿐만 아니라 사실(facts), 법칙 및 원리(laws and principles), 공식(formula), 개념과 개념 사이의 관계(the relation among several concepts), 개념에 대한 인지적 구조(conceptual structure) 등을 하위요소로 두는 용어로서, 이는 이경호(2007)가 제시한 학생이 물리학을 학습하면서 겪는 어려움을 분석한 지식-신념틀에서 정의된 과학 지식과 관련된 요소들 중 하나이다.

학생의 이해 (students' understanding)

본 연구에서 사용하는 학생의 이해는 개념적 지식에 대한 이해에 초점을 맞추고 있다. 문제풀이과정에서 드러나는 학생들의 선개념, 개념 이해의 어려움, 개념에 대해 학생들이 생각하는 주요 예, 개념과 개념 사이의 관계에 대한 이해, 공식이나 법칙을 적용할 때 필요한 조건에 대한 이해 등이 포함된다.

학생의 어려움 (students' difficulties)

성공적인 물리 문제 해결을 위해서는 개념적(또는 명제적) 지식, 절차적 지식, 전략적 지식, 신념과 가치관 등 다양한 요소를 갖추고 있어야 한다(박윤배, 2002). 본 연구에서는 학생이 문제풀이에 실패하게 되는 원인을 학생이 갖고 있는 개념적 지식 측면에 초점을 두어 조사하였다. 학

생이 오개념을 갖고 있거나 학생이 갖고 있는 지식의 구조가 과학적 지식의 구조와 차이가 날 때, 문제풀이에 필요한 개념이나 관련된 정보를 충분히 인지하지 못하고 있을 때, 이를 학생의 어려움으로 정의하였다.

효과적 지도 방안 (suggestions for effective instruction)

오슈벨의 유의미 학습 이론에 따르면, 기존에 형성된 개념들이 인지구조를 이루고 이 인지구조는 새로운 정보가 정착할 수 있는 정착지의 역할을 하여 새로운 개념이 유의미 학습을 통하여 기존의 인지구조에 포섭된다(Ausubel, 2000). 즉, 학생의 선개념에 바탕을 둔 개념에 대한 설명 및 개념들 간의 관계에 대한 이해가 의미있는 학습을 위한 핵심이 된다. 본 연구에서는 개념적 지식에 대한 학생의 이해 조사 결과와 개념들 사이의 위계와 관계에 초점을 두어, 효과적 지도를 위한 핵심개념과 관련 개념들의 설명 순서와 각각의 개념에 대한 설명방법을 제시하고자 하였다.

열역학적 과정 (thermodynamic process)

열역학적 계가 주위환경과 에너지를 교환하면서 처음 상태에서 나중 상태로 변화하는 과정을 일컫는 용어이다. 고립계의 엔트로피 변화 여부에 따라 가역과정과 비가역과정으로 구분할 수 있으며, 에너지 전달의 특징 및 외부 조건에 따라 등온과정, 등적과정, 등압과정, 단열과정으로 구분할 수 있다.

가역과정 (reversible process)

가역과정은 역학적 상황에서의 가역과정과 열역학적 상황에서의 가역과정이 존재하나, 본 연구에서는 이 용어를 주로 열역학적 상황에서의 가역과정을 일컫는 용어로 사용하였다. 즉, 가역과정이란 열역학적 과정

이 매우 천천히 준정적으로 일어나서 매 순간 계가 열역학적 평형상태에 놓여있으며, 마찰이나 난류가 존재하지 않아 고립계의 엔트로피가 증가하지 않는 과정을 일컫는다.

이상기관 (ideal engine)

이상기관은 가역적으로 작동할 수 있는 기관으로 정의된다. 대표적인 예로는 카르노 기관이 있다. 이상기관이라는 용어는 ‘ideal engine’ 뿐만 아니라 한 순환과정 동안 열을 일로 100% 바꿀 수 있는 열역학 제2법칙에 위배되는 ‘perfect engine’이라는 용어를 번역할 때 사용되기도 하는데 (Halliday *et al.*, 1993), 현재 ‘perfect engine’이라는 용어는 주로 제2종 영구기관으로 번역된다.

다입자계 (many-particle system)

본 연구에서는 다입자계를 계가 굉장히 많은 수($\sim 10^{24}$)의 입자로 구성되어 있으며, 입자 간 상대속도가 존재하며, 상대속도가 입자 간 작용하는 힘이나 충돌에 의해 계속 바뀌는 경우로 한정한다. 예를 들면 상자 안에 300 K의 이상기체가 1 L 들어있는 경우는 다입자계에 속한다. 하지만 역학에서 말하는 강체는 많은 수의 입자로 구성되어 있으나 입자 사이의 상대속도가 0이므로 다입자계에 속하지 않는다.

구속조건 (constraint conditions)

본 연구에서 사용하는 구속조건의 의미는 특정한 수식을 문제 상황에 적용할 때, 수식을 사용하기 위해 만족되어야 할 외부조건을 의미한다. 예를 들어 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’의 구속조건은 ‘이상기체로 이루어진 계가 가역적으로 단열팽창을 하거나 단열수축을 하는 경우’로 주어진다.

1.5. 연구의 한계

학생의 물리 개념 형성 및 문제해결의 성공 여부는 다양한 요소들, 예를 들면 개념적 지식뿐만 아니라 절차적, 맥락적 지식 및 학생의 신념과 교수환경 등이 복합적으로 관여한다(박윤배, 2002). 하지만 본 연구는 다양한 요소 중 개념적 지식 측면에 초점을 두어 학생의 이해를 살펴보았다.

본 연구에서 찾아낸 개념적 어려움들이 학생들이 열역학 제2법칙을 학습하는 데 있어서 겪는 모든 어려움을 나타내지는 않는다. 본 연구에서 제시한 문제들은 주로 열역학에서의 가역과정과 관련된 문제들이었다. 또한 학생의 문제풀이는 상황의존적이어서(홍미영, 박윤배, 1995; Song & Black, 1991) 문제상황에 따라 문제 풀이가 달라질 가능성이 크며 새로운 어려움이 나타날 가능성도 있기 때문에 다양한 상황을 기반으로 자료를 조사할 필요가 있다.

본 연구에 참여한 학생은 서울 소재 1개 대학교의 열 및 통계물리학 강좌를 수강한 학생들과 서울 소재 1개 과학고등학교의 일반물리학 수준의 열역학 수업을 들은 고등학생들이다. 특정 학교에 다니는 학생들을 대상으로 한 연구이기 때문에 본 연구에 참여한 학생들은 열역학 제2법칙에 대해 들은 강의내용과 학습을 위해 참고한 교과서가 거의 유사할 것이다. 따라서 다른 집단을 대상으로 학생의 이해를 조사하면 본 연구에서 제시한 결과와 그 결과가 일치하지 않을 수도 있다. 연구 결과를 일반화하기 위해서는 보다 다양한 학생들을 대상으로 조사할 필요가 있다.

2. 선행연구와 이론적 논의

2.1. 관련 물리 개념

2.1.1. 거시 세계와 미시 세계

열역학이란 부피, 압력, 온도와 같이 측정가능한 물리량으로 계의 상태를 기술하고, 열과 일이라는 열적, 역학적 상호작용을 이용해 계의 상태가 어떻게 변하는지를 살펴보는 학문이다. 이를 미시적으로 들여다보면 원자 하나하나의 위치와 운동을 고려하여 10^{24} 개 정도의 입자들의 상호작용을 살펴보아야 한다. 하지만 실제로 이렇게 많은 수의 입자 하나하나의 운동을 살펴보는 것은 불가능하기 때문에 통계적 방법을 사용해야 하는데, 이것이 통계역학의 시초이다.

계의 최종상태를 예측하기 위해서는 다음과 같은 기본 개념을 알아야 한다. 동전을 던질 때 동전 하나가 앞면이 나올지 뒷면이 나올지는 알 수가 없으나, 수많은 동전을 던졌을 때 동전의 앞면이 나올 확률을 이야기할 수 있는 것처럼 미시세계는 개별 입자에 대한 정보는 알 수 없는 확률적 세계임을 인지해야 하며, 하나의 거시상태(거시적 세계에서 측정으로 결정되는 상태)를 표현하는 수많은 미시상태가 존재한다.

계가 갖는 미시상태의 수가 바로 계의 엔트로피이다. 고립계의 경우, 각각의 미시 상태에 대한 확률은 모두 동등하다는 선형확률동등의 원리 (the equal a priori probability postulate)가 기본 가정이 되어, $S = k \ln \Omega$ (k 는 볼츠만 상수, Ω 는 하나의 거시 상태에 해당하는 미시상태 수, multiplicity)로 엔트로피가 표현된다. 즉, 사건이 일어날 확률이 커지는 방향으로 계

의 상태가 변화하며, 이를 이용하면 사건의 비가역성을 쉽게 설명할 수 있다.

2.1.2. 열역학 제2법칙

열역학 제2법칙은 자연에서 일어나는 사건의 방향성을 결정하기 위한 법칙으로서, 다양한 표현이 존재하나 가장 중요한 표현은 클라우지우스의 서술과 켈빈-플랑크 서술이다.

- 클라우지우스(Clausius) 서술

열이 외부에서의 에너지 유입 없이 저온의 물체에서 고온의 물체로 이동할 수 없다는 것으로서, 외부로부터 전혀 일을 받지 않고 저온에서 고온으로 열이 이동하는 이상적인 냉동기관이 불가능함을 설명할 때 주로 사용된다.

- 켈빈-플랑크(Kelvin-Planck) 서술

열원에서 열을 뽑아내어 100% 일로 전환시키는 것은 불가능함을 의미하며, 따라서 100%의 열효율을 갖는 열기관이 불가능함을 설명할 때 주로 사용된다.

한편, 위의 두 서술로부터 ‘동일한 두 열원 사이에서 작동하는 모든 비가역 열기관은 카르노 기관보다 효율이 낮으며, 가역기관일 경우에는 카르노 기관과 효율이 같다.’는 카르노 원리를 이끌어낼 수 있다. 여기에서 카르노 기관이란 등온과정과 단열과정으로 구성된 가역기관으로서, 카르노 기관의 효율은 고온의 열원의 온도가 T_H , 저온의 열원의 온도가

T_L 일 때, $\varepsilon = W/Q_H = (T_H - T_L)/T_H$ 로 주어진다.

또한 카르노 기관을 이용하면, 클라우지우스 서술과 켈빈-플랑크 서술이 동등함을 증명할 수 있다.

열원에서 뽑아낸 열을 100% 일로 바꿀 수 있는 열기관이 있다면 이 열기관을 거꾸로 작동하는 카르노 기관과 연결시키면 그림 2.1과 같이 외부로부터의 도움 없이 저온에서 고온으로 열을 이동시킬 수 있는 열기관을 만들 수 있다. 즉, 열원에서 뽑아낸 열을 100% 일로 바꿀 수 있는 열기관을 만들 수 없다는 표현(켈빈-플랑크 서술)은 외부로부터의 도움 없이 저온에서 고온으로 열을 이동시킬 수 있는 열기관을 만들 수 없다는 표현(클라우지우스의 서술)과 동등하다.

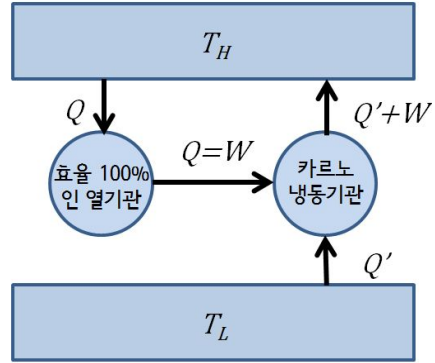


그림 2.1 클라우지우스 서술과 켈빈-플랑크 서술의 동등성

한편, 미시적이고 통계적인 측면에서 열역학 제2법칙은 ‘상호작용하는 두 거시계가 평형상태에 있을 때 여러 가지 계 변수의 값들은 결합계에 허용된 상태수가 최대값을 갖도록 하는 값을 취한다.’로 기술할 수 있다.

열역학 제2법칙에 대한 위의 모든 표현은 ‘고립계에서 엔트로피는 감소하지 않는다.’라는 표현으로 대체할 수 있으며, 이러한 이유로 엔트로피 개념은 열역학 제2법칙의 핵심 개념이라고 할 수 있다.

2.1.3. 가역과정과 비가역과정

과정의 비가역성은 열역학 제2법칙의 핵심 개념이라고 할 수 있다. 열역학에서 가역과정은 총 엔트로피의 증가 없이 사건이 일어남을 뜻하며

($\Delta S_{total} = 0$), 이를 위해서는 거시적 관점에서 계를 관찰했을 때, 계의 어떤 변수가 미소하게 변하여 계가 매 순간 평형상태에 놓인 것으로 간주할 수 있고(준정적 과정, quasi-static process), 마찰이나 난류 등 비보존력이 존재하지 않아야 하며, 온도 차가 나는 두 물체의 직접적 접촉이 없어야 한다. 미시적 관점에서는 고립계가 갖는 미시상태 수가 일정하게 유지되어야 한다.

한편, 비가역과정은 사건이 일어나면서 고립계의 총 엔트로피가 증가하는, 즉, 거시적 관점에서는 온도 차가 나는 두 물체가 직접 접촉하거나 물체에 큰 압력이 가해져 매 순간을 평형상태로 간주할 수 없는 경우를 일컬으며, 이 과정 동안에 거시적 관점에서 계의 상태를 나타내는 변수들, 즉 온도, 부피, 압력 등을 살펴보면 그 값이 잘 정의되지 않는다. 또한 비가역과정을 거친, 최종적으로 새로운 평형상태에 도달한 고립계는 이전에 비해 가능한 미시상태 수가 증가한다. 사실 거시세계에서 관찰되는 모든 자연현상은 엄밀하게 말해 비가역적이라고 말할 수 있다.

‘거꾸로 되돌릴 수 있는’의 의미인 가역과정에 대한 아이디어는 카르노에서 출발한다. 카르노는 1824년 ‘불의 동력 및 그 힘의 발생에 적당한 기계에 관한 고찰(*Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu*)’에서 열에너지를 역학적 에너지로 전환시키는 것에 대하여 고민하였다. 19 C 전반은 산업혁명과 증기기관에 대한 관심이 증대되었음에도 불구하고 증기기관에 대한 보편적인 이론이 부족하며, 따라서 증기기관을 포함하는 모든 열기관에 적용되는 이론을 세울 필요가 있음을 언급하면서 열을 일로 변환시키는 열기관은 그 효율에 있어서 한계가 있는지를 살펴보았다. 열이 고온에서 저온으로 이동하면서 일을 얻을 수 있는데, 카르노는 만약 두 열원 사이에서 열기관이 가역적으로 작동할 수 있다면 이 기관은 최고효율을 갖는 열기관임을 증명하였다. 그리고 이 때, 계가 부피팽창이나 화

학반응을 하지 않으면서 다른 온도 차가 나는 계와 직접 접촉하게 되면 이 때는 일의 손실이 있다고 주장하였다.

매번 고온에서 저온으로 열소가 이동하여 평형상태에 도달하는 것(re-establishment of equilibrium in the caloric)은 일을 생성하는 원인이 된다. 그런데 만약 이러한 과정이 일의 생성 없이 일어난다면, 이는 실질적인 손실로 간주할 수 있다. 만약 고온과 저온 사이에서 작동하는 물체들이 부피의 변화 없이 온도만 변한다면 이는 쓸모가 없는 열소의 이동으로 간주할 수 있다. (중략) 부피 변화가 온도 변화의 원인이 되지 않는 경우로는, 온도 차가 나는 물체들 간의 직접적 접촉의 경우를 생각할 수 있다. 따라서 이러한 접촉은 가능한 한 피해야 한다. (중략) 한 물체에서 다른 물체로 열소를 이동시키기 위해서는 처음에는 한쪽의 온도가 약간 더 높아야 하지만, 그 차이는 가능한 한 매우 작아야 한다(Carnot, 1988, p. 13).

여기에서 설명하는 조건이 바로 열이 가역적으로 이동하기 위한 조건이며, 이러한 생각으로부터 카르노는 온도 차가 나는 두 물체가 직접 접촉하지 않는, 가역적으로 작동하는, 등온과정과 단열과정으로 구성된 이상적인 카르노 기관을 구성할 수 있었다(Carnot, 1988).

한편, 클라우지우스는 열의 이동과 관련하여 자연에는 두 가지 경향이 있는데, 열이 고온에서 저온으로 전달되는 경향성을 지칭하는 에너지 전달로서의 변환(transmission transformation)과 일이 열로 전환되려는 경향성을 지칭하는 에너지 전환으로서의 변환(conversion transformation)의 정도가 동일할 때에 열기관이 가역적으로 움직일 수 있을 것으로 판단하였다. 예를 들어 열기관은 고온에서 저온으로 열이 이동하면서 열이 일로 전환되는 기관인데, 이 때 열이 일로 최대로 전환될 수 있는 경우가 카르노

기관이며 이 기관은 가역적으로 작동한다(Clausius, 1867).

자연현상에 대한 가역성 여부에 대한 논의는 1872년 볼츠만의 H이론에 대한 로슈미트, 체르멜로 등의 반박에 의해 더욱 본격화되었다. 주요 논의는 H이론은 뉴턴역학을 따르는 가역성을 띠는 입자들의 운동에 의해 결정되는 입자의 분포에 대한 수식임에도 불구하고 그 결과가 거시적인 비가역성을 예측하고 있는 이유에 대한 것이었다.

맥스웰은 평형상태에 있는 계의 개별 분자들이 나타내는 속도분포를 딱딱한 구의 강제역학으로부터 유도하였으며, 평형상태에 있는 계에서 속력이 v 와 $v + dv$ 사이에 있는 분자의 수는

$$f(v)d^3v = Ce^{-av^2} 4\pi v^2 dv$$

로 주어진다고 주장하였다(맥스웰 분포). 볼츠만은 이 분포가 평형상태에 있는 모든 분자 배열에 대해 적용되는 분포임을 증명하고자 하였다. 기체분자로 이루어진 계의 상태가 변하는 것을 분자들 사이의 충돌이라는 역학적 관점으로 취급하였으며, 계가 맥스웰 분포를 따르는 경우 그 분포는 시간이 지나더라도 더 이상 변하지 않음을 증명하였다. 여기에서 볼츠만은 H 라는 물리량을 정의했으며, 이 값은 시간이 지남에 따라 $dH/dt \leq 0$ 이 성립함을 보였다. 이는 오늘날의 엔트로피와 연결되는 식이다. 이러한 증명을 통해 볼츠만은 입자들 각각에 뉴턴의 역학 법칙을 적용해도 그 입자들이 모이면 계가 비가역성을 띌 수 있으며, 따라서 고전역학을 이용하여 열역학 제2법칙을 유도할 수 있다고 주장하였다 (Brush, 1975).

이러한 설명은 톰슨과 로슈미트에 의해 반박되었다. 뉴턴역학의 근간이 되는 뉴턴방정식 $m \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{\partial V}{\partial x}$ 은 시간 t 를 $-t$ 로 바꾸어도 성립하는데 (예: 포물선 운동, 두 입자의 탄성충돌, 단진동 등), 볼츠만이 유도한 H정리는 ‘충돌’과 분자간의 ‘힘’이라는 뉴턴역학을 기반으로 하고 있음에도

불구하고 시간의 방향을 바꾸었을 때 성립하지 않기 때문이다. 이러한 반론 때문에 볼츠만은 열역학 제2법칙에 대한 역학적 증명은 가능하지 않음을 인정하였으며, 열역학 제2법칙을 확률이론으로 설명해야 한다고 주장하게 되었다. 즉, 평형상태란 가장 사건이 일어날 확률이 높은 상태라는 것이다.

한편 20년이 지난 후, 체르멜로는 푸앵카레의 회기이론에 의거하여 볼츠만의 H정리에 대해 또 다른 반론을 제기하였다. 푸앵카레는 ‘질점으로 이루어진 계에서 일반적으로 (입자들의 위치와 속도로 규정되는) 계의 운동상태는 충분히 긴 시간이 지나면 언젠가는 원래의 운동상태로 정확히는 아니더라도 최대한 처음상태에 가까이 되돌아온다.’는 명제를 증명하였다. 즉, 비평형상태에 있는 어떤 계는 충분한 시간이 지나면 결국 비평형상태의 근처로 되돌아온다는 것으로서 볼츠만의 H정리는 푸앵카레의 회기정리와 모순된다. 이에 대해 볼츠만은 여기에서 말하는 ‘충분히 긴 시간’은 우주의 역사와 맞먹는 엄청난 긴 시간으로서, 대단히 많은 수의 매우 작은 분자들이 개입해 있는 운동에서는 확률이 더 작은 상태에서 확률이 더 큰 상태로의 전이가 항상 존재하며, 따라서 열역학 제2법칙은 확률법칙임을 다시 한번 강조하였다(김재영, 2004; Daub, 1969).

열역학과 역학의 차이점이 있다고 한다면 상호작용하는 입자의 수일 것이다. 역학은 서로 상호작용하는 입자의 수가 매우 제한적인 데 반하여 열역학은 굉장히 많은 수($\sim 10^{24}$)의 입자가 서로 상호작용을 한다. 역학적 관점에서 계의 상태를 기술하는 방법은 입자의 위치와 운동량에 대한 정보를 파악한 후에 이를 뉴턴역학에서의 운동방정식에 대입하는 것인데, 입자의 위치나 운동량에 대한 정보를 정확하게 아는 것은 실질적으로 불가능하며, 따라서 입자 하나하나를 추적하여 물체의 운동을 기술할 수 없다. 이러한 이유로 비가역성의 근본 원인을 정보의 불충분함으

로 보기도 한다(Hobson, 1966; Lebowitz, 1993; Swendsen, 2008).

미시적으로 입자의 운동을 하나하나 관찰할 수 있다고 하자. 그래서 특정 시각에 입자들의 위치와 속력을 전부 기록하였다고 가정해보자. 그리고 정확히 동시에 모든 입자들을 위치는 동일하고 방향은 반대방향으로 속력을 갖게 만든다면, 입자들은 뉴턴의 운동법칙에 따라 완벽하게 처음 상태로 되돌아가야 한다. 즉, 가역적이어야 한다.

여기에서 문제가 되는 것은 입자들의 위치와 운동량을 정확하게 알 수 있는가 하는 점이다. 측정의 관점에서 살펴보면, 어떤 입자가 갖는 속력을 아무리 잘 측정해도 100%의 정확도로 측정하는 것은 불가능하다. 즉, 입자 각각의 상태에 대한 정보가 부족하기 때문에 뉴턴의 운동법칙을 사용하여 입자들을 처음상태로 되돌리는 것은 불가능하다. 특히 상호작용하는 입자의 수가 굉장히 많으면, 각각의 입자에 대한 위치와 운동량에 대한 모든 정보를 얻는 것은 사실상 불가능하며, 작은 초기 속력의 차이에 의해 나중의 분자 각각의 속력과 배치는 확연히 달라짐을 알 수 있다. 이는 높은 곳에서 동일한 주사위를 최대한 같은 속도로 같은 위치에서 던져도 그 결과가 항상 다르게 나오는 것과 유사하다. 즉, 비가역성은 어떤 입자의 정확한 위치와 정확한 속도를 측정할 수 없다는 것, 다시 말하면 어떤 입자의 정확한 궤적을 그릴 수 없다는 것 때문에 나타난다고 볼 수 있으며, 특히 서로 충돌하는 입자 수가 굉장히 많을 때에 그 효과가 극명하게 나타난다고 할 수 있다. 따라서 많은 수의 입자들이 서로 충돌하는 상황에서의 입자들의 운동은 통계적으로 다루어야만 하고, 이에 따라 계는 존재할 확률이 가장 높은 상태로 진행되는 것으로부터 비가역성의 근원을 설명할 수 있다.

2.1.4. 엔트로피

엔트로피는 클라우지우스, 볼츠만, 깁스 등에 의해 정의된 개념으로서 전통적으로 물리학과 화학에서 사용된 용어이다. 열역학 제2법칙에서는 ‘자연현상은 항상 고립계의 엔트로피가 증가하는 방향으로 일어난다.’고 서술하고 있으며, 이 때의 엔트로피에 대한 일반물리학 및 일반화학 교재에 등장하는 설명의 예는 다음과 같다.

- 계가 자발적으로 변화할 수 있는 경향의 척도
- 계의 무질서한(disorder)/무작위성(randomness) 정도
- 특정한 온도에서 에너지의 분산 정도
- 비가역적 효과에 의해 발생하는, 계가 할 수 있는 일의 손실 정도
- 일로 전환될 수 없는 에너지 또는 열의 정도
- 하나의 계가 가질 수 있는 가능한 미시적 배열 방법의 수
- 하나의 계가 가질 수 있는 가능한 미시 상태의 수

일반물리학 수준의 열역학에서 엔트로피는 수학적으로는 크게 두 가지 ($dS \geq dQ/T$, $S = k \ln \Omega$)로 표현되며, 고전적이고 거시적 관점을 설명할 때에는 정성적으로 ‘에너지 분포의 평형화 정도’, ‘계가 할 수 있는 최대 가능한 일’로 해석하기도 한다. 또한 정보이론에서는 엔트로피를 ‘정보의 부족 정도($S = -k \sum_i p_i \log p_i$)’로 표현한다.

(1) 고전적이고 거시적 관점의 엔트로피: $dS \geq dQ/T$

앞에서 언급한 바와 같이 클라우지우스는 1854년 논문에서 열역학 제2법칙과 관련하여 자연에는 열이 고온에서 저온으로 전달되는 경향성을

지칭하는 에너지 전달로서의 변환과 일이 열로 전환되려는 경향성을 지칭하는 에너지 전환으로서의 변환이 있다고 기술하였다.

클라우지우스는 이러한 변환에는 자연스러운 방향이 있으며 두 가지 변환 값을 동등하게 취급할 수 있는 특정한 물리량(equivalence value of transformations)이 있을 것으로 추정하였는데, 1865년에 이를 엔트로피로 명명하였다. 엔트로피는 자연의 두 가지 변환에 대한 자발성의 척도로서, 가역적으로 순환하는 카르노 기관을 이용하여 두 변환 값을 동등하게 취급할 수 있는 함수를 열원과 계의 온도 및 이들 사이에서 교환되는 열량을 변수로 하여 수학적으로 유도하면 열기관이 가역적으로 작동할 때 $\oint dQ/T = 0$ 을 얻을 수 있으며, 이로부터 준정적 과정에서 계가 δQ 만큼의 미소량을 흡수할 때 계의 엔트로피 변화량을 $dS = \delta Q/T$ 로 정의하였다(Clausius, 1867). 이 식은 열역학 관련 문제를 풀 때 유용하나, 엔트로피를 정의하는 식이 아닌 온도를 정의하는 식이라는 주장이 있다(Lee, 2001).

(2) 미시적이고 통계적인 관점의 엔트로피: $S = k \ln\Omega$

거시적인 열역학 상태에 대응되는 미시적 상태 수는 굉장히 많으며 미시적으로 살펴보면 입자의 배치나 모습은 가능성(확률)이 큰 방향으로 사건이 진행되는 데 이 때 엔트로피는 열이나 일의 출입이 없는 상황(작은바른틀 모듬: Microcanonical ensemble)에서 $S = k \ln\Omega$ 로 정의된다. 여기에서 Ω 는 미시상태 수로서, 거시 계의 에너지, 부피, 입자 수 등과 관련된다. 무질서도(disorder), 무작위도(randomness) 등의 표현은 볼츠만의 정의로부터 유래된 것들로서, 자연의 방향성을 확률을 이용해 설명하는 이 식에 대한 비유적 표현이다. 거시적으로 계의 부피, 온도, 입자 수가 증가하면 미시적으로는 계가 가질 수 있는 가능한 미시상태 수가 증가하여

경우의 수가 많아진다. 계의 부피가 증가하면 입자가 위치할 수 있는 공간의 수가 늘어나며, 계의 온도가 증가하면 입자들이 위치할 수 있는 에너지 준위의 수가 많아진다. 또한 입자 수가 1개일 때 보다는 많을 때, 하나의 거시상태를 결정하는 미시상태의 수가 훨씬 다양해질 수 있다. 고립계에서 미시상태의 수가 많아지면 사건이 일어날 확률이 커지게 된다.

한편, 깁스는 볼츠만의 엔트로피를 주어진 계가 주위환경과 열적으로 에너지 교환을 하여 온도가 항상 T 로 일정하게 유지되는 경우(바른틀 모드: canonical ensemble)로 확장시켰는데, 이 경우에 엔트로피를 계산하면 $S = -k \sum_i p_i \log p_i$ 로 주어지며 이는 $S = k \ln \Omega$ 과 동등한 표현이다(Pathria, 1996, pp. 54-55).

(3) 정보이론에서의 엔트로피: $S = -k \sum_i p_i \log p_i$

엔트로피가 정보의 부족과 연결되어 있음은 여러 사람들에 의해 논의되었다(Shannon & Weaver, 1948; Szilard, 1964). 새논이 제안한 정보란 그 정보가 지닌 내용의 발생가능성을 양적으로 기술하고자 하는 것으로서, 바른틀 모드에서의 엔트로피와 동일한 형태로 표현되며 아래와 같은 예로 이해할 수 있다.

정보에 대해 구체적으로 살펴볼까요? 모두 W 가지의 사건이 일어날 수 있는 상황에서 사건 r 의 확률을 p_r 이라 하면($r = 1, 2, \dots, W$), 정보는

$$I = \sum_{r=1}^W p_r \log p_r + I_0$$

로 정의합니다. ... (중략) ... 여러분이 선다형 문제로 시험을 치른다고 합시다. 다섯 개의 보기 중 하나를 선택할 때 공부를 전혀 하지 않아서 아무것도 모르면 확률이 모두 5분의 1이지요. 이 경우에 정보가 가장 적어

서, $I_0 \equiv \log 5$ 라 놓으면 정보는 $I = 0$ 입니다. 그런데 여러분이 어느 정도 공부했기 때문에 답이 3번하고 4번 중에 하나라는 것을 안다고 합시다. 그러면 확률이 각각 1/2이기 때문에 완벽하지는 않지만 정보가 조금 있는 겁니다. 정의 식에 넣어 계산하면 정보가 $I = \log_2 \frac{5}{2}$ 임을 알 수 있습니다.

... (중략) ... 엔트로피란 정보가 얼마나 모자라는지 나타내는 지표입니다. 서로 부호가 반대라고 할 수 있고, 따라서 정보를 네겐트로피라고 부르지요. 식으로는

$$S = -I + I_0 = -\sum_{r=1}^W p_r \log p_r$$

로 쓸 수 있습니다(최무영, 2008, pp. 350-351).

즉, 여기에서 말하는 엔트로피는 제시된 상황이나 문장에 대한 정보가 참일 가능성이 적을수록 그 값이 크기 때문에 정보의 부족과 연결된다고 말하는 것이며, 오늘날에는 이러한 개념을 확장하여 생태계, 언어, 기후, 웹 체계 분석 등 다양한 분야에 적용하고 있다.

(4) 엔트로피에 대한 정성적 설명들

우선 엔트로피를 ‘계가 할 수 있는 최대 가능한 일’로 보는 관점이 있다. 열이 고온에서 저온으로 이동할 때에 일을 얻을 수 있으며 그 때의 일은 효율에 한계가 있다는 것이다. 이는 열역학 제2법칙에 대한 켈빈-플랑크의 서술과 관련된다. 일반적으로 계의 엔트로피가 낮을수록 계의 에너지는 다양한 형태로 변환이 가능하며 특히 역학적 일로 변환될 수 있는 능력이 높아지는데, 이에 초점을 맞추어 몇몇 문헌에서는 엔트로피를 계가 할 수 있는 최대 가능한 일의 정도로 정의하고 있다(Leff & Jones, 1975; Marcella, 1992).

특정한 계가 일을 할 수 있는 상태는 맞닿아 있는 두 계, 즉 전체 계가 평형을 이루지 않은 경우일 때이다. 예를 들어 외부환경이 계보다 온도가 높은 경우, 계는 외부환경으로부터 에너지를 흡수하면서 일을 할 수가 있다. 하지만 열의 이동이 멈추면 더 이상의 일은 가능하지 않다. 주어진 계가 외부환경과 가역적으로 상호작용을 하는 경우에는, 그 계는 계가 할 수 있는 가능한 최대의 일을 하게 된다. 이는 공학에서 주로 사용되는 ‘어떤 주어진 상태의 에너지원이 환경상태와 열역학적 평형상태에 도달할 때까지 최대한 얻을 수 있는 일’ 또는 역학적 에너지가 거의 완벽하게 전기에너지로 전환되는 것처럼 ‘다른 에너지 형태로 제한 없이 전환될 수 있는 에너지 몫’으로 정의되는 엑서지(exergy)라는 개념에 더 가깝다(Dincer & Cengel, 2001). 만약 사건이 비가역적으로 진행된다면 계가 할 수 있는 가능한 일의 양은 줄어들고 계와 주위환경을 포함한 전체 엔트로피는 증가하게 된다. 계가 일을 할 수 없다면 그 계가 갖고 있는 에너지는 쓸모 없는 형태로 여겨지며, 따라서 엔트로피 증가는 ‘에너지의 질적 저하 정도’로 표현되기도 한다. 이 설명에 기반하여 엔트로피를 설명할 경우, 엔트로피를 마치 에너지의 일종으로 생각하여 온도 부분을 무시해버리는 오류를 범할 수 있다.

한편, 엔트로피를 에너지 분포의 평형화 정도로 보는 관점도 있다. 이 설명은 자연현상의 방향성을 에너지의 분포로 설명하고자 하는 시도로서, 열은 고온에서 저온으로 이동하려는 경향이 있다는 클라우지우스의 열역학 제2법칙에 대한 서술과 관련된다. Leff(1996)와 Rodewald(1990)는 거시계에서 에너지는 항상 퍼져나가며 미시적으로는 양자역학적인 에너지 준위에 입자들이 최대한 골고루 분포하여 에너지가 균등하게 분배되려는 성향이 있는데 이를 나타내는 척도가 바로 엔트로피라고 설명하였다. 예를 들어 찬물과 더운물이 섞이는 경우, 물을 구성하는 분자들이 서로 충

돌하면서 에너지가 가능한 많이 교환되려고 한다. 이 때 에너지는 거시적으로 고온에서 저온으로 퍼져나가며, 미시적으로는 양쪽 에너지 준위를 통틀어 균등하게 분배되려고 하는데 이러한 성향이 최대에 도달할 때가 바로 평형상태다.

Lambert(2002)는 Leff(1996)의 논문을 바탕으로 클라우지우스의 엔트로피는 ‘엔트로피 변화란 절대온도에서 에너지가 얼마나 퍼져 나가는가’로 해석할 수 있다고 주장하였다. 역사적으로 클라우지우스도 에너지의 흠어짐 정도 등의 의미로 엔트로피를 사용하였다. 열이 고온에서 저온으로 직접 이동하거나, 마찰에 의해 역학적 에너지가 열에너지로 바뀌는 것 등이 에너지가 흠어지는 예이다.

(5) 엔트로피 개념의 다양한 활용

한편 엔트로피 개념은 물리학뿐만 아니라 다른 여러 학문과 대중매체에서 다양하게 사용되고 있다. 우선 대중매체에 자주 등장하는 엔트로피와 관련된 서술들을 살펴보면 다음과 같다. 고립계에서의 엔트로피는 절대 줄어 들 수 없다는 관점으로부터 ‘엔트로피 증가는 시간의 화살이다.’, ‘나이를 먹는다는 것은 우리 몸의 엔트로피가 증가한다는 것이다.’와 같은 서술들이 있으며, 고립계가 평형상태에 도달한 상태가 엔트로피가 최대라는 관점으로부터, ‘우주는 결국 열죽음(heat-death)에 도달할 것이다.’라는 서술이 있다. 한편 ‘생명현상은 시간이 지나도 엔트로피가 증가하지 않는 특이한 현상이다.’라는 서술도 빈번히 접할 수 있는데 슈뢰딩거는 책 ‘생명이란 무엇인가’에서 생명이란 외부로부터 에너지를 끊임없이 받아들이므로 생명현상 자체가 열역학 제2법칙을 위배하는 것은 아니라고 주장하였으며(Schrödinger, 1956), 이것이 오늘날 정설로 받아들여지고 있다. 또한 고립계의 엔트로피가 증가할수록 유용한 에너지가 점차 줄어

든다는 관점으로부터 엔트로피를 환경오염 정도, 또는 자원 고갈 정도로 서술하는 경우가 있으며, 엔트로피는 무질서한 정도라는 관점으로부터, ‘집안 청소를 하지 않으면 집안이 점차 난잡해진다’, ‘엔트로피란 우리 사회의 갈등 등의 부작용을 의미하며, 따라서 아무런 노력 없이 가만히 두면 사회시스템은 결국 붕괴될 것이다.’와 같은 서술도 사용되고 있다.

한편, 프리고진의 비평형 열역학에 따르면, 외부로부터 계에 에너지가 지속적으로 유입되는 상황에서는 열역학 제2법칙을 위배하지 않으면서도 미시적인 요동의 효과로 인해 새로운 패턴이나 질서가 생겨날 수 있다. 프리고진은 이러한 과정을 ‘자기 조직화’ 과정으로 명명하였다(Prigogine & Stengers, 1984). 생태경제학에서는 엔트로피를 지구상에서 사용가능한 에너지원의 정도와 연결시키고, 지구가 외부와 교환하는 에너지량(예: 태양에너지)을 고려하여 지속가능한 개발을 위해 경제가 발전하면서도 생태계가 보존될 수 있는 방안에 대해 모색하기도 한다(Swaney, 1985; Yuri M, 2000). 여기에서 엔트로피는 사용가능한(또는 유용한) 에너지량으로 정의되며, 열역학 제2법칙을 지구 환경에 확장하여 적용한 것으로 생각할 수 있다. 사회, 경제 시스템에 엔트로피 개념을 적용한 사례들은 열역학과 사회시스템의 유사성에 그 기반을 두고 있다. 열역학이 수많은 분자($\sim 10^{24}$ 개)가 있는 시스템의 변화를 다룬다면, 사회학 또는 경제학은 수많은 사람(적게는 100여명에서 많게는 수십 억 명까지)이 속해있는 조직의 특성 및 변화를 다룬다. 시스템의 노동력이나 협동심, 기술력 등을 비유를 이용하여 에너지, 엔트로피 등의 물리 개념에 대응시킨 후, 물리법칙 및 통계기법을 사용하여 미래의 시스템에 대해 예측하는 경우들이 있다(최동식, 2000; Ball, 2008; Saslow, 1999).

이처럼 열역학 제2법칙을 일상 및 다양한 학문에 적용시키는 것은 현상을 새로운 시각으로 바라보고 해석하는 토대가 된다. 시간의 기원을

열역학 제2법칙과 연결시켜보고, 열역학 법칙을 이용하여 우리 사회를 지속시키기 위한 방안을 고민하며, 정보이론이라는 새로운 분야가 창안되었다. 열역학 제2법칙의 다양한 적용에 대해 살펴보는 것은 서로 다른 두 영역을 연결하는 과정에서 창의적인 아이디어가 발현됨을 보여주는 예로 볼 수 있다. 한편 이 예들은 일반인들의 과학개념에 대한 올바른 이해가 중요하다는 것을 보여준다. 여러 사람들이 엔트로피라는 개념을 이용하여 다양한 주장을 하지만, 논리적 오류가 있는 경우가 있다. 예를 들어 리프킨(Rifkin, 1980)의 자연으로 돌아가자는 주장은 열린계인 지구를 고립계로 생각하는 오류를 범하였다. 우주가 열죽음에 도달할 것이라는 생각 또한 현재 우주가 팽창하고 있음을 간과하였다. 무질서한 배치(또는 잘 정렬된 배치)를 단순히 엔트로피가 높다(또는 낮다)고 해석하는 것 또한 상황에 따라 오류일 가능성이 있다. 이처럼 해석에 있어서 논리적 오류가 있는 경우 올바른 결론을 도출할 수 없다.

2.2. 학생의 물리개념 조사

2.2.1. 학생의 물리개념 조사 방법

물리교육에서 꾸준히 화두가 되는 주제는 ‘물리학 학습에서 학생들은 어떤 어려움을 느끼며 이를 어떻게 해소할 수 있는가?’이다. 이 주제는 오늘날 이공계 기피현상 및 고등학생의 물리 선택 감소 현상 등을 설명하는 데 있어서 핵심이 되며, 우리나라뿐만 아니라 전세계적으로 대두되는 문제이다. 학생의 어려움은 물리학 자체의 어려움, 학교 외적인 요인, 학교 내적인 요인, 수업 요인, 개인 요인 등 그 요인이 단순하지 않고 다양한 것으로 보고되었다(김희경, 이봉우, 2006; 이경호, 2007; 이승희, 2006; Woolnough, 1994). 이 중 ‘~에 대한 학생의 어려움(Students difficulties with

~)’ 또는 ‘~에 대한 학생의 이해(Students understanding of~)’라는 제목으로 쓰여진 다수의 물리교육 논문들은 학생들이 특정 개념을 학습할 때 겪는 인지적 어려움을 다루고 있다. 즉, 과학개념과는 다른 선개념이 학생의 어려움으로 작용할 수도 있으며, 물리 개념의 추상성, 수학적 기술, 추론 과정의 비정교성 등이 인지적 어려움의 원인이 될 수 있다.

학생들이 물리학이 어렵다고 생각하는 주된 이유 중 하나는 학생들이 가지고 있는 개념이 과학적 개념과 상당히 다르기 때문일 것이다. 1960년대에 오슈벨이 학생의 선개념이 학습에 끼치는 영향에 대해 지적인 이후, 물리교육 영역에서는 다양한 물리 개념에 대한 학생의 선개념(preconceptions) 또는 오개념(misconception)을 조사하는 일이 방대하게 이루어졌다. 학생은 감각적으로 경험한 것이나 대중 매체, 일상적인 언어 생활 및 대화를 통해 개념을 생성하며 이러한 정보를 기초로 하여 교사나 교과서의 설명을 해석한다. 또는 학생이 직관적으로 갖고 있는 개념들은 과학사에서 나타난 예전의 개념과 비슷한 경우도 많다. 이 때 학생이 갖고 있는 개념이 과학적 개념과 다르다고 해도, 기존의 자기 생각이 현상과 사물을 설명하는 데 매우 성공적이거나 새로운 생각의 필요성을 깨닫지 못할 때 학생들은 개념 변화를 강하게 거부하는 것으로 알려져 있다. 학생의 선개념은 견고하고, 경험에 기원하면서 직관적이면서도 여러가지 요소가 복잡하게 얽혀있고, 상황에 의존하지만, 상황이 변함에도 불구하고 동일하게 유지되는 부분도 상당히 많다는 것이 기존에 연구된 학생의 선개념에 대한 특징이다(Driver, 1981, 1989).

물리 선개념 조사 방법에는 단어 연상 검사, 정의와 특징을 쓰게 하는 방법, 개념도, 특정 개념이나 상황에 대해 연구자가 질문을 하면서 면담을 하는 방법, 두 단계 설명식 문항, 선택 후 설명식 문항, 두 단계 선택형 문항 등이 있다(박종원, 2001; Osborne & Gilbert, 1980). 단어 연상 검

사나 정의와 특징을 쓰게 하는 방법은 개념과 관련하여 학생들이 표현하는 떠오르는 생각들을 수집하는 것으로서, 구체적인 사례가 제시되지 않기 때문에 학생들이 사용하는 언어가 다소 추상적일 수는 있으나 학생들의 생각의 경향성을 파악하는데 유용하다. 보다 구체적인 선개념 조사를 위해서는 면담이 필요하다. 개념도는 주요 개념들을 제시해 주고 개념들의 위계적으로 나열한 다음 개념들을 연결하여 하나의 지도를 완성하게 하는 것으로서, 학생이 생각하는 개념들의 위계나 연결에 대한 조사를 할 때 많이 사용된다. 대규모 조사를 위해서는 문항을 고안하는 것이 필요한데, 문제 상황에 대한 예상결과와 이유를 적는 방법이 많이 사용된다. 조사 규모가 커질수록 객관식 문항을 제작하는 것이 효율적인데, 이를 위해서는 철저한 사전 조사가 필요하다.

한편, 정용재(2004)는 학생의 개념을 파악하는 방법으로서 학생이 인식하고 있는 ‘전형적 인식상황’을 조사하는 것을 제안하였다. 전형적 인식상황이란, ‘사물, 감정, 개념, 상황 등과 같은 어떤 대상에 대해 혹은 그와 관련해서 생각할 때 즉시적이고 자동적으로 떠오르는 상황’을 의미한다. 개념을 파악하기 위해서는 주어진 맥락 속에서 그 순간 떠오르는 복합적인 어떤 것, 즉, 상황을 파악하는 것이 필요하며, 특히 즉시 떠오르는 상황은 관련된 수많은 상황들을 대표하는 추상화된 원형 상황이거나 주어진 맥락에서 가장 적절한 것으로 선택되도록 안정화된 본보기 상황일 것으로 생각하였다.

학생의 물리 개념 학습의 어려움에는 학생의 선개념과 관련된 어려움뿐만 아니라 다양한 종류의 어려움이 존재한다. 예를 들면 피아제의 분류에 의한 구체적 조작기에 있는 학생들이 추상적 개념들을 습득할 수 있는지, 또는 물리 개념을 습득하는 과정에서 나타나는 어려움은 무엇이며 이를 개선하기 위해 교수학습과정에서 어떠한 조치가 필요한지 등을

고민할 필요가 있다. 형식적 조작기에 있는 학생이라고 하더라도 에너지나 엔트로피와 같은 추상적 개념을 이해하는 데는 어려움이 따를 것으로 판단된다. 이러한 어려움의 경우, 개념에 대한 정의를 기술하고 개념도를 작성하는 수준에서는 학생들은 어렵고 이해하지 못한다고 응답할 뿐, 구체적으로 어떠한 부분이 어려움으로 작용하는지를 찾아내기가 어렵다.

문제 상황을 주고 문제를 그림이나 글, 수식을 이용하여 해결하게 한 후에 그 결과물을 연구자와 면담을 하는 방법은 문제 상황과 관련된 학생의 선개념을 조사할 수 있을 뿐만 아니라 개념과 관련된 원리와 공식을 학생이 실제로 어떻게 적용하는지 확인할 수 있으며, 이를 기반으로 학생이 가지고 있는 어려움을 구체적으로 찾아내고 이론화할 수 있도록 도와준다. 이러한 이유로 물리 개념과 관련된 학생의 인지적 어려움을 조사하는 대부분의 연구들은 특정한 상황에 대한 문제를 제시하고 학생들이 문제를 어떻게 해결하는지를 자세하게 살펴보는 방식으로 진행되며, 이를 바탕으로 연구자들은 성공적인 수업을 위한 전략을 세운다 (McDermott & Shaffer, 1998).

이 외에 주간 보고서(Etkina, 2000)와 같이 학생이 특정 개념을 학습하면서 자신이 인지하는 어려움을 직접 기술하는 방식이 있다. 이 방식의 경우 인지적 어려움뿐만 아니라 정의적, 환경적 어려움도 모두 조사할 수 있다는 장점이 있으나, 학생 스스로 인지하지 못하는 어려움은 찾아낼 수가 없다.

2.2.2. 문제풀이와 개념이해의 관계

학생들이 특정 개념과 관련된 문제들을 성공적으로 풀이할 때, ‘난 이 개념을 잘 이해하고 있다.’고 생각할 가능성이 높다. 하지만 문제를 성공적으로 풀이한다고 해서 문제와 관련된 개념을 잘 이해한다고 할 수 있

을까? 즉, 문제풀이와 개념이해 사이에는 어떠한 관계가 있는지 살펴볼 필요가 있다.

문제를 해결하기 위해서는 기본적으로 문제와 관련된 원리, 공식, 개념들에 대한 사실적 정보 또는 내용을 알아야 한다. 이러한 측면에서 문제를 잘 해결한다는 것은 문제와 관련된 개념을 잘 이해하고 있다는 결론에 이르게 된다. 하지만 Kim & Pak(2002)은 전통적인 형태의 문제에 대해 학생이 풀이한 문제의 수와 개념이해 사이에는 낮은 상관성이 있음을 보여주었다. 즉, 전통적인 형태의 유사한 문제를 많이 풀면 그 문제를 푸는 패턴을 익히기 때문에 문제는 성공적으로 풀 수 있지만 그렇다고 해서 이것이 반드시 '개념 이해'와 연결되는 것은 아니라는 것이다. 다른 연구에서도 학생들은 개념 이해 없이 전통적인 문제 풀이 방식을 익히며, 그 결과 학생들의 개념 이해 수준이 낮은 것으로 나타났다(Lawson & McDermott, 1987; McMillan & Swadener, 1991).

개념을 잘 안다고 문제를 성공적으로 해결할 수 있는가라는 질문에 대해서도 그렇지 않다는 의견이 지배적이다. 문제풀이에는 문제와 관련된 원리, 공식, 개념들에 대한 명제적 지식뿐만 아니라 이러한 지식을 잘 적용하기 위해 필요한 논리적 사고기능이나 비례추리 기능과 같은 절차적 지식, 문제를 이해하고 적절한 지식을 사용하는데 필요한 전략적 지식, 신념과 가치관 등 다양한 요소가 관여하기 때문이다(박운배, 2002).

그러면 과연 학생의 문제풀이과정을 통해 학생의 개념이해를 살펴볼 수 있는가라는 문제가 제기될 수 있다. 학생이 어떻게 특정 개념을 이해하고 있는지를 살펴보는 것이 목적이려면, 살펴보고자 하는 개념과 긴밀한 관련이 있는 문제를 제시하며, 문제는 전형적이지 않아야 한다. 또한 문제에 대해 정량적으로 계산해보고, 정성적으로도 설명해보게 하는 등, 다각도로 질문을 할 필요가 있다. 상황은 다르지만 주요 개념이 동일한

문제나, 난이도가 다른 문항들을 여러 개 만들어서 학생들이 풀 수 있도록 조치할 필요가 있다. 또한 학생의 사고과정을 모두 그림이나 글로 표현하게 하여 사고과정을 일일이 추적하는 것도 학생의 개념 이해 정도를 파악하는 데 도움이 될 것이다. 이러한 측면에서 문제해결 과정에서 해결자의 머리 속에 떠오르는 생각들을 말로 표현하게 하고 이것을 녹음하여 해결자의 사고과정을 알아내는 발성사고법이나, 문제해결자가 문제를 모두 해결한 다음 해결과정에서 사용한 전략 행위 등을 연구자에게 자세히 이야기하는 내성법, 문제해결자가 문제를 해결하면서 일어나는 모든 사고 과정과 해결방법을 스스로 기록하는 지필검사법은 학생의 개념 이해를 살펴보는 데 도움이 된다(박윤배, 2002).

2.2.3. 학생과 전문가가 갖고 있는 물리개념의 차이점

한편, 전문가의 물리개념의 특징을 살펴보는 것은 학생이 전문가 단계로 성장하기 위해 갖추어야 할 요소들을 확인해본다는 의미에서 중요하다. 인지과학자들의 연구결과에 따르면 과학적 지식은 복잡하여 전문가의 지식은 묵시적(tacit)이지만(Glynn *et al.*, 2002), 과학교육 연구자들은 전문가가 갖고 있는 과학 개념의 특징에 대해 명시하고자 하였으며, 초보자와 전문가의 문제풀이방식의 비교를 통해 이들이 갖고 있는 지식의 차이를 찾아내고자 하였다.

오슈벨 등에 따르면 아동의 개념과 과학자의 개념은 다음과 같은 방식에서 차이가 난다고 지적하였다(Osborne *et al.*, 1983).

- 어린 아동은 추상적 사고를 하는 과학자와는 달리 사물을 자기중심적 또는 인간 중심적 관점에서 바라보는 경향이 있다. 그리고 일상 경험에서 직접 나타나는 개체와 구성물만을 고려한다.

- 아동은 특별한 사건의 특이한 설명에만 관심을 갖는다. 아동은 과학자와는 다르게 다양한 현상에 대하여 모순이 없는 일관적인 설명을 찾지 않는 것처럼 보인다. 아동은 대신 자신의 제한된 경험과 특이한 설명에 집중하면서 자신이 보기에 그럴듯한 가능성이 있는 설명 중의 하나에만 몰두한다.
- 아동은 일상 생활에서 사용하는 언어의 영향을 받아 과학 법칙과 전혀 다른 관점을 지닐 수 있다.

한편 Larkin *et al.*(1980)는 전문가는 다음과 같은 특징을 가지고 있다고 언급했다.

- 전문가는 초심자보다 많은 지식을 가지고 있으며 어떤 문제에 접했을 때 관련 지식을 쉽게 끌어낸다.
- 전문가의 지식은 단순히 개념, 원리, 법칙 등이 개별적으로 기억되어 있는 것이 아니라 5-6개 정도의 관련 개념들이 무리지어 하나의 단위(chunk)로 기억되어 있다.
- 전문가는 관련 개념의 적용범위와 한계를 명확히 규정지을 수 있고 문제를 해결하는 데 필요한 논리적 사고력도 잘 갖추고 있다.

Reif(1995)에 따르면, 초심자의 물리 개념은 일관적이지 않고, 일상의 지식(everyday knowledge)처럼 분절되어 있으며, 더 포괄적인 개념과 서로 연결이 되어 있지 않다. 그래서 낱낱의 지식을 전부 외어야 하는 상황에 직면하게 된다. 한편, 전문가의 과학 개념, 특히 물리 개념의 경우 고도로 정교하게 지식이 조직화되어 있으며 이러한 특징 때문에 세부적인 내용을 기억해내고 사용하는데 큰 어려움이 없다고 알려져 있다.

Chi *et al.*(1981)는 초보자와 전문가 사이의 문제풀이의 특징을 살펴보기 위해 피험자들이 문제들을 분류하고 문제들을 어떻게 풀어야 하는지 설명하게 하였다. 그 결과 초보자는 문제의 진술문을 반복해서 읽다가 문제에 포함된 용어나 문제의 목표 등 문제로부터 직접 얻어낼 수 있는 일차적인 정보들을 바탕으로 공식이나 원리를 선택하였고, 문제에 명시되어 있지는 않지만 유추하여 낼 수 있는 이차적인 정보들은 거의 사용하지 못하였다. 반면, 전문가들은 문제를 해결하는데 필요한 본질적인 정보를 사용하여 문제를 범주화하는 경향이 있었다. Reif & Heller(1982)도 전문가는 기본적인 개념 아래 위계적으로 내용을 조직하는 반면, 초보자는 표면적인 특징에 따라 지식을 조직한다고 주장하였다. 즉, 물리 지식을 어떻게 구조화하는가가 성공적인 문제해결의 핵심 과제임을 알 수 있다.

열역학 제2법칙의 핵심 개념인 엔트로피 개념은 전통적으로 이해하기 어려운 개념으로 여겨져 왔다. 여기에서 ‘이해하기 어렵다’의 의미는 개념에 대해 구체적인 심상을 떠올리기 어렵다는 것을 의미한다. 그래서 열역학 제2법칙과 엔트로피 개념 이해 증진을 위한 지금까지의 많은 연구들이 주로 ‘엔트로피에 대한 구체적인 심상을 쉽게 떠올려 직관적으로 개념을 이해하게 하는 것’에 초점을 두었다. 하지만 열역학 제2법칙을 잘 이해하고 이를 기반으로 문제를 성공적으로 해결하기 위해 학생이 갖춰야 할 지식의 구조와 형태에 대해서는 논의된 바가 거의 없다.

본 연구에서는 전문가가 갖추고 있는 지식의 형태, 즉, ‘일관된 설명’을 갖추고 있으며, ‘개념, 원리, 법칙들이 서로 무리지어 하나의 단위로 기억’되며, ‘관련 개념의 적용범위와 한계를 명확히 규정’지을 수 있고, ‘본질적인 정보가 무엇인지를 명확하게 알고 있음.’을 기반으로 하여, 열역학 제2법칙과 관련된 문제들을 성공적으로 해결하기 위해 갖춰야 할 지식의 내용과 구조를 찾아내고자 하였다.

2.3. 열역학 제2법칙 교육에 대한 선행연구

2.3.1. 학생의 열역학 개념 이해에 대한 연구

열역학은 크게 열과 온도, 이상기체 상태방정식, 열역학 제1법칙, 열역학 제2법칙으로 나눌 수 있다. 각각에 대한 선행연구들을 검토해보면 다음과 같다.

열과 온도의 경우, 학년에 관계없이 학생들이 열과 온도를 구별하지 못하거나 이와 관련된 개념들을 이해하기 어려워한다는 지적이 있었다. 학생들은 열과 온도를 차갑고 뜨거운 정도로 생각하여 동일시할 뿐만 아니라, 열을 열소와 같은 물질의 일종으로 생각하고, 접촉하고 있는 물체의 온도는 모두 동일해지는 열적 평형상태에 대해 알지 못하였으며, 열용량 및 비열 등에 대한 개념 이해가 부족하였다(권성기, 2004; Harrison *et al.*, 1999; Jasien & Oberem, 2002; Lewis & Linn, 1994; Loverude *et al.*, 2002; Meltzer, 2004). 온도 개념을 이해하는 데 있어서 초등 수준에서는 온도계를 사용하여 다양한 상황에서 온도를 측정해보는 것이 온도를 이해하는 데 도움이 된다는 주장이 제기되었고(Arons & Redish, 1997), 대학물리 수준에서는 ‘분자가 갖는 평균 병진운동에너지’의 개념을 넘어서서 열역학적 평형과 엔트로피 개념을 도입한 정의가 필요하다는 주장도 있었다(Baierlein, 1990; Worthing, 1940).

열에너지(thermal energy), 열(heat), 내부에너지(internal energy)라는 세 가지 용어를 구분해야 한다는 주장도 있는데, 열은 열역학적 과정의 의미로, 내부에너지는 열역학적 상태를 지칭하는 의미로 사용하는 것이 적절하다는 논의가 있었다. 하지만 열에너지라는 용어는 교재마다 다르게 사용하는데, 열의 의미로 쓰는 경우도 있었고 내부에너지의 의미로 쓰는 경우도 있었다(Kautz *et al.*, 2005a).

이상기체 상태방정식인 $PV = nRT$ 와 관련하여 주요 연구결과는 학생들이 기체의 양이 일정한($n = \text{일정}$) 상황에 대해 문제를 풀 때, P, V, T 세 가지 변수를 동시에 고려하지 않고 세 가지 중에서 두 가지만 고려한다는 것이다(Kautz *et al.*, 2005a; Leinonen *et al.*, 2011; Rozier & Viennot, 1991). 특히 단열과정에서 온도가 변하지 않는다는 오개념을 가지고 있는 학생들이 있었다. 또한 미시적 관점에 대한 이해가 부족하였는데, 대표적인 예로는 계의 온도가 높아지는 것을 계에 속해있는 입자의 평균운동에너지가 증가한다고 보지 않고 입자 간 충돌 수의 증가로 잘못 해석하는 경우가 있었다(Kautz *et al.*, 2005b; Leinonen *et al.*, 2011; Leinonen & et al., 2009; Loverude *et al.*, 2002; Meltzer, 2004).

한편, 열역학적 과정 및 열역학 제1법칙과 관련된 학생의 문제풀이를 살펴본 연구에서는 학생들이 등온과정과 단열과정을 잘 구별하지 못함을 확인할 수 있었다. 등온과정에서 열의 이동이 없다고 생각하거나 단열과정에서 온도 변화가 없다고 생각하는 학생들이 있었다. (Kautz *et al.*, 2005a; Leinonen *et al.*, 2009; Meltzer, 2004). 단열압축과정과 관련하여 학생들은 상태변수(예: 내부에너지)와 과정변수(예: 일, 열)를 잘 구별하지 못하고, 열, 온도, 내부에너지와 같은 개념들을 헷갈려 하여 문제풀이에 실패하는 것을 볼 수 있었다(지영래, 2008; Leinonen *et al.*, 2009; Loverude *et al.*, 2002). Meltzer(2004)의 경우 p - V 그림에서의 열, 일, 열역학 제1법칙에 대한 학생의 생각을 조사하였는데, 학생들은 일, 열과 같은 과정변수를 상태변수처럼 다루었으며 그래프를 보고 일의 부호를 결정하는 데 있어서 어려움을 겪고 있었다. 지영래(2008)는 대학생들을 대상으로 한 연구에서 학생들은 단열, 등온, 자유팽창과정에 대한 p - V 그림을 잘 그리지 못하며, 특히 자유팽창에 대한 개념이 부족함을 지적하였다.

2.3.2. 열역학 제2법칙 학습에서 학생들이 겪는 어려움

열역학 제2법칙 및 엔트로피 개념과 관련된 선행연구에는 엔트로피 개념에 대한 학생의 이해에 대한 연구, 열역학 제2법칙과 관련된 문제풀이에 관한 연구, 열역학 제2법칙의 적절한 교수방법에 관한 연구가 있었으나 지금까지는 주로 엔트로피 개념에 대한 학생의 이해가 부족하다는 연구 및 열역학 제2법칙 및 엔트로피를 가르칠 때 통계역학적 관점을 적극적으로 도입할 필요가 있음을 주장하는 논문이 주를 이루었다.

우선 전문가의 입장에서 학생들이 어려움을 겪을 것으로 예상하거나 직접 수업을 하면서 학생들이 어려워한다고 보고한 것들이 있었다. 대표적인 것이 식 $dS = \delta Q/T$ 에 대한 직관적 이해에 관한 것이다(Alonso & Finn, 1995; Baierlein, 1994; Müller, 2007; Reif, 1999; Schoepf, 2002). 이들의 주장에 따르면, 이 식만으로는 엔트로피 개념이 사건의 방향성과 어떻게 연결되는지 알 수가 없고, 엔트로피는 상태함수임에도 불구하고 이 식은 엔트로피의 변화량을 강조하고 있으며, 이 식은 가역과정에서만 적용할 수 있는데 학생들이 가역과정에 대해 떠올리는 것이 쉽지 않다.

다음으로 ‘무질서도’라는 비유가 엔트로피를 이해하는 데 있어서 혼란을 가중시킬 수 있다는 연구가 상당 수 보고되었다(Bindel, 2004; Johnstone *et al.*, 1977; Lowe, 1988; Rodewald, 1990; Styer, 2000; Wright, 1970). 보통 ‘무질서도(disorder, randomness)’라는 용어를 들으면 어지러운 배열을 떠올리게 되는데, 엔트로피 개념은 한 순간을 포착하여 설명할 수 있는 것이 아니라, 압력, 온도, 입자 수 등으로 정의되는 하나의 열역학적 거시상태가 가질 수 있는 가능한 모든 미시적 상태 수를 따져야 하는 개념이다. 즉, ‘어지러운 방’을 엔트로피가 높은 상태로 정의한다면, 이는 현재 놓여있는 물건의 배열이 무작위해서가 아니라 어지러운 방의 상태를 만들 방법의 수가 정돈된 방의 상태를 만들 방법의 수보다 크기 때문인 것으로 생

각해야 한다. 한편, Sözbilir(2007)는 터키에서 화학을 전공하는 대학교 3학년 학생들을 대상으로 엔트로피에 대한 학생의 생각을 조사하였는데, 많은 연구자들이 예측한 바와 같이 엔트로피를 무질서도로 생각하는 학생들이 많은 것으로 나타났다.

한편, 학생들에게 간단한 문제를 제시하고 여기에서 나타나는 학생의 어려움을 조사한 연구들이 있다. Christensen *et al.*(2009)는 일반물리학을 수강하는 학생들의 엔트로피 및 열역학 제2법칙에 대한 생각을 조사하였는데, 상당 수의 학생들이 엔트로피를 일종의 보존되는 양으로 생각하였다. 또한 열역학 제2법칙은 고립계의 총 엔트로피의 변화량이 0보다 크다는 것을 의미함에도 불구하고 단순히 계의 엔트로피가 증가하는 것이 열역학 제2법칙이라고 생각하는 학생들이 있었다(이주현, 송진웅, 2007; Granville, 1985). 화학에서는 깁스 자유에너지를 계산하기 위하여 주위환경은 고려하지 않고 계의 엔트로피만 계산하는 경우가 많은데, 그래서 화학을 전공하는 학생들이 총 엔트로피 변화량이 열역학 제2법칙과 연결된다는 것을 잘 인지하지 못한다는 연구도 있었다(Sözbilir, 2007; Thomas & Schwenz, 1998).

또한 Granville(1985)에 따르면 단열과정에서 엔트로피 변화량은 무조건 0이라고 생각하는 학생들도 상당 수 있었다. 이는 식 $dS = \delta Q/T$ 를 적용할 수 있는 조건에 대해 알지 못하였기 때문으로 보인다. Cochran & Heron(2006)은 열기관과 냉동기관을 간단한 도식을 이용해서 나타낸 후, 대학생들에게 주어진 기관이 작동가능한 기관인지의 여부를 결정하도록 하였다. 문제를 해결하는 데 있어서 대부분의 학생들이 열역학 제1법칙은 고려하였으나 열역학 제2법칙은 고려하지 않았으며, 열기관 효율의 구속조건과 총 엔트로피의 증가 사이의 관계를 잘 알지 못하였다.

이주현, 송진웅(2007)의 연구에 따르면 엔트로피 개념에 대한 이해의

어려움은 개념 자체에 대한 이해의 어려움, 계산 과정의 어려움, 열역학적 과정에 대한 이해의 어려움, 엔트로피와 다른 열역학적 개념들 사이의 관계에 대한 이해의 어려움 등이 있었다. 또한 이러한 어려움을 해결하기 위해서는 엔트로피 개념을 어떻게 도입할 것인지에 대한 고민과 열역학적 과정에 대한 명료한 이해, 열역학적 과정에 따른 상황의 해석 방법 및 수식의 적용 방법 등에 대한 연구가 필요한 것으로 제언하였다. 특히 열역학적 상태를 제대로 예측하기 위해서는 열역학 제1법칙과 열역학 제2법칙을 문제상황에서 적절히 적용할 수 있는 능력이 필요한데, 따라서 연구의 초점을 엔트로피 개념에서 열역학 제2법칙을 포함한 열역학 전반으로 확장할 필요가 있었다.

2.3.3. 열역학 제2법칙 및 엔트로피 개념의 교수학습방법

열역학 제2법칙은 고립계에서의 엔트로피 증가 법칙으로 귀결된다. 즉, 엔트로피가 무엇인지를 이해하는 것이 열역학 제2법칙을 이해하는 핵심 과제이다. 따라서 열역학 제2법칙을 어떻게 가르칠까에 대한 논의는 곧바로 엔트로피 개념을 어떻게 가르치는 것이 좋은가에 대한 논의로 바뀌어 진행되었다.

우선 ‘무질서도’라는 표현 대신에 학생들이 직관적으로 이해할 수 있으면서도 물리적으로 그럴듯한 정성적인 표현을 찾는 연구가 있었다. 그 결과, 열역학적 엔트로피를 ‘에너지의 퍼짐과 공유 정도(the spreading and sharing of energy)’, 또는 ‘에너지의 분산 정도(the dispersion of energy)’로 정의하자고 주장한 연구들이 있었다(Kolarczyk, 2010; Lambert, 2002; Leff, 1996, 2012). 즉, 물질을 통해 에너지가 퍼져나가는 정도와 원자 또는 분자 수준의 다양한 에너지 저장 모드(energy storage modes: 예를 들면 병진 운동에너지, 회전운동에너지, 진동운동에너지, 분자간 힘에 의한 퍼텐셜

에너지 등)에 에너지가 분배되어 있는 정도로 가르칠 것을 주장하였다. 연구자들은 고립계가 평형상태에 놓여있을 때가 에너지의 퍼짐과 공유 정도가 최대(열역학 제2법칙)라는 전제조건 하에 엔트로피에 대한 클라우지우스 식을 유도하였으며, 고립계에서 내부에너지가 재분배되는 과정을 통해 엔트로피가 생성된다고 설명하였고, 이러한 정성적 정의를 이용하여 클라우지우스 표현 및 켈빈-플랑크 표현을 설명할 수 있음을 보였다. Bindel(2004)과 Kozliak(2004)도 고등학교 화학 수업 및 대학교 물리화학 수업에서 엔트로피를 ‘무질서도’라는 개념 대신 ‘에너지의 퍼짐 정도 (energy dispersal)’로 정의한 후 수업에 도입하였으며, 이를 사건의 자발성과 연결하여 수업에서 설명하는 사례를 보여주었다.

한편, 역사적 관점을 수업에 도입하고자 하는 노력이 있었다. Viard(2007)는 ‘엔트로피’라는 개념 자체가 학생들에게 모호하고 그 자체만으로는 이해하기 어려운 용어라고 규정하고, 대학교 3학년 학생들에게 엔트로피 개념을 가르치는 데 있어서 직접 Carnot(1888), Clausius(1867), Cropper(1986)등의 글들을 읽고 다음과 같은 질문에 학생들 스스로 답변을 하도록 수업을 진행하였다.

- 맥스웰이 열역학을 정의할 때 그는 열과 역학적인 물리량 사이에 어떤 관계가 있다고 생각했으며, 여기에서 잘 알려지지 않은 부분은 무엇이었는가?
- 왜 새로운 물리량이 도입되는 것이 필요하다고 생각하였는가?

아울러 카르노 논문에 제시되어 있는 수차(water engine)와 증기기관의 비교, 클라우지우스 논문에 제시된 자연의 두 가지 방향성에 초점을 두어 학생들이 글을 읽도록 하였고, 엔트로피에 대한 생각을 키우도록 유도하였다. Strnad(1984)는 인문학에 관심있는 학생들에게 물리학에서의 개념 진화의 중요성을 알려주는 목적으로 열역학 제2법칙에 대한 물리학

내용과 역사적 사실을 접목시켜 수업을 진행하였으며, 그 결과 학습에 대한 학생들의 흥미도가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

한편, 엔트로피 개념의 직관적 이해를 위해서는 기존의 역사적 흐름에 따라 내용을 가르치는 것을 넘어서서 통계역학적이고 미시적 관점의 엔트로피 개념의 도입이 필요하다는 주장이 제기되었다(Alonso & Finn, 1995; Baierlein, 1994; Lee, 2001; Reif, 1999; Schoepf, 2002). 일반물리학에서 열역학은 전통적으로 역사적 발달과정과 일치하는 순서로 기술되어 있으며 이러한 설명방식에서 열, 내부 에너지, 절대온도, 엔트로피 등의 개념은 굉장히 추상적이어서, 기존의 기술방식은 현상적인 측면을 부분적으로만 설명하고 있다. 특히 열역학 제2법칙과 관련하여 고전적인 관점은 사건이 한쪽 방향으로 진행되는 이유를 제공하지 못하는 단점이 있으며, 이를 극복하기 위해 일반물리학에서 통계역학적 관점을 도입할 필요가 있다는 것이 이들의 핵심 주장이다. 이 논문들은 미시상태 수의 개념, 즉 볼츠만의 엔트로피를 도입하여 사건의 방향성을 설명하고, 이 식을 이상기체상황에 적용하여 온도를 정의하며($1/T = dS/dE$), 열역학적 평형이 어떻게 접촉하고 있는 두 계의 온도가 동일해지는 것과 연결되는지를 논의하고, 이상기체에서의 내부에너지 공식과 이상기체방정식, 등압 및 등적과정에서의 몰비열 등을 유도하였다. 이 결과들은 일반물리학 교재에 나오는 수식들과 일치하며, 따라서 이러한 접근들은 일반물리학에서 나오는 여러가지 수식(또는 법칙)들을 실험적인 방법뿐만 아니라 통계적 기법으로도 찾아낼 수 있음을 보여준다. 이러한 흐름에 따라 2000년대 이후 상당 수의 일반물리학 교과서 및 일반화학 교과서에서 통계적 관점의 엔트로피 개념을 도입하기 시작하였으며(서영진, 채희권, 2009), Chabay & Sherwood(2002)의 교과서는 통계적 관점을 기반으로 하여 열역학을 기술하였다. 또한 프로그래밍을 통해 학생들이 하나의 거시상태에 해당하

는 미시상태 수를 세어보게 하고, 엔트로피 개념을 익힐 수 있도록 도와주는 연구들도 진행되었다(Lee, 2001; Moore & Schroeder, 1997; Salagaram & Chetty, 2011; Timberlake, 2010).

하지만 이러한 접근에서 특정한 계의 미시상태의 수를 예측하는 일은 쉽지 않으며, 일반물리학 수준에서 적용을 한다면 매우 한정된 상황에 대해서만 적용을 할 수 있을 것이다. 또한 실제로 거시적 변수가 주어졌을 때의 엔트로피 변화량의 계산은 볼츠만의 식을 이용하는 것보다 클라우지우스의 식을 이용하는 편이 훨씬 유용한 경우가 많다. 즉, 미시적 관점의 도입이 엔트로피라는 추상적인 개념을 구체화시키는 데는 도움이 되지만 열역학 문제 해결에 있어서 완전한 해결책이 될 수는 없다. 아울러 힘과 에너지를 기반으로 한 뉴턴역학적 관점으로 기술되었던 기존의 서술이 왜 통계적 관점으로 바뀌었는지에 대한 추가적인 서술이 뒷받침되어야 열역학이 역학과는 달리 왜 통계적 요소가 도입되었는지를 학생들에게 이해시킬 수 있을 것이다. 즉, 열역학 제2법칙과 엔트로피를 어떻게 도입해야 하는가에 대한 부분은 지속적으로 연구를 해야 할 필요가 있다.

3. 연구 1: 일반물리학 교과서에서의 열역학 제2법칙과 엔트로피에 대한 설명 분석¹

3.1. 연구의 필요성 및 목적

열역학 제2법칙의 중요한 물리량인 엔트로피는 일반물리학에서 주로 두 가지 수학적 방법으로 정의된다. 하나는 카르노 순환에 대한 클라우지우스의 역학적 해석을 통해 유도된 $dS = \delta Q/T$ 이며, 다른 하나는 볼츠만의 통계적 아이디어에 기반한 $S = k \ln \Omega$ 이다. 이러한 수학적 정의로부터 출발한 엔트로피는 자연현상의 자발성에 대한 척도, 비가역적 효과에 의한 계가 할 수 있는 일의 손실 정도, 계의 무질서한 정도, 하나의 계가 가질 수 있는 가능한 미시 상태의 수 등으로 다양하게 해석된다. 하지만 선행연구에서 논의한 바와 같이 클라우지우스의 엔트로피에 대한 정의는 직관적으로 이해하기가 어려우며 볼츠만의 엔트로피에 대한 정의는 일반물리학 수준에서 다루기가 쉽지 않고 계산의 어려움이 있다.

본 연구는 일반물리학 교과서에서 열역학 제2법칙과 엔트로피 개념을 어떻게 설명하고 있는지를 조사하고 교육적인 시사점을 찾는 데 목적을 두었다. 교과서 설명의 전개 과정을 살펴보고, 클라우지우스 식과 볼츠만 식의 도입 방식 및 예제의 유형에 대해 조사하였으며, 가역과정 및 카르노 순환에 대해 어떻게 교과서에서 설명하고 있는지를 살펴보았다.

¹ 이 장의 주요 내용은 ‘이주현, 송진웅(2009a). 일반물리학 교과서의 엔트로피 개념에 대한 설명 분석. 새물리, 58(3), 340-352.’에 발표되었다. 이와 함께 추가로 분석된 내용이 포함되어 있다.

3.2. 연구 대상 및 조사 내용

본 연구에서는 대학에서 주로 사용하는 총 8권의 일반물리학 교과서를 분석하였다. 분석 대상 교과서는 표 3.1과 같으며, 주로 과학이나 공학을 전공하는 사람들을 위한 교과서를 선택하였다(Chabay & Sherwood, 2002; Giancoli, 2000; Halliday *et al.*, 2008; Hecht, 1996; Serway & Beichner, 2000; Swartz & Miner, 1997; Tipler & Mosca, 2004; Young *et al.*, 2008). Chabay & Sherwood(2002)의 경우 기존의 교과서와는 달리 미시적 관점과 입자간 상호작용을 강조한 교과서이다. 해당 교과서를 본문에서 언급할 때에는 제1저자의 성을 사용하였다.

표 3.1 본 연구에서 분석한 일반물리학 교과서

| 기호 | 저자 | 교과서명 | 년도 | 출판사 |
|----|----------------------------|---|------|------------------------|
| He | Hecht | <i>Physics: Calculus</i> | 1996 | Brooks/Cole Pub. |
| Se | Serway | <i>Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics (5th Ed.)</i> | 2000 | Saunders College Pub. |
| Gi | Giancoli | <i>Physics for scientists & engineers with modern physics (3rd Ed.)</i> | 2000 | Prentice Hall |
| Ti | Tipler & Mosca | <i>Physics for Scientists and Engineers (5th Ed.)</i> | 2004 | W. H. Freeman |
| Ha | Halliday, Resnick & Walker | <i>Fundamental of Physics (8th Ed.)</i> | 2008 | Wiley |
| Yo | Young & Freedman | <i>University Physics: with modern physics (12th Ed.)</i> | 2008 | Pearson/Addison Wesley |
| Sw | Swartz & Miner | <i>Teaching Introductory Physics: A Sourcebook</i> | 1998 | Springer-Verlag |
| Ch | Chabay & Sherwood | <i>Matter & Interactions, Vol.1</i> | 2002 | Wiley |

본 연구에서는 열역학 제2법칙과 엔트로피에 대한 단원들을 분석하였다. 교과서들에 나타난 주요 용어로는 열역학 제2법칙, 가역과정과 비가역과정, 열, 일, 열기관, 냉동기관, 카르노 기관, 엔트로피, 무질서도 등이 있었다. 내용의 전체적인 흐름, 주요 개념의 정의와 설명방식, 제시된 예제의 형태를 살펴봄으로써 교과서별 설명의 다양성 및 각 설명의 장단점을 제시하는데 초점을 두었다. 구체적인 분석 내용은 다음과 같다.

- 열역학 제2법칙과 엔트로피 개념에 대한 교과서의 서술
- 열역학 제2법칙에 대한 다양한 서술들 사이의 관계
- 엔트로피 개념에 대한 교과서의 내용 전개 순서
- 식 $dS = \delta Q/T$ 와 $S = k \ln \Omega$ 의 도입 방식
- 교과서에 등장하는 주요 예제들
- 가역과정에 대한 정의
- 카르노 순환에 대한 서술

3.3. 연구 결과 및 논의

3.3.1. 열역학 제2법칙과 엔트로피 개념에 대한 교과서의 서술

열역학 제2법칙 및 엔트로피에 대해 교과서에서는 어떻게 서술하고 있는지 살펴보았다. 표 3.2는 교과서에 나타난 열역학 제2법칙에 대한 대표적 서술들을 나타내며, 표 3.3은 엔트로피에 대한 표현들을 나타낸다.

표 3.2 열역학 제2법칙에 대한 서술들

| 열역학 제2법칙에 대한 서술들 | 교과서 | | | | | | | |
|--|-----|----|----|----|----|----|----|----|
| | He | Se | Gi | Ti | Ha | Yo | Sw | Ch |
| - 자연계에서 일어나는 사건들은 비가역적이다. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| - 고립계에서 엔트로피는 감소하지 않는다. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| - (Kelvin-Planck 서술) 단일 열원에서 열을 뽑아내어 100% 일로 바꾸는 것은 불가능하다. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| - 에너지가 변환되는 과정에서 일로 변환시킬 수 있는 에너지가 줄어드는 질적 저하가 일어난다. | ○ | | ○ | ○ | | ○ | ○ | |
| - (Clausius 서술) 아무런 작용 없이 저절로 열이 저온에서 고온으로 이동하는 것은 불가능하다. | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| - 에너지는 퍼져나가려고 하며, 따라서 고립계는 결국 평형상태에 도달한다. | ○ | | | | | | ○ | ○ |
| - 고립계는 무질서해지려고 한다. | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ |
| - 엔트로피가 증가한다는 것은 사건이 일어날 확률(또는 가능한 미시 상태 수)이 커짐을 의미한다 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

표 3.3 엔트로피에 대한 정의

| 엔트로피에 대한 정의 | 교과서 | | | | | | | |
|---|-----|----|----|----|----|----|----|----|
| | He | Se | Gi | Ti | Ha | Yo | Sw | Ch |
| - 계의 무질서한(disorder/randomness) 정도 | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ |
| - 하나의 거시상태에 대한 가능한 미시상태의 수, 또는 사건이 일어날 확률 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

열역학 제2법칙에 대한 일반적인 서술로는 ‘자연계에서 일어나는 사건들은 비가역적이다.’와 ‘고립계에서 엔트로피는 감소하지 않는다.’가 있었다. 일과 열 사이의 에너지 전환과 관련해서는 ‘단일 열원에서 열을 뽑아내어 100% 일로 바꾸는 것은 불가능하다(켈빈-플랑크 서술).’와 ‘에너지가 변환되는 과정에서 일로 변환시킬 수 있는 에너지가 줄어드는 질적 저하가 일어난다’는 설명이 있었다. 켈빈-플랑크 서술은 주로 열기관을 다루는 과정에서 나타났으며, ‘카르노기관보다 더 효율이 높은 기관은 없다.’라는 서술로부터 유도되기도 했다. 고온에서 저온으로의 에너지 이동과 관련해서는 ‘아무런 작용 없이 저절로 열이 저온에서 고온으로 이동하는 것은 불가능하다 (클라우지우스 서술).’는 서술이 있었는데, 이는 주로 냉동기관을 다루는 과정에서 나타났다. ‘에너지는 흩어지려고 한다.’는 서술은 Hecht에서만 나타났으며, ‘고립계는 평형상태가 되려는 경향이 있다.’는 서술은 세 권의 교과서에서 나타났다. 한편 엔트로피는 표 3.3과 같이 ‘무질서도’ 또는 ‘하나의 거시 상태에 대한 가능한 미시 상태의 수’로 정의되며, 이에 따라 열역학 제2법칙은 ‘고립계는 무질서한 상태가 되려는 경향이 있다.’는 서술과 ‘엔트로피가 증가한다는 것은 사건이 일어날 확률(또는 가능한 미시 상태 수)이 커짐을 의미한다.’는 서술로 설명되기도 하였다.

한편, 열역학 제2법칙은 대부분의 교과서에서 ‘에너지가 보존됨에도 불구하고 일어날 수 없는 사건들이 존재하는데, 이를 설명하기 위해서는 새로운 법칙, 즉 열역학 제2법칙이 필요하다.’라는 기술로부터 시작된다. 하지만 대부분의 교과서에서 역학에서 다루지 않던 비가역성이 열역학에서 왜 나타나며 역학과 열역학의 차이는 무엇인지에 대한 설명 없이 열역학 제2법칙의 여러가지 표현들을 설명하는데 그 초점을 두고 있었다.

‘무질서도’라는 표현에 대한 설명 방식은 교과서마다 차이가 있었다.

Tipler는 계의 질량 중심에 대해 계 내부의 입자들이 얼마나 무작위하게 움직이고 있는가가 무질서의 척도가 된다고 설명하였으며, Young과 Giancole은 미시적으로 정렬이나 분류가 잘 되어있지 않은 상황을, Hecht는 한 곳에 집중되어 있던 에너지가 퍼져나가거나 흩어져서 평형을 이루는 상황을 무질서한 상황이라고 설명하였다. 몇몇의 교과서에서 무질서도라는 표현을 사용할 때에 주의가 필요함을 강조하였다. Chabay와 Swartz의 경우 무질서도를 잘 정의하지 않으면 그 의미가 모호해질 수 있음을 언급하였으며, 무질서도라는 개념을 미시적 관점의 상태수와 연결해서 설명해야 한다고 지적하였다. Halliday 등의 *Fundamentals of Physics*의 경우, 4판에서는 ‘무질서도’라는 표현을 사용하고 있으나 5판 이후로는 이 표현을 사용하지 않는데, 이는 무질서도라는 비유로 인해 학생들이 엔트로피에 대한 오개념을 가질 수 있다는 기존의 연구 결과를 반영하였기 때문으로 추정된다.

모든 교과서에서 엔트로피를 미시적 상태수와 관련시켜 정의하고 있으나, 고전적인 교과서에서는 이 정의를 해당 단원의 뒷부분에 제시하였으며, 그 중 일부 교과서에서는 선택과제로 제시하였다(Serway, Giancole, Young). 한편 Swartz와 Chabay는 주로 이 정의를 이용하여 엔트로피를 설명하였다.

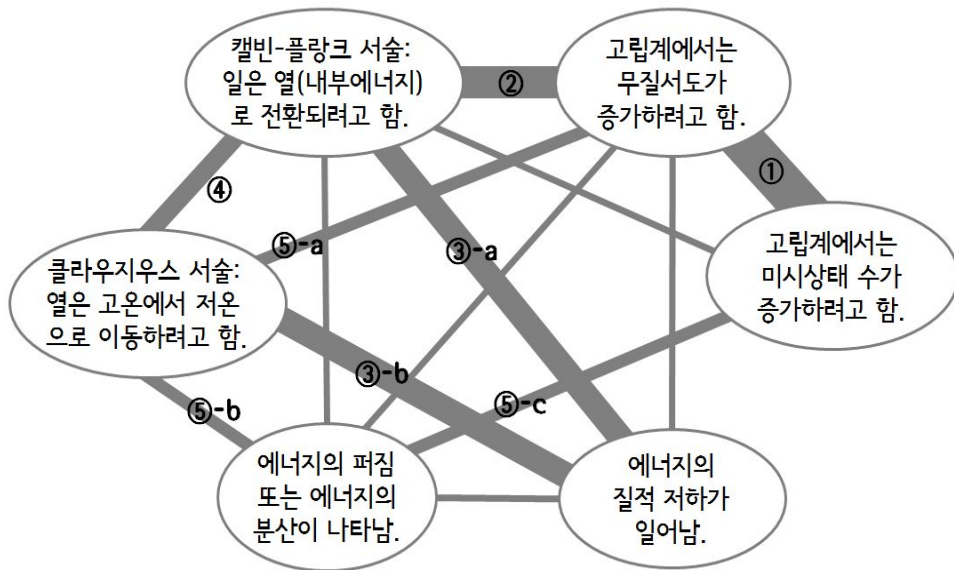
3.3.2. 열역학 제2법칙에 대한 다양한 서술들 사이의 관계

여기에서는 교과서에 나타난 열역학 제2법칙의 다양한 서술들 사이의 관계를 살펴보았다. 3.3.1절에 따르면 교과서에 제시된 열역학 제2법칙에 관련된 주요 서술은 8가지가 있었으며, 이 중 ‘자연계에서 일어나는 사건은 비가역적이다.’와 ‘고립계에서 엔트로피는 증가한다.’라는 서술을 제외한 나머지 6가지 서술들 사이의 관계를 살펴보았다. 이 두 서술은 열

역학 제2법칙에 대한 일반적인 서술로서, 모든 교과서에서 강조됨과 동시에 다른 서술들과 대체로 연결되어 사용되기 때문에 분석에서 제외하였다.

열역학 제2법칙과 관련된 서술들 사이의 관계에 대한 교과서 설명을 전체적으로 정리한 그림은 그림 3.1과 같다. 열역학 제2법칙에 대한 다양한 서술들을 원 안에 배치시켰으며, 원과 원 사이를 선으로 연결하고 번호를 부여한 후, 두 서술 사이의 관계를 보여주는 설명을 그림 아래에 제시하였다. 선의 굵기는 설명이 제시되어 있는 교과서의 수에 비례하며, 가장 굵은 선을 ①번으로 하여 굵은 선에서 가는 선 순으로 번호를 부여하였다. 그림 3.2는 분석결과를 교과서 별로 나타낸 것이다.

교과서에 주로 등장하는 설명으로는 무질서도와 계의 미시적 상태 수 사이의 관계에 대한 설명(7권의 교과서에서 언급함), 미시적 관점에서의 역학적 에너지와 열에너지의 차이에 대한 설명(5권), 역학적 에너지와 열에너지의 유용성 비교(4권), 열평형 상태에서 일을 얻을 수 있는지의 여부(4권), 열기관과 냉동기관을 이용한 켈빈-플랑크 서술과 클라우지우스 서술의 동등성 증명(3권)이 있었다. 그 외에 물체의 온도와 무질서도 사이의 관계, 열의 이동에 따른 열역학적 평형상태로의 도달, 열역학적 평형상태와 계의 미시적 상태 수의 관계, 마찰에 의해 일이 열로 전환되는 데 이 때의 마찰열은 분산된 형태의 에너지라는 설명, 고립계가 평형상태에 도달했을 때가 계가 가장 무질서할 때라는 설명, 고체모형에서 계에 일을 해 주면 계가 갖는 미시상태 수는 변하지 않지만(예: 강체에 힘을 가해 밀어주는 경우) 계에 열이 유입되면 계가 갖는 미시상태의 수가 증가한다는 설명, 에너지가 무질서한 형태일수록 또는 에너지가 흩어질수록 계는 평형상태에 가까이 가게 되며 따라서 계로부터 일을 얻어낼 수 있는 능력이 떨어진다는 설명이 있었다.



[다양한 서술들 사이의 관계를 보여주는 설명들]

- ① 고립계는 무질서할수록 계가 갖는 미시 상태수가 많아진다.
- ② 분자 수준에서 역학적 에너지는 분자들이 한 방향으로 움직이는 것을 의미하며, 열에너지(내부에너지)는 분자들이 무작위로 움직이는 것을 의미한다.
- ③-a. 역학적 에너지가 열에너지보다 유용하다.
- ③-b. 열평형 상태에 도달하면 고립계로부터 일을 얻을 수 없다.
- ④ 열역학 제2법칙에 대한 켈빈-플랑크 서술과 클라우지우스 서술은 동등하다. (열기관과 냉동기관을 연결하여 두 서술이 동등함을 증명할 수 있다.)
- ⑤-a. 고온의 물질과 저온의 물질에 동일한 양의 열이 투입되었을 때, 저온에서의 무질서 변화 정도가 더 크다.
- ⑤-b. 열은 고온에서 저온으로 퍼져나가려고 하는 경향이 있으며, 그 계는 결국 평형상태에 도달한다.
- ⑤-c. 평형상태가 확률적으로 가장 가능성이 높은 상태이다.

그림 3.1 교과서에 나타난 열역학 제2법칙의 다양한 서술들 사이의 관계

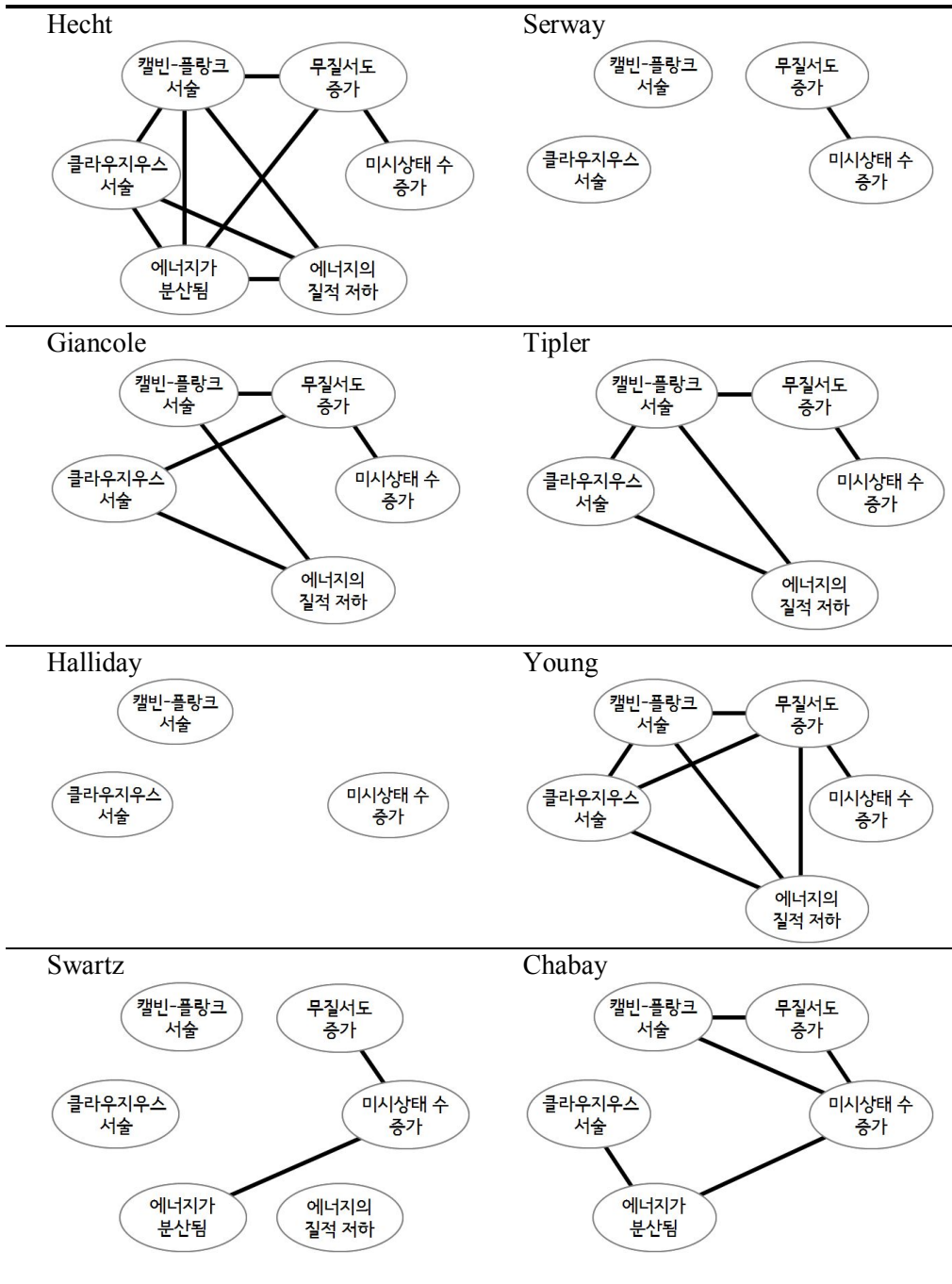


그림 3.2 교과서별 열역학 제2법칙 서술들의 연결 형태 비교

그림 3.2는 교과서 별로 등장하는 열역학 제2법칙에 대한 서술의 종류 및 서술들 간의 관계를 나타낸 것이다. 서술들 사이에 연결선이 없는 경우는 각 서술이 다른 서술과 연결되어 설명되지 않고 독립적으로 주어졌음을 의미한다. 상당 수의 교재에서 열역학 제2법칙에 대한 다양한 서술들을 무질서도와 연결시켰으며, 무질서도라는 용어를 계의 미시상태 수와 연결시켰다. 반면, Chabay는 열역학 제2법칙에 관한 다양한 서술들을 미시적 관점으로 해석하고 각각을 미시 상태 수와 연결시켜 설명하였다. 켈빈-플랑크 서술과 클라우지우스의 서술 사이의 관계를 증명 없이 정성적으로 설명하는 데 있어서는 주로 ‘에너지의 질적 저하’라는 표현이 매개자로 사용되었다. Hecht는 열역학 제2법칙에 관한 다양한 서술들 사이의 관계를 보여주기 위해 풍부한 설명을 제시한 반면, Halliday와 Serway는 서술들 간의 관계를 보여주는 정성적 설명을 거의 제시하지 않았다.

3.3.3. 엔트로피에 대한 내용 전개 순서

엔트로피에 대한 내용의 전개 순서를 클라우지우스의 식인 $dS = \delta Q/T$ 을 중심으로 기술된 교과서와, 볼츠만의 식인 $S = k \ln \Omega$ 을 중심으로 기술된 교과서로 나누어 살펴보았다. 고전적인 교과서들은 클라우지우스의 식을 중심으로 내용을 전개하는 반면에, Swartz와 Chabay는 볼츠만 식을 중심으로 내용을 전개하였다.

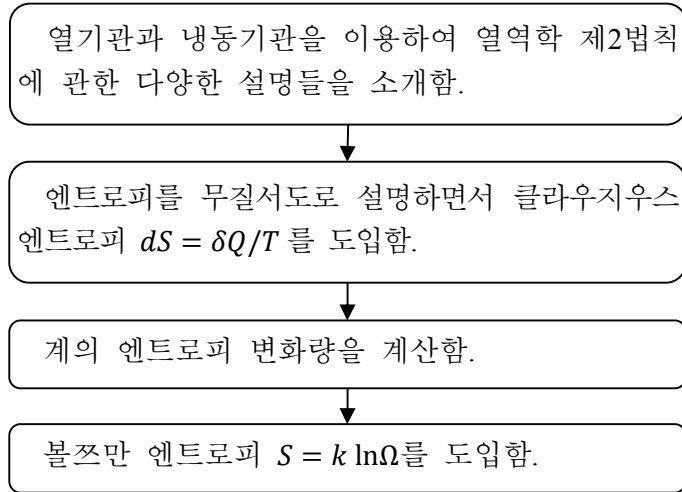


그림 3.3 클라우지우스 엔트로피에 초점을 둔 교과서의 전개 방식

그림 3.3에 해당하는 교과서는 5권(Hecht, Serway, Giancoli, Tipler, Young)으로서 내용 전개는 엔트로피 개념의 역사적 발달 과정과 유사하다. 구체적인 과정은 다음과 같다. 우선 ‘자연현상은 비가역적이다.’ ‘단일 열원에 대해 열을 100% 일로 바꾸는 것은 불가능하다(켈빈-플랑크 서술).’ ‘열은 고온에서 저온으로 이동하려는 경향성이 있다(클라우지우스 서술).’와 같은 열역학 제2법칙에 대한 다양한 서술들을 열기관 및 냉동기관을 이용하여 설명하였다. 다음으로 열역학 제2법칙을 수량화하기 위해서는 엔트로피 개념이 필요함을 언급하면서 식 $dS = \delta Q/T$ 을 제시하고, 엔트로피를 ‘무질서도’ 또는 ‘에너지의 질적 저하 정도’로 정의하였다. 이후에는 클라우지우스 식을 이용하여 엔트로피 변화량을 계산하는 법을 다루고, 열역학 제2법칙이란 고립계의 엔트로피가 증가하는 것임을 정량적·정성적 방법으로 설명하였다. 마지막으로 볼츠만의 엔트로피 $S = k \ln \Omega$ 를 제시하고, 무질서도를 확률 또는 미시상태 수와 연결하였다.

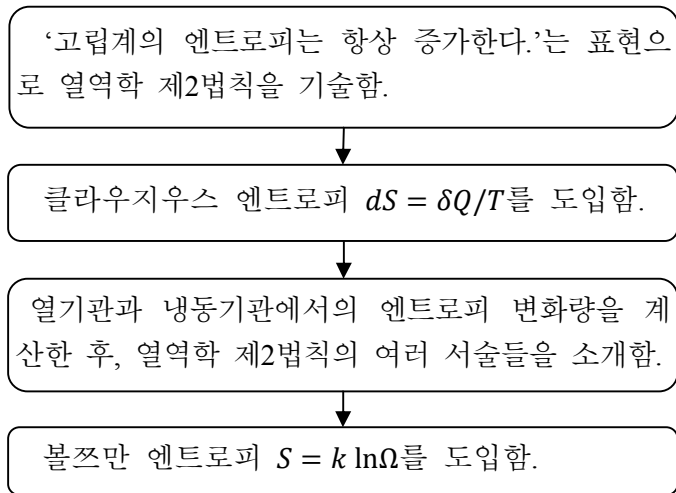


그림 3.4 Halliday *et al.* (2008)의 교과서의 전개 방식

한편, Halliday는 그림 3.3과 내용 전개방식은 비슷하나, 식 $dS = \delta Q/T$ 의 적용에 보다 초점을 두었다(그림 3.4 참고). 우선 식 $dS = \delta Q/T$ 을 정성적 설명 없이 도입한 후, 자유팽창과정과 같은 비가역상황에 대해서 식의 활용방법을 구체적으로 제시하였다. 이후에 열기관 및 냉동기관 상황에서 계의 엔트로피 변화량을 계산하고 이로부터 열역학 제2법칙에 대한 켈빈-플랑크 서술과 클라우지우스 서술을 이끌어냈다.

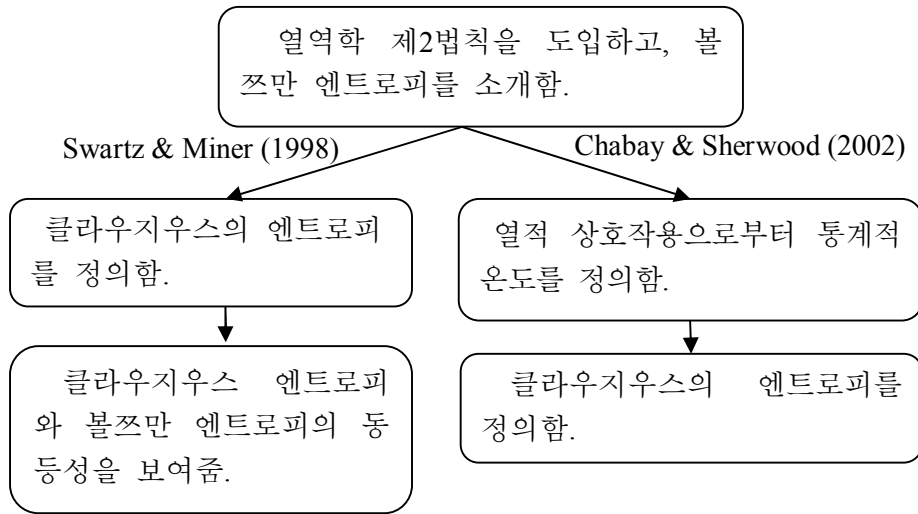


그림 3.5 볼츠만 엔트로피에 초점을 둔 교과서의 전개 방식

Swartz와 Chabay는 그림 3.5와 같이 엔트로피를 설명하는 데 있어서 볼츠만 식을 먼저 제시하였는데, 이는 일부 물리학자 및 물리교육 연구자들이 주장한 엔트로피 개념의 도입 방식과 일치한다(Baierlein, 1994; Lee, 2001; Reif, 1999; Schoepf, 2002). 하지만 이후의 클라우지우스 식의 설명에 있어서는 차이가 있었다. Swartz는 카르노의 정리($Q_1/T_1 = Q_2/T_2$)로부터 클라우지우스 식을 도입한 후, 이상기체 상황에서 두 식이 동등함을 수학적으로 증명하였다. 반면, Chabay는 두 계의 열적 상호작용 상황으로부터 통계역학적인 온도를 정의하고, 이로부터 클라우지우스의 엔트로피를 유도하였다.

3.3.4. 클라우지우스 식과 볼츠만 식의 도입 방식

여기에서는 여러 일반물리학 교과서에서 식 $dS = \delta Q/T$ 와 식 $S = k \ln \Omega$ 을 어떻게 도입하고 있는지를 살펴보았다. 식 $dS = \delta Q/T$ 에 대해서는 교

과서마다 그 설명 방식이 매우 다양하였는데, 식 $dS = \delta Q/T$ 을 제시함에 있어서 물리적 의미를 설명하지 않고 수학적으로만 정의하는 방식, 카르노 순환으로부터 식 $dS = \delta Q/T$ 을 유도하는 방식, 식 $dS = \delta Q/T$ 을 열역학 제2법칙 및 무질서도와 연결하여 설명하는 방식, 통계학적 온도로부터 식 $dS = \delta Q/T$ 을 유도하는 방식이 있었다. 한편, 식 $S = k \ln \Omega$ 에 대해서는 계의 특정한 상태에 대한 경우의 수를 구하는 방식으로 모든 교과서에서 동일하게 도입되었다.

(1) 식 $dS = \delta Q/T$ 의 도입에 대한 분석

● 엔트로피를 식 $dS = \delta Q/T$ 로 단순히 정의함

Halliday는 엔트로피 개념을 도입함에 있어서 계의 엔트로피 변화량은 단순히 식 $dS = \delta Q/T$ 을 사용하여 계산할 수 있다고 설명하였다. 이 식과 관련하여 엔트로피에 대한 정성적 설명은 제시하지 않았다. 다만, 자유팽창과 같은 비가역과정에 대해 엔트로피 변화량을 계산할 때에는 처음상태와 나중상태가 동일한 가역과정 경로를 취해 계의 엔트로피 변화량을 계산해야 하며, 사건이 비가역적으로 진행될 때 고립계의 엔트로피는 항상 증가한다고 서술하였다.

한편 Tipler와 Serway는 엔트로피를 ‘무질서도’로 정의하였으며, Halliday와 마찬가지로 식 $dS = \delta Q/T$ 을 이용하여 계의 엔트로피 변화량을 계산할 수 있다고 설명하였다. 하지만 무질서도와 주어진 식 사이의 관계에 대해서는 서술하지 않았다.

● 카르노 순환을 이용한 식 $dS = \delta Q/T$ 의 유도

Giancoli는 식 $dS = \delta Q/T$ 에 대한 설명을 카르노 기관에서부터 시작하였다. 카르노 기관으로부터 유도되는 식 $Q_H/T_H + Q_L/T_L = 0$ 을 이용하여,

그림 3.6과 같이 임의의 순환과정을 여러 개의 카르노 사이클로 나눈 후, 어떤 순환과정에서든지 식 $\oint dQ/T = 0$ 이 성립함을 증명하였다. 그리고 dQ/T 가 완전미분이 가능한 함수임을 보임으로서 이를 dS 라는 상태함수의 변화량으로 정의하였다. 하지만 Giancoli 또한 식의 의미를 정성적으로 해석하지는 않았다. Swartz도 카르노의 정리($Q_1/T_1 = Q_2/T_2$)로부터 식 $dS = \delta Q/T$ 을 유도할 수 있음을 언급하였다. 한편, 이러한 형태의 설명방식은 전통적으로 사용되어 온 것으로 추정되는데, 클라우지우스가 학생들에게 강의하기 위한 목적으로 쓴 책인 *The Mechanical Theory of Heat* (Clausius, 1879) 및 Halliday 등의 *Fundamentals of Physics*의 2판과 4판에서도 찾아볼 수 있다(Halliday & Resnick, 1974; Halliday et al., 1993).

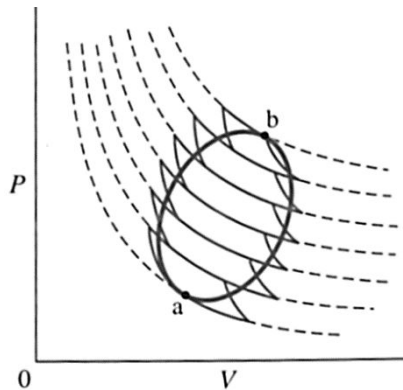


그림 3.6 여러 개의 카르노 사이클로 표현된 임의의 순환과정(Giancole, 2000)

● 열역학 제2법칙에 대한 서술로부터 식 $dS = \delta Q/T$ 의 유도

Hecht의 경우, 열역학 제2법칙의 여러 가지 서술들을 엔트로피와 연결하여 서술한 후에, 식 $dS = \delta Q/T$ 을 유도하였다. Hecht의 열역학 제2법칙에 대한 서술은 다음과 같다.

“(켈빈-플랑크 서술의 변형) 계에 열이 유입될 때 계의 엔트로피는 증가하며, 계로부터 열이 방출될 때 계의 엔트로피는 감소한다. 그리고 계가 마찰 없이 일을 하게 되면 엔트로피는 일정하게 유지된다.”

“(클라우지우스 서술의 변형) 계로 열이 유입되거나 유출될 때, 계의 온도가 높을수록 엔트로피 변화는 적다(p. 628).”

이로부터 Hecht는 엔트로피 변화량이 계가 받는 열량에 비례해야 하고 계의 온도에 반비례해야 한다는 결론을 내렸다($\Delta S \propto \Delta Q/T$). 한편 계가 일을 할 때 엔트로피가 일정하게 유지된다는 것을 서술하기 위해서는 ‘일’을 분자적 관점에서 해석해야 할 필요성이 있음을 언급하면서, 일은 미시적으로 매우 정렬된(ordered) 형태의 에너지를 기술하였다.

● ‘무질서도’와 식 $dS = \delta Q/T$ 의 연결

Young은 엔트로피를 계의 무질서한 정도로 정의한 후에, 이상기체의 가역등온팽창과정을 이용하여 식 $dS = \delta Q/T$ 이 어떻게 계의 무질서한 정도와 연결되는지를 보여주었다.

열(dQ)을 가하고 온도를 일정하게 유지한 채로 아주 조금만 기체를 팽창시킨다고 생각해 보자. 그러면 기체는 받은 열량만큼 외부에 일을 하게 된다. $dQ = dW = pdV = nRT dV/V$, 따라서 $dV/V = dQ/nRT$ 이다.

기체가 등온팽창을 하게 되면, 분자들이 이동할 수 있는 위치가 많아지므로 계는 보다 무질서한 상태가 되는데, 따라서 dV/V 는 무질서한 정도를 측정하게 되며 이는 dQ/T 에 비례한다. 즉, 계의 온도가 T 이고 계가 가역적으로 작동할 때에 엔트로피는 $dS = dQ/T$ 로 정의된다(p. 691).

이 설명을 이해하기 위해서는 무질서도에 대한 미시적이고 통계적인

관점의 이해가 필요하다. 하지만 이 책에서 통계적인 관점의 엔트로피는 해당 장의 맨 뒷부분에 선택과제로 제시되어 있다.

● **통계학적 온도로부터 식 $dS = \delta Q/T$ 의 유도**

Chabay는 카르노 사이클에 대한 언급 없이 열적 상호작용을 하는 두 계의 열적 평형 조건을 이용하여 식 $dS = \delta Q/T$ 을 유도하였다. 우선 통계역학 기반의 아인슈타인의 고체모형²에서 볼츠만의 엔트로피($S = k \ln \Omega$)를 정의하고, 평형상태에서의 입자들의 분포 형태에 대해 소개하였다. 그리고 두 계의 열적 상호작용 상황에서 엔트로피가 최대가 되기 위해서는 각 계로 이동한 열에 대한 엔트로피 변화 정도가 같아야 된다는 것을 보이고($dS_1/dq_1 = dS_2/dq_2$), 이를 온도의 역수로 정의하였다($1/T = \partial S/\partial E_{int}$). 다음으로 계에 열이 유입되는 경우는 입자(quanta)들의 배열이 바뀔 수 있지만 계가 일을 받는 경우에는 배열이 바뀔 수 없음을 설명하고, 따라서 이 상황에서 $\Delta E_{int} = Q$ 이 성립함을 설명하였다. 마지막으로 $1/T = \Delta S/\Delta E_{int} = \Delta S/Q$ 로부터 클라우지우스의 식인 $\Delta S = Q_{rev}/T$ 을 이끌어냈다.

(2) 식 $S = k \ln \Omega$ 의 도입에 대한 분석

식 $S = k \ln \Omega$ 에 대한 도입은 모든 교과서에서 거의 동일하다. 어떤 사건이 일어날 경우의 수를 구하는 문제상황으로부터 경우의 수를 Ω 로 두고, 엔트로피를 $S = k \ln \Omega$ 로 정의하였다. 그리고 Ω 가 커질수록 사건이 일어날 확률이 커지며, 따라서 자연계에서 사건은 확률이 커지는 방향으로 일어난다고 서술하였다. 하지만 미시상태를 설명하는 맥락에 있어서

² 고체 물질을 구성하는 원자들에 대해서 원자 사이의 인력을 진동자 형태로 표현하고 진동자들의 진동수가 모두 같다고 가정하는 모형.

대부분의 교과서는 동전던지기나 카드놀이 등의 일상생활과 관련된 비유를 사용한 반면, Chabay는 고체에 대한 미시적 모형을 사용하였다.

(3) 엔트로피 식의 도입 방식에 대한 논의

클라우지우스 식의 도입 방식에 대한 분석결과를 살펴보면, 교과서마다 설명방식이 다른 것을 확인할 수 있는데, 이는 클라우지우스 식을 사건의 방향성과 연결시킬 수 있는 최적의 방법을 찾아내지 못하였기 때문으로 보인다. 특히 무질서도 개념(Young)이나 계에 일어나 열이 유입되었을 때의 에너지의 유용성 측면(Hecht)을 고려하여 클라우지우스 식을 유도해내는 경우에는 무질서도나 에너지의 유용성 등에 대한 정의 자체가 모호하다는 점을 고려하면 식의 유도 과정이 학생들에게 이해되지 않을 수 있다. 카르노 기관을 이용하여 엔트로피 식을 유도하는 경우에는 이 식이 어떻게 사건의 방향성과 연결되는지 알기가 어렵다. 따라서 클라우지우스 엔트로피를 무리하게 사건의 방향성과 연결시켜 식을 유도하기보다는 Halliday와 같이 먼저 식을 제시하고 식의 사용법을 충분히 알려준 후에, 볼츠만 엔트로피를 이용하여 엔트로피가 사건의 방향성과 어떻게 연결되는지를 설명하고 Chabay와 같이 볼츠만 엔트로피와 클라우지우스 엔트로피 사이의 관계를 보여주는 방법을 고려해 볼 수도 있다. 확률적 관점으로 설명되는 사건의 방향성이 거시적 관점에서 측정 가능한 물리량들과 어떤 관계가 있는지를 제시함으로써 학생들은 엔트로피가 어떻게 사건의 방향성과 연결이 되는지, 볼츠만 엔트로피와 클라우지우스 엔트로피 사이에는 어떤 관계가 있는지 어느 정도 이해할 수 있을 것이다.

3.3.5. 교과서에 제시된 예제

여기에서는 교과서 본문에 삽입되어 있는 예제(example) 및 내용설명을 위해 제시된 상황들을 분석하였다(표 3.4 참고). 주로 식 $dS = \delta Q/T$ 와 관련된 예제 및 상황들이 많았다. 표 3.4에서 ‘○’는 계에 대한 물리량이 숫자로 주어지고 문제를 풀이하는 상황을 의미하며, ‘△’는 물리량이 문자로 표시되어 있고 수식을 전개하는 상황을 의미한다.

표 3.4 교과서에 제시된 예제들

| 구분 | 예제 상황 | 교과서 | | | | | | | |
|---|-------------------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | He | Sr | Gi | Ti | Ha | Yo | Sw | Ch |
| 가역과정 에서의 $dS = \delta Q/T$ 의 사용 | 계의 엔트로피 변화량 계산 | | | | | | | | |
| | - 0°C 얼음이 녹는 상황, 등온과정, 단열과정 등 | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | ○ | △ | △ |
| | - 카르노 순환 | △ | △ | △ | ○ | △ | ○ | △ | △ |
| | ‘계+주위환경’의 엔트로피 변화량 계산 | | | | | | | | |
| | - 0°C 얼음이 녹는 상황, 등온과정, 단열과정 등 | △ | △ | ○ | ○ | △ | ○ | △ | △ |
| | - 카르노 순환 | △ | | | | ○ | | ○ | △ |
| 비가역과정 에서의 $dS = \delta Q/T$ 의 사용 | ‘계+주위환경’의 엔트로피 변화량 계산 | | | | | | | | |
| | - 자유팽창과정 | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| | - 일이 열로 전환되는 과정 | | | | | ○ | | | |
| | - 열이 고온에서 저온으로 이동하는 과정 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ |
| $S = k \ln \Omega$ 의 사용 | 일상상황(예:동전던지기)에 대해 미시상태 수 계산하기 | ○ | ○ | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | 자유팽창과정에서 미시상태 수 계산하기 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | | | |
| | 고체 모형에서 미시상태 수 계산하기 | | | | | | | | ○ |

○: 문제풀이상황, 주요 물리량들이 숫자로 주어짐
 △: 수식 전개 상황, 주요 물리량들이 문자로 주어짐.

가역과정에서의 식 $dS = \delta Q/T$ 을 활용하는 예제는 계에 열이 유입 또는 유출되거나 계가 일을 하는 경우, 카르노 순환에 대해서 계의 엔트로피 변화량을 계산하는 경우 등이 있었다. 카르노 순환에서 ‘계+주위환경’의 엔트로피 변화량이 0임을 계산해 보는 경우는 적은 편이었다. 참고로 여기에서 말하는 계는 열기관(또는 작동물질)을 의미하며, 주위환경은 열기관과 접촉하는 열원을 의미한다.

한편, 비가역과정에서 식 $dS = \delta Q/T$ 을 활용하는 예제는 주로 고온에서 저온으로의 열의 이동상황과 자유팽창과정이 있었다. 자유팽창과정은 식 $dS = \delta Q/T$ 을 잘못 적용하기 쉬운 대표적인 예제로서(이주현, 송진웅, 2007), 비가역적으로 작동하는 계는 처음상태와 나중상태가 동일한 가역과정을 임의로 설정하고 가역과정경로를 따라 계산을 해야 한다. 이는 고전적인 교재에서 보다 많이 강조되고 있었는데, 특히 Halliday는 식 $dS = \delta Q/T$ 의 적용에 있어서 등온팽창과정과 자유팽창과정에서 어떻게 다른지를 구체적으로 설명하고 있으며, 비가역과정에서의 이 식의 적용에 대한 이해를 돕고 있었다. 하지만 비탄성충돌과 같이 일이 열로 바뀌는 경우에 대한 계산문제는 매우 적었다.

식 $S = k \ln\Omega$ 의 적용에 대해서는 7권의 교과서에서 동전놀이나 카드놀이와 같은 일상생활의 상황을 제시하였다. 예를 들면, 동전을 N 개 던졌을 때 그 중 앞면이 n 개가 나올 경우의 수를 계산하고 이를 엔트로피 개념과 연결하여 설명하였다. 이러한 비유는 고등학교 수준의 수학만 알고 있으면 충분히 문제상황을 이해할 수 있으며, 따라서 학생들이 엔트로피 개념을 쉽게 이해할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 계에 열이 유입되거나 일이 가해졌을 때와 같은 열역학적 상황과 직접적으로 연결시키기 어려우며, 특정한 물리적 상황에 대한 정량적인 계산 및 다른 열역학적 변수들과의 관계를 이해하는 데 있어서는 한계가 있다.

대부분의 교과서에서 제시하는 물리적 상황으로는 자유팽창상황이 있었다. 이 때의 미시상태 수는 입자가 위치할 수 있는 공간의 크기에 의해 결정되는데, 실질적으로 이상기체에서의 미시상태수는 계의 부피뿐만 아니라 온도 및 입자 수에 의해서도 결정된다. 따라서 계의 온도변화 및 입자 수 변화에 따른 미시 상태수의 변화를 고려하는 문제도 제시할 필요가 있다.

Chabay의 경우, 식 $S = k \ln \Omega$ 을 도입함에 있어서 아인슈타인의 고체모형을 사용하였다. 고체에서의 아인슈타인 모형이나 고전적인 이상기체모형은 물리계를 기술하는 데 있어서 중요하게 받아들여지며, 엔트로피를 설명하는 것이 용이할 뿐만 아니라 계의 비열 예측 및 맥스웰-볼츠만 속력분포의 유도 등도 가능하다. 하지만 이러한 모형을 사용할 때에는 에너지의 양자화에 대한 개념이나 입자의 분포를 위치와 운동량으로 표현하는 위상공간(phase space)에 대한 개념 등이 필요하며, 따라서 수업 전에 학생들이 원자적 관점에서의 물리학 이론에 대한 지식을 갖출 필요가 있다.

3.3.6. 가역과정에 대한 정의

열역학 제2법칙에 대한 다양한 서술들(표 3.1 참고)은 대체로 비가역적 상황을 상정하고 있으며, 교과서에 제시된 예제들도 비가역적 상황에서 에너지의 전달 및 에너지 전환의 특징이 잘 드러난다. 한편, 학생의 어려움과 관련된 연구에 따르면, 학생들은 가역과정에 대해 이해의 어려움을 겪고 있으며, 엔트로피 증가의 법칙을 적용함에 있어서 고립계에 대한 인식이 부족하고, 엔트로피와 일 사이의 관계를 잘 알지 못하는 것으로 나타났다(이주현, 송진웅, 2007). 이러한 어려움을 해결하기 위해서는 가역과정에 대한 이해가 필수적이다. 가역과정에 대한 일반물리학 교

과서의 대표적인 설명을 찾아보면 다음과 같다.

“마찰이나 난류, 그리고 원치 않는 열의 전달이 없으며, 팽창이나 압축 그리고 온도와 압력의 변화는 매우 천천히 진행되는 과정을 생각할 수 있다. 이러한 진행과정에서 계는 항상 평형상태에 있으며 이는 p - V 그림으로 표현할 수 있다. 이러한 방식으로 진행되는 과정을 가역과정이라고 하는데, 외부 조건을 매우 조금씩 변화시켜 열역학적 과정을 반대로 진행시킬 수 있기 때문이다. (Halliday *et al.*, 1993, p.613)”

학생들은 가역과정에 대해 설명할 때, ‘가역’이라는 용어 때문에 거꾸로 되돌릴 수 있는 과정, 또는 거꾸로 자발적으로 되돌아가는 과정 등으로 주로 생각한다(이주현, 2007). 교과서에서도 거꾸로 되돌릴 수 있는 과정(Young, Giancole, Hecht, Tipler)이라는 표현이 상당히 많이 등장하는데, Young과 Hecht의 경우에는 ‘어떤 계에 대해 주위환경을 아주 조금씩 변화시켜서 매 순간순간 계가 평형상태에 놓일 수 있도록 사건을 진행시킨다면, 반대 과정을 거쳐서도 계가 처음 상태로 되돌아올 수 있는 과정’으로 기술하였다. 그리고 이러한 설명을 통해 준정적 과정이 가역과정의 필요조건임을 언급하였다. 하지만 여기서 말하는 ‘반대 과정을 거친다’라는 표현만으로는 가역과정은 어떤 조작과정을 거치는지를 충분히 보여주지 못한다.

준정적 과정을 기술하는 또 다른 방식은 p - V 그림에 계의 매 순간의 상태가 표시되어 있는지의 여부를 확인하는 것이다. 즉, 한 상태에서 다른 상태로의 이동을 선으로 표현할 수 있는 경우를 의미한다. 여기서 주의할 점은 준정적 과정은 가역과정의 충분조건이 아닌 필요조건이기 때문에 p - V 그림에 계의 매 순간의 상태를 나타낼 수 있는 과정이 항상 가역과정은 아니라는 것이다. 계가 준정적 과정을 따르더라도 외부와의 열

이나 일의 교환 방식에 따라 그 과정은 비가역과정일 수가 있다 (Samiullah, 2007; Thomsen, 1960). 이러한 측면에서 Young의 ‘가역순환과정은 p - V 경로 상에서 닫힌 경로를 나타낸다(p. 695).’는 표현이나 Serway의 ‘가역과정에서는 p - V 그림을 따라 계가 처음상태로 되돌아갈 수 있다(p. 674).’등의 표현은 해석에 있어서 주의가 요구된다. 각 표현에 대한 역이 항상 성립하는 것이 아님을 인지할 필요가 있다.

Chabay는 다른 교과서와는 다르게 가역과정을 ‘어떤 사건을 녹화한 후 비디오 테이프를 거꾸로 되돌렸을 때 그 과정이 합리적(reasonable)인 것으로 판단할 수 있는 경우’로 기술하면서, 가역과정의 대표적인 예로서 1909년 Rutherford 등이 수행한 알파입자 산란실험과 두 물체의 탄성충돌 상황을 제시하였다. 여기에서 말하는 거꾸로 되돌린다는 의미는 시간을 거꾸로 되돌릴 때 나타나는 행위들을 수행한다는 것으로서(예: 추를 피스톤 위에 올려놓는 과정이 있다면, 이것을 거꾸로 되돌린다는 의미는 피스톤 위에 올려져 있는 추를 들어낸다는 뜻임.) 이러한 설명을 통해 가역적으로 조작한다는 것의 의미를 명확히 하였다.

한편, 어떤 과정이 가역과정이기 위해 만족해야 할 조건에 대해서는 대부분의 교과서에서 ‘과정이 준정적이어야 한다.’는 서술과 ‘마찰이나 난류와 같은 것이 존재하지 않아야 한다.’는 서술을 제시하였다. 하지만 카르노가 가역과정의 중요한 요소로 생각했던 접촉하는 두 물체 사이에 온도 차가 존재해서는 안 된다는 설명(Carnot, 1988)을 한 책은 상대적으로 적었다(표 3.5 참고).

표 3.5 교과서에 나타난 가역과정의 조건

| 가역과정의 조건 | 교과서 | | | | | | | |
|--|-----|----|----|----|----|----|----|----|
| | He | Se | Gi | Ti | Ha | Yo | Sw | Ch |
| 준정적 과정 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 마찰이나 난류가 없어야 함 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 온도 차가 나는 두 물체 사이에 접촉에 의한 열의 이동이 없어야 함. | | | | ○ | | ○ | | ○ |

Chabay는 다른 책과는 달리 ‘준정적 과정’을 단순히 계의 변화를 편리하게 기술하기 위해 도입된 과정으로 소개하면서 이 과정을 가역과정과 연결시키지 않았다. 또한 외부에서 계에 힘을 가해 계 내부의 기체의 압력이 급격하게 변하는 경우에 대해서도 그 과정이 가역적인지의 여부를 판단하지 않았다. Chabay는 수직으로 세워진, 기체가 채워져 있는 주사기의 피스톤 위에 무거운 추를 올려놓으면(그림 3.7 참조), 기체가 들어있는 공간이 마치 수직으로 피스톤과 실린더 바닥을 연결하는 용수철과 같은 역할을 하여 추와 피스톤이 계속 진동할 것이라고 서술하였다. 이러한 설명으로부터 Chabay는 열역학적 과정이 준정적이지만 계가 가역적으로 작동할 수 있는 경우가 있다고 판단한 것으로 보인다. 하지만 이러한 관점은 잘못된 것으로서, 본 논문의 5장에서 이 과정은 비가역과정이며 추와 피스톤은 결국 멈추게 됨을 설명할 것이다. 여기에서 핵심이 되는 것은 수많은 입자들이 서로 충돌하는 상황에서 계가 비평형상태에 놓여있다면, 최종적으로 계는 평형상태로 이동한다는 것이다.

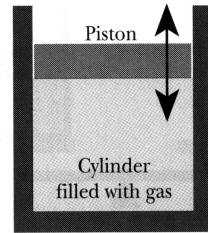


그림 3.7 마찰 없이 수직으로 진동하는 피스톤 (Chabay & Sherwood, 2002)

비가역과정은 대체로 ‘자연계에서 일어나는 사건에는 방향성이 있다.’라는 서술로부터 시작한다. 하지만 가역과정은 우리가 실제로는 관찰할

수 없는 과정이기 때문에 교과서에서는 어떠한 방식으로 이 개념이 도입되는지 그 맥락을 살펴볼 필요가 있다. 가장 일반적인 방법은 카르노 기관을 소개하면서 ‘두 열원 사이에서 최대 효율을 내는 기관을 작동시키기 위해서는 그 기관은 가역적으로 작동해야 한다.’라는 서술로부터 시작하는 방식이다(Tipler, Giancoli, Serway, Swartz, Chabay). 하지만 교과서에서 카르노 기관을 도입하는 목적이 열기관의 최대 효율에 한계가 있다는 열역학 제2법칙을 설명하기 위한 것이라면, 이 부분을 학습하는 학생들은 가역과정이 무엇인지를 이해하는 데에 학습의 초점을 두지 않을 수도 있다. 한편, Halliday는 등온팽창과정과 단열팽창과정을 비교하면서, 계의 엔트로피 변화량을 계산할 때 $\Delta S = \int_i^f dQ/T$ 를 이용하려면 매 순간의 계의 상태를 결정할 수 있어야 하며, 이렇게 매 순간 평형상태에 놓이는 과정을 가역과정으로 소개하였다. 이와 유사하게 Hecht도 등온팽창과정에 대해 설명한 후 p - V 그림에서 매 순간 계의 상태를 표시할 수 있는 과정을 가역과정으로 설명하였다. Young은 우리가 관찰하는 모든 사건이 비가역적이지만 거의 가역적인, 매우 이상적인 과정을 상상할 수 있다는 언급으로부터 가역과정을 소개하고 있다.

고등학교 물리Ⅱ 교과서에서는 가역과정을 일반물리학 교과서와 상당히 다르게 설명하고 있다. 본 연구는 일반물리학 교과서를 대상으로 진행된 연구이지만, 여기에서는 고등학교 물리Ⅱ 교과서의 가역과정에 대한 설명방법도 살펴보았다.

7차 교육과정을 기반으로 발간된 교과서 9종(고재걸 등, 2004; 광근식 등, 2004; 권재술 등, 2002; 박봉상 등, 2002; 방형찬 등, 2002; 이춘우 등, 2002; 이희복 등, 2004; 장준성 등, 2003; 채광표 등, 2003)과 2009 교육과정에 의해 발간된 교과서 2종(곽성일 등, 2011; 김영민 등, 2011)의 열역학 제2법칙에 대한 표현들을 살펴본 결과, 교과서에 나타

난 대표적인 설명은 다음과 같다.

“진자는 공기의 저항이 없을 때 A점에서 놓으면 B점까지 갔다가 다시 A점으로 돌아온다. 이렇게 외부에 아무런 흔적도 남기지 않고 스스로 원래의 상태로 되돌아갈 수 있는 현상을 가역 과정이라고 한다(곽성일 등, 2011, p. 91).”

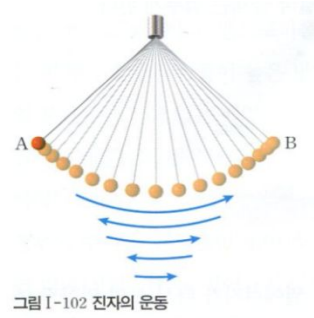


그림 3.8 가역과정의 예로서의 단진자 운동 (곽성일 등, 2011)

총 11종의 교과서 중, 8권의 교과서가 ‘물체가 외부에 어떠한 변화도 남기지 않고 처음 상태로 되돌아가는 과정’을 가역과정으로 정의하였으며, 가역과정의 대표적인 예로써 단진동 운동(단진자, 용수철 진자)을 언급하였다.

2권의 교과서에서는 가역과정에 대한 설명을 하지 않고 비가역과정에 대해서만 설명하거나(장준성 등, 2003), 가역과정에 대한 정의 없이 예(화학퍼텐셜에너지↔전기에너지)만을 제시하였다(김영민 등, 2011). 1권의 교과서에는 가역과정에 대한 설명 대신에 “역학과정”이라는 용어를 사용하였는데, 역학과정을 다음과 같이 설명하였다.

“물체 하나가 움직이는 경우에만 관심을 두면, 그 물체가 움직이는 경로는 뉴턴의 운동 법칙에 의해 물체가 받는 힘과 처음 조건에 따라 결정된다. 또한 주어진 조건에 따라 똑같은 운동이 거꾸로 진행될 수도 있는데 이를 역학과정이라고 한다(방형찬 등, 2002, p. 119).”

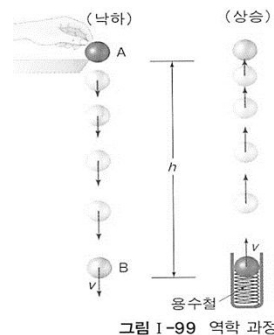


그림 3.9 역학 과정에 대한 예시 (방형찬 등, 2002)

이 과정은 다른 교과서에서 말하는 가역과정과 유사한 상황을 다루고 있으나 그 의미는 전혀 다르다. 다른 고등학교 교과서에서는 가역과정을 설명함에 있어서 외부의 변화 없이 계가 처음상태로 되돌아올 수 있는가에 초점을 두었지만 이 교과서는 계가 수많은 입자들로 구성되어 있는지의 여부에 초점을 두어, 상호작용하는 입자 수가 매우 적은 경우를 역학 과정으로, 매우 많은 입자들이 서로 충돌하거나 상호작용하는 경우를 열역학적 과정으로 정의하였으며, 열역학적 과정에서는 사건이 비가역적으로 일어나는 열역학 제2법칙이 성립됨을 설명하였다. 열역학 제2법칙에서의 비가역성의 근원이 수많은 입자로 구성된 계에서의 입자 간 상호작용 또는 충돌에 의한 것임을 고려할 때 후자의 형태로 사건의 가역성과 비가역성을 설명하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

결론적으로 일반물리학 교과서에서는 가역과정을 카르노 기관을 도입하면서 소개하는데, ‘주위환경의 변화 없이 거꾸로 되돌릴 수 있는 과정’으로 정의하였으며, 가역과정을 만족시키기 위해서는 열역학적 과정이 준정적이어야 하며 마찰이 없어야 한다고 기술하였다. 하지만 ‘거꾸로 되돌릴 수 있는 과정’이란 무엇인지에 대한 의미가 불분명하기 때문에 조작적 내용이 포함된 정의가 필요한데 Chabay가 제시한 ‘어떤 사건을 녹화한 후 비디오 테이프를 거꾸로 되돌렸을 때 그 과정이 합리적인 것으로 판단할 수 있는 경우’라는 설명은 조작적 내용이 포함된 예로 볼 수 있다. 한편 가역과정의 필요조건 중 ‘온도 차가 나는 두 물체의 직접적인 접촉이 없어야 한다.’는 설명은 교과서에서 강조가 되지 않고 있는데, 어떤 열기관이 가역적인지의 여부를 판단하는 데 있어서 이 조건은 핵심역할을 하며 따라서 이 조건에 대한 강조가 필요하다. 이에 대해서는 연구 2에서 자세하게 다룰 것이다.

3.3.7. 카르노 기관의 작동과정에 대한 설명

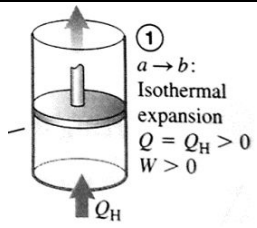
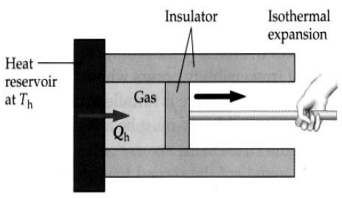
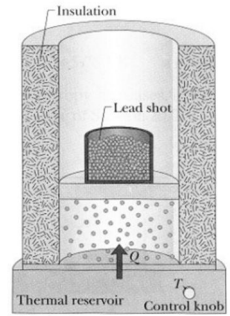
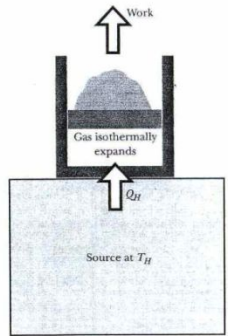
가역과정에서의 에너지 전환 및 에너지 이동을 설명할 수 있는 대표적인 예로는 카르노 기관이 있다. 이러한 측면에서 카르노 기관이 어떻게 서술되어 있는지 살펴보는 것이 필요하다.

카르노 기관은 동일한 두 열원에 대해 한 바퀴 순환할 동안 최대 효율을 내는 기관으로서, 이를 위해서는 ‘계+주위환경’의 엔트로피의 생성이 없어야 한다. 따라서 열기관은 준정적으로 작동해야 하고, 마찰과 같이 역학적 에너지가 내부에너지로 전환되는 현상이 일어나지 않아야 하며, 고온의 물체와 저온의 물체가 직접적으로 접촉하지 않아야 한다. 교과서에서 이러한 요소들이 어떻게 표현되어 있는지를 살펴보았다.

대부분의 교과서가 카르노 기관을 가역기관이라고 소개하면서 기관이 가역적으로 작동하기 위해서는 위에서 말한 조건들이 성립해야 함을 정성적으로 설명하고 있었다. 하지만 정량적인 계산을 통해 카르노 기관의 각 과정이 가역적인지의 여부를 설명하는 부분은 부족했다. ‘계+주위환경’의 엔트로피 생성에 대해서 3.3.5의 표 3.4에 따르면 절반 정도의 고전적인 교과서에서 이를 다루지 않는 것으로 조사되었다. 오히려 교과서에서는 카르노 기관이 한 바퀴 순환한 후의 계의 엔트로피 변화를 계산하는데 초점을 맞추고 있었다. 특히 학생들이 주로 참고하는 Young과 Serway에서는 카르노 기관을 설명함에 있어서 주위환경의 엔트로피 변화량에 대해 거의 설명하지 않고 한 순환과정 동안 계의 엔트로피 변화량의 총합이 0이며, 따라서 가역적으로 작동하는 기관은 어떠한 경로를 따르던간에 한 바퀴 순환을 한다면 계의 엔트로피 변화량은 0임을 강조하고 있었다. Halliday에서는 열기관이 한 바퀴 순환하는 동안 계의 엔트로피 변화량이 0임을 이용하여 카르노 기관의 열효율을 열원의 온도로 표현하는 방법을 설명하고 있었다. 이러한 계산은 엔트로피가 상태함수라는 것을

이해하는 데에는 도움을 줄 수 있지만, 가역기관이란 ‘계+주위환경’의 엔트로피 생성이 없는 기관임을 인식시키는 데에는 어려움을 줄 수 있다.

표 3.6 가역등온팽창과정에 대한 그림들

| 구분 | 가역등온팽창과정에 대한 그림들 | |
|-----------------------------|--|--|
| <p>준정적 과정이 잘 표현되지 않은 경우</p> |  <p>(Tipler & Mosca, 2004)</p> |  <p>(Young <i>at al.</i>, 2008)</p> |
| <p>준정적 과정이 잘 표현된 경우</p> |  <p>(Halliday <i>at al.</i>, 2008)</p> |  <p>(Chabay & Sherwood, 2002)</p> |

‘준정적’이라는 서술과 관련하여 카르노 기관의 작동 과정에 대한 교과서 그림을 살펴보았다(표 3.6 참고). 8권의 교과서 중 그림이 제시되어 있지 않은 1권의 교과서(Swarts)를 제외하고 7권의 교과서에 대해 카르노 순환 과정 중 하나인 가역등온팽창과정을 살펴본 결과, 5권의 교과서에서 기체가 팽창하는 과정을 단순히 추를 들어올리거나 피스톤을 잡아당기는 형태로 표현하였다. 하지만 이와 같은 표현은 카르노 기관을 어떻게 준정적으로 작동시킬 수 있는지에 대한 정보를 제공하지 않으며, 피스톤이

나 추의 무게가 일정한 것으로 묘사되기 때문에, 기체가 팽창하면서 기체의 압력이 줄어드는 것에 대한 정보가 모호하게 제공된다. 반면, Halliday와 Chabay는 준정적 과정을 피스톤 위에 올려져 있는 매우 작은 알갱이들(납알, 모래알 등)을 하나씩 들어올리거나 내려놓는 과정으로 표현하였다. 즉, 기체의 압력이 순간순간 매우 조금씩 변화되어 계가 거의 평형상태에 놓여있음을 보여준다. 이러한 표현이 가역과정을 기술하는데 있어서 보다 적절한 것으로 판단된다.

마지막으로 카르노 기관이 최대 효율을 얻기 위해 갖춰야 할 조건에 대한 교과서의 설명을 살펴보았다. 최대 열효율을 얻기 위해 열기관을 어떻게 구성해야 하는가라는 질문에 대해서 대부분의 교과서가 가역적으로 작동해야 하며, 마찰이나 난류와 같이 역학적 에너지가 내부에너지로 전환되는 과정이 없어야 한다고 기술하였다. 하지만 가역과정에 대한 설명에서와 마찬가지로 온도 차가 나는 두 물체가 직접적으로 접촉하지 않아야 한다고 언급한 교과서는 3권(Tipler, Young, Chabay)에 불과하였다. 이러한 측면은 가역과정이 어떠한 방식으로 일어나는지를 이해하는데 어려움을 주는 요소로 작용할 수 있다.

카르노 기관에 대한 교과서 설명을 정리해보면, 카르노 기관은 가역적으로 작동하는 기관이라는 설명을 강조하고 있으나 가역적으로 작동하기 위한 구체적 과정에 대한 설명이 부족하며, 카르노 기관이 가역기관임을 설명하는 데 있어서 매 순간 총 엔트로피가 일정하게 유지되어야 한다는 명제를 사용하지 않고 있었다.

3.4. 결론 및 시사점

엔트로피 개념은 전통적으로 학생들이 이해하기 어려운 개념으로 여겨

져 왔으며, 따라서 교수 방법의 개선이 요구되는 물리학 영역 중 하나이다. 본 연구에서는 8종의 일반물리학 교과서를 대상으로 열역학 제2법칙과 엔트로피에 대한 교과서 설명의 전체 흐름 및 수식의 도입 방식과 예제, 그리고 가역과정과 카르노 순환에 대한 기술을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 교과서에서 열역학 제2법칙과 관련한 8가지의 서술과 엔트로피에 대한 2가지 표현을 찾아내었다.
- 교과서에서는 일반적으로 엔트로피를 식 $dS = \delta Q/T$ 을 중심으로 열역학적 관점으로 기술하나, Chabay와 Swartz는 식 $S = k \ln \Omega$ 을 중심으로 통계적 관점으로 기술하였다.
- Hecht는 열역학 제2법칙에 대한 정성적 설명을 풍부하게 제공하는 반면, Halliday는 정성적 설명보다는 식 $dS = \delta Q/T$ 의 활용에 초점을 두고 있었다.
- 식 $dS = \delta Q/T$ 의 도입을 살펴보면, 식에 대한 정성적 설명 없이 단순히 식만 제시하는 경우, 카르노 순환을 이용한 역사적 접근 방식을 따르는 경우, 열역학 제2법칙에 대한 서술이나 무질서도라는 개념으로부터 식을 유도하는 경우, 통계적인 온도로부터 식을 유도하는 경우가 있었다.
- 식 $dS = \delta Q/T$ 와 관련된 예제를 살펴보면, 가역과정에서의 고립계의 엔트로피 변화량이 0임을 확인해 보는 문제와 비가역과정에서의 일이 열로 전환되는 상황에서 엔트로피 변화량을 계산해 보는 문제가 적었다.
- 식 $S = k \ln \Omega$ 의 도입을 살펴보면, 모든 교과서가 계의 특정한 상태에 대한 경우의 수(Ω)를 구하는 방식을 사용하고 있었으며, 대

체로 일상생활과 관련된 맥락에서 서술되었다.

- 가역과정에 대한 설명과 관련하여, 가역과정이 무엇인지에 대한 조작적 정의가 부족하였으며, 가역과정의 필요조건 중 하나인 ‘온도 차가 나는 두 물질의 접촉이 없어야 한다’는 진술을 언급하지 않는 교과서가 많았다.
- 카르노 순환에 대한 설명에 있어서는, 작동과정과 관련된 그림에서 피스톤이 가역적으로 작동하는 것에 대한 표현이 잘 나타나지 않으며, 계와 주위환경의 엔트로피 변화를 사건의 가역성과 연결하여 진술하는 것이 부족함을 확인하였다.

위의 연구결과로부터 도출된 시사점은 다음과 같다.

엔트로피 개념의 접근에는 열역학적 접근과 통계적인 접근이 존재하며, 엔트로피 개념을 잘 이해하기 위해서는 개념에 대한 의미 파악 및 수식의 적용, 그리고 다양한 설명들 사이의 관계에 대한 파악이 필요하다. 내용의 제시 순서는 학생의 수준 및 수업 목표를 고려하는 것이 중요할 것이다. 식 $S = k \ln \Omega$ 을 이용하여 엔트로피를 학습하는 것이 엔트로피에 대한 직관적 이해에 도움을 준다는 연구들이 있었으나, 일상생활의 비유를 도입하여 이 식을 설명하는 경우에는 다양한 열역학적 상황을 제시하기 어려우며, 물리적 모형을 사용하는 경우에는 학생들이 미시적이고 양자적인 물리학에 대한 상당한 수준의 지식을 갖추고 있어야 한다. 반면에 식 $dS = \delta Q/T$ 은 정성적인 이해의 어려움이 있지만, 계산의 측면에 있어서 식 $S = k \ln \Omega$ 보다 유용하며, 특히 공학이나 화학에서는 계의 열 출입 문제를 많이 다루기 때문에 일반물리학 수준에서 식 $dS = \delta Q/T$ 을 잘 가르치는 것도 중요하다.

만약 계의 엔트로피 변화량을 잘 계산하는 것에 수업의 목적이 있다면

Halliday와 같이 식 $dS = \delta Q/T$ 의 특징을 잘 설명하고 다양한 상황에 대해 문제를 풀어보는 것이 필요할 것이다. 한편 식 $dS = \delta Q/T$ 이 사건의 방향성과 어떻게 연결되는지를 설명하는 것이 목적이려면, Swartz와 같이 $S = k \ln \Omega$ 에 대해 먼저 설명한 후에 두 식의 동등성을 증명하는 방법이 있다. 엔트로피와 관련된 다양한 정성적 설명들을 확인하고 이들 사이의 관계를 잘 설명하는 데 목적을 둔다면, Hecht와 같이 여러 가지 서술들이 서로 어떻게 연결될 수 있는지를 보여주는 것이 필요하다. 학생이 미시적인 관점에서의 물리학에 익숙하다면, Chabay와 같이 물리적 모형을 도입하여 엔트로피를 학습하는 것이 유용하다. 식 $S = k \ln \Omega$ 로부터 통계적인 온도 개념을 유도하고 이를 식 $dS = \delta Q/T$ 과 연결하는 과정은 열역학 제2법칙과 엔트로피에 대한 전체적인 이해에 도움을 준다. 물론 열역학적 관점에서 열이나 일, 사건의 가역성과 엔트로피 등의 여러가지 개념들이 서로 어떠한 관계에 있는지 파악하는 것이 중요하며, 이러한 측면에서 카르노 기관의 작동과정 및 이와 관련된 물리량들을 잘 설명하여, 열역학에서의 가역과정과 비가역과정의 의미를 학생들이 명확히 인지할 수 있도록 도와주는 것도 중요하다.

한편, 가역과정은 열역학적 과정 중에서 가장 이상화된 과정으로서, 계의 엔트로피 변화량을 계산하는 데 있어서도 반드시 알아야 할 중요한 개념이다. 하지만 교과서에서는 가역과정이 무엇인지, 어떤 과정이 가역과정이기 위해서는 어떤 조건을 만족해야 하는지, 가역과정으로 구성된 카르노 기관은 어떠한 방식으로 작동하는지에 대한 정보를 충분히 제공하지 못하는 것으로 나타났다.

열물리학은 고전역학이나 양자역학과 달리 매우 많은 수($\sim 10^{24}$ 개)의 입자가 상호작용한 결과를 온도, 압력, 부피, 엔트로피 등의 변수를 이용하여 해석해내는 학문이다. 따라서 이러한 거시적으로 측정 가능한 변수들

을 학습할 때에는 미시적 관점으로 이들이 어떻게 설명될 수 있는지를 고찰해야 하며, 이러한 입자들의 상호작용 때문에 거시적으로 어떠한 특정한 현상들이 일어날 수 있는지, 또 거시적 변수들 사이에 어떤 관계가 성립하는지를 예측하는 것이 중요하다. 이러한 측면에서 열역학 제2법칙과 엔트로피, 과정의 가역성과 비가역성에 대해 미시적 관점과 거시적 관점을 비교해 가면서 학습하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4. 연구 2: 열기관에서 열효율과 가역과정의 관계에 대한 대학생의 이해³

4.1. 연구의 필요성과 목적

열역학은 열과 일 사이의 관계를 살펴보는 학문으로서, 열역학 제2법칙을 설명함에 있어서 핵심적으로 등장하는 도구가 바로 열기관이다. 카르노는 1824년 ‘열의 동력에 관한 고찰(*Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu*)’에서 열기관의 효율에 한계가 있는지, 어떻게 열기관으로부터 최대 일을 얻을 수 있는지에 대해 연구하였고, 최대 효율의 열기관에 대해 다음과 같이 언급하였다.

“두 열원 사이에서 작동하는 열기관 중, 가역적으로 작동하는 열기관보다 효율이 더 좋은 열기관은 없다(Carnot, 1988, p.11).”

여기서 말하는 ‘가역적으로 작동하는 기관’의 대표적인 예는 등온과정과 단열과정으로 구성된 카르노 기관이다. 한편, 일반물리학 교과서 및 열역학 관련 전공 서적들을 살펴보면, 아래와 같은 설명을 찾아볼 수 있다.

“이상적인 스텔링(Stirling) 기관은 카르노 기관과 마찬가지로 가역적으로 작동한다(Halliday *et al.*, 2008, p.546).”

³ 이 장의 주요 내용은 ‘이주현, 송진웅 (2009b). 스텔링 기관의 열효율에 대한 설명방식 및 대학생들의 사고과정 분석. 새물리, 59(3), 229-239.’에 발표되었다. 이와 함께 추가로 분석된 내용이 포함되어 있다.

앞의 두 서술을 살펴보았을 때, 가역적으로 작동하는 스텔링 기관의 효율이 카르노 기관과 동일할 것이라고 생각할 수 있다. 하지만 동일한 두 열원 사이에서 작동하는 스텔링 기관의 열효율을 p - V 그림이나 T - S 그림을 이용하여 계산해 보면 스텔링 기관의 열효율이 카르노 기관에 비해 낮다(Kaufman *et al.*, 1996; Seidman & Michalik, 1991). 전통적으로 가역기관이란 주어진 상황에서 최대 열효율을 내는 기관이라는 의미를 내포하는 것으로 간주되나, 앞의 논의에 따르면 이러한 가정이 정당한지에 대해 의문을 품을 수 있다.

본 연구에서는 스텔링 기관의 열효율의 크기를 설명하는 방식에 대해 논의하고, 동일한 두 열원 사이에서 작동하는 카르노 기관과 스텔링 기관의 열효율 비교를 통해 열기관에서의 열효율과 가역과정의 관계에 대한 물리교육 전공 대학생들의 사고과정을 살펴보았다. 그리고 열역학 제 2법칙을 가르칠 때에 열기관의 문제를 효과적으로 다룰 수 있는 방안을 탐색하고자 하였다.

4.2. 스텔링 기관의 열효율에 대한 설명방식

여기에서는 스텔링 기관의 열효율과 관련하여 카르노 기관의 효율이 스텔링 기관보다 높다는 서술에 대한 설명 방식과 카르노 기관의 효율은 스텔링 기관과 동일하다는 서술에 대한 설명 방식을 살펴보았다.

4.2.1. 카르노 기관의 효율이 스텔링 기관보다 높다는 서술에 대한 설명방식

(1) T-S 그림을 이용한 카르노 기관과 스텔링 기관의 열효율 비교

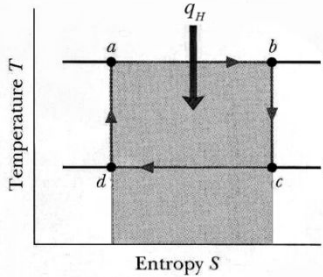
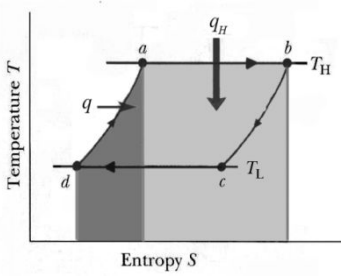
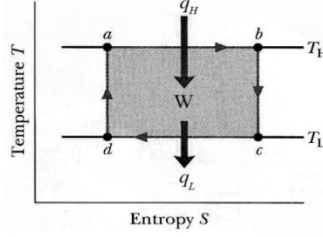
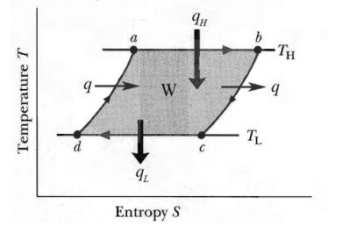
Halliday *et al.* (2008)에 제시되어 있는 이상적인 스텔링 기관과 카르노 기관의 p - V 그림과 T - S 그림 및 열효율은 표 4.1과 같다 (Halliday *et al.*, 2008).

표 4.1 카르노 순환과 스텔링 순환의 열효율 비교

| | 카르노 순환 | 스�텔링 순환 |
|--------------|---|---|
| p - V 그림 | | |
| T - S 그림 | | |
| 열효율 비교 | $\epsilon_{Carnot} = \frac{T_H - T_L}{T_H}$ | $\epsilon_{Stirling} < \frac{T_H - T_L}{T_H}$ |

카르노 기관과 스텔링 기관의 작동과정을 비교해 보면, 카르노 기관은 등온팽창-단열팽창-등온수축-단열수축과정 순으로 작동하는데 반해, 스텔링 기관은 등온팽창-등적-등온수축-등적과정으로 작동한다. 즉, 카르노 기관에서는 등온과정에서만 계와 열원 사이에 열교환이 이루어지지만, 스텔링 기관에서는 모든 과정에서 계와 열원 사이에 열교환이 이루어진다.

표 4.2 카르노 순환과 스텔링 순환에서 유입된 열과 해준 일의 크기

| | 카르노 순환 | 스텔링 순환 |
|---------------------------|---|---|
| 한 순환 동안 계로 유입된 열의 양 Q_H |  $Q_H = q_H$ |  $Q_H' = q_H + q$ |
| 한 순환 동안 계가 외부로 해준 일 W |  $W = q_H - q_L$ |  $W' = (q_H + q) - (q_L + q) = q_H - q_L$ |

열효율의 크기를 비교하기 위해서 T - S 그림을 살펴보았다. 열효율은 일반적으로 $\varepsilon = W/Q_H = (Q_H - Q_L)/Q_H$ 로 정의되므로(단, Q_H 는 계가 열원으로부터 받은 열의 양을, Q_L 은 계가 열원으로 방출한 열의 양을 의미한

다.), 열기관의 열효율을 계산하기 위해서는 Q_H 와 W 의 크기를 비교할 필요가 있다. T - S 그림에서 계에 유입된 열의 양은 계의 엔트로피가 증가할 때의 곡선의 아래쪽 면적에 해당하는 양이다. 따라서 동일한 두 열원에 대해서 카르노 기관과 스티링 기관이 한 바퀴 순환할 동안 받은 열의 양(Q_H)과 외부로 한 일(W)은 표 4.2의 색칠된 부분과 같다.

표 4.2에서 보는 바와 같이, 동일한 온도의 두 열원에 대하여 카르노 기관과 스티링 기관이 한 일의 크기가 같다면 (표 4.2의 T - S 그림에서 두 기관에 대한 a-b-c-d로 연결되는 도형의 면적이 동일한 경우), 스티링 기관이 받는 열의 양이 카르노 기관보다 많다. 따라서 T - S 그림을 이용한 분석에 따르면, 카르노 기관의 열효율($\epsilon_{Carnot} = (q_H - q_L)/q_H$)이 스티링 기관의 열효율($\epsilon_{Stirling} = (q_H - q_L)/(q_H + q)$)보다 높다고 말할 수 있다.

(2) 열기관의 가역성과 열효율 사이의 관계를 이용한 두 기관의 열효율 비교

Seidman & Michalik(1991)은 두 열원 사이에서 작동하는 스티링 기관의 효율이 카르노 기관의 효율보다 낮은 이유를 열기관의 가역성과 열효율에 대한 카르노의 증명 및 스티링 기관의 작동과정에 대한 고찰을 통해 설명하였다. 여기에서는 그의 관점을 소개하고, Halliday *et al.* (1994, 2008)에 제시된 스티링 기관에 대한 설명을 살펴보았다.

‘두 열원 사이에서 작동하는 열기관 중, 가역적으로 작동하는 열기관보다 효율이 더 좋은 열기관은 없다.’라는 서술에 대한 카르노의 증명과정은 아래와 같다(그림 4.1 참고). 참고로 이 증명에 대한 기본 아이디어는 카르노의 1824년 논문에 제시되어 있지만(Carnot, 1988), 카르노는 당대의 관념에 따라 열을 열소(caloric)로 생각하였기 때문에 그의 증명이 아래의 서술과 정확히 일치하지는 않는다.

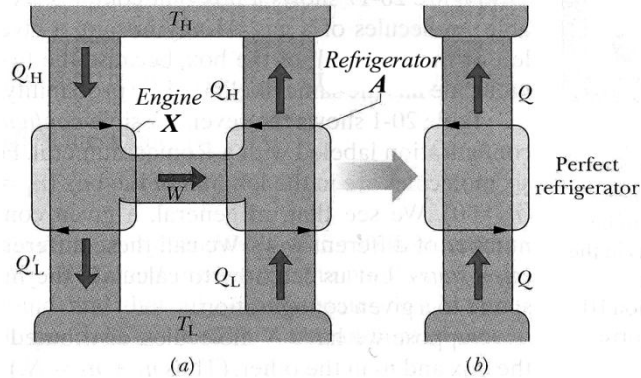


그림 4.1 가역기관이 두 열원 사이에서 작동하는 기관 중, 최고효율을 갖는 기관임을 보여주는 그림

증명: 만약 가역적으로 작동하는 열기관 A가 있고, 이 열기관보다 효율이 더 높은 열기관 X가 있다고 하자. 열기관 A를 거꾸로 작동시켜 냉동기관을 만든 후 열기관 X와 연결하면, (a)와 같이 구성된다. 이러한 열기관은 외부로부터의 에너지 유입 없이 저온에서 고온으로의 열의 이동이 가능하며(b), 따라서 이러한 열기관 X는 열역학 제2법칙을 위배하므로 존재하지 않는다.

그림 4.1의 증명이 내포하는 또 다른 의미는 두 열원 사이에서 가역적으로 작동하는 모든 기관의 열효율은 동일하다는 것이다. 하지만 $T-S$ 그림을 이용하면 가역적으로 작동하는 카르노 기관의 열효율이 가역적으로 작동하는 스텔링 기관의 열효율보다 높다. 따라서 스텔링 기관이 가역적으로 작동할 수 없음을 보이거나, 앞서 제시된 증명이 본 상황에 적합하지 않음을 보여야만 한다. Seidman & Michalik(1991)은 스텔링 기관이 두 열원 사이에서 가역적으로 작동하는 것이 가능한지에 대한 논의를 통하여 모순 상황을 해결하고자 하였다. 일반물리학 교과서에 제시되어 있는 가역과정의 조건을 살펴보면 다음과 같다(Samiullah, 2007; Tipler & Mosca, 2004).

[가역과정의 조건]

- 역학적 에너지가 마찰이나 점성, 또는 난류 등에 의해 열에너지로 전환되지 않아야 한다.
- 두 물체 사이에 열의 형태로 에너지가 전달될 때에는 접촉하고 있는 두 물체의 온도가 항상(또는 거의 항상) 동일해야 한다.
- 열역학적 과정이 준정적이어서 계는 항상(또는 거의 항상) 평형상태에 있다고 가정할 수 있어야 한다. 즉, p - V 그림에서 매 순간의 계의 상태가 표시될 수 있어야 한다.

이 조건에 따르면, 스티링 기관을 가역적으로 작동시키기 위해서는 계가 열원과 열교환을 할 때에 계와 열원의 온도가 같아야 한다. 예를 들어, 계의 부피를 일정하게 고정시킨 상태에서 계에 열을 가하는 등적과정의 경우, 계와 열원의 온도를 매 순간 동일하게 만들기 위해서는 계에 열이 유입될 때마다 열원의 온도도 조금씩 높여주어야 한다. 등적과정에서 계가 열을 흡수하면, 계의 온도도 증가하기 때문이다.

카르노가 가역기관의 열효율과 관련하여 그의 논문에서 증명한 상황은 열원의 온도가 T_H 와 T_L 로 고정된 경우에 대한 것이다. 하지만 스티링 기관을 가역적으로 작동시키려면 열원의 온도를 T_H 와 T_L 로 고정시킬 수 없다. 만약 열원의 온도를 T_H 와 T_L 로 고정시킨다면 등적과정에서의 계와 열원 사이의 열교환은 비가역적으로 일어날 것이다. 계로 열이 유입되거나 계가 열을 방출하는 동안 계의 온도는 변화하며, 따라서 계와 열원 사이의 온도 차가 상당히 커지는데 이는 앞서 언급한 가역과정에 대한 두 번째 조건을 위반하는 결과를 가져온다. 이러한 이유로 가역적으로 작동하는 스티링 기관의 열효율은 카르노 기관과 동일할 필요가 없으며, 열원이 2개인 경우에는 비가역적인 효과에 의해 스티링 기관의 열효율이 카르노 기관의 열효율보다 작아지게 된다.

‘Fundamentals of Physics’ 4판(1993)과 8판(2008)의 스티링 기관에 대한 서술내용을 살펴보면(Halliday *et al.*, 1993, 2008), 두 교과서의 가장 큰 차이는 열효율의 크기에 대한 부분이다. 4판 교과서는 스티링 기관의 열효율이 카르노 기관의 열효율과 같다고 기술한 반면, 8판 교과서는 스티링 기관의 열효율이 카르노 기관의 열효율보다 낮다고 기술하고 있다(표 4.3 참고).

표 4.3 일반물리학 교과서(Halliday *et al.*, 1993, 2008)에서의 스티링 기관에 대한 서술 비교

| | 4판 (1993) | 8판 (2008) |
|---------------|---|---|
| <i>p-V</i> 그림 | | |
| 기관의 열효율 | $\epsilon_{Stirling} = \epsilon_{Carnot} = (T_H - T_L)/T_H$ | $\epsilon_{Stirling} < (T_H - T_L)/T_H$ |

4판 교과서와 8판 교과서에서 열효율의 크기가 다르게 서술된 가장 큰 이유는 4판 교과서는 등적과정에서 열이 계로 유입되거나 유출되는 것을 고려하지 않았기 때문이다. 8판 교과서의 경우, 등적과정에서 일어나는 계와 열원 사이의 열의 출입을 고려하고는 있었지만 열기관 작동의 가역성과 열효율의 관계에 대해 단순히 카르노 기관보다 스티링 기관의 효율이 낮다고만 진술하였는데, 이는 ‘두 열원 사이에서 가역적으로 작동함

에도 불구하고 최대 효율을 내지 못하는 열기관이 있을 수 있다.’는 오해를 불러일으킬 수 있다.

“.....스털링 기관은 가역적인 열전달이 모든 과정에서 일어난다. 따라서 스털링 기관의 경우 카르노 기관에서의 효율 식이 적용되지 않는다. 보다 중요한 것은, 이상적인 스털링 기관의 열효율은 동일한 두 온도 사이에서 작동하는 카르노 기관의 열효율보다 낮다는 것이다(Halliday *et al.*, 2008, p.546).”

4.2.2. 카르노 기관과 스털링 기관의 열효율은 같다는 서술에 대한 설명방식

여전히 많은 글에서 스털링 기관과 카르노 기관의 열효율이 같다고 기술하고 있다(Çengel & Boles, 2006; Deacon *et al.*, 1994; Tobin, 1969; Viglietta, 1990; Wark & Richards, 1999). 따라서 두 기관의 열효율이 동일하다고 주장할 때의 설명방식에 대해 자세히 살펴볼 필요가 있다. 여기에서는 공학 쪽에서 주로 사용하는 열역학 교과서인 Çengel & Boles(2006)의 ‘*Thermodynamics: an engineering approach*’에 제시되어 있는 논의를 살펴보았다.

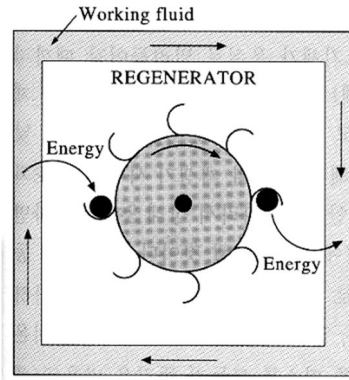


그림 4.2 재생기

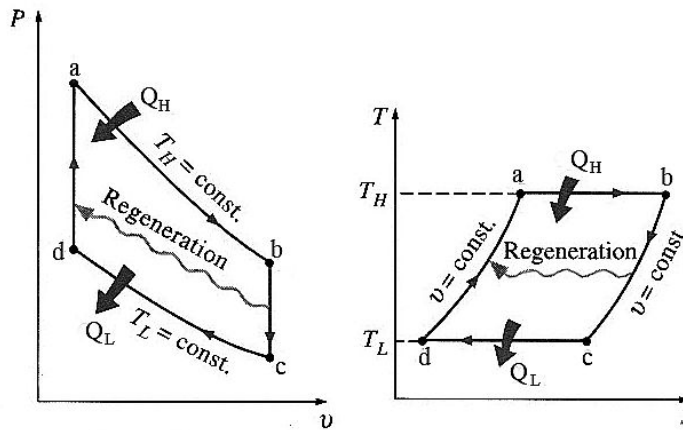


그림 4.3 공학 교과서에 제시된 스티링 기관의 $p-v$ 그림과 $T-s$ 그림 (Çengel & Boles, 2006)

이 책에 제시된 스티링 기관에는 2개의 열원과 계 외에 재생기 (regenerator)라는 특별한 장치가 있다 (그림 4.2 참고). 재생기는 등적과정에 관여하며, 계가 냉각될 동안 계로부터 에너지를 받아 저장했다가 계의 온도를 높일 때에는 저장한 에너지를 계로 되돌려주는 장치이다. 스티링 기관의 구체적인 작동 과정을 살펴보면 (그림 4.3 참고) $a \rightarrow b$ 의 과정 동안 계는 고온의 열원으로부터 열을 받으면서 등온팽창을 하고, $b \rightarrow c$

의 과정에서 계는 재생기로 열을 방출하면서 부피는 일정한 상태로 온도를 떨어뜨린다. $c \rightarrow d$ 의 과정에서 계는 저온의 열원과 접촉하여 열원으로 열을 방출하며, $d \rightarrow a$ 의 과정에서 계는 재생기로부터 열에너지를 흡수하여 처음 상태로 돌아오게 된다. 만약 기관이 이상적으로 작동하여 $b \rightarrow c$ 과정에서 재생기가 흡수한 열의 양이 $d \rightarrow a$ 과정에서 재생기가 방출한 열의 양과 동일하다면 계는 그림 4.3과 같이 외부로부터 Q_H 의 열을 받아 $Q_H - Q_L$ 만큼 일을 하게 된다. 따라서 이 기관의 열효율은 $\epsilon_{Stirling} = (Q_H - Q_L)/Q_H = (T_H - T_L)/T_H$ 로 표현될 수 있으며, 이러한 맥락에서 스텔링 기관의 열효율은 카르노 기관의 열효율과 같다.

4.3. 연구 대상 및 설문 문항

본 연구에 참여한 학생은 서울시 소재 1개 대학교의 열 및 통계물리 과목을 수강 중인 24명의 학생이다. 설문에 응답한 학생들은 물리교육을 전공하는 3,4학년 학생들로서, 모두 일반물리학 수업을 수강하였다. 연구는 5차례의 설문으로 진행되었으며, 5차례 설문 중 4차 설문에는 24명의 학생 중 18명의 학생만 참여하였다. 2009년 3월 말에 1차 설문을 실시하였으며, 일주일 후에 2차 설문과 3차 설문을 실시하였다. 4차 설문은 3차 설문이 끝난 후, 이틀 후에 실시되었다. 5차 설문은 3차 설문이 끝난 후 일주일 후에 실시되었으며, 과제 형태로 이루어졌다. 설문지의 문항들은 Halliday *et al.*(2008)에 제시된 설명을 기준으로 제작되었다 ([부록1] 참고).

설문지는 열기관 상황에서 학생들이 가역과정의 의미를 잘 알고 있는지와 p - V 그림이 주어졌을 때 열기관이 어떤 방식으로 작동하는지를 학생들이 상상할 수 있는지의 여부를 확인하기 위해 고안되었다. 또한 두 열원 사이에서 가역적으로 작동하는 열기관의 열효율이 가장 높다는 열

역학 제2법칙과 관련된 진술에 대해서 열기관의 열효율과 가역적으로 작동하는 열기관 사이의 관계에 대한 응답으로부터 일(또는 열효율)과 엔트로피 사이의 관계에 대한 학생들의 생각을 조사하고자 하였다.

표 4.4 설문지 내용

| 설문 순서 | 설문 내용 |
|-------|--|
| 1차 설문 | <ul style="list-style-type: none"> - 이상기관의 조건 서술하기 - 스텔링 기관의 순환과정을 T-S그림으로 나타내기 - 동일한 두 온도 사이에서 작동하는 스텔링 기관과 카르노 기관의 열효율 비교하기 |
| 2차 설문 | <ul style="list-style-type: none"> - 스텔링 기관이 이상기관인지의 여부를 판단하고, 그 이유를 서술하기 - 스텔링 기관의 각 과정이 가역적인지의 여부를 판단하고, 그 이유를 서술하기 |
| 3차 설문 | <ul style="list-style-type: none"> - 가역적으로 작동하는 스텔링 기관이 카르노 기관보다 효율이 낮은 이유를 기술하기 |
| 4차 설문 | <ul style="list-style-type: none"> - 카르노 기관의 각 과정이 가역적인지의 여부를 판단하고, 그 이유를 서술하기 - 가역과정에 대해 설명하기 |
| 5차 설문 | <ul style="list-style-type: none"> - 책을 읽거나 친구들과의 토론을 통해 3차 설문에 대한 답을 찾아내기 |

설문지의 내용은 표 4.4와 같다. 1차 설문은 이상적인 스텔링 기관의 열효율에 관한 설문이었다. 일반물리학 교과서에 제시되어 있는 이상적으로 작동하는 스텔링 기관에 대한 p - V 그림을 제시한 후에 이에 대한 T - S 그림을 그리고 열효율을 계산하도록 요구하였다. 아울러 이상기관의 조건에 대해서도 물어보았다. 2차 설문에서는 1차 설문에서와 동일하게 스텔링 기관에 대한 p - V 그림을 제시한 후, 이 과정을 따르는 스텔링 기

관이 이상기관인지의 여부와 스텔링 기관의 각 과정들(등온과정과 등적 과정)이 가역적인지의 여부를 물어보았다. 3차 설문에서는 ‘가역적으로 작동하는 기관의 열효율은 동일한 두 온도 사이에서 작동하는 어떤 실제 기관보다 높다.’라는 서술에 대한 증명과정을 보여준 후에 (그림 4.1 참고), 가역적으로 작동하는 스텔링 기관의 효율이 카르노 기관의 효율보다 낮은 이유에 대해 기술하게 하였다. 하지만 이 문제에 대해 학생들이 생각을 정리하는 데에는 시간이 많이 걸릴 것으로 사료되어, 학생 각자가 일주일 동안 생각해본 후에 문제에 다시 답을 해 보게끔 하였다 (5차 설문). 한편, 5차 설문을 실시하기 전에 4차 설문을 실시하였는데, 4차 설문은 카르노 기관을 구성하는 각 과정이 가역적인지의 여부를 결정하고, 가역과정에 대해 서술해보는 문항이다.

1차 설문에서부터 5차 설문까지 진행하는 데 소요된 시간은 총 2주이며, 학생들은 설문기간 동안 책을 통해 새로운 지식을 습득하거나 친구들과의 논의를 통해 자신의 생각을 변화시켜 나갔기 때문에 다섯 번의 설문에 대한 한 학생의 답변이 항상 일관적이지는 않았다. 그럼에도 불구하고 이러한 형태의 연구를 통해 열기관과 관련된 열역학 개념들을 학생들이 어떻게 이해하고 있는지에 대해 보다 세밀하게 관찰할 수 있을 것으로 판단하였다. 참고로 본 연구에 참여한 24명의 학생 중 20명의 학생이 스텔링 기관에 대한 T - S 그림을 대략적으로 표 4.2에서 제시한 것과 동일하거나 유사한 형태로 올바르게 그렸다.

4.4. 학생 응답 결과 분석

여기에서는 학생들이 생각하는 이상기관의 조건, 스텔링 기관의 열효율 크기, 스텔링 기관과 카르노 기관의 가역성을 판단하는 척도, 스텔링

기관의 열효율이 카르노 기관보다 낮은 이유, 그리고 설문을 진행하는 동안 학생들의 가역과정과 열효율에 대한 생각의 변화를 살펴보았다.

4.4.1. 이상기관의 조건

이상기관에 대한 일반물리학 교과서의 설명은 대체로 다음과 같다 (Halliday *et al.*, 2008; Young *et al.*, 2008)

- 기관이 작동할 때에 모든 과정들이 가역적이어야 한다.
- 마찰이나 난류, 원하지 않는 열의 교환이 없어야 한다.

표 4.5 이상기관의 조건에 대한 학생의 생각

| 이상기관의 조건 | 응답자 수 |
|---|-------|
| 마찰이나 난류 또는 원하지 않는 열의 이동이 없어야 한다. | 8 |
| 카르노 기관이 대표적인 이상기관이다. | 8 |
| 한 순환과정동안 계의 엔트로피 변화량이 0이어야 한다. | 5 |
| $Q_H/T_H = Q_C/T_C$ 가 성립해야 한다. | 4 |
| 각 과정이 가역과정으로 구성되어 있어야 한다. | 3 |
| 열효율이 $\varepsilon = (T_H - T_L)/T_H$ 로 주어져야 한다. | 3 |
| 카르노 기관이 곧 이상기관이다. | 3 |
| 열을 100% 일로 바꿀 수 있는 기관이다. | 2 |
| 이상기체를 작동물질로 사용하는 기관이다. | 2 |

(*중복 응답 포함)

표 4.5를 살펴보면, 상당 수의 학생들이 이상기관에서는 마찰이나 난류 또는 원하지 않는 열의 교환이 없어야 한다고(8명) 서술하였다. 반면,

기관의 작동이 가역적이어야 한다고 서술한 학생은 3명이며, 계 내부에 들어있는 물질이 이상기체여야 한다고 서술한 학생은 2명이었다.

전체적으로 카르노 기관을 염두에 두고 응답한 학생이 많았는데, 8명의 학생이 카르노 기관이 대표적인 이상기관이라고 응답하였으며, 이상기관의 열효율은 $\varepsilon = (T_H - T_L)/T_H$ 로 주어진다고 응답한 학생이 4명, 식 $Q_H/T_H = Q_C/T_C$ 이 만족되어야 한다고 응답한 학생이 3명 있었다. 이상기관이란 곧 카르노 기관을 의미한다고 서술한 학생도 3명이 있었다. 한 사이클의 엔트로피 변화량이 0이면 그 기관은 이상기관이라고 응답한 학생이 5명 있었는데, 만약 이 때의 엔트로피 변화량이 계의 엔트로피 변화량만을 의미하는 것이라면 이 서술은 위에 제시한 이상기관의 조건으로는 부적합하다. 엔트로피는 상태함수이기 때문에 열기관이 비가역적으로 작동한다고 하더라도 계가 처음 상태로 되돌아온다면 계의 엔트로피는 변하지 않기 때문이다. 그 외 계에 유입된 열이 100% 일로 전환되어야 한다고 서술한 학생이 2명 있었다. 이는 2중 영구기관(perfect engine)에 대한 서술이다.

4.4.2. 스텔링 기관의 열효율 크기

이상적인 스텔링 기관의 열효율이 동일한 두 온도 사이에서 작동하는 카르노 기관의 열효율보다 높은지, 낮은지, 혹은 같은지에 대해 스텔링 기관의 열효율이 카르노 기관보다 낮다는 응답이 전체의 79%(19명)를 차지하였다(표 4.6 참고). 그 중 10명은 열효율에 대한 정의 $\varepsilon = W/Q_H = (Q_H - Q_L)/Q_H$ 을 이용하여 스텔링 기관의 열효율을 직접 계산하면 스텔링 기관이 카르노 기관보다 열효율이 낮음을 증명할 수 있다고 서술하였다. 다음은 한 학생의 응답이다.

표 4.6 스티어링 기관과 카르노 기관의 열효율 크기에 대한 학생의 생각

| 열효율 비교 | 이유 | 응답자 수 |
|---|---|-------|
| $\epsilon_{Stirling} < \epsilon_{Carnot}$ | 등적과정 동안(표 4.3의 d→a), 스티어링 기관은 열원으로부터 열을 흡수한다. 따라서 계산 결과에 따르면 카르노 기관이 스티어링 기관보다 열효율이 더 높다. | 10 |
| | 카르노 정리에 따르면, 카르노 기관보다 효율이 더 높은 열기관은 존재하지 않는다. | 5 |
| | 등적과정동안 스티어링 기관은 일을 하지 않으면서 열만 흡수하므로, 에너지는 질적으로 저하된다. | 3 |
| | 카르노 기관과 스티어링 기관의 $T-S$ 그림을 비교해보면, 카르노 기관이 스티어링 기관보다 효율이 높다. | 1 |
| $\epsilon_{Stirling} = \epsilon_{Carnot}$ | 두 기관 모두 이상기관이며, 한 순환 후의 엔트로피 변화량은 0이다. | 2 |
| | 두 기관 모두 가역적으로 작동한다. | 1 |
| | 계산을 해 보면 두 기관의 열효율이 동일하다. | 1 |
| 결정하지 못함. | | 1 |
| 계 | | 24 |

태영: 스티어링 기관의 열효율은 카르노 기관의 열효율보다 낮다. 두 등온과정을 연결하는 등적과정에서도 열전달이 일어나기 때문이다. 즉 d→a (부피는 일정하지만 온도가 증가하는 과정)에서 (계가) 열은 받지만 일은 하지 않는다.

스티어링 기관의 열효율을 직접 계산해 보면,

$$\text{열효율: } \epsilon_{Stirling} = W/Q_H,$$

$$\text{계가 하는 일: } W = nR(T_H - T_L) \ln(V_b/V_a)$$

계가 받은 열: $Q_H = nRT_H \ln\left(\frac{V_b}{V_a}\right) + nc_V(T_H - T_L)$

따라서 스텔링 기관의 열효율의 크기를 카르노 기관과 비교해 보면,

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Stirling} &= \frac{nR(T_H - T_L) \ln\left(\frac{V_b}{V_a}\right)}{nRT_H \ln\left(\frac{V_b}{V_a}\right) + nc_V(T_H - T_L)} < \frac{nR(T_H - T_L) \ln\left(\frac{V_b}{V_a}\right)}{nRT_H \ln\left(\frac{V_b}{V_a}\right)} \\ &< \frac{T_H - T_L}{T_H} = \varepsilon_{Carnot} \end{aligned}$$

이 되어, 스텔링 기관의 열효율이 카르노 기관보다 낮다.

한편, 5명의 학생은 카르노 기관이 두 열원 사이에서 최대효율을 가질 수 밖에 없음을 보여주는 카르노 증명에 의해(그림 4.1 참고) 스텔링 기관의 효율이 카르노 기관보다 낮을 수 밖에 없다고 서술하였다. 3명의 학생은 스텔링 기관은 등적과정에서 에너지가 질적으로 저하되기 때문에 카르노 기관보다 효율이 낮다고 서술하였다.

스텔링 기관과 카르노 기관의 효율이 같다고 응답한 경우(4명)에는 그 이유로서, ‘두 기관 모두 이상기관이기 때문에’, ‘한 사이클을 돌고 나서도 엔트로피 변화가 없기 때문에’, ‘기관이 가역적으로 작동하기 때문에’ 등을 언급하였다. 이 학생들은 열기관이 두 열원 사이에서 가역적으로 작동한다면 열기관의 효율은 모두 동일하다는 생각을 기반으로 두 기관의 열효율이 같다고 생각한 것으로 추정된다.

4.4.3. 스텔링 기관과 카르노 기관의 가역성 여부

여기에서는 학생들이 생각하는 스텔링 기관과 카르노 기관의 가역성 여부를 각각 살펴본 후에, 스텔링 기관에서와 카르노 기관에서의 가역과정에 대한 학생들의 판단기준이 어떻게 달라지는지를 살펴보았다.

(1) 스텔링 기관의 가역성 여부

2차 설문에서는 문제에 주어진 스텔링 기관이 이상기관인지의 여부와 기관의 각 과정은 가역적으로 작동하는지의 여부에 대해 물어보았다. 학생들에게는 일반물리학 교과서에 나오는 이상적인 스텔링 기관에 대한 p - V 그림(그림 4.4 참고)을 이상기관의 조건과 함께 제시해 주었다.

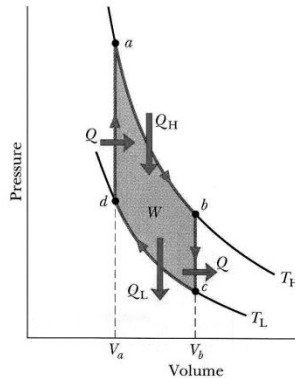


그림 4.4 스텔링 기관에서의 p - V 그림

제시된 스텔링 기관이 이상기관이라고 응답한 학생은 12명이며, 그렇지 않다고 응답한 학생 또한 12명이었다 (표 4.7 참고). 한편, 제시된 스텔링 기관이 가역적으로 작동한다고 응답한 학생은 13명인 반면, 11명의 학생은 과정 중에 비가역성이 존재한다고 응답하였다 (표 4.8 참고). 스텔링 기관은 가역적으로 작동하지만 이상기관이 아니라고 응답한 한 학생은의 경우, 스텔링 기관은 카르노 기관의 열효율($\epsilon_{Carnot} = (T_H - T_L)/T_H$)을 만족하지 않기 때문에 이상기관이 될 수 없다고 응답하였다.

표 4.7 스텔링 기관이 이상기관인지의 여부에 대한 학생의 응답

| 응답 유형 | 응답자 수 |
|--------------------|-------|
| 스텔링 기관은 이상기관이다. | 12 |
| 스텔링 기관은 이상기관이 아니다. | 12 |
| 계 | 24 |

표 4.8 스텔링 기관이 가역적으로 작동하는지의 여부에 대한 학생의 생각

| 구분 | 이유 | 응답자 수 |
|----------------------|---|-------|
| 스텔링 기관은 가역적으로 작동한다. | 한 바퀴 순환 후, 계의 엔트로피 변화량이 0이다. | 7 |
| | 모든 과정이 거꾸로 되돌릴 수 있는/또는 준정적으로 작동 가능한 과정이다. | 4 |
| | 이유를 기술하지 않음. | 2 |
| 스텔링 기관은 비가역적으로 작동한다. | 일부 과정에서 계의 엔트로피 변화량이 0이 아니다. (예: 등적과정) | 10 |
| | 거꾸로 되돌릴 수 없는 과정이 포함되어 있다. | 1 |
| 계 | | 24 |

스텔링 기관의 가역성을 판단하는 데 있어서 17명의 학생이 계의 엔트로피 변화 여부를 고려하였다. 한 바퀴 순환을 했을 때 계의 엔트로피 변화량이 0이면 가역기관이라고 응답한 학생이 7명이었고, 그 중 2명의 학생은 엔트로피 변화량이 0이면 각 과정은 비가역적이더라도 전체 과정은 가역적일 수 있다고 응답하였다. 스텔링 기관이 가역적으로 작동하지 않는다고 응답한 10명의 학생은 ‘등온과정은 가역적이지만 등적과정은 비가역적이다(7명)’, ‘계의 엔트로피 변화량이 0이 아닌 과정은 비가역적이다(2명)’, ‘계의 엔트로피가 증가하면 비가역적이지만 감소하면 가역적

이다(1명)’라고 서술하였다. 하지만 여기에 응답한 모든 학생들은 대체로 계의 엔트로피 변화량만 고려할 뿐, 주위환경의 엔트로피 변화량은 고려하지 않았다. 사실 문제에 주어진 p - V 그림은 계가 가역적으로 작동하는지에 대한 정보를 포함하고 있지 않다. 주위환경이 계와 어떻게 작동하는지에 대한 구체적인 과정이 제시되어야만 계가 가역적으로 작동하는지의 여부를 판단할 수 있다. 이러한 관점을 제시한 학생은 아무도 없었으며, 이는 이주현, 송진웅(2007)이 지적했던, 엔트로피 변화량으로 사건의 가역성을 예측할 때 학생들은 주위환경의 엔트로피 변화량을 고려하지 않는 경향이 있다는 연구결과와 일치한다.

한편, 학생들의 응답에서 볼 수 있듯이 두 열원 사이에서 작동하는 열기관이 한 바퀴 순환한 후 처음 상태로 되돌아오면(예: p - V 그림에서 폐곡선으로 그려지는 모든 기관들) 그 과정은 항상 가역적이라고 판단하는 오류를 범할 수 있다. 이 경우 계가 어떤 방식으로 작동하든 상관없이 계와 열원은 처음 상태로 되돌아올 수 있다. 하지만 이는 ‘열원’이라는 장치가 열을 흡수하거나 방출하더라도 일정한 온도를 유지하는, 실제 세계에서 존재할 수 없는 이상적인 도구이기 때문에 나타나는 문제이다 (실제 세계에서 입자 교환이 없는 닫힌계가 열을 흡수하면 부피가 증가하거나 온도가 증가해야만 한다. 또한 열원은 부피가 무한히 큰 계로 생각할 수 있으며, 따라서 열역학적 변수들인 p , V , T 를 이용하여 열원의 상태를 정의하는 것은 불가능하다.). 즉, 고립계에서 온도가 다른 두 물체가 접촉하였을 때 한 물체의 온도가 계속 일정하게 유지된다는 것은 엄밀하게 말하면 불가능한 일이다. 예를 들어 부피를 일정하게 고정시킨, 온도가 T_A 인 이상기체를 온도가 T_B 인 열원과 접촉시킨 후, 이상기체의 온도가 T_B 에 도달하면 온도가 T_B 인 열원과 분리시키고 다시 온도가 T_A 인 열원과 접촉시켜 기체의 온도를 T_A 가 되게 만든다고 하자. 이 때 기

체는 처음상태로 되돌아오며 열원의 온도도 계속 일정하게 유지된다. 하지만 온도 차가 나는 두 물체를 접촉시켜 고온에서 저온으로 열이 이동하는 것은 비가역적인 행위이며 이 상황에 대한 고립계의 엔트로피를 계산해보면 총 엔트로피가 증가하였음을 확인할 수 있다. p - V 그림에서 폐곡선으로 그려지는 모든 기관들은 준정적으로 작동하는 기관이 맞지만, 준정적 과정은 가역과정의 충분조건이 아니기 때문에 이러한 기관을 모두 가역기관으로 볼 수는 없다. 따라서 고려하는 계에 열원과 같은 이상적인 도구가 포함되어 있을 때에는, 어떤 과정이 가역과정인지의 여부를 판단할 때 고립계의 엔트로피 변화 유무를 확인하는 과정이 반드시 필요하다.

5명의 학생은 스텔링 기관의 작동과정을 거꾸로 되돌릴 수 있는지, 혹은 열기관이 준정적으로 작동할 수 있는지의 여부가 문제에 주어진 스텔링 기관이 가역기관인지의 여부를 결정한다고 응답하였다. 하지만 이 경우에도 학생들이 생각하는 ‘거꾸로 되돌릴 수 있다.’의 의미를 확인해 볼 필요성이 있다. 이주현(2007)에 따르면, 학생들은 열역학에서의 가역과정을 ‘저절로 (힘이나 에너지 유입 없이) 처음 상태로 되돌릴 수 있는 과정’으로 잘못 이해하고 있을 가능성이 있다. 1명의 학생은 스텔링 기관은 주위환경과 계속 열교환을 하기 때문에 이상기관이 아니나 각 과정은 모두 거꾸로 되돌릴 수 있으므로 가역과정이라고 응답하였다.

(2) 카르노 기관의 가역성 여부

4차 설문에서는 카르노 기관의 각 과정이 가역적으로 작동하는지의 여부와 가역과정은 어떤 과정인지에 대해 물어보았다. 4차 설문에는 24명의 학생 중 18명의 학생만이 참여하였으며, 카르노 기관이 가역적으로 작동하는지에 대한 학생들의 판단은 표 4.9와 같았다.

표 4.9 카르노 기관이 가역적으로 작동하는지의 여부에 대한 학생의 생각

| 구분 | 이유 | 응답자 수 |
|----------------------|--|-------|
| 카르노 기관은 가역적으로 작동한다. | 계의 엔트로피가 변하지 않거나 계의 온도가 변하지 않는 과정은 가역과정이다. | 5 |
| | 한 바퀴 순환 후, 계의 엔트로피 변화량이 0이다. | 3 |
| | 모든 과정이 거꾸로 되돌릴 수 있는/ 또는 준정적으로 작동 가능한 과정이다. | 3 |
| | 계의 엔트로피 변화가 없는 과정은 가역과정이다. | 1 |
| | 고립계의 엔트로피 변화가 없으면 가역과정이다. | 1 |
| | 이유를 기술하지 않음. | 2 |
| 카르노 기관은 비가역적으로 작동한다. | 일부 과정의 계의 엔트로피 변화량이 0이 아니다. (예: 등온과정) | 3 |
| 계 | | 18 |

학생들은 카르노 기관이 가역기관인 이유로서 계의 엔트로피 변화량이 0인 단열과정뿐만 아니라 계의 온도가 변하지 않는 등온과정도 엔트로피가 일정하게 유지되는 과정이라고 응답하였다(5명). 4명의 학생은 열역학적 과정에서 계의 엔트로피 변화량이 0이 아니면 그 과정은 비가역과정이라고 응답하였는데, 그 중 3명의 학생은 등온과정의 경우 계의 엔트로피가 증가하기 때문에 카르노 기관은 가역과정과 비가역과정이 섞여있는 과정이라고 응답하였다. 3명의 학생은 각 과정에서 계의 엔트로피 증가 유무와 상관없이 열기관이 한 바퀴 순환하였을 때 계의 엔트로피 증가가 없으면 순환 과정을 구성하는 모든 과정이 가역과정이라고 응답하였다. 이와 관

련해서는 스텔링 기관의 가역성 여부를 결정하는 과정에서 이미 논의한 바와 같이 엔트로피는 상태함수이며 따라서 계가 처음상태로 돌아온다면 그 과정이 비가역적이더라도 항상 계의 엔트로피 변화량이 0이다. 1명의 학생만이 카르노 기관이 가역적으로 작동하는지의 여부를 결정하기 위해서는 계의 엔트로피 변화량뿐만 아니라 주위환경의 엔트로피 변화량도 함께 고려해야 하며, 계와 주위환경의 엔트로피 변화량의 합이 0인 경우에 그 과정을 가역과정으로 볼 수 있다고 응답하였다. 이 외에 거꾸로 되돌릴 수 있는 과정, 매우 천천히 준정적으로 일어나는 과정을 가역과정으로 생각하는 학생들이 있었다(3명).

결론적으로 학생들이 카르노 기관이 가역적으로 작동하는지의 여부를 결정할 때 사용하는 판단기준은 스텔링 기관이 가역적으로 작동하는지의 여부를 결정할 때 사용하는 판단기준과 유사하였으나 완전히 일치하지는 않았으며, 대체로 계의 엔트로피 변화량이 0이면 가역과정으로 판단하였다. 많은 학생들은 학교나 책에서 배운 지식대로 카르노 기관이 가역기관이라고 굳게 믿고 있었으며, 따라서 계의 엔트로피가 증가하거나 감소하는 등온과정에서의 과정의 가역성을 설명하기 위해 ‘온도가 변하지 않는 과정도 가역과정’이라는 가역과정에 대한 새로운 조건을 만드는 모습을 볼 수 있었다. 이는 라카토스(Lakatos) 연구프로그램에서의 보호대 이론처럼 기존에 확실하게 알고 있다고 생각하는 지식을 설명하기 위해 새로운 이론을 덧붙이는 것과 유사한 행위로 생각할 수 있다.

(3) 가역과정에 대한 판단 기준의 변화 여부

여기에서는 카르노 기관에서의 가역과정에 대한 학생들의 판단기준이 어떻게 달라지는지를 살펴보았다. 2차 설문과 4차 설문은 학생들이 열기관을 각 과정이 가역과정인지의 여부를 어떻게 결정하는지를 살펴보는

문항으로서, 여기에서는 개별 학생의 2차 설문과 4차 설문의 응답을 비교하였다.

본 연구의 2차 설문에서는 스텔링 기관의 각 과정이 가역적인지의 여부를, 4차 설문에서는 카르노 기관의 각 과정이 가역적인지의 여부를 물어보고, 자신의 판단에 대한 근거를 서술하게 하였다. 2차 설문과 4차 설문에 모두 참여한 18명의 학생의 응답결과를 살펴보면, 8명의 학생은 가역과정을 판단하는 기준을 바꾸었으며, 또 다른 8명의 학생은 기준을 바꾸지 않았다. 2명의 학생은 설문지에 가역과정에 대한 판단 기준을 명확하게 기술하지 않았다(표 4.10 참고).

표 4.10 스텔링 기관과 카르노 기관에서의 학생들의 가역과정을 판단하는 기준 비교

| 구분 | 가역과정에 대한 기준 | | 응답자 수 |
|----------------------------|----------------------|--|-------|
| | 스텔링 기관의 경우 | 카르노 기관의 경우 | |
| 가역과정에 대한 판단기준이 바뀐 경우 | $\Delta S_{sys} = 0$ | $\Delta S_{sys} = 0$ 또는 $\Delta T_{sys} = 0$ | 3 |
| | $\Delta S_{sys} = 0$ | 정성적 설명 | 3 |
| | 정성적 설명 | $\oint dS = 0$ ($\Delta S_{total} = 0$) | 2 |
| 가역과정에 대한 판단기준이 바뀌지 않은 경우 | $\Delta S_{sys} = 0$ | | 4 |
| | | $\oint dS = 0$ | 3 |
| | | 정성적 설명 | 1 |
| 가역과정에 대한 판단 기준을 제시하지 않은 경우 | | | 2 |
| 계 | | | 18 |

판단기준을 바꾼 8명의 응답을 자세히 살펴보면, 기존의 자신의 생각에 대해 부가적인 조건($\Delta T_{sys} = 0$)을 덧붙이는 경우(3명), 정량적 설명에서 정성적 설명으로 바꾼 경우(3명), 정성적 설명에서 정량적 설명으로 바꾼 경우(2명)를 확인할 수 있었다. 첫 번째 경우와 관련하여 학생들은 카르노 기관의 매 과정이 가역적임을 설명하기 위해 엔트로피가 증가하는 등온팽창과정에 대해 ‘엔트로피가 증가하더라도 계의 온도 변화가 0이면 가역과정이다.’라는 새로운 조건을 덧붙였다. 이는 카르노 기관이 가역적으로 작동하는 기관임을 설명하기 위해 자신이 명료하게 알지 못하는 지식 중 일부를 수정하거나 검증되지 않은 지식을 만들어내는 행위로 볼 수 있다. 두 번째 경우는 어떤 과정이 가역과정인지의 유무를 계의 엔트로피 변화량(ΔS_{sys})으로 판단하던 학생들이, 정량적인 방법을 포기하고 가역과정에 대한 정성적인 설명을 이용하여 판단하는 것으로서, ‘준정적으로 일어나는 과정’, ‘경로를 알 수 있는 과정’ 또는 ‘역과정이 가능한 과정’ 등을 사용하여 각 과정이 가역적인지의 유무를 판단하였다. 하지만 정성적인 설명방식에서 사용되는 용어들, 예를 들면 ‘준정적’이나 ‘역과정이 가능한’에 대해 학생들이 그 의미를 명확히 알고 있지 않을 가능성이 크다(이주현, 2007; 지영래, 2008). 세 번째 경우에는 학생들이 ‘역과정이 가능한’, ‘준정적인’과 같은 정성적인 설명을 사용하다가 ‘고립계의 엔트로피는 항상 일정하다($\Delta S_{total} = 0$).’, ‘열기관에서 한 바퀴 순환하고 난 후의 계의 엔트로피 변화량은 0이다($\oint dS = 0$).’과 같은 정량적인 설명을 사용하는 경우이다. 이 때 사용된 정량적인 설명들을 이용하면 카르노 기관이 가역과정이라는 기준에 부합한다. 학생들이 판단기준을 바꾸는 가장 큰 이유로는 스텔링 기관의 경우 이 기관이 가역적으로 작동하는지의 여부를 확신하지 못하지만 카르노 기관은 가역적으로 작동한다고 확신하기 때문이다.

한편, 가역과정에 대한 판단 기준을 바꾸지 않은 경우를 살펴보면, 4명의 학생은 계의 엔트로피 변화량이 0이면($\Delta S_{sys} = 0$) 가역과정이고 따라서 스텔링 기관과 카르노 기관 모두 비가역 과정을 포함하고 있는 기관으로 판단하였다. 이 때 4명의 학생 중 1명의 학생은 가역과정과 관련된 자신의 판단에 오류가 있는 것 같다고 생각하였으나, 어떤 오류가 있는지는 잘 모르겠다고 기술하였다. 3명의 학생은 ‘열기관에서 한바퀴 순환하고 난 후의 계의 엔트로피 변화량이 0($\oint dS = 0$)이라면 그 열기관은 가역적으로 작동하는 열기관이다.’라고 결론을 내렸다. 여기에서 학생들이 가역과정에 대한 자신의 생각을 바꾸지 않은 이유는 자신이 생각하고 있는 조건을 이용하면 인지 구조 상의 갈등 없이 문제 상황에 대한 답을 설명해낼 수 있기 때문이다.

2차 설문과 4차 설문에 대한 응답 결과 비교를 통해, 어떤 과정이 가역적인지 비가역적인지를 판단하기 위한 준거로서 반드시 정량적 설명이 제시될 필요가 있음을 확인하였으며, 학생들은 자신이 불확실하게 알고 있다고 생각하는 부분은 교과서의 설명과 관계없이 스스로 설명을 만들어내고 보완하거나 설명을 바꾸는 행동을 하는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 열기관이 한 바퀴 순환하고 난 후의 계의 엔트로피 변화량이 0일 때 그 과정이 가역과정이라고 판단하는 학생들을 위해서는 학생이 인지 갈등을 할 수 있는 새로운 문제 상황을 개발할 필요가 있다.

4.4.4. 스텔링 기관의 열효율이 카르노 기관보다 낮은 이유

여기에서는 동일한 열원 사이에서 작동하는 스텔링 기관의 효율이 카르노 기관보다 낮은 이유에 대한 학생들의 추론 과정을 살펴보고, 추론 과정에서 나타나는 특징들을 조사하였다.

(1) 학생의 응답 결과

3차와 5차 설문에서는 스텔링 기관의 열효율이 카르노 기관의 열효율보다 낮다고 설명한 후에, 가역적으로 작동하는 스텔링 기관의 열효율이 카르노 기관의 열효율보다 낮은 이유를 서술하게 하였다. 여기에서는 ‘두 열원 사이에서 작동하는 열기관 중, 가역적으로 작동하는 열기관보다 효율이 더 좋은 열기관은 없다.’는 카르노의 증명(그림 4.1 참고)도 함께 제시하였다. 결과는 표 4.11와 같다.

표 4.11 스텔링 기관이 카르노 기관보다 효율이 낮은 이유에 대한 학생의 응답

| 설명 유형 | 3차 설문 | 5차 설문 |
|---|-------|-------|
| $\epsilon_{Carnot} > \epsilon_{Stirling}$ 이므로 이상적으로 작동하는 스텔링 기관은 존재하지 않는다. | | |
| - 스텔링 기관은 가역적으로 작동하는 기관이 맞지만, 이상기관은 아니다. | 3 | 1 |
| - 스텔링 기관은 비가역적으로 작동한다. | 10 | 1 |
| 열효율과 관련된 증명 중 일부가 잘못되었다. | | |
| - 열기관의 열효율은 열원의 온도뿐만 아니라 열역학적 과정과도 관련이 있다. 즉, 가역적으로 작동한다고 모두 동일한 효율을 갖는 것은 아니다. | 4 | 6 |
| - 이 증명은 이상기관끼리의 비교에서는 적용할 수 없다. | 3 | 2 |
| - 이 증명은 열원과 열기관이 두 군데에서 열교환을 할 때만 적용할 수 있다. | 1 | 1 |
| 재생기의 효율이 100%라면, 근사적으로 스텔링 기관의 효율은 카르노 기관과 동일해진다. | 0 | 2 |
| 잘 모르겠다. | 3 | 11 |
| 계 | 24 | 24 |

이 문제에 대한 학생들의 의견은 ‘이상적인 스텔링 기관은 불가능하다’는 입장과 ‘문제에서 제시한 증명이 문제 상황에 적합하지 않다’는 입장, 또는 ‘스텔링 기관의 열효율도 근사를 하면 카르노 기관의 열효율과 동일해질 것이다’라는 입장으로 나뉘어졌다. 책의 도움이나 친구들과의 논의가 불가능했던 3차 설문에서는 10명의 학생이 스텔링 기관이 가역적으로 작동하는 것은 불가능하며 따라서 ‘가역적으로 작동하는 이상적인 스텔링 기관’이라는 서술 자체가 성립할 수 없다고 주장하였다. 이러한 생각은 2차 설문에서 많은 학생들이 스텔링 기관이 이상기관이 될 수 없다고 주장했던 것과 일맥상통하는 것으로 보여진다. 반면 질문에 대해 일주일간의 생각할 시간을 줬던 4차 설문에서는 11명의 학생이 응답을 하지 않거나 ‘무엇이 문제인지 잘 모르겠다.’고 응답하였다. 6명의 학생은 열기관이 동일한 두 온도 사이에서 작동한다고 하더라도 작동 경로가 달라지면 열효율도 달라질 수 있다고 응답하였다. 다음은 이에 대한 한 학생의 응답이다.

영기: (열기관이) 가역적으로 작동하는 것까지는 좋다. 하지만 일은 상태함수가 아니다. 즉, 두 온도 차가 똑같다고 해서 열기관이 같은 효율을 내는 것은 아니다. 일은 경로에 의존하는 함수이므로 가역적인 작동을 하더라도 사이클을 돌 때 경로가 서로 다른 카르노 기관과 스텔링 기관의 열효율이 같을 수는 없다.

24명의 학생 중 한 학생은 카르노의 증명에서 말하는 최고 효율의 열기관은 열전달 과정이 두 곳에서만 일어나는 경우에 대해서만 적합한 모형이라고 응답하였다. 이는 4.2절의 ‘열기관 작동의 가역성과 열효율의 관계’에서 논의한 내용과 유사하다.

강수: 스텔링 기관도 이상기관으로 작동하지만 열효율은 카르노 기관보다 낮을 것이다. 스텔링 기관은 가역적인 변화를 위한 열전달 과정이 4곳에서 일어나므로 카르노 기관과는 큰 차이가 있다. 즉, $\varepsilon = 1 - |Q_L|/|Q_H| = 1 - T_L/T_H$ 의 식을 적용할 수 없다. 박스 안의 증명은 카르노 기관처럼 가역적인 열전달이 2개인 과정의 기관에만 적용되는 것은 아닐까? 스텔링 기관의 열효율은 직접 계산을 통해 비교해야 하는 것이 아닌가?

하지만 이 학생도 스텔링 기관을 두 개의 열원을 사용하여 작동시키려고 할 때, 열원과 계 사이의 온도 차가 고립계의 엔트로피 증가를 가져오며, 따라서 이 경우에 스텔링 기관을 가역적으로 작동시키는 것이 불가능하다는 생각은 하지 못하고 있었다.

2명의 학생은 문제 풀이에 있어서 재생기 개념을 도입하여 만약 스텔링 기관의 재생기 효율이 100%라면 스텔링 기관의 열효율은 카르노 기관의 열효율과 같아질 수 있다고 응답하였다. 이는 4.2.2절에서 논의한 바와 동일하며, 논리적으로 이해 가능한 설명형태라 할 수 있다.

수연: 스텔링 기관에는 카르노 기관과는 달리 열교환기가 있다. (스텔링 기관의 $p-V$ 그림을 제시하면서) $b \rightarrow c$ 과정(등적과정)에서 T_H 인 이상기체는 열교환기를 지나면서 열을 잃어 T_L 이 된다. 반대로 $d \rightarrow a$ 과정(등적과정)에서 T_L 인 이상기체는 열교환기를 지나면서 열을 얻어 T_H 가 된다. 이러한 열교환기가 이상적으로 작동을 하여 마찰 등이 무시된다면 스텔링 기관도 카르노 기관만큼의 효율을 얻을 수 있다. ... (중략) ... 하지만 실제로는 완벽하게 이상적인 열교환기를 만들 수 없기 때문에 에너지 손실이 생기고 따라서 열효율은 낮아지게 된다.

대부분의 학생들이 이 문제를 해결하는데 어려움을 호소하였으며, 친

구들과 논의를 하거나 일반물리 수준의 책을 찾아보는 것만으로는 쉽게 문제를 해결하지 못하였다.

(2) 자신의 생각과 불일치하는 상황에 직면했을 때의 학생의 사고과정

여기에서는 2차 설문결과와 3차 설문결과를 이용하여 학생이 자신의 생각과 일치하지 않는 상황에 직면했을 때 어떤 지식을 우선으로 하여 문제를 해결하는지를 살펴보았다.

학생들은 1차 설문에서 스텔링 기관의 열효율을 계산하였고, 연구에 참여한 대부분의 학생들이 스텔링 기관의 효율이 카르노 기관보다 낮은 것으로 판단하였다. 2차 설문은 스텔링 기관이 이상기관인지 아닌지의 여부를 판단하는 문항이었는데, 절반 정도의 학생이 스텔링 기관은 가역적으로 작동하며 따라서 이상기관이라고 판단하였다. 이러한 상황에서 가역적으로 작동하는 스텔링 기관의 효율이 카르노 기관보다 낮은 이유는 무엇인가를 묻는 3차 설문에 대한 학생의 사고과정을 좀 더 자세하게 살펴보았다(표 4.12 참고).

먼저 2차 설문에서 스텔링 기관이 가역적으로 작동한다고 판단했던 13명의 학생들이 3차 설문에 대해 어떻게 응답하였는지를 살펴보았다. 13명 중 4명의 학생은 스텔링 기관이 카르노 기관보다 열효율이 낮음을 확신했으며, 따라서 스텔링 기관이 가역기관일 것이라는 자신들의 기존 생각을 바꾸어 스텔링 기관은 비가역 기관이거나 이상기관이 아닐 것으로 추정하였다. 또 다른 4명의 학생은 열기관의 효율을 구하는 과정을 자세히 살펴보면 열역학적 과정에 따라 기관이 하는 일의 양이 다르기 때문에 열기관이 가역적으로 작동하는지의 여부에 상관없이 경로에 따라 열기관의 효율이 결정된다고 생각하였다. 즉, 스텔링 기관이 가역과정인지 비가역과정인지의 유무에 대한 판단은 명확히 내리지 않은 채, 모든 이상기관이

카르노 기관과 효율이 같다는 증명은 어디엔가 문제점이 있을 것으로 생각하였다. 나머지 3명의 학생은 이 증명을 스텔링 기관에 사용할 수 없는 이유를 구체적으로 제시하였는데, 이상기관의 비교에서는 이 증명을 사용할 수 없다고 응답하거나 스텔링 기관은 네 부분에서 모두 열교환을 하는데 이를 고려해주는 서술이 부족한 것 같다는 응답을 하였다.

표 4.12 스텔링 기관이 가역기관인지의 여부에 대한 학생 생각의 변화

| 3차 설문에서 가역적으로 작동하는 스텔링 기관의 효율이 카르노 기관보다 낮은 이유에 대한 학생의 응답 | 2차 설문에서 스텔링 기관이 가역기관인지에 대한 학생의 생각 | |
|---|-----------------------------------|--------|
| | 가역기관임 | 비가역기관임 |
| $\epsilon_{Carnot} > \epsilon_{Stirling}$ 이므로 이상적인 스텔링 기관은 존재하지 않는다. | | |
| - 스텔링 기관은 가역적으로 작동하는 기관이 맞지만, 이상기관은 아니다. | 0 | 3 |
| - 스텔링 기관은 비가역적으로 작동한다. | 4 | 6 |
| 열효율과 관련된 증명 중 일부가 잘못되었다. | | |
| - 열기관의 열효율은 열원의 온도뿐만 아니라 열역학적 과정과도 관련이 있다. 즉, 가역적으로 작동한다고 모두 동일한 효율을 갖는 것은 아니다. | 4 | 0 |
| - 이 증명은 이상기관끼리의 비교에서는 적용할 수 없다. | 2 | 1 |
| - 이 증명은 열원과 열기관이 두 군데에서 열교환을 할 때만 적용할 수 있다. | 1 | 0 |
| 이유를 잘 모르겠다. | 2 | 1 |
| 계 | 13 | 11 |

한편, 2차 설문에서 스텔링 기관이 비가역적으로 작동한다고 응답한 학생은 11명으로서, 이 중 6명의 학생은 스텔링 기관이 비가역적으로 작동하기 때문에 카르노 기관보다 스텔링 기관의 효율이 낮은 것은 당연하다고 기술하였다. 즉, 문제에 제시된 ‘스텔링 기관은 가역기관이다.’라는 서술을 무시하였다. 3명의 학생은 스텔링 기관은 등적과정에서 열이 유입됨에도 불구하고 계가 일을 하지 않는 것을 에너지 손실이 있기 때문이라는 언급을 하면서, 이 기관은 가역기관은 맞지만 이상기관이 아니기 때문에 카르노 기관의 효율을 갖지 않는다고 진술하였다. 1명의 학생은 주어진 증명은 이상기관끼리의 비교에 관한 것이 아니라고 응답하였으며, 또 다른 1명의 학생은 가역과정과 비가역과정에 대한 본인의 이해가 부족하여 명제의 참, 거짓을 판단하기 어렵다고 진술하였다.

학생들의 응답 유형을 보면, 학생들은 본인이 명확히 안다고 생각하는 명제를 중심으로 문제를 재구성하여 판단을 하는 경향을 볼 수 있었다. 주로 ‘스텔링 기관의 열효율이 카르노 기관의 열효율보다 낮다.’라는 서술을 확신하여, 이 명제를 중심으로 자신이 갖고 있는 생각을 바꾸는 모습을 볼 수 있었다. 그 예로는 스텔링 기관은 가역적으로 작동한다고 생각하던 학생들이 비가역적으로 작동한다고 생각을 바꾸거나 증명과정을 의심하고 있었다. 또한, 처음부터 스텔링 기관이 비가역적으로 작동하고 믿었던 학생들은 스텔링 기관은 가역적으로 작동한다고 생각하였던 학생들보다 더 많이 문제에 제시된 ‘스텔링 기관은 가역적으로 작동한다.’는 설명이 잘못되었다고 판단하는 경향이 있었다. 표 4.11에 따르면 1주일의 시간을 더 준 5차 설문에서는 스텔링 기관이 비가역적으로 작동하는 기관이라고 응답하는 대신에 증명에 대해 다시 생각해보거나 문제점이 무엇인지 잘 모르겠다고 응답을 하는 경우가 많았는데, 이는 학생들이 주로 참고하는 일반물리학 교과서(예: Halliday 교과서)에서 스텔링 기관

이 이상기관이라는 설명이 있어서 스텔링 기관을 단순히 비가역적으로 작동하는 기관으로 판단할 수 없었기 때문인 것으로 보인다.

이로 미루어볼 때, 열역학 제2법칙과 가역과정에 대한 학생의 개념을 정교화하기 위해서 교수자는 학생들이 스스로 명확하게 알고 있다고 생각하는 지식과 어렵듯이 알고 있다고 생각하는 지식이 무엇인지를 확실히 구별해서 알아야 할 필요가 있다. 다음으로 핵심 개념과 명제를 확실하게 익히게 한 다음, 학생들이 애매모호하게 알고 있는 개념들에 대해 인지갈등 상황을 지속적으로 제시하여 과학적 개념으로 바꿀 수 있도록 지도해야 한다. 물론 설문 결과에서 나타나는 바와 같이, 학생들이 기존에 잘못된 지식을 가지고 있는 경우 학생의 개념을 변화시키기는 일은 상당히 어렵다.

4.5. 결론 및 시사점

열기관은 열역학에 대한 이해를 돕는 전형적이면서도 효과적인 도구로 여겨져 왔다. 특히 마찰이나 난류 등의 효과를 무시할 수 있는 이상적인 열기관을 다루는 것은 열효율이나 엔트로피, 가역과정 등의 열역학 개념과 관련된 수학적 계산 및 이론적 논의를 하기에 용이하다는 점에서 중요하다. 본 연구에서는 ‘이상적으로 작동하는 스텔링 기관과 카르노 기관의 열효율을 비교해 보면 어느 것이 더 큰가’라는 대한 질문에 대해 ‘동일하다’와 ‘스텔링 기관이 더 낮다’라는 두 가지 답변이 가능함을 보이고, 특히 후자와 관련하여 ‘동일한 두 열원 사이에서 가역적으로 작동하는 스텔링 기관의 열효율이 카르노 기관의 열효율보다 낮은 이유는 무엇인가?’라는 질문에 대한 학생들의 사고 과정을 살펴보고자 하였다.

스텔링 기관과 카르노 기관의 열효율을 비교하기 위해서는 각 기관이

가역적으로 작동하는지를 확인하는 것이 중요하다. 스텔링 기관이 카르노 기관과 같이 동일한 두 열원 사이에서 가역적으로 작동하는 것이 가능한가라는 질문에 대해서 가능하다는 의견과 그렇지 않다는 의견이 있었다. 가능하지 않다는 의견의 핵심은 등적과정을 가역적으로 작동시키기 위해서는 열원과 계 사이의 온도 차가 극히 적어야 하며, 이를 위해서는 열원이 2개보다 많아야 된다는 것이었다. 따라서 두 열원 사이에서 작동하는 스텔링 기관의 열효율은 카르노의 증명에 따라 카르노 기관보다 열효율이 낮아지게 되며, 이는 $T-S$ 그림을 분석한 결과에 의해서도 뒷받침된다. 반면 재생기를 도입할 경우에는 재생기가 온도 변화가 가능한 제3의 열원 역할을 하며, 따라서 온도가 T_H 와 T_L 로 고정된 두 열원 사이에서 스텔링 기관은 가역적으로 작동할 수 있을 뿐만 아니라 열효율도 카르노 기관과 같아질 수 있었다. 따라서 스텔링 기관과 같은 이상기관의 열효율을 다룰 때에는 실질적으로 기관이 어떻게 작동하는지, 카르노 기관과 비교했을 때 열효율이 어떻게 차이가 나며 그 이유가 무엇인지에 관한 세밀한 묘사가 필요하다.

상당 수의 학생들은 스텔링 기관의 효율이 카르노 기관보다 낮으며, 스텔링 기관이 이상기관인지 혹은 가역적으로 작동하는지의 여부가 계의 엔트로피 변화량에 의해 결정된다고 생각하였다. 하지만 열기관이 가역적으로 작동한다는 의미를 ‘계+주위환경’의 엔트로피 변화량이 0인 상황으로 생각하지 않고 한 바퀴 순환하였을 때 계의 엔트로피 변화량이 0인 상황으로 주로 생각하였다. 한편, 카르노 기관이 가역기관임을 설명하기 위해서 가역과정의 조건으로서 엔트로피 변화량이 0인 경우뿐만 아니라 등온과정과 같이 온도가 변하지 않는 경우를 추가적으로 제시한 학생들도 있었다.

한편 가역적으로 작동하는 스텔링 기관의 열효율이 카르노 기관의 열

효율보다 낮은 이유에 대해서 절반 이상의 학생들이 ‘스털링 기관은 가역적으로 작동하지 않는다.’, ‘잘 모르겠다.’ 등의 형태로 응답하였으며, 열기관의 작동 과정에 대해 세밀하게 고찰한 후 스털링 기관과 카르노 기관의 열효율 크기를 비교한 학생은 매우 적었다. 즉, 학생들은 가역과정의 어떠한 조건에서 성립하는지에 대한 구체적이고 다양한 사례들에 대해 잘 알지 못하였으며, 단순히 스털링 기관은 카르노 기관 보다 효율이 낮으며 카르노 기관은 가역기관이라는 서술만 기억하고 있었다. 또한 주어진 모순상황에 대해서 모순 상황을 해결하기 위해 자신이 가지고 있는 개념을 꼼꼼히 검토해보기보다는 단순히 문제에 제시된 설명이나 전제조건이 잘못된 것으로 생각하는 경우가 많았다. 특히 이 과정에서 학생들은 자신이 분명히 알고 있다고 생각하는 명제를 중심으로 하여 잘 알지 못하는 개념들에 대한 생각을 바꾸거나, 자신의 생각과 문제 상황이 대치되는 경우에는 문제에 제시된 조건이나 증명과정에 오류가 있는 것으로 판단하였다. 이러한 측면은 단순히 인지갈등 상황을 제시하는 것만으로는 학생의 개념을 변화시키는 것이 쉽지 않음을 보여주는 사례이다. 따라서 학생의 개념을 변화시키기 위해서는 학생이 스스로 확실하게 알고 있다고 생각하는 개념적 지식이 무엇인지를 우선적으로 파악할 필요가 있다.

일반물리학에서 열기관을 도입하는 이유가 일과 열의 전환 및 열의 전달에 열역학 제2법칙과 엔트로피 개념을 잘 이해하기 위함임에도 불구하고 많은 학생들이 일과 엔트로피 사이의 관계를 이해하는 데 어려움을 느끼고 있음을 감안할 때에(이주현, 송진웅, 2007), 본 연구에서 제시한 상황에 대한 논의를 통해 학생들은 열효율, 일, 가역과정, 엔트로피 등의 개념들 사이의 관계에 대한 선개념들을 재고할 수 있으며, 나아가 개념 변화를 위한 교수 전략을 세우는 데에 도움을 줄 수 있다.

또한 본 연구를 통해 열역학 개념들을 다룰 때 ‘이상기관’이라는 용어 사용에 주의를 기울여야 함을 알 수 있었다. 일반물리학에서 이상기관은 가역적으로 작동하는 기관으로 묘사된다. 하지만 이상기관에 대한 p - V 그림은 주어진 기관이 준정적으로 작동하고 있다는 것만을 표현해줄 뿐, 가역적으로 작동하는지에 대한 여부는 알려주지 않는다. 주위환경(열원도 주위환경에 포함됨)이 계와 어떻게 상호작용하는지에 대한 정보가 포함되어야만 주어진 기관이 가역적으로 작동하는지의 여부를 판단할 수 있다. 만약 계와 열원 사이에 열의 교환이 준정적으로 매우 천천히 일어나나 근본적으로 열원과 계 사이의 온도 차가 크다면 고립계의 엔트로피가 증가하게 되고, 따라서 이는 열역학에서 일반적으로 말하는 가역과정이 아니다. 이러한 측면에서 p - V 그림을 이용하여 이상기관을 해석할 때는 ‘가역적으로 작동하는 기관’보다는 ‘마찰과 난류, 원하지 않는 열의 교환 등이 없으며, 온도 차가 나는 두 물체가 직접적으로 접촉하지 않고, 준정적으로 작동하는 기관’으로 해석하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

5. 연구 3: 비가역 단열과정에서 열역학적 평형 상태로의 이동에 관한 과학고 학생들의 이해

5.1. 연구의 필요성 및 목적

본 연구의 목적은 비가역 단열과정 상황이 주어졌을 때의 학생들의 문제풀이방식을 살펴봄으로써 학생들이 비가역적으로 작동하는 계를 다룸에 있어서 겪는 어려움을 파악하는 데 있다.

단열과정은 계 내외로 열전달이 일어나지 않는 주요 열역학적 과정 중 하나로서($Q = 0$), 계와 그 주위를 단열물질로 둘러싸거나, 열이 흐를 수 있는 시간보다 더 짧은 시간 내에 과정이 이루어져 열이 흘러가지 못하게 함으로써 계가 외부와 열교환을 하지 않는 과정을 의미한다(Young *et al.*, 2008, p. 657).

일반물리학 교과서에 등장하는 단열과정의 주요 예는 가역단열팽창과 자유팽창이다. 가역단열팽창은 계가 외부와 완전히 열적으로 차단된 상황에서 계의 압력을 매우 조금씩 줄여나가면서 부피를 팽창시키는 과정으로서, 이 상황에서 계의 나중 상태를 예측하기 위해 주로 사용하는 식은 ' $pV^\gamma = \text{일정}$ (단, $\gamma = C_p/C_v$)'이다. 한편, 자유팽창과정은 기체가 외부에 일을 하지 않고 진공으로 퍼져나가면서 부피만 증가하는 상황으로서, 열역학 제1법칙에 의해 자유팽창 후에도 기체의 온도는 일정하게 유지되므로 ' $pV = \text{일정}$ '이 성립한다. 즉, 이 과정은 계가 외부와 열적 상호작용을 하지 않음에도 불구하고, ' $pV^\gamma = \text{일정}$ '이 성립하지 않는 대표적인 예라고 할 수 있다. 이 차이는 열역학적 과정이 가역적인지 비가역적인지의 여부에 의해 결정된다.

열역학에서 가역과정이란 준정적 과정을 필요조건으로 하는 과정으로서, 고립계의 엔트로피가 일정하게 유지되는 특별한 경우를 일컫는다. 즉, 단열과정 중에 열이 흐를 수 있는 시간보다 더 짧은 시간 내에 과정이 일어나는 급격한 단열팽창은 가역과정에 해당하지 않으며 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’이 성립하지 않는다. 하지만 단열과정과 관련된 일반물리학 교과서의 예제문제들을 살펴보면 대부분 사건이 가역적으로 일어나는지의 여부를 고려하지 않고 있으며, 동시에 대체로 식 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’을 사용하여 문제를 풀이하고 있음을 확인할 수 있다(Halliday *et al.*, 2008, p. 528; Young *et al.*, 2008, p. 669). 이와 같은 상황에서 학생들은 단열팽창이 일어나는 계는 그 과정이 가역적인지의 여부에 관계없이 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’이라는 식이 성립할 것으로 생각할 수 있으며, 자유팽창과정은 계에 출입하는 열이 없는 단열과정의 일종임에도 불구하고 보통의 단열과정과는 구별되는 매우 특별한 과정으로 인식하게 될 가능성이 높다.

단열과정에 대한 연구는 크게 단열과정 상황을 수학적으로 다루는 방법에 대한 연구와 단열과정에 대한 학생의 이해에 대한 연구로 나눌 수 있다. 전자와 관련하여 최근 십여 년 간 실린더 속에 이상기체가 들어있는 상황에서의 비가역 단열과정을 계산하는 방법에 대한 연구들이 진행되었다(Anacleto & Pereira, 2009; Gislason, 2010; Miranda, 2008). Miranda(2008)는 단열과정에서 적용되는 식 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’에서 γ 의 크기가 과정이 가역적인지의 여부를 결정하며, 특히 $\gamma = C_p/C_v$ 일 때만 그 과정이 가역과정을 증명하였다. Gislason(2010)은 단열 상자가 피스톤에 의해 두 구역으로 나뉘어져 있고 각각의 방에 기체가 들어있는 상황에서 초기에 두 기체의 압력이 다를 때, 시간에 따른 피스톤의 위치를 수학적으로 계산하였는데, 시간이 지날수록 피스톤이 감쇄진동운동을 하여 최종적으로 멈추게 됨을 보였다. 단열과정에 대한 학생의 이해에 대한 연구에서는 주

로 단열과정상황에서 학생들이 이상기체 상태방정식을 적절히 사용하는지의 여부와 열역학 제1법칙을 활용하여 나중 상태를 예측하는지의 여부가 조사되었으며, 연구대상은 대체로 일반물리학 또는 열물리학을 수강하는 학생들이었다(Kautz *et al.*, 2005a, 2005b; Leinonen *et al.*, 2011; Leinonen, *et al.*, 2009; Loverude *et al.*, 2002). 이들의 연구에 따르면 학생들은 열역학 제1법칙은 고려하지 않은 채 이상기체 상태방정식만을 사용하여 단열과정을 따르는 계의 나중상태를 예측하였으며, 이상기체 상태방정식을 사용할 때에도 압력, 온도, 부피의 세 가지 변수 중 두 가지 변수만 고려하는 것으로 나타났다. 하지만 단열과정이 가역적인지의 여부에 따른 계의 최종 상태에 대한 학생의 예측과 문제풀이과정에서 나타나는 열역학 과정 및 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해를 다룬 연구는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 과학고 학생들의 비가역 단열과정에 대한 문제 풀이 과정을 자세히 살펴보았다. 이를 위해 두 가지 문제 상황을 제시하고 이에 대해 문제를 풀게 하였으며, 응답 분석 후 비가역 단열과정에 대한 문제 해결에 있어서 학생의 어려움을 유발하는 요소들을 추출하는 한편, 학생의 풀이 중 비가역과정의 특징을 잘 보여주는 풀이에 대해서도 논의하였다. 그리고 성공적인 문제풀이를 위해 필요한 개념적 지식들을 살펴보았으며, 비가역 단열과정의 교육적 의의에 대해서도 논의하였다.

5.2. 연구 대상 및 설문 문항

본 연구에 참가한 학생들은 서울 소재 1개 과학고 2학년에 재학 중인 학생 140명으로서, 설문은 2010년 10월 말에 실시되었다. 이 학생들은 학교 수업시간에 일반물리학 수준의 열역학 수업을 2010년 5월부터 8월까지 약 12차시(1차시 당 50분) 수강하였으며, 이 시간 동안 열과 온도, 이

상기체 상태방정식, 기체분자운동론, 열역학 제1법칙, 열역학 제2법칙, 가역과정과 비가역과정, 엔트로피 등을 학습하였다. 또한 이 학생들은 화학 수업시간에도 열역학 부분을 학습하였으며, 이 때 엔트로피, 깁스자유에너지, 엔탈피 등의 개념들을 학습하였다. 대학의 일반물리학 교육과정에서 열역학 내용을 다룰 수업 시간이 충분하게 주어지지 않는 경우가 많으며 특히 일반물리학 수업을 듣는 학생들 중 고등학교 때 물리Ⅱ 수업을 듣지 않은 학생이 상당 수 있다. 이를 감안하면, 열역학 내용을 오랜 시간 동안 자세하게 배우는 과학고 학생들을 대상으로 연구를 진행하는 것이 열역학 제2법칙에 대한 기존의 설명방식 및 교수학습에서의 문제점을 찾아내는 데 보다 도움이 될 수 있다. 또한 과학고 학생들은 대체로 과학적 소질이 뛰어난 학생들이지만 모든 학생이 물리학에 우수한 것은 아니다. 물리학에 뛰어난 학생들로부터는 일반학생들로부터는 찾아내기 어려운, 문제 풀이에 있어서 생각할 수 있는 논리적 오류 등을 확인할 수 있을 것으로 생각하였으며, 상대적으로 물리학이 취약한 학생들로부터는 일반 학생들이 생각하는 사고방식을 확인할 수 있을 것으로 기대하였다. 그리고 과학고 학생들을 대상으로 연구함으로써 다른 과학 영역의 학습으로부터 기인하는 열역학 분야의 오개념 등도 확인할 수 있을 것으로 생각하였다.

연구는 설문지에 학생이 응답하는 방식으로 진행되었다. 예비설문지를 통하여 열 및 통계물리학 수업을 수강하는 물리교육 전공의 10명의 대학생으로부터 응답을 받고, 과학고 학생들 20명으로부터 응답을 받은 후에 본 설문지를 개발하였다([부록2] 참고). 설문지는 열역학에 관한 주요 개념을 알고 있는지의 여부를 확인하는 기본문항들(표 5.1 참고)과 비가역 단열과정과 관련된 두 가지 상황에 대해 계의 나중 상태를 예측하는 문항(표 5.2 참고)으로 구성되어 있다. 학생들이 문항에 응답할 때는 자유

롭게 응답하고 싶은 문항을 응답하게 하였으며, 설문에 응답하는 데 주어진 시간은 50분이었다.

140명의 학생 중 120명의 학생에게는 기본 설문과 비가역과정에 대한 문제가 모두 제시되었으며, 20명의 학생에게는 비가역과정에 대한 문제들만 제시되었다. 주어진 비가역과정에 대한 두 개의 문항은 학생들이 평소에 다루지 않는 생소한 문제였기 때문에 대부분의 학생들이 두 개의 문항 중 하나를 선택해서 풀었다. 학생들의 비가역 단열과정 문제에 대한 응답 현황은 표 5.3과 같다.

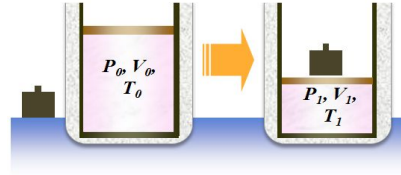
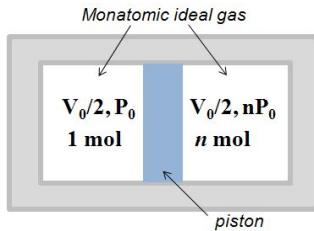
표 5.1 열역학 제2법칙과 관련된 기본 문항들

| 구분 | 기본 문항들 |
|-------------------------------|---|
| 학생의 기본 지식을 조사하기 위한 문항들 | <ul style="list-style-type: none"> - 가역과정과 비가역과정에 대한 구체적인 예 제시하기 - 열역학 제2법칙에 대해 설명하기 - 엔트로피에 대해 설명하기 - 역학과 열역학의 공통점과 차이점 설명하기 |
| 학생 스스로 자신의 이해 정도를 평가하기 위한 문항들 | <ul style="list-style-type: none"> - 열역학 제2법칙과 엔트로피 개념을 학습하면서 어려운 점은 무엇인가? - 열역학 제2법칙을 학습할 때 무엇이 가장 중요하다고 생각하는가? |

표 5.2 비가역 단열과정에 관한 주요 문제들

문제 1 (double chamber problem)

문제 2 (vertical syringe problem)



밀폐된 용기가 자유롭게 움직일 수 있는 피스톤에 의하여 같은 부피의 두 부분으로 구분되어 있다.

각 부분에 각각 1몰과 n 몰의 단원자 분자로 된 이상기체가 들어있고, 압력이 각각 P_0 와 nP_0 인 초기상태에서 피스톤이 운동을 시작하였다고 하자.

피스톤과 용기 사이에 마찰이 없고 모두 단열재로 만들어졌다고 할 때, 피스톤의 운동을 예측해보자.

단원자 분자 이상기체가 마찰없이 자유롭게 움직일 수 있는 피스톤으로 막힌 실린더 안에 들어있다. 기체의 처음 상태는 P_0, V_0, T_0 로 주어진다. 피스톤과 실린더는 단열재로 만들어져 있다.

(1) 누군가가 피스톤 위에 추를 올릴 때, 피스톤의 운동 및 기체의 나중상태를 예측하고 그 이유를 서술해보자.

(2) 올려둔 추를 제거했을 때, 기체가 처음 상태로 되돌아가는 것이 가능한가?

표 5.3 비가역 단열과정 문제에 대한 학생의 응답 빈도

| 구분 | 응답자 수 |
|-------------------------|-------|
| A. 문제 1에 응답한 학생 수 | 91 |
| B. 문제 2에 응답한 학생 수 | 69 |
| C. 문제 1과 2에 모두 응답한 학생 수 | 38 |
| D. 응답을 안 한 학생 수 | 18 |
| 계 (= A+B-C+D) | 140 |

기본문항의 경우 설문지에서는 학생의 기본 지식을 조사하기 위한 문항과 학생 스스로 자신의 이해 정도를 평가하기 위한 문항으로 나뉘어져 있다. 학생의 기본 지식을 조사하기 위한 문항으로는 가역과정과 비가역 과정에 대한 구체적인 예를 제시하기, 열역학 제2법칙에 대해 설명하기, 엔트로피에 대해 설명하기, 역학과 열역학의 공통점과 차이점에 대해 제시하기가 포함되어 있으며, 학생 스스로 자신의 이해 정도를 평가하기 위한 문항으로는 열역학 제2법칙과 엔트로피 개념을 학습하면서 본인이 생각하는 어려운 점은 무엇인지, 열역학 제2법칙을 학습할 때 무엇이 가장 중요하다고 생각하는지를 물어보는 문항이 있었다.

본 연구에서 사용한 비가역 단열과정에 대한 문항은 2가지이다(표 5.2 참고). 문항 개발의 주요 목적은 학생들이 가역과정과 비가역과정을 구별하여 열역학 제2법칙과 관련된 문제를 해결하는지, 기체와 같이 입자 수가 많은 계에서 계의 나중 상태를 예측할 때 열역학 제2법칙의 개념을 적절하게 사용하는지, 또는 역학적 관점으로만 문제를 해결하는지를 알아보는 데 있다. 문제 상황들은 정량적으로 그 결과를 예측하기에는 상당히 까다로운 문항들이며, 열역학 제2법칙에 대한 정확한 이해를 하고 있지 않으면 문제에 대한 올바른 답변을 하기가 상당히 어렵다.

문제 1(double chamber problem)은 밀폐된 공간에서 좌우로 자유롭게 움직이는 피스톤의 운동에 대해 묻는 문항이다. 이 문항은 Hoover & Moran(1979)와 Gislason(2010) 등에 의해 수학적으로 다루어진 문항으로서, 단열재로 만들어진 이상기체가 채워진 상자 안에 피스톤을 설치한 후, 피스톤 좌우의 기체의 압력이 다른 상태에서 피스톤이 운동을 시작할 때, 피스톤이 계속 진동할 것인지 또는 열역학적 평형상태에 도달할 것인지를 여부를 묻는 문항이다. 이 때 피스톤은 단열재로 만들어져 있어서 양쪽 기체의 온도 차에 의한 열의 이동을 차단하며, 피스톤과 상자 사이에

는 마찰이 없다.

문제2(vertical syringe problem)는 수직으로 놓여있는 주사기에서 피스톤 위에 물체를 갑자기 올려놓거나 피스톤 위의 물체를 치웠을 때의 피스톤의 운동을 예측하는 문항으로서, 이것은 Mungan(2003)이 다룬 상황이다. 처음 상태는 단원자분자 이상기체가 피스톤에 의해 실린더 안에 갇혀있는 상황이다. 이 때 피스톤 위에 추를 올려놓으면 기체의 나중 상태가 어떻게 될 것인지, 또 올려놓은 추를 다시 제거하면 기체는 처음 상태로 되돌아갈 것인지를 결정해보는 문제이다. 여기에서도 피스톤과 실린더는 모두 단열재로 구성되어 있으며, 실린더와 피스톤 사이에 마찰이 없다고 가정한다.

두 문항 모두 피스톤이 평형상태에 도달하기 전까지는 피스톤 양쪽의 압력 차이 때문에 매 순간 피스톤에 작용하는 힘의 합력을 0으로 근사할 수 없는 상황이며, 따라서 피스톤이 준정적으로 이동하지 않기 때문에 이 과정들은 비가역과정에 속한다고 할 수 있다.

5.3. 학생 응답 결과 분석

이 장에서는 열역학 제2법칙에 대한 학생의 기본 이해와 생각을 살펴본 후 비가역 단열과정에 대한 학생들의 문제해결방식을 분석하고, 학생의 응답 중 비가역과정의 특징을 잘 보여줄 수 있는 풀이방법을 자세하게 살펴보았다.

5.3.1. 열역학 제2법칙에 대한 학생의 기본 이해

여기에서는 본 연구에 참여한 학생들의 열역학 제2법칙과 엔트로피에

대한 생각, 가역과정과 비가역과정의 대표적인 예에 대한 생각, 역학과 열역학의 차이에 대한 생각, 열역학 제2법칙을 학습할 때의 어려움과 학습을 잘 하기 위한 핵심요소가 무엇인지에 대한 생각을 조사하였다.

(1) 열역학 제2법칙 및 엔트로피에 대한 학생의 생각

‘열역학 제2법칙에 대해서 기술해보자.’라는 문항에 대해서는 120명의 학생 중 104명이 응답하였으며, 응답결과는 표 5.4과 같다. 90명의 학생이 열역학 제2법칙을 엔트로피 개념을 이용하여 ‘계의 엔트로피는 절대 감소하지 않는다.’ 또는 ‘고립계의 엔트로피는 절대 감소하지 않는다.’로 표현하였다. 하지만 53명의 학생은 열역학 제2법칙을 고립계의 엔트로피 감소와 연결시키지 않고 있었다.

표 5.4 열역학 제2법칙에 대한 학생의 설명방식

| 열역학 제2법칙에 대한 설명방식 | 응답자 수 |
|--|-------|
| 엔트로피 (또는 무질서도)는 절대 감소하지 않는다. | 53 |
| 고립계의 엔트로피는 절대 감소하지 않는다. | 37 |
| 순환과정에서 열을 일로 100% 바꿀 수는 없다. | 11 |
| 열은 저절로 저온에서 고온으로 이동할 수 없다. | 7 |
| 카르노 기관보다 효율이 더 높은 기관은 존재하지 않는다. | 6 |
| 그 외 (가장 사건이 일어날 확률이 높은 상황은 미시상태수가 가장 많은 상황이다. 등) | 3 |
| 잘못된 표현들 ($\Delta U = Q - W$, 엔트로피는 보존된다. 등) | 5 |

(*중복응답 포함)

‘엔트로피에 대해 기술해보라.’는 문항에 대해서는 112명이 응답하였으며, 그 결과는 표 5.5과 같다. 본 문제에 응답한 학생 중 약 80%의 학생들이 엔트로피를 거의 무질서한 정도로 응답하였다. 이는 교과서 및 여러 매체들에서 ‘무질서도’라는 말을 자주 사용하며, 2010년 8월에 진행된 열역학 제2법칙에 대한 수업에서도 무질서도라는 용어를 사용하였기 때문으로 보인다. 수업시간에는 ‘무질서도’라는 용어는 그 자체로 모호한 용어이기 때문에 잘 정의해서 사용할 필요가 있음을 강조하였다. 무질서도라는 설명 이외에 절반 정도의 학생들이 볼츠만의 엔트로피 $S = k \ln \Omega$ 나 클라우지우스의 엔트로피 $dS = dQ/T$ 를 사용하여 엔트로피를 설명하였다.

표 5.5 엔트로피에 대한 학생의 설명방식

| 엔트로피에 대한 설명방식 | 응답자 수 |
|---|-------|
| 계의 무질서한 정도 | 91 |
| $S = k \ln \Omega$ (하나의 거시상태에 해당하는 미시상태의 수) | 40 |
| $dS = dQ/T, \Delta S = \int dQ/T$ | 33 |
| 상태함수 | 16 |
| 반응의 자발성의 척도 | 6 |
| 혼란스러운(chaotic) 정도 (잘못된 표현임) | 2 |

(*중복 응답 포함)

(2) 가역과정과 비가역과정에 대한 대표적인 예

예를 이용하여 개념을 설명하는 방식은 교수학습 과정에서 사용되는 가장 대표적인 개념 학습 방법이며, 특정 개념에 대해 학생이 어떠한 예를 생각하고 있는지 알아보는 것은 학생이 갖고 있는 개념을 파악할 수

있는 도구가 된다. 특히 가역과정과 비가역과정의 대표적인 예를 응답하는 과정을 통해 학생들이 자신의 개념을 어떤 상황과 연결시키고 있는지 미리 파악할 수 있다. 만약 학생의 개념이 불충분하다면 그 상황이 갖고 있는 문제점을 이용하여 학생이 인지갈등을 일으킬 수 있도록 도와줄 수 있다는 점에서 학생이 생각하는 예를 조사하는 것은 의미가 있다.

120명의 학생 중, 가역과정에 대해서는 113명의 학생이 응답을 하였고, 비가역과정에 대해서는 116명의 학생이 응답을 하였다. 학생들이 생각한 가역과정의 예를 살펴보면, 표 5.6과 같이 크게 역학적 상황, 열역학적 상황, 화학적 상황으로 나눌 수 있다. 역학적 상황에서는 단진자 운동이나 용수철 진동과 같이 마찰이나 공기저항이 없고 2~3개의 물체가 상호 작용하고 있는 상황에 대해 가장 많이 응답하였다. 열역학적 상황에서는 열기관에 대한 언급이 많았는데, 카르노 기관의 작동과정을 가역과정의 대표적인 예로 든 학생이 가장 많았으며, 그 외에 피스톤 위에 모래알을 하나씩 올려놓거나 빼내는 과정과 같은 준정적 과정이나 $p-V$ 그림으로 표현이 가능한 과정을 가역과정이라고 언급한 학생들이 있었다. 한편, 화학적 과정과 관련해서는 상전이 과정이나 화학평형에서의 정반응과 역반응을 가역과정의 대표적인 예로 든 경우가 많았다.

표 5.6 학생들이 생각하는 가역과정의 대표적인 예

| 가역과정의 예 | 응답자 수 | |
|---------|--|----|
| 역학적 상황 | - 단진자 운동 | 14 |
| | - 용수철 진자 운동 | 6 |
| | - 완전 탄성 충돌 | 5 |
| | - 공 던지기, 포물선 운동 | 4 |
| 열역학적 상황 | - 카르노 기관 | 31 |
| | - 매우 작은 추를 피스톤 위에 하나씩 올려놓아 계의 상태가 매우 천천히 변화되는 과정 | 10 |
| | - 등온과정 또는 단열과정과 같은 열역학적 과정 | 8 |
| | - p - V 그림에서 각 과정이 선으로 표현되는 과정 | 3 |
| 화학적 상황 | - 상전이 | 12 |
| | - 화학평형에서의 가역반응 (정반응과 역반응이 동시에 일어남) | 10 |
| | - 화학반응 | 4 |
| 그 외 | 11 | |

(*중복 응답 포함)

학생들이 제시한 비가역과정의 예(표 5.7 참고)에는 가역과정처럼 역학적 상황, 열역학적 상황, 화학적 상황이 있고, 그 외에 일상적 상황이 있으며, 8명의 학생은 자연계에서 일어나는 모든 과정이 비가역과정이라고 응답하였다. 비가역과정의 예에 대해서는 열역학적 상황이나 화학적 상황을 응답한 학생 수가 많았다.

표 5.7 학생들이 생각하는 비가역과정의 대표적인 예

| 비가역과정의 예 | 응답자 수 | |
|-----------------|--|----|
| 역학적 상황 | - 마찰이 존재할 때의 물체의 운동 | 5 |
| | - 공기저항이 있는 곳에서의 단진자 운동 (또는 자유낙하운동) | 4 |
| 열역학적 상황 | - 자유팽창과정 | 22 |
| | - 확산 | 18 |
| | - 고온에서 저온으로의 열이동에 의한 열평형 과정 | 7 |
| | - 기체가 들어있는 실린더의 피스톤 위 에 무거운 추를 올리는 과정 등의 갑 작스러운 압력 변화가 있는 과정 | 3 |
| 화학적 상황 | - 연소 과정 | 24 |
| | - 용해과정, 중화과정, 앙금생성과정 | 8 |
| 일상적 상황 | - 달걀 가열하기 | 10 |
| | - 유리 깨뜨리기 | 5 |
| | - 팝콘 만들기 | 3 |
| | - 진흙을 벽에 던지기 | 1 |
| 자연에서 일어나는 모든 과정 | 8 | |
| 그 외 | 3 | |

(*중복 응답 포함)

가역과정과 비가역과정의 예에 대한 학생 응답은 이주현(2007)이 조사한 가역과정에 대한 학생의 생각과 연결시켜 볼 수 있다. 이 연구에서는 14명의 물리학 또는 물리교육을 전공하는 대학생들을 대상으로 열역학에서의 가역과정이 무엇인지에 대한 생각을 조사하였는데, 결과에 따르면 학생들은 가역과정을 ‘자연스러운 과정, 외부의 도움 없이 또는 에너지 손실 없이 처음상태로 되돌아올 수 있는 과정, 양쪽 상태 어느 쪽으로도

이동이 가능한 과정, 매우 천천히 일어나는 과정, $\Delta S = 0$ 인 과정' 등으로 생각하고 있었다. 학생들의 응답에서 열역학에서 말하는 가역과정의 조건인 사건이 매우 천천히 일어나서 계와 주위환경 사이에 압력 차나 온도 차가 존재하지 않거나 존재하더라도 그 차이가 매우 작아서 매 순간순간 계가 주위와 열역학적 평형을 이루어야 한다는 준정적 과정에 대한 응답은 매우 적었다. 이는 역학적 과정이나 화학평형에서의 정반응과 역반응 등을 가역과정의 대표적인 예로 생각했기 때문으로 보인다.

또한 본 연구에서의 학생의 응답을 고등학교 교과서 표현과 연결시켜 생각할 수도 있다. 3.3.6절에서 서술한 바와 같이 고등학교 물리Ⅱ 교과서에서는 가역과정을 주로 '물체가 외부에 어떠한 변화도 남기지 않고 처음 상태로 되돌아가는 과정'으로 정의하면서 단진자 운동과 같은 역학적 과정을 가역과정의 대표적 예로 기술하였다. 고등학교 화학Ⅱ에서는 가역과정에 대한 설명뿐만 아니라 화학평형을 설명하기 위해 '가역반응 (reversible reaction)'이 소개되는데(박종석 외, 2011, p. 137), 이 과정은 가역과정과 헛갈릴 수 있다. 이는 반응계에서 생성계로 향하는 정반응이 진행되는 것과 동시에 생성계에서 반응계로 향하는 역반응도 무시할 수 없을 속도로 일어나는 경우를 말한다. 예를 들어 $H_2 + Cl_2 \rightleftharpoons 2HCl$ 의 경우 정반응은 H_2 분자와 Cl_2 분자가 충돌하여 $2HCl$ 을 만들어내는 것이며, 역반응은 두 개의 HCl 분자가 충돌하여 H_2 분자와 Cl_2 분자가 만들어지는 것이다⁴. 화학반응을 분자 간의 충돌로 해석하는 경우, 열역학에서 말하는 가역과정과는 상당한 차이가 있다.

결론적으로 학생들의 응답에서 나타나는 주요 문제점은 많은 입자들이 충돌할 때 나타나는 사건의 비가역성과 소수의 입자들이 충돌하거나 보

⁴ 물론 화학반응의 경우 분자 간의 충돌로 새로운 물질이 만들어질 때에는 분자가 갖고 있는 운동에너지가 최소한의 활성화 에너지보다 커야 한다(Atkins & De Paula, 2006, p. 924)

존력을 받아 운동할 때의 역학적인 가역성이 구분되지 않고 있다는 것이다. 열역학 제2법칙은 굉장히 많은 수의 입자들의 운동을 통계적으로 처리하는 과정에서 나타나는 결과인데, 진자 운동이나 강체의 충돌과 같은 역학적 상황들은 뉴턴의 운동법칙을 따르는 과정으로서 입자가 많은 계를 미시적으로 관찰했을 때 개별 입자의 운동에서 나타나는 상황이라고 할 수 있다. 즉 2.1.3절에서 논의한 바와 같이 역학에서의 가역과정과 열역학에서의 가역과정은 구분되어야 할 필요가 있다.

(3) 고전역학과 열역학의 공통점과 차이점

‘역학과 열역학의 공통점 및 차이점에 대해 기술해보자.’라는 질문에 대해서 공통점에 대해서는 54명이, 차이점에 대해서는 79명이 응답하였다. 공통점과 차이점에 대한 응답 결과는 표 5.8과 같다.

학생들은 열역학과 역학 모두 기본적으로 힘과 에너지를 다루며(A1, 24명), 두 영역 모두 같은 법칙이 적용된다고 생각하였으나(A3+A4+A5, 총 11명), 열역학은 역학에서는 다루지 않는 열 개념을 더 다루며, 내부 에너지, 온도, 엔트로피와 같은 변수들을 추가적으로 사용한다고 생각하였다(B1, 34명). 본 연구에 참여한 학생 중 26명의 학생은 역학과 열역학은 다루는 대상이 다르다고 기술하였는데, 역학은 우리가 관찰할 수 있는 거시적 세계에 존재하는 물체의 운동을 기술하는 반면, 열역학은 분자운동과 같은 미시적 세계의 물체의 운동을 기술하거나(B2) 굉장히 많은 수의 입자들이 모인 계를 다룬다는 응답이 있었다(B4). 즉, 학생들은 대체로 역학과 열역학에서 사용하는 법칙들, 변수들, 관찰 대상에 초점을 두어 역학과 열역학을 구분하고 있었으며, 특히 두 영역 모두 사용하는 물리량 및 관찰 대상이 다소 다를 뿐 근본적으로 같은 법칙이 적용된다고 생각하고 있었다. 한편 11명의 학생들은 열역학은 계를 다루는 데 있

어서 통계적 기법을 사용한다는 응답을 하여, 사용하는 수학적 기법이 다를 수 있음을 지적하였다.

표 5.8 학생들이 생각하는 고전역학과 열역학의 공통점과 차이점

| 설명 | 응답자 수 |
|---|-------|
| 공통점 | |
| A1. 힘 또는 에너지를 다룬다. | 24 |
| A2. 물체의 운동이나 계의 변화를 다룬다. | 19 |
| A3. 뉴턴의 운동법칙으로 해석할 수 있다. | 6 |
| A4. 에너지가 보존된다. | 4 |
| A5. 열역학 법칙으로 해석할 수 있다. | 1 |
| 그 외 (고전적 관점으로 설명할 수 있다, 등.) | 4 |
| 차이점 | |
| B1. 사용하는 물리량이 다르다. | 34 |
| B2. 고전역학은 거시세계를 다루는 반면, 열역학은 미시 세계, 분자 수준의 세계를 다룬다. | 16 |
| B3. 열역학은 열역학적 계를 기술하기 위해 통계적 기법을 사용하나, 고전역학은 물체의 운동을 기술하기 위해 뉴턴의 운동법칙만을 사용한다. | 11 |
| B4. 고전역학은 강체와 같은 물체를 다루나, 열역학은 매우 많은 입자들로 구성된 계를 다룬다. | 10 |
| B5. 열역학은 사건의 비가역성을 다룬다. | 3 |
| B6. 열역학적 계는 거시적 관점과 미시적 관점을 동시에 활용하여 분석해야 한다. | 2 |
| 그 외 (열역학은 고전역학을 포함한다, 화학은 고전역학 보다는 열역학적 개념들을 사용한다, 등) | 6 |

(*중복 응답 포함)

(4) 열역학 제2법칙과 엔트로피 개념을 학습할 때 학생들 스스로 느끼는 어려움

‘열역학 제2법칙 및 엔트로피와 관련하여 여전히 잘 이해가 되지 않거나 헷갈리는 부분은 무엇인가?’라는 질문에 응답한 학생은 84명이다. 이 중 ‘무엇을 잘 모르는지 명확하게 잘 모르겠다.’는 응답이나 ‘전체적으로 잘 이해가 안 되는 것 같다’, ‘거의 다 이해하고 있다고 생각한다.’와 같이 어떤 부분이 어려운지에 대한 진술을 하지 않은 17명 학생의 응답을 제외하고 나머지 학생들의 응답 중, 빈도가 3회 이상 나온 응답을 표 5.9에 제시하였다.

표 5.9 학생들 스스로 생각하는 열역학 제2법칙과 엔트로피 개념에 대한 이해의 어려움

| 이해의 어려움 | 응답자 수 |
|-------------------------------------|-------|
| 엔트로피 식에 대한 직관적 이해 | 17 |
| 볼츠만 엔트로피 식에 대한 이해(또는 미시상태 수의 계산 방법) | 10 |
| 계의 엔트로피 변화량 계산 | 8 |
| 엔트로피 식의 유도과정 | 6 |
| 가역과정과 비가역과정의 구별 | 5 |
| 클라우지우스 엔트로피와 볼츠만 엔트로피의 동등성 | 4 |
| 카르노 기관이 효율이 최대인 기관임을 증명하는 과정 | 4 |

학생들이 이야기하는 열역학 제2법칙에 대한 주요 어려움은 주로 엔트로피 개념에 대한 직관적 이해, 계산방법, 식의 유도과정 등에 대한 것이었다. 학생들은 열역학 제2법칙을 학습하면서 열역학 제2법칙의 주요 서술들에 대한 고민보다는 엔트로피 개념을 어떻게 이해할 것인가에 초점

을 두고 있음을 확인할 수 있었다.

한편, 극소수의 학생들이 열역학 제2법칙은 본질적으로 어떻게 나타나는 것인가에 대해 고민하고 있었다. 학생들이 제시한 ‘열역학 제2법칙이 열역학 외 다른 분야에서도 여전히 성립함을 어떻게 보이고 알 수 있는가?’라는 물음이나 ‘역학을 이용해 단순 입자계에서 엔트로피 증가를 유도할 수 있는가?’라는 물음은 볼츠만의 열역학 제2법칙에 대한 고민과 맞닿아 있다(김재영, 2004).

(5) 학생들이 생각하는 열역학 제2법칙 학습에서의 핵심 요소

‘열역학 제2법칙 및 엔트로피에 대해 학습할 때, 무엇을 아는 것이 가장 중요하다고 스스로 생각하는가?’라는 질문에 대해서는 92명이 응답하였다. 응답 패턴이 다양하여 정확하게 정량화하여 제시하기는 어려우나, 열역학 제2법칙 및 엔트로피를 포함한 열역학 2법칙과 관련된 주요 개념에 대한 이해가 중요하다고 응답한 학생이 응답한 학생의 절반 정도를 차지하였다. 한편, 개념에 대한 공식을 알고 공식을 이용하여 상황에 맞게 문제를 풀이하는 것이 중요하고 응답한 학생들과 개념을 아는 것보다 문제를 잘 푸는 것이 더 중요하다고 응답한 학생들도 있었다. 하지만 전체적으로 본 연구에 참여한 학생들은 개념 이해가 가장 중요하며 개념 이해를 통해 문제를 더 잘 해결할 수 있을 것으로 생각하였다.

일부 학생들은 문제풀이를 잘 하기 위해 꼭 알아야 할 개념적 지식으로서 개념 자체에 대한 이해 이 외에 다음과 같은 것들이 있음을 강조하였다. 6명의 학생이 가역, 비가역과정 또는 준정적 과정에 대한 이해가 필수적이라고 응답하였으며, 5명의 학생은 엔트로피는 상태함수임을 이해하는 것이 중요하다고 응답하였다. 2명의 학생은 총 엔트로피는 항상 증가한다는 서술을 머릿속에 기억하는 것이 가장 중요하다고 응답하였다.

대체로 본 연구에 참여한 학생들은 개념 이해를 기반으로 계의 엔트로피 변화량을 계산하는 방법 및 계산 결과를 사건의 방향성과 연결시키는 데 관심을 갖고 있는 것으로 추정되나, 문제 해결과 관련하여 학생들이 어떠한 지식을 중요하게 생각하며 실제로 그 지식들을 어떻게 적용하는지 살펴보기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

(6) 열역학 제2법칙에 대한 학생의 기본 이해에 대한 논의

지금까지의 학생 응답 분석 결과를 종합해보면, 학생들은 엔트로피 개념에 초점을 맞추어서 열역학 제2법칙을 학습하고 있음을 알 수가 있다. 열역학 제2법칙을 주로 엔트로피 개념을 이용하여 표현하였으며, 엔트로피를 ‘계의 무질서한 정도’로 설명하였으나 볼츠만 엔트로피($S = k \ln \Omega$)나 클라우지우스 엔트로피($dS = \delta Q/T$)를 이용하여 엔트로피를 설명하는 경우도 상당히 많았다. 열역학 제2법칙을 학습하는 데 있어서의 어려움은 대체로 엔트로피 개념에 대한 이해와 관련되며, 학습에 있어서 가장 중요한 부분도 열역학 제2법칙과 엔트로피 개념을 이해하는 것이라고 응답하였다. 열역학적 과정이나 열역학 제2법칙을 적용할 때 필요한 구속조건 등에 대한 관심은 상대적으로 부족한 편이었다.

한편 가역과정과 비가역과정에 대한 대표적인 예를 제시하는 문항에서는 열역학적 상황뿐만 아니라 역학적 상황이나 화학적 상황을 고려하는 학생들도 상당 수 있었으며, 역학과 열역학의 공통점과 차이점을 기술하는 문제에서는 다루는 계의 입자 수 차이에서 오는 사건의 비가역성에 대한 고려 없이, 두 분야의 경우 사용하는 물리량이 다를 뿐 근본적으로 동일한 법칙이 적용된다고 생각하는 학생들이 많았다. 이는 곧 엔트로피 개념을 학습하기에 앞서 비가역성의 근원이 무엇인지를 살펴보는 교수학습이 필요함을 의미하며, 이러한 학습을 통해 학생들은 엔트로피 개념이

왜 필요한지, 볼츠만의 엔트로피가 어떻게 사건의 방향성과 연결되는지에 대해 보다 깊이 이해하게 될 것이다.

5.3.2. 밀폐된 공간에서 좌우로 이동하는 피스톤 운동의 예측

이 절에서는 표 5.2의 문제 1에 제시된 밀폐된 공간에서 좌우로 이동하는 피스톤의 운동에 대한 연구자들의 풀이를 먼저 제시한 후에, 이 문제에 대한 학생들의 정성적인 설명 방법에 대해 살펴보고, 수학적으로 문제를 푼 몇몇 학생들의 풀이들 중 비가역과정의 특징을 잘 보여줄 수 있는 두 가지 풀이방법을 제시하였다.

이 문제에서 피스톤과 실린더는 단열물질로 되어있고 온도변화가 없으며, 피스톤과 벽 사이에 마찰이 없다는 가정을 하고 있다. 즉, 실제로 강체는 존재하지 않으며 따라서 열의 이동을 완벽하게 차단시킬 수 없고 벽과 피스톤 사이의 마찰이 존재하지 않는 상황은 구현할 수 없기 때문에 이 상황은 일종의 사고실험으로 볼 수 있다. 한편 ‘열(heat)’은 거시적으로는 온도 차가 나는 두 물체 사이에 교환하는 에너지로 볼 수 있으나, 전도에 의한 열이동을 미시적으로 살펴보면 고온의 물체와 저온의 물체가 접촉해 있을 때 두 물체의 경계면에서 입자 간 충돌에 의해 고온의 물체에서 저온의 물체로 전달되는 에너지로 해석할 수 있다. 따라서 열은 미시적 관점에서는 물체에 힘을 가해 물체를 이동시킬 때 전달되는 에너지인 ‘일(work)’과 명확하게 구분되지 않는다(Besson, 2003). 본 문제 상황은 미시적 관점에서 봤을 때 양쪽 방에 갇힌 분자들이 피스톤과 끊임없이 충돌하면서 에너지 교환을 하고 있기 때문에 (즉, 왼쪽 방에 갇혀있는 입자들은 피스톤과 충돌하면서 자신의 운동에너지의 일부를 피스톤에 전달하고, 에너지를 얻은 피스톤은 오른쪽 방에 속해있는 입자들과 충돌하면서 피스톤의 운동에너지의 일부를 오른쪽 방의 입자들에게 전달

하여 최종적으로 왼쪽 방에서 오른쪽 방으로 에너지가 이동하게 된다. 동일한 방법으로 오른쪽 방에서 왼쪽 방으로의 에너지 전달도 가능하다.) 피스톤은 에너지 전달자의 역할을 하게 된다.

거시적 관점에서 온도 차에 의해 전달되는 열의 이동이 없으며 고립계의 총 에너지는 보존되고, 열역학 제2법칙에 의해 최종적으로 피스톤이 멈춘다고 가정하면, 아래와 같은 수식을 세울 수 있다(Crosignani *et al.*, 1996; Curzon, 1969; Gislason, 2010; Hoover & Moran, 1979).

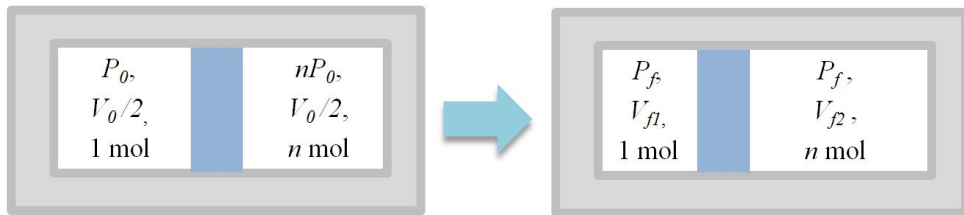


그림 5.1 문제 1의 계에 대한 변수들

열역학 제2법칙에 따르면 양쪽 기체의 압력은 최종적으로 동일해야 한다(Curzon, 1969). 양쪽 기체의 처음상태의 온도를 $T_0 (= P_0 V_0 / 2)$, 나중 상태의 온도를 각각 T_{f1} 과 T_{f2} 라고 하자. 계가 평형상태에 도달한 상황에서, 에너지 보존법칙을 사용하면(그림 5.1 참고),

$$\frac{3}{2}R(T_0 + nT_0) = \frac{3}{2}R(T_{f1} + nT_{f2})$$

이 성립한다. 이상기체 상태방정식($PV = nRT$)으로부터,

$$\frac{P_0 V_0}{2T_0} = \frac{P_f V_{f1}}{T_{f1}}, \quad \frac{nP_0 V_0}{2T_0} = \frac{P_f V_{f2}}{T_{f2}}$$

이 성립하며, 계의 총 부피는 일정하므로 $V_0 = V_{f1} + V_{f2}$ 이다. 위의 네 식을 연결하여 P_f 를 구하면, $P_f = (1 + n)P_0 / 2$ 이다.

이 문제의 경우, 열역학 법칙만으로는 기체의 최종 온도와 부피를 결정할 수 없으며, 기체의 최종 상태를 예측하기 위해서는 뉴턴의 운동 제 2법칙에 의해 주어지는 미분방정식과 열역학 법칙들을 함께 사용하여 문제를 해결해야 한다(Crosignani *et al.*, 1996; Gislason, 2010). 피스톤의 운동은 기체의 초기상태 및 피스톤의 질량 등에 의해 달라지지만, 단열 상자 내의 이상기체는 공기저항과 같은 역할을 하여 피스톤은 그림 5.2와 같이 감쇄진동을 한다.

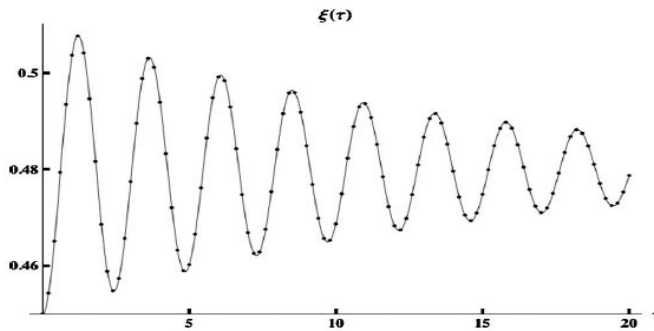


그림 5.2 시간에 따른 피스톤의 위치에 대한 시뮬레이션 결과 (Gislason, 2010)

Crosignani *et al.*(1996)은 이 문제 상황의 경우 아주 오랜 시간이 지나면 벽이 단열재로 되어있다고 하더라도 결국에는 양쪽 기체의 온도도 동일해진다고 주장하였다. 양쪽 방의 압력이 같아진 후라고 하더라도 미시적으로 관찰했을 때 양쪽 방에 들어있는 입자와 피스톤이 계속 충돌하면서 피스톤이 각 방에 있는 입자들의 운동에너지를 다른 방 쪽으로 전달해주는 역할을 하여 열역학 제2법칙에 따라 결국 양쪽 기체의 온도도 동일해지는 방향으로 사건이 진행될 것이기 때문이다.

문제 1에 대해 140명의 학생 중 총 91명의 학생이 응답을 하였다. 그 중 36명의 학생이 피스톤이 계속 진동한다고 응답하였으며, 56명의 학생이 피스톤이 진동하다가 멈춘다고 응답하였다(표 5.10 참고). 먼저 피스

톤이 계속 진동한다고 응답한 학생들의 주요 설명을 살펴보면, 에너지 보존법칙에 의해 상자 안의 ‘기체+피스톤’의 에너지는 일정하게 유지되어야 하며 특히 피스톤은 양쪽 기체의 압력 차에 의해 계속 진동할 것으로 예측하였다. 학생들의 대표적인 설명은 아래와 같다.

표 5.10 문제 1에 대한 학생의 응답: 피스톤이 최종적으로 멈추는지의 여부

| 설명 | 응답자 수 |
|--|-------|
| 피스톤은 계속 진동할 것이다. 왜냐하면..... | |
| - 마찰이 없고 단열과정이기 때문에 계의 에너지는 보존되기 때문이다. | 16 |
| - 기체가 피스톤에 가하는 힘을 용수철의 탄성력에 대응시켜 이 힘에 의해 피스톤이 운동하는 것으로 생각할 수 있다. | 9 |
| - ‘ $pV = \text{일정}$ ’ 이나 다른 수식들을 이용하여 계산하면 피스톤이 계속 진동한다는 결과를 얻을 수 있다. | 8 |
| - 그 외 (이유를 쓰지 않은 학생이 포함되어 있음.) | 3 |
| 피스톤은 결국 멈출 것이다. 왜냐하면..... | |
| - 자연은 평형상태로 이동하려는 경향이 있기 때문이다. | 11 |
| - 피스톤은 가속운동을 한다. 따라서 이 과정은 비가역적이며 총 엔트로피가 증가하게 된다. | 9 |
| - 기체와 피스톤의 충돌에 의해 피스톤의 운동에너지가 기체의 내부에너지로 전환될 것이다. | 7 |
| - 그 외 | 8 |
| - 이유는 잘 모르겠다. | 21 |

- 피스톤은 처음에 압력 차에 의해 왼쪽으로 이동한다. 하지만 양쪽의 압력이 동일해질 때 피스톤은 멈추지 않고 피스톤의 속력에 의해 계속 왼쪽으로 이동하며, 그러면 왼쪽의 압력이 오른쪽의 압력보다 더 높아지게 되고, 피스톤의 속력이 점차 줄어 어느 순간 피스톤이 멈춘다. 하지만 이번엔 오른쪽의 압력이 더 높으므로 피스톤은 왼쪽으로 이동하게 되며 피스톤은 이러한 운동을 반복하게 된다. 이러한 운동의 주요 이유는 마찰이 없고 계의 에너지는 보존되기 때문이다.

- 기체가 피스톤에 가하는 힘은 기체의 압력 차로 인하여 용수철 계수가 서로 다른 두 용수철이 연결되어 있는 시스템과 동일하게 생각할 수 있으며, 문제의 상황은 에너지가 보존되므로 피스톤은 계속 진동을 할 것이다. (그림 5.3 참고)

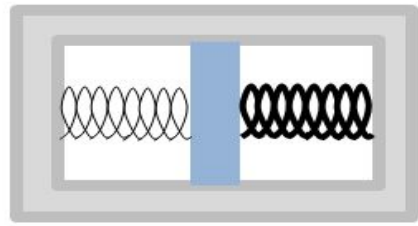


그림 5.3 피스톤의 운동을 설명하기 위한 용수철 모형

몇몇 학생들은 이 문항의 문제를 해결하는 데 있어서 수학적 계산을 하였다. 이 학생이 사용한 주요 수식은 계의 에너지는 일정하게 보존된다는 것과 단열과정에서는 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’이라는 식이 성립된다는 것이다. 이 문제를 풀이하는 데 있어서 16명의 학생이 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’이라는 수식을 사용하였으며, 이 중 11명이 피스톤이 계속 진동할 것으로 예측하였고, 6명의 학생이 상세하게 계산하였다. 피스톤이 계속 진동한다고 응답한 한 학생의 문제 해결 과정(풀이1)을 간략하게 살펴보면 아래와 같다.

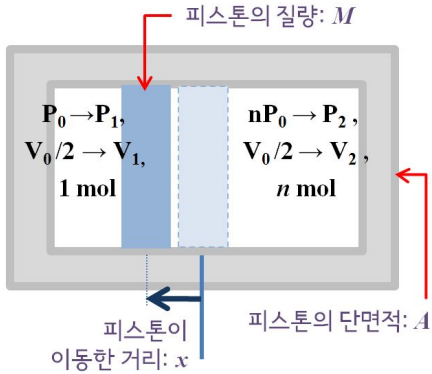


그림 5.4 피스톤이 왼쪽으로 x 만큼 이동하였을 때의 계의 상태

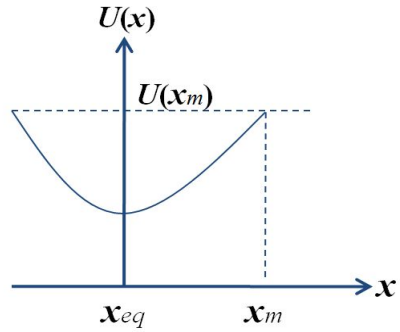


그림 5.5 문제 1에 대한 풀이를 설명하기 위한 $U-x$ 그래프

(풀이1) 피스톤은 양쪽 용기의 압력 차에 의해 운동을 한다. (그림 5.4 참고) 피스톤이 처음 위치에서 x 만큼 이동하였을 때의 상자 안 기체의 내부에너지 $U(P_1, P_2, V_1, V_2) = 3(P_1 V_1 + P_2 V_2)/2$ 이며, 이 때 양쪽 기체의 압력과 부피 P_1, P_2, V_1, V_2 는 그림 5.4와 단열과정에서 적용되는 식인 “ $pV^\gamma = \text{일정}$ ”에 의해 아래와 같이 결정된다.

$$V_1 = V_0/2 - xA, \quad V_2 = V_0/2 + xA,$$

$$P_0 \left(\frac{V_0}{2}\right)^\gamma = P_1 \left(\frac{V_0}{2} - xA\right)^\gamma, \quad nP_0 \left(\frac{V_0}{2}\right)^\gamma = P_2 \left(\frac{V_0}{2} + xA\right)^\gamma,$$

상자는 외부와 단열되어 있고 피스톤과 상자 사이의 마찰은 존재하지 않기 때문에 상자가 갖는 총 에너지는 $U = U(P_1, P_2, V_1, V_2) + Mv^2/2$ 로 표현될 수 있으며, 특히 P_1, P_2, V_1, V_2 는 모두 x 의 함수로 표현이 가능하므로 $U = U(x) + Mv^2/2$ 로 쓸 수 있다(그림 5.5 참고). 즉, 피스톤의 위치에 의해 기체의 내부에너지와 피스톤의 운동에너지가 결정되며, 따라서 피스톤은 영원히 진동한다고 볼 수 있다.

위의 풀이는 얼핏 보기에는 상당히 논리정연하고 물리적으로 오류가 없어 보인다. 하지만 Gislason(2010)의 분석에 따르면 피스톤은 최종적으로 멈추어야 하는데, 이 풀이에 의하면 피스톤이 계속 진동해야 한다. 이러한 차이가 생긴 이유는 비가역 단열과정에서 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’을 사용하였기 때문이다. 이에 대해서는 5.3.4에서 좀 더 자세하게 설명하겠다.

두 번째로 피스톤이 진동하다가 멈춘다고 답변한 학생들의 응답 분석 결과는 다음과 같다(표 5.10 참고). 응답한 학생 56명 중 절반 정도의 학생만이 구체적인 이유를 기술하였는데, 이로부터 많은 수의 학생들이 피스톤이 멈춘다고 추측만 할 뿐 멈추는 이유에 대해서는 논리적으로 설명해내지 못하는 것으로 생각할 수 있다. 이유를 쓴 학생 중 상당 수가 ‘자연현상은 열역학 제2법칙을 따르며 따라서 계는 평형상태로 이동하려고 하는 경향이 있다.’고 기술하거나, ‘이 과정은 준정적 과정이 아니기 때문에 엔트로피가 증가하는 과정이다.’ 등 열역학 제2법칙의 관점에서 기술하였다. 학생의 대표적인 응답은 아래와 같다.

- 자연현상은 평형상태로 이동하려고 하며, 따라서 최종적으로 양쪽의 압력이 같아진 상태에서 피스톤은 멈추게 될 것이다.
- 처음에 붙들고 있던 피스톤을 놓으면 피스톤은 왼쪽으로 순간적으로 가속운동을 하게 되며 이것에 의해 공기입자가 쏠리게 된다. 즉, 양쪽 기체는 평형상태에 놓여있지 않으며 따라서 이 과정은 비가역과정이다 (가역과정은 평형상태의 연속으로 생각할 수 있지만 이 상태는 평형상태가 아니다). 그래서 엔트로피가 증가하며 결국 피스톤은 멈추게 될 것이다.

- 열역학 제2법칙에 따르면 제2종 영구기관은 존재할 수 없다. 처음 상태에서 피스톤을 놓으면 오른쪽 기체분자들이 갖고 있던 운동에너지의 일부가 피스톤의 운동에너지로 전환되고 또한 피스톤의 운동에너지는 왼쪽 기체로 전달된다. 이러한 과정이 반복되다 보면, 피스톤이 갖고 있던 운동에너지는 결국 열에너지(내부에너지) 형태로 전환될 것이다. 즉, 결국 피스톤은 멈추게 된다.

이러한 관점에 대해서 끝까지 수학적인 풀이를 한 학생은 없었지만, 학생 중에 계가 최종적으로 평형상태에 도달한다고 가정을 하면 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’이라는 수식으로 문제를 풀 때와 모순되는 점이 생기기 때문에 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’을 비가역과정에서 사용할 수 없다고 기술한 학생이 있었다. 이 학생의 설명은 아래와 같다 (풀이2).

(풀이2) 그림 5.1에서 피스톤이 최종적으로 정지한다고 가정하고 문제를 풀면, 기체의 최종 압력 $P_f = (1+n)P_0/2$ 이다.

하지만 이 과정이 단열과정이므로, ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’이 성립해야 한다고 가정한 후, 위에서 구한 P_f 를 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’에 대입하면,

$$P_0 \left(\frac{V_0}{2}\right)^{5/3} = P_f V_{f1}^{5/3} = \frac{(1+n)P_0}{2} V_{f1}^{5/3} \quad \rightarrow \quad V_{f1} = \frac{V_0}{2^{2/5}(1+n)^{3/5}}$$

$$nP_0 \left(\frac{V_0}{2}\right)^{5/3} = P_f V_{f2}^{5/3} = \frac{(1+n)P_0}{2} V_{f2}^{5/3} \quad \rightarrow \quad V_{f2} = \frac{V_0}{2^{2/5}} \left(\frac{n}{1+n}\right)^{3/5}$$

이고, 이를 이용하여 최종 부피의 합을 구하면,

$$V_{f1} + V_{f2} = \frac{V_0 \left(1 + n^{3/5}\right)}{2^{2/5}(1+n)^{3/5}}$$

을 얻는데, 이는 $n = 1$ 인 경우를 제외하고는 처음부피와 일치하지 않는다. 따라서 이러한 계산으로부터 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’이 성립하기 위해서는 피

스톤은 영원히 평형상태에 도달하지 않는다고 생각하거나, 피스톤이 평형상태에 도달한다면 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’이라는 식이 이 상황에 적용되지 않는다고 해석해야 한다.

즉, 앞서 제시된 두 가지 형태의 수학적 문제풀이로부터 알 수 있듯이, 열역학 제1법칙만으로는 피스톤이 계속 진동하는지 또는 멈추는지의 여부를 결정할 수 없다. 문항 1을 수학적으로 해결하려고 한 학생들의 문제풀이로부터 학생들이 단열과정에서 무조건 “ $pV^\gamma = \text{일정}$ ”이라는 식을 적용하려고 하는 경향을 볼 수 있었으며, 이 학생들은 계가 열역학적 평형상태에 놓여있지 않음에도 불구하고 기체의 압력이나 온도를 정의하는 것을 볼 수 있었다. 또한 ‘마찰이 없다’라는 조건과 ‘열의 출입이 없다’라는 조건으로부터 문제를 풀이하는 데 있어서 역학적 에너지 보존법칙을 적용하려고 하는 학생들도 상당 수 있었다. 한편 피스톤이 멈출 것으로 예측한 학생들은 열역학 제2법칙을 고려하여 문제를 해석하였다. 즉, 이 문제를 잘 해결하기 위해서는 열역학 제1법칙과 제2법칙을 모두 적용할 수 있어야 하며, ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’을 사용할 수 있는 조건을 정확히 알아야 하고, 온도, 압력, 부피는 상태변수로서 사건이 비가역적으로 진행되는 중에는 제대로 정의될 수 없음을 알고 있어야 한다.

5.3.3. 수직으로 놓인 실린더에서 피스톤 운동의 예측

이 문항에 대한 풀이는 Mungan(2003)의 설명을 참고하여 풀이하면 다음과 같다. 피스톤에 추를 올리면 열역학 제2법칙에 의해 최종적으로 피스톤과 추가 정지한다.

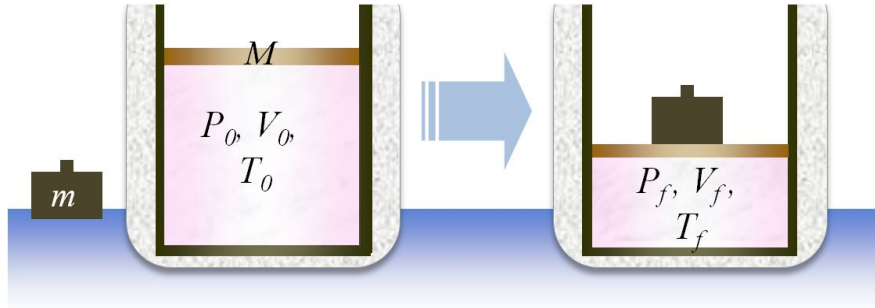


그림 5.6 문제 2의 계에 대한 변수들: 피스톤 위에 추를 올려놓는 상황

(그림 5.6과 같이 외부는 진공이고, 피스톤의 질량을 M , 피스톤의 단면적을 A , 추의 질량을 m 으로 두고, 기체의 나중 상태를 P_f, V_f, T_f 라고 하면.)

최종적으로 피스톤과 추가 정지한다면 추와 피스톤이 가하는 힘에 의한 압력이 기체의 압력과 동일해지므로

$$P_f = (M + m)g/A = P_0 + mg/A$$

이다. 다음으로 열역학 제1법칙인 ' $\Delta U = -W$ '와 이상기체 상태방정식 ' $PV/T = \text{일정}$ '을 사용하여 나중 부피 V_f 를 구하면,

$$\frac{3}{2}R(T_f - T_0) = \frac{3}{2}(P_f V_f - P_0 V_0) = (M + m)g \frac{V_0 - V_f}{A}$$

이며, 따라서 $V_f = \frac{5M+2m}{5(M+m)} V_0$ 이 된다. 또한 이상기체 상태방정식

($PV/T = \text{일정}$)으로부터 나중 온도를 구하면, $T_f = \frac{5M+2m}{5M} T_0$ 이 된다.

다음으로 올려놓은 피스톤 위의 추를 다시 들어내는 경우를 살펴보자.

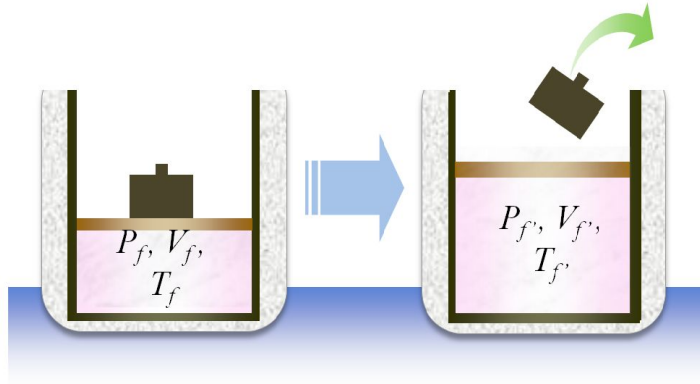


그림 5.7 문제 2의 계에 대한 변수들: 피스톤 위의 추를 제거하는 상황

기체의 나중 상태를 $P_{f'}$, $V_{f'}$, $T_{f'}$ 라고 하면, 추(m)를 들어낸 이후에 외부에서 기체에 가하는 힘은 피스톤(M)의 무게에 의한 것이므로, 기체의 최종압력은 처음과 동일하게 $P_{f'} = Mg/A = P_0$ 로 주어진다.

열역학 제1법칙인 $\Delta U = -W$ 와 이상기체 상태방정식인 ' $PV/T = \text{일정}$ ' 을 사용하여 추를 들어낸 후의 기체의 나중상태를 예측해보면,

$$\frac{3}{2}R(T_{f'} - T_f) = \frac{3}{2}(P_{f'}V_{f'} - P_fV_f) = -Mg \frac{V_{f'} - V_f}{A}$$

이다. 따라서 $V_{f'} = \frac{5M+3m}{5M} V_f$ 이며, 이 값은 V_0 보다 크다. 또한 이상기체 상태방정식으로부터 나중 온도를 구하면, $T_{f'} = \frac{5M+3m}{5(M+m)} T_f$ 로서 이 값 또한 T_0 보다 크다.

사실 추를 피스톤 위에 올리는 과정 및 피스톤 위에 올려져 있는 추를 제거하는 과정은 준정적 과정이 아니며, 따라서 엔트로피가 증가하는 과정이다. 또한 엔트로피는 상태함수이므로, 고립계의 엔트로피가 증가한다는 뜻은 처음 상태와 나중 상태가 다를 수 있음을 의미한다. 그러므로 기체의 처음상태 P_0 , V_0 , T_0 와 나중상태 $P_{f'}$, $V_{f'}$, $T_{f'}$ 는 동일할 수 없다.

이 문항에 대해서는 140명의 학생 중 69명의 학생이 응답을 하였다. 피스톤 위에 추를 올려놓았을 때 기체의 최종상태를 예측하는 질문에 대해 기체의 부피가 감소하고 온도가 증가한다고 응답한 학생은 37명이었으며, 11명의 학생은 주어진 문제의 상황은 피스톤이 계속 진동하는 상황 이므로 최종상태를 결정할 수 없다고 응답하였다. (표 5.11 참고)

표 5.11 문제 2에 대한 학생의 응답: 추를 피스톤 위에 올려놓는 상황

| 설명 | 응답자 수 |
|---|-------|
| ‘ $F = ma$ ’와 ‘ $pV = \text{일정}$ ’으로부터, 피스톤은 영원히 진동할 것이다. | 11 |
| 피스톤은 최종적으로 멈추게 될 것이다. 기체의 압력은 증가할 것이며 부피는 감소할 것이다. | |
| - ‘ $pV = nRT$ ’와 ‘ $pV = \text{일정}$ ’으로부터 기체의 온도는 증가할 것이다. | 19 |
| - ‘ $pV = nRT$ ’와 ‘ $\Delta U = -W$ ’으로부터 기체의 온도는 증가할 것이다. | 13 |
| - ‘ $Q = 0$ ’(단열)으로부터 기체의 온도는 변하지 않을 것이다. | 5 |
| 그 외 | 3 |
| 결정하지 못함 | 18 |

기체의 부피가 감소하고 온도가 증가한다고 응답한 학생들 중 절반 정도의 학생은 ‘ $pV = \text{일정}$ ’과 ‘ $PV/T = \text{일정}$ ’을 사용하여 기체의 최종상태를 예측하였으며, 나머지 학생들은 열역학 제1법칙인 ‘ $\Delta U = -W$ ’와 ‘ $PV/T = \text{일정}$ ’을 이용하여 최종상태를 예측하였다. 하지만 위의 두 가지 방법으로 최종상태를 각각 구해보면, 아래와 같이 그 결과가 일치하지

않음을 확인할 수 있다.

(그림 5.7의 상황에서)

(풀이3) ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’과 ‘ $PV/T = \text{일정}$ ’을 사용하는 경우, 힘의 평형에 의해 압력을 구하면, $P_0 = Mg/A$, $P_f = (M+m)g/A = P_0 + mg/A$ 이다.

‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ (단, $\gamma = 5/3$)’을 이용하여 나중 부피 V_f 를 구하면, $V_f =$

$$\left(\frac{P_0}{P_f}\right)^{\frac{3}{5}} V_0 = \left(\frac{M}{M+m}\right)^{\frac{3}{5}} V_0 \text{ 으로 부피가 감소하며, 이상기체 상태방정식으로부터}$$

나중 온도를 구하면, $T_f = \left(\frac{M+m}{M}\right)^{\frac{2}{5}} T_0$ 으로 온도가 증가한다.

(풀이4) 열역학 제1법칙인 ‘ $\Delta U = -W$ ’와 이상기체 상태방정식 ‘ $PV/T = \text{일정}$ ’을 사용하여 문제를 풀이한 경우는 앞에서 논의한 바와 같

이 $V_f = \frac{5M+2m}{5(M+m)} V_0$ 이며 $T_f = \frac{5M+2m}{5M} T_0$ 이다.

즉, (풀이 3)과 (풀이 4)의 경우 모두 부피는 감소하고 온도는 증가하지만, 추의 질량인 $m = 0$ 인 경우를 제외하고는 온도의 크기에 있어서 차

이가 난다. (풀이 3)에서는 $T_f = \left(\frac{M+m}{M}\right)^{\frac{2}{5}} T_0$, (방법 2)에서는 $T_f = \frac{5M+2m}{5M} T_0$

가 얻어졌다. 실제로 비가역과정에서는 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’이 성립하지 않으므로 (풀이 4)로 풀이하는 것이 옳다.

한편, 11명의 학생은 주어진 문제의 상황은 피스톤이 계속 진동하는 상황이므로 최종상태를 결정할 수 없다고 응답하였다. 이 학생들은 계산을 할 때 ‘ $F = ma$ ’와 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’을 사용하여 추가 계속 진동함을 증명하려고 노력하였으며, 정성적으로 응답을 한 학생들은 아래와 같이 기술하였다.

추를 올려놓으면 추가 아랫쪽으로 내려가면서 기체의 압력은 증가하지만, 기체의 압력과 (추+피스톤)의 무게에 의한 압력이 동일해지는 순간에 추는 관성에 의해 더 아랫쪽으로 내려갈 수 있으며, 그 이후에는 기체의 압력이 (추+피스톤)의 무게에 의한 압력보다 커지기 때문에 어느 순간 추는 정지했다가 다시 윗쪽으로 올라오게 된다. 이러한 과정이 계속 반복되면서 추는 기체의 압력과 (추+피스톤)의 무게에 의한 압력이 동일해지는 지점을 기준으로 계속 진동할 것이다.

응답자 중 5명의 학생은 이 과정은 단열과정이므로 기체의 온도가 일정하게 유지된다고 생각하였는데, 이는 Kautz *et al.*(2005a) 등이 언급한 단열과정에 대한 학생의 주요 오개념 유형 중 하나이다.

다음은 피스톤 위에 올려놓은 추를 다시 제거할 때, 계의 상태가 처음 상태로 되돌아 올 것이라고 생각하는지에 대한 질문에 대한 응답이다. 69명의 응답자 중에 11명이 피스톤은 계속 진동운동을 할 것으로 예측하였고, 23명은 처음 상태로 되돌아가지 않는다고 예측하였으며, 27명은 처음상태로 되돌아갈 것으로 예측하였다(표 5.12 참고).

피스톤이 계속 진동운동을 할 것이라고 답변한 11명은 피스톤 위에 추를 올려놓는 문제에서도 피스톤이 진동운동을 할 것으로 예측한 학생들이 대부분이다. 피스톤이 처음 상태로 되돌아가지 않는다고 응답한 경우, 그 이유를 살펴보면 대부분이 열역학적 과정이 준정적 과정이 아니기 때문에 비가역과정에 해당하기 때문이라고 답하였다. 몇명의 학생은 열역학 제1법칙을 이용하여 기체가 외부로부터 받은 일과 기체가 외부로 해준 일의 크기를 비교하였는데, (추+피스톤)이 기체에 해준 일이 피스톤이 받은 일보다 크기 때문에 계는 처음상태로 되돌아가지 않는다고 응답하였다.

표 5.12 문제 2에 대한 학생들의 응답: 피스톤 위에 올려놓은 추를 제거한 이후 기체가 처음상태로 되돌아가는지의 여부

| 설명 | 응답자 수 |
|---|-------|
| 피스톤이 진동하는 상황에서 추를 제거하면, 피스톤은 이전과는 다른 진폭으로 계속 진동할 것이다. | 11 |
| 기체는 처음 상태로 되돌아가지 않을 것이다. | |
| - 이 과정은 비가역과정이기 때문이다. (또는 준정적 과정이 아니기 때문이다.) | 19 |
| - 추를 올려놓을 때 추와 피스톤이 기체에 해준 일이, 추를 제거할 때 기체가 외부에 해준 일보다 더 크다. | 4 |
| 기체는 처음 상태로 되돌아갈 것이다. | |
| - 열의 이동이 없으므로($Q = 0$), 기체의 엔트로피 변화량은 0이다. | 11 |
| - ' $pV = \text{일정}$ '과 ' $pV = nRT$ '로부터 기체의 압력을 알면 부피와 온도도 결정할 수 있다. 그런데 추를 제거하면 기체의 압력은 처음과 동일해진다. | 7 |
| - 계의 에너지가 보존된다. | 5 |
| - 기체가 외부로부터 받은 일만큼 기체가 외부에 일해 주었다. | 2 |
| 그 외 | 11 |

반면 처음상태로 되돌아간다고 응답한 학생의 경우, 그 이유에는 몇 가지가 있는데 먼저 문제의 상황은 단열과정($Q = 0$)이므로 계의 엔트로피는 일정하게 유지되며($\Delta S = 0$) 따라서 이 과정은 가역과정이기 때문이라고 기술하거나, 계가 외부와의 열교환이 없으므로 에너지가 보존되기 때문이라는 응답이 있었다. 또는 ' $pV = \text{일정}$ '으로부터 추를 제거한 후의 기체의 압력은 추를 올려놓기 전의 압력과 동일하기 때문에 기체의 부피도 추를 올려놓기 전과 동일하고 따라서 계는 처음상태로 되돌아온다는

답변이 있었으며, 주위환경이 계에 해준 일만큼 계가 주위환경에 일을 해 주기 때문에(즉, 열역학적 일을 잘못 계산한 경우임) 계는 처음상태로 되돌아간다는 응답이 있었다.

5.3.4. 성공적인 문제풀이를 위한 개념적 지식들

비가역 단열과정에 대한 위의 두 문제를 성공적으로 해결하기 위해 학생이 알아야 할 개념적 지식들에는 가역과정과 비가역과정에 대한 이해, 열역학적 평형에 대한 이해, ' $pV^\gamma = \text{일정}$ '을 사용할 수 있는 조건, 계의 엔트로피 변화량 계산, 비가역 과정에서의 열역학적 일의 사용 등이 있다.

(1) 가역과정과 비가역과정에 대한 이해

본 연구에서 제시한 문제들은 그 과정이 가역적인가 비가역적인가를 판단한 후, 열역학 제2법칙을 적용할 수 있으면 정성적으로는 쉽게 예측이 가능한 문항들이다. 고립계에서 사건이 비가역적으로 일어나면 총 엔트로피가 증가하게 되고, 엔트로피가 상태함수임을 감안하면 나중의 계의 상태는 처음과 달라져야 한다. 즉, 계는 주위환경의 변화 없이 처음 상태로 돌아올 수 없다.

사건이 비가역적으로 일어나는지를 확인하는 일은 가역과정의 조건에 위배되는 측면이 있는지를 확인하면 된다. 열역학적 과정이 준정적이지 않고 계가 열역학적 평형 상태에 놓여있지 않은 경우, 마찰이 존재하는 경우, 또는 온도 차가 나는 두 물체가 직접 접촉해 있는 경우에 사건이 비가역적으로 일어난다.

첫 번째 문항에서는 초기에 피스톤을 중심으로 양쪽 기체의 압력에 차이가 있었으며, 따라서 피스톤이 작동을 시작하는 순간부터 각 기체들은

열역학적 평형 상태에 놓여있지 않았다. 즉, 이 과정은 준정적 과정이 아니며 엔트로피가 증가하는 과정으로서 외부의 변화 없이는 계가 처음상태로 되돌아갈 수가 없다. 이러한 측면에서 피스톤은 영원히 같은 크기의 진폭으로 진동운동을 할 수가 없다.

두 번째 문항 또한 무거운 추를 피스톤 위에 올려놓아서 기체가 압축되고 있는 과정에서는 기체의 압력이 단위면적당 (추+피스톤)의 무게에 대응되지 않기 때문에 기체가 열역학적 평형상태에 놓여있다고 말할 수 없으며, 따라서 이 과정은 준정적 과정이 아니다. 피스톤 위에 놓여 있는 무거운 추를 제거하는 과정도 마찬가지이다. 이러한 과정에서 총 엔트로피는 증가해야 하며, 따라서 추를 올려놓고 제거하는 과정을 거치기 전과 거친 후의 계의 상태는 다를 것으로 추측할 수 있다.

본 연구에 참여한 많은 학생들이 가역과정의 대표적인 예로서 단진자운동과 같은 역학적 과정이나 상전이 또는 화학평형에서의 정반응과 역반응을 생각하고 있었다. 즉, 수많은 입자들이 충돌하는 열역학적 과정에서의 가역과정에 대한 조건을 잘 알지 못하고 있었으며 비가역적으로 일어나는 사건은 최종적으로 처음과는 고립계의 상태가 달라진다는 것을 문제풀이과정에서 적용하지 못하였기 때문에 ‘피스톤이 계속 진동한다.’와 같은 답변을 하게 된 것으로 보인다.

(2) 열역학적 평형에 대한 이해

문제에 제시되어 있는 ‘마찰이 없다’와 ‘열의 이동이 없다’라는 표현으로부터 상당 수의 학생들이 에너지 보존, 특히 역학적 에너지 보존을 떠올리는 것을 볼 수 있었다. 즉, 기체가 압축되고 팽창하는 과정을 용수철이 압축되고 팽창하는 과정에 대응시켜, 양쪽 방에 있는 기체에 압력 차이가 있는 상태는 용수철이 압축되어 있거나 늘어나 있어 퍼텐셜에너지를

저장하고 있는 상태와 동일하다고 생각하였다. 그리고 이러한 퍼텐셜 에너지가 피스톤의 운동에너지와 교환되며 총 역학적 에너지는 보존되기 때문에, 어떤 열역학적 상태이든 처음에 비평형상태에 놓여있으면 마찰이 존재하지 않고 외부에서 에너지가 유입되지 않는 한 피스톤은 절대 열역학적 평형상태에 도달할 수 없다는 생각을 갖고 있었다. 즉, 학생들은 역학에서 배운 역학적 에너지 보존에 대한 이해를 열역학에도 그대로 적용하고자 하였는데, 이는 열역학을 역학의 일종으로 생각하여 열역학 문제풀이에서 열역학 제2법칙에 대한 고려를 하지 않았기 때문에 나타나는 현상이다.

열역학 제2법칙을 고려한다는 것의 의미는 입자 수가 많은 계가 처음에 열적, 역학적 비평형 상태에 놓여있더라도 최종적으로는 평형상태로 이동한다는 것을 의미한다.

“엔트로피 개념은 어떤 계가 열역학적 평형상태에 도달했는지를 보여주는 척도가 된다. 고립계에서 사건은 엔트로피가 최대가 되는 방향으로 진행되며, 이것이 바로 열역학적 평형상태이다.”

작은 바른틀 모든 상황(계의 에너지가 일정하게 유지되는 경우)에서 통계역학적으로 계를 다룰 때의 기본적인 가정은 계는 동등한 확률의 여러 미시 상태를 가질 수 있는데, 우리가 관찰하는 거시적 상태는 미시상태가 가장 많은, 확률이 가장 높은 거시상태로 진행된다는 것이다. 그래서 최종적으로 모든 고립계는 국소적으로 요동(fluctuation)이 있을 수 있지만 최종적으로는 거시적 물리량(상태변수들)이 변화하지 않는 열역학적 평형상태에 도달한다.

열역학적 평형에는 여러 가지 형태가 존재한다. 서로 상호작용하는 두

물체의 온도가 다른 경우, 전체 계의 엔트로피가 최대가 되기 위해서는 두 물체의 온도가 같아질 때까지 고온에서 저온으로 열이 이동해야 하며, 따라서 접촉한 두 물체의 온도가 동일해지는 것을 열적 평형상태(thermal equilibrium)라고 한다. 역학적 평형(mechanical equilibrium)은 상호작용하는 두 계의 압력과 관련되며, 열역학 제2법칙에 따르면 최종적으로 두 계의 압력은 동일해져야 한다. 계가 두 개의 상(phase)을 포함하고 있는 경우에는 각 상에 해당하는 물체의 질량이 더 이상 변하지 않고 평형에 도달해 있을 때를 상평형(phase equilibrium)에 도달하였다고 표현한다. 입자가 서로 교환되거나 입자 간 충돌로 인하여 화학 반응이 일어날 때 계의 화학적 조성이 시간에 따라 변하지 않으면 화학퍼텐셜(chemical potential)이 동일해졌다고 표현하고, 이를 화학적 평형(chemical equilibrium)이라고 부른다.

역학에서 역학적 평형상태에 도달하였다고 하면 물체에 작용하는 힘(force)과 돌림힘(torque)의 합력이 0이 되어 정지 또는 등속 직선운동을 하는 경우를 생각할 수 있으며, 물체가 한 지점을 중심으로 영원히 진동운동을 하는 경우(예: 용수철이나 단진자의 단진동 운동)는 동적으로 안정된 상태라고 이야기한다. 한편, 열역학에서의 평형상태는 거시적으로 계를 관찰했을 때 더 이상 상태변수들의 변화가 관측되지 않는 것을 의미하며, 따라서 역학과 열역학에서의 평형의 의미는 상당히 다르다고 말할 수 있다.

문제 상황에서 주어진 계는 외부와 열적으로 차단되어 있는 계이다 하지만, 계 내부에 위치한 기체를 구성하는 입자와 피스톤은 충돌을 통해 끊임없이 운동에너지를 주고받는다. 즉, 이러한 에너지교환으로 인하여 피스톤의 운동에너지는 결국 기체의 내부에너지로의 전환이 가능하며, 따라서 피스톤은 운동에너지를 잃어버리고 계는 결국 피스톤 양쪽의 기

체의 압력이 동일해지는 평형상태에 도달할 것이다. 물론 피스톤이 평형점을 중심으로 약간 요동하는 모습은 확인할 수 있다(Gislason, 2010). 따라서 설문에서 제시된 두 문항은 피스톤이 최종적으로 역학적 평형상태에 도달한다는 전제조건 하에 계산되어야 한다.

(3) ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’ 의 사용 조건

비가역 단열과정에 대한 문항을 풀이하는 데 있어서 학생들이 가장 많이 사용한 수식은 이상기체 상태방정식인 ‘ $PV = nRT$ ’와 더불어 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’이다. 하지만 이 식과 이상기체 상태방정식을 사용해서 계의 최종상태에 대한 결과를 예측할 때와 이상기체 상태방정식과 열역학 제1법칙을 이용하여 계의 최종상태를 예측할 때 그 결과가 다름을 문항 1과 문항 2의 풀이를 통해 확인할 수 있었다.

사실 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’은 계의 엔트로피 변화가 없는, 이상기체가 가역단열과정을 거치는 경우에만 사용할 수 있는 식인데, 이에 대한 증명과정은 주로 아래와 같은 두 가지 형태로 나타난다.

(증명1) 온도가 T , 부피가 V , 입자수가 N 인 단원자분자 이상기체의 엔트로피는 다음과 같이 주어진다.

$$S(T, V, N) = N \left(\log T^{\frac{3}{2}} + \log V + \text{상수} \right)$$

따라서 계의 엔트로피가 일정하게 유지되기 위해서는 ‘ $T^{\frac{3}{2}}V = \text{일정}$ ’이 만족되어야 한다. 여기에 이상기체 상태방정식인 $pV = NkT$ 를 결합시키면, ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’을 얻을 수 있다. (Kittel & Kroemer, 1980, p. 173)

(증명2) 그림 5.8와 같이 피스톤 위의 작은 추를 하나씩 들어올리는 과정을 열역학 제1법칙으로 표현하면,

$$dE_{int} = Q - pdV$$

이다. 이 과정은 단열과정이므로 $Q = 0$ 이며, $dE_{int} = nC_V dT$ 와 $pV = nRT$, $pdV + Vdp = nRdT$ 를 위의 식에 적용하면,

$$ndT = -\left(\frac{p}{C_V}\right)dV = \frac{pdV + Vdp}{C_P - C_V}, \quad \frac{dp}{p} + \left(\frac{C_P}{C_V}\right)\frac{dV}{V} = 0$$

이고, 이로부터 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’을 얻을 수 있다. (Halliday *et al.*, 2008, p. 527)

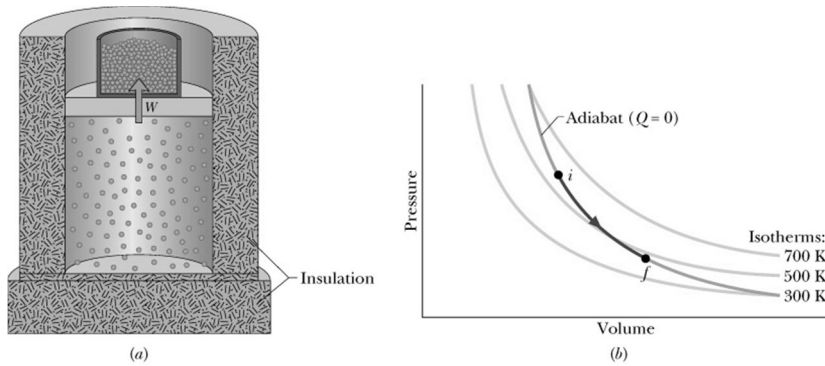


그림 5.8 가역단열과정에서의 p - V 그림 (Halliday *et al.*, 2008)

(증명1)은 다른 조건 없이 계의 엔트로피가 일정하게 유지되는 상황만을 가정하고 있으며, 이 때 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’을 얻을 수 있음을 보이고 있다. 이 식이 성립되는 경우의 열역학적 과정을 구체적으로 보여주는 예가 (증명2)의 과정이라고 할 수 있다. 그림 5.8를 보면 알 수 있듯이, 외부에서 열이 유입되지 않으면서 매우 작은 추를 하나씩 들어올리는 과정은 매 순간 기체상태를 기술할 수 있는 준정적 과정이다. 사실 식을 유도하는 과정에서 단열과정에 대한 열역학 제1법칙을 $dU = -\delta W = -pdV$ 로

표현하는 것은 이미 이 과정이 준정적 과정임을 전제하는 것이다. 비가역과정인 경우에는 계의 압력 p_{sys} 과 외부의 압력 p_{ext} 이 동일하지 않아서 계가 외부로 해준 일 $\delta W = -p_{ext}dV \neq p_{sys}dV$ 이며, 계의 압력에 대한 정보를 알기 어렵기 때문에 결론적으로 비가역과정에서는 ‘ pV = 일정’을 사용할 수 없다 (Anacleto *et al.*, 2009; Anacleto & Pereira, 2009; Miranda, 2008).

‘ pV = 일정’은 가역단열과정에서 기체의 나중 부피와 온도를 쉽게 예측할 수 있게 해 준다. 하지만 앞에서 본 바와 같이 비가역 단열과정에서는 이 식을 이용하여 계의 최종상태를 근사적으로만 예측할 수 있으며, 특히 이 식을 모든 단열과정에 적용할 수 있다고 잘못 알고 있는 경우에는 문항 1이나 문항 2에서 다수의 학생들이 풀이한 바와 같이 처음에 열역학적 평형상태에 놓여있지 않은 계는 최종적으로 평형상태에 도달하지 못하고 피스톤이 계속 진동할 것으로 잘못 예측할 가능성이 있다.

한편, Halliday *et al.*(2008) 및 Young *et al.*(2008)과 같이 학생들이 흔히 참고하는 대표적인 물리교과서에서 이 수식을 사용할 수 있는 조건을 살펴보면, 과정의 가역성 여부에 대한 설명 없이, ‘이상기체, 단열과정일 때’만을 언급하는 경우가 많다. 이러한 이유로 학생들은 ‘ pV = 일정’을 사용함에 있어서 이 수식을 가역과정에서만 쓸 수 있다는 것을 인지하지 못할 수 있다. 아래는 ‘ pV = 일정’을 사용하여 문제를 풀이한 교과서의 예제들로서, 두 문항 모두 열역학적 과정이 가역적인지의 여부를 고려하지 않고 있다.

산소(이상기체라고 가정하자) 1몰이 처음 310 K 의 온도에서 처음부피 $V_i = 12\text{ L}$ 에서 나중부피 $V_f = 19\text{ L}$ 로 단열팽창을 하였다면, 나중 온도는 얼마가 되겠는가? 산소는 이원자 분자이고 회전 운동은 있지만 진동운동

은 없다. (Halliday *et al.*, 2008, p. 528)

단원자 분자 이상기체의 처음 압력은 $1.50 \times 10^5 \text{ Pa}$ 이고 부피는 0.0800 m^3 이다. 이 기체가 외부와 단열된 채로 부피가 0.0400 m^3 까지 줄었다. 기체의 최종 압력은 얼마인가? (Young *et al.*, 2008, p. 669)

물론 비가역과정에서도 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’을 사용하여 근사적으로 단열과정에서의 기체의 최종 압력이나 부피를 예측할 수도 있다. 하지만 본 연구에서 사용한 문항에서 보는 바와 같이 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’을 사용하는 것 때문에 계의 나중 상태를 잘못 예측할 수 있다. 또한 학생들은 단열팽창의 일종인 자유팽창에서는 왜 이 식을 사용할 수 없는지에 대한 의문을 가질 수 있으며, 이 때문에 열역학에서의 단열과정은 굉장히 어려운 주제로 여기게 될 수 있다.

(4) 계의 엔트로피 변화량 계산

한편, 주어진 문제를 풀이하기 위해서 계의 엔트로피 변화량을 고려하는 학생들도 상당 수 있었다. 고립계의 총 엔트로피 변화량이 0이면 계는 준정적 과정을 거쳐 처음상태로 되돌아갈 수 있으며, 0보다 크면 그 과정은 비가역적이어서 외부에서 에너지가 유입되지 않는 한 처음상태로 되돌아갈 수 없다. 학생들은 문제상황에서 엔트로피 변화량을 계산할 때 단순히 식 $dS = \delta Q/T$ 에서 단열과정이므로 $\delta Q = 0$ 으로 생각하여 엔트로피 변화가 없다고 결론내렸다. 즉, 이주현, 송진웅(2007)에서 지적한 바와 같이 학생들은 사건이 준정적으로 진행되는지의 여부를 고려하지 않고 계의 엔트로피 변화량을 계산하였다. 이는 열역학 제2법칙과 관련된 엔트로피 변화량을 계산할 때 필요한 조건, 즉 식 $dS = \delta Q/T$ 은 가역과정

에서 사용할 수 있다는 것을 충분히 숙지하고 있지 못함을 의미한다.

(5) 열역학적 일의 계산

열역학에서의 일과 열은 계가 열원과 에너지를 교환하는 방식을 의미한다. 두 계가 온도 차에 의해 상호작용을 하는 경우 이동한 에너지를 열이라고 한다면, 열적 상호작용 없이 부피 변화에 의해 에너지 교환을 하는 경우 이러한 에너지 전달을 일로 볼 수 있다.

일의 기본 정의는 다음과 같다. 물체 A가 물체 B에 해준 일이란, 물체 A가 물체 B에 \mathbf{F} 의 크기로 힘을 가하여 물체 B가 받은 힘과 동일한 방향으로 d 만큼 이동하였을 때 물체 A에서 물체 B로 이동한 에너지의 크기를 의미하며, 수학적으로는 $W \equiv \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r}$ 로 표현된다. 당연히 에너지 보존법칙에 의해 물체 B가 물체 A로부터 받는 에너지량은 물체 A가 물체 B에 주는 에너지량과 그 크기가 동일하다. 상호작용하는 두 물체를 강체로 가정할 수 있는 상황에서 이 식은 바로 적용되지만, 마찰이 존재하거나 물체의 모양이 변할 수 있는 경우에는 이 식을 다양한 형태로 변형하여 사용할 수 있는데, 이러한 이유로 내적인 일(internal work), 거시적 측면에서의 외적인 일(external macroscopic work), 미시적 측면에서의 외적인 일(external microscopic work), 가짜일 또는 질량중심일(pseudowork or center of mass work), 보존일(conservative work), 비보존일(nonconservative work), 준정적 일(quasistatic work), 열역학적 일(thermodynamic work) 등 다양한 형태가 나타난다(Mallinckrodt & Leff, 1992).

열역학에서의 일과 역학에서의 일은 개념적으로는 동일하다. 다만 열역학에서 주로 다루는 계는 입자들이 많이 모여있는 계로서, 힘과 압력의 관계를 이용하여 $dW = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{x} = pA dx = p dV$ (단, A 는 계가 수직으로 힘을 받는 면적)로부터, $W = \int p dV$ 로 표현된다. 특히 $W = \int p dV$ 에서

압력 p 는 주로 계의 압력으로 기술되는데, 비가역과정에서 이 식을 적용할 때는 열역학적 사건이 일어나는 도중의 기체의 압력 값을 정의할 수 없는 경우가 많기 때문에 주의해서 위의 식을 사용해야 한다. 사건이 비가역적으로 일어나는 경우에라도 외부에서 계에 가하는 압력 p_{ext} 이 명확하게 정의된다면 $W = -\int p_{ext} dV$ 을 이용하여 계가 외부에 해 주는 일을 구할 수 있다.

한편, 자유팽창은 기체가 팽창하는 동안 기체가 하는 일이 0인 매우 특별한 경우이다. 이 경우에는 주위환경에 자신의 에너지를 전달하려고 해도 에너지를 전달할 대상이 되는 물체가 없기 때문에 기체는 외부에 일을 할 수 없다. 이 경우에 기체가 퍼져나가는 동안의 압력은 근사적으로 구할 수 있지만(Cockerham, 1969), 그 때의 기체의 부피변화를 안다고 해서 이 정보를 이용하여 기체가 외부에 해 주는 일의 양을 구할 수는 없다. 즉, 비가역과정에서의 열역학적 일은 일에 대한 정의를 정확히 알고, 문제 상황을 정확히 이해해야만 적절히 사용할 수 있다.

5.4. 결론 및 시사점

열역학에서 단열과정은 등적과정, 등압과정, 등온과정과 함께 열역학의 주요 과정 중 하나로서, 열역학을 학습하는 학생들이 반드시 익혀야 할 과정이다. 기존에는 주로 ‘단열’이라는 용어, 즉 $Q = 0$ 에 초점을 맞추어 교과서가 기술되어 있었으며, 그 과정이 가역적인지의 여부를 고려하지 않고 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’ 을 사용하여 문제를 풀이하는 경우가 많았다. 하지만 이러한 방식의 서술은 단열과정의 일종인 자유팽창과정에서는 왜 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’이 성립하지 않는가라는 궁금증을 유발하는 동시에 열역학이라는 학문을 더욱 어렵게 만든다.

본 연구에서는 가역과정과 비가역과정을 구분하는 것의 중요성을 학생들의 문제해결과정을 통해 보이고자 하였으며, 이를 기반으로 교과서의 서술에서 좀 더 구체화하거나 고려해야 할 점들을 살펴보았다. 우선 학생들이 문제해결에 실패하는 경우, 그 원인은 다음과 같다.

- 학생들은 열역학적 과정이 가역적인지 비가역적인지의 여부를 고려하지 않고 자신이 알고 있는 수식을 대입하여 문제를 풀려는 경향이 있다. 특히 단열과정의 경우 문제를 풀 때 항상 ' $pV^\gamma = \text{일정}$ '을 사용하려는 경향이 있었다.
- 학생들은 '단열'이고 마찰이 없는 과정에서는 (역학적) 에너지가 보존될 것으로 생각하고, 따라서 이런 계 속에 놓여있는 피스톤과 같은 물체는 처음에 진동하고 있다면 영원히 진동을 할 것으로 생각하였다. 즉, 역학적 상황과 열역학적 상황의 차이를 인지하지 못하며, 열역학 문제를 역학적 관점으로 해석하고 있었다. 특히 비가역 단열과정에서도 ' $pV^\gamma = \text{일정}$ '이라는 식이 성립한다고 믿는 학생 중 일부는 이 식을 이용하여 피스톤이 계속 진동함을 수학적으로 증명함으로써, 자신도 출한 결과가 옳은 것으로 생각하였다.

단열과정과 관련된 기존의 논문들이 주로 학생들이 열역학 제1법칙을 고려하지 않고 이상기체 상태방정식만으로 문제를 해결하려고 한다고 주장하였다면, 본 논문은 학생들이 열역학적 문제들을 해결할 때 열역학 제2법칙적 요소를 고려하지 않음을 보여주고 있다.

기본질문에서는 학생들에게 가역과정과 비가역과정에 대한 대표적인 예를 써 보라고 하였는데, 그 결과 학생들이 생각하는 가역과정에 대한 예는 상황에 따라 '역학적 상황', '열역학적 상황', '화학적 상황'으로 나뉘어지며 각각에 대한 대표적인 예로는 '단진자 운동', '카르노 기관', '화학

평형에서의 정반응과 역반응'이 있었다. 이러한 예들은 고등학교 교과서에도 모두 등장하는 것들로서 역학적 상황과 화학적 상황을 제시한 학생들은 열역학에서 말하는 가역과정에 대해 충분히 이해하지 못하는 것으로 볼 수 있다. 또한 열역학과 역학의 차이를 서술하는 문항에서는 역학과 열역학 모두 다루는 물리량과 관찰대상이 다소 다를 뿐 근본적으로 같은 법칙이 적용된다고 생각하는 학생들이 많았다. 이러한 믿음은 역학과 열역학은 근본적으로 동일하다는 생각을 갖게 하며, 따라서 비가역성과 관련된 전형적인 상황이 주어지지 않았을 때는 학생들은 문제풀이에서 열역학 제2법칙을 간과할 수 있다.

문제풀이과정에서 나타나는 결과는 교과서 분석을 통해서도 예상할 수 있는데, 대부분의 일반물리학 교과서에서 ' $pV = 일정$ '이라는 식을 중요하게 다루면서도 단순히 이상기체의 단열과정에서 적용되는 식이라고 기술할 뿐 가역과정에서만 적용된다는 명확한 기술은 없다. 특히 대부분의 교과서가 비가역성의 근원에 대해 설명하지 않고 있는데, 이러한 측면 때문에 학생들은 가역과정과 비가역과정의 차이에 대해 잘 알지 못하고 '단열'이나 '마찰 등이 없다'는 조건이 주어질 때 열역학적 평형을 떠올리는 것이 아니라 역학에서 적용되는 이상적인 조건들을 떠올리게 되는 것으로 보인다. 또한 계의 엔트로피 변화량을 계산하거나 계가 외부에 한, 또는 받은 일을 계산할 때도 그 과정이 가역적인지의 여부를 아는 것이 중요한데, 가역과정에 대한 불충분한 이해 때문에 문제를 제대로 풀지 못하는 것으로 추측할 수 있다. 이를 극복하기 위해서는 열역학 시스템에서는 비가역과정이 왜 나타나는지(다입자의 상호작용과 통계적 처리에 관한 문제), 열역학에서 가역적으로 사건이 일어나려면 어떤 조건을 만족시켜야 하는지(가역과정의 조건), 사건이 비가역적으로 일어나면 계의 최종상태는 어떻게 되는지(열역학적 평형에 대한 문제), 사건의 가

역성과 엔트로피 사이에는 어떤 관계가 있는지(엔트로피를 이용한 열역학 제2법칙의 표현)에 대해 상세하게 다룰 필요가 있다. 또한 단열과정의 문제해결을 위해서는 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’을 사용할 수 있는 조건을 정확하게 알려주는 것이 필요한데, 엔트로피 일정으로부터 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’을 유도하는 Kittel(1980)의 방식을 소개하거나, 가역과정과 비가역과정의 차이를 자세히 설명하고 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’을 적용할 때는 가역과정에서만 적용할 수 있다는 단서를 교과서에 제시하는 것이 좋다.

현재의 열역학에 관한 일반물리학 수준의 교과서 기술은 상당부분 열역학 제1법칙에 초점을 맞추고 있으며, 역학적인 물리량을 열역학적 상황에서 적절한 물리량으로 어떻게 변환시킬 것인가에 많은 노력을 기울이고 있다. 하지만 역학과 달리 열역학이 가지고 있는 고유의 속성을 잘 보여주는 법칙은 열역학 제2법칙이라고 말할 수 있으며, 따라서 이를 어떻게 다룰 것인가에 관한 지속적인 고민이 필요하다.

6. 연구 4: 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해를 고려한 효과적인 지도 방안

6.1. 연구의 필요성 및 목적

물리학을 학습하는 가장 근본적인 이유는 자연현상을 이해하는 데 있다. 특히 법칙, 원리, 개념 등을 이해하고 이를 문제 상황에 잘 적용하는 것은 물리학 학습에 있어서 핵심이 된다. 한편 학생은 자신의 경험과 교과서와 교사로부터 얻은 지식 등을 기반으로 세계를 바라보는 틀을 구축하며, 이 때의 학생의 개념은 그 분야의 전문가들이 갖고 있는 개념과는 상당히 다를 수 있다. 따라서 교사의 지도를 통해 학생의 개념을 전문가가 갖고 있는 개념의 수준으로 끌어올리기 위해서는 교사는 개념이 갖는 주요 특징, 학생의 인지 수준, 수업 전략, 수업 시간 등 다양한 요소를 고려해야 한다(Abell, 2007; Shulman, 1987). 물론 학생의 인지 수준이 추상적 개념을 이해하기에는 충분히 높지 않아 법칙이나 개념을 학습하는 데 한계가 있을 수도 있고, 물리적으로 주어진 시간이 충분하지 않을 수도 있다. 그럼에도 불구하고 특정 개념에 대한 학생의 이해는 어떠한지, 학생의 이해를 증진시키기 위해서는 내용학적으로 어떤 요소를 다루는 것이 필요한지, 교수학적으로 어떤 전략을 구사할 수 있는지를 고민하는 것은 학생의 물리 개념 이해 증진을 위해 필수적이다.

구성주의적 관점에서 물리 수업을 설계하는 데 고려해야 할 기초 자료는 학생의 선개념으로서, 이는 학습자의 학습에 영향을 주는 강력한 요소이다(Hammer, 1996; Redish, 1994). 많은 연구들이 학생의 선개념 중

과학적이지 않은 개념을 변화시키고 개념에 대한 직관적 이해를 돕는 방법을 고안하는 데 노력을 기울였으며, 그 결과 인지적 갈등의 인식과 해소에 기초를 둔 전략(권재술 외, 2003; Hewson & Hewson, 1984; Nussbaum & Novick, 1982), 상황을 예측하고 실험과 같은 탐구활동을 통해 자신의 생각을 변화시키는 전략(McDermott, 2001), 학습자가 갖는 생각에 기초하여 비유나 유추 등을 통해 그 생각들을 발전시키는 전략(김영민, 1991; Duit, 1991), 학습자 자신의 학습을 인지하고 통제하여 개념변화가 일어나도록 하는 전략(박종원, 1992; White & Gunstone, 1989) 등이 제안되었다. 이러한 전략들은 여러가지 개념들에 대해 일반적인 적용이 가능한 전략으로서, 각 전략의 효과에 대해서는 지속적인 연구를 통해 검증되고 있다(Scott *et al.*, 2007).

한편, 기존에 제시된 인지갈등 전략 등 여러 전략들은 목표가 되는 한 두 가지 개념의 변화에 초점을 두는 경우가 대부분이다. 열역학 제2법칙에는 열기관, 엔트로피, 가역과정과 비가역과정, 열역학 제2법칙의 다양한 표현방식 등 많은 개념과 명제들이 포함되어 있으며, 각각은 독립적이지 않고 서로 깊은 관련을 맺고 있다. 개념 이해 및 문제 해결을 위해서는 각각의 개념에 대한 정확한 이해뿐만이 아니라 개념 간 위계와 연결에 대한 이해 또한 중요하므로(Novak, 2002), 어떠한 방식으로 열역학 제2법칙과 관련된 내용 전체를 조직하는 것이 필요한지 논의할 필요가 있다. 연구 1에 따르면 일반물리학 교과서에서의 열역학 제2법칙과 엔트로피 개념에 대한 도입 방식 및 교과서 흐름은 다양하다. 따라서 교수 목적에 따라서 어떤 방식으로 전체 내용을 조직하고 설명하는 것이 효과적인지에 대한 연구는 계속적으로 진행되어야 할 부분이다.

이 장에서는 선행연구와 연구1~연구3을 기반으로 하여 열역학 제2법칙의 효과적인 지도방안에 대해 제안하고자 하였다. 개념변화를 위한 특

정 전략의 사용에 초점을 두지 않고, 내용의 전체적인 구성 방식에 초점을 두어 논의하고자 하였다. 이를 위해 6.2절에서는 선행연구와 연구 2, 연구 3의 결과를 기반으로 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해를 정리하였다. 6.3절에서는 연구 1의 결과를 바탕으로 열역학 제2법칙과 관련된 주요 설명 방법 중 논쟁의 여지가 있는 부분에 대해 논의하고, 열역학 제2법칙에 대한 학생의 어려움과 관련된 내용이 교과서에 어떻게 서술되어 있는지를 살펴보았다. 6.4절에서는 교수학습흐름도를 제시하고 주요 개념에 대한 구체적인 설명방안을 제안하는 등, 효과적인 열역학 제2법칙의 지도방안에 대해 논의하였다. 6.5절에서는 6장의 논의에 대한 결론 및 시사점을 살펴보았다.

6.2. 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해

선행연구와 연구2, 연구3으로부터 찾아낸 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해는 표 6.1과 같다. 열역학 제2법칙과 관련된 기존의 선행연구들은 학생이 겪는 어려움으로서 다음과 같은 것들을 지적하였다(이주현, 송진웅, 2007; Alonso & Finn, 1995; Baierlein, 1994; Bindel, 2004; Christensen *et al.*, 2009; Cochran & Heron, 2006; Granville, 1985; Johnstone *et al.*, 1977; Lowe, 1988; Müller, 2007; Reif, 1999; Rodewald, 1990; Schoepf, 2002; Sözbilir, 2007; Styer, 2000; Wright, 1970).

표 6.1 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해

| 구분 | 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해 | 비고 |
|---------------|--|------------|
| 선행연구에서 조사된 내용 | 클라우지우스의 식 $dS = \delta Q/T$ 에 대한 직관적인 이해가 어려움. | 연구 3에서 재확인 |
| | 엔트로피를 ‘계의 무질서한 정도’로 이해함. | 연구 3에서 재확인 |
| | 주위환경에 대한 고려 없이 계의 엔트로피는 항상 보존되거나 증가할 것으로 생각함. | 연구 2에서 재확인 |
| | 식 $dS = \delta Q/T$ 이 가역과정에서만 적용된다는 사실을 알지 못함. | 연구 3에서 재확인 |
| 연구 2에서 조사된 내용 | 열역학에서의 가역과정의 조건을 알지 못함. | |
| | 준정적 과정을 가역과정과 동일하게 생각함. | |
| | 주위환경에 대한 고려 없이 한 순환과정 동안 계의 엔트로피 변화량이 0인 과정을 가역과정으로 생각함. | |
| 연구 3에서 조사된 내용 | 열역학에서의 가역과정의 조건을 알지 못하며, 열역학에서의 가역과정을 역과정이나 화학에서의 가역반응과 구별하지 못함. | |
| | ‘ $pV^\gamma = 일정$ ’을 비가역과정에도 사용함. | |
| | 입자 수가 많은 열역학적 계에서 사건은 항상 열역학적 평형상태에 도달하는 방향으로 일어남을 알지 못함. | |

- 엔트로피 개념과 관련하여 클라우지우스의 식 $dS = \delta Q/T$ 에 대한 직관적인 이해가 어렵다.
- 학생들은 주로 엔트로피를 ‘계의 무질서한 정도’로 이해하고 있는데, 엔트로피를 이와 같이 정의하는 것이 부적절하다.
- 학생들은 엔트로피를 에너지와 같이 일종의 보존되는 양으로 생각하거나, 고립계가 아닌 곳에서도 엔트로피가 증가하면 열역학 제2법칙이 성립하는 것처럼 생각한다.
- 식 $dS = \delta Q/T$ 이 가역과정에서만 적용된다는 사실을 알지 못한다.

본 연구에서는 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해를 조사하기 위해 가역적으로 작동하는 스티링 기관과 비가역 단열과정 상황을 고안하였다. 열기관 상황에서의 가역과정에 대한 학생의 이해를 살펴보고, 역학과 열역학의 차이에 대한 인식 및 비가역과정에서의 열역학적 평형상태로의 이동에 대한 학생의 이해를 조사하였다. 그 결과 선행연구에서 언급한 열역학 제2법칙과 관련된 학생의 어려움 또는 오개념 중의 일부를 확인하였으며, 새롭게 찾아낸 학생의 어려움도 있었다. 다음은 본 연구를 통해 새롭게 찾아낸 열역학 제2법칙과 관련된 학생의 어려움이다.

- 학생들은 열역학에서의 가역과정의 조건에 대해 알지 못하며, 특히 역학에서의 단진동이나 입자간 충돌, 화학평형에서의 정반응과 역반응을 가역과정의 대표적인 예로 잘못 이해하고 있다.
- 준정적 과정 (p - V 그림에서 선으로 그려지는 모든 과정)을 가역과정과 동일시한다. (참고로 모든 가역과정은 준정적 과정이나, 그 역이 항상 성립하는 것은 아니다.)
- 주위환경에 대한 고려 없이 한 순환과정 동안 계의 엔트로피 변화

량이 0인 과정을 가역과정으로 이해한다. (참고로 엔트로피는 상태 함수이며, 따라서 비가역적으로 작동하는 순환과정에서도 계의 엔트로피 변화량은 0이다.)

- 가역과정에서만 사용할 수 있는 수식들($pV^\gamma = \text{일정}$, $dS = \delta Q/T$ 등)을 비가역과정에서도 사용한다.
- 서로 충돌하거나 상호작용하는 입자 수가 많은 열역학적 계에서 사건은 항상 열역학적 평형상태에 도달하는 방향으로 일어난다는 열역학 제2법칙에 대한 지식이 부족하다. 즉, 열역학과 역학의 차이에 대한 인식이 부족하여 고립계에서 역학적 에너지는 보존될 것으로 생각한다.

본 연구에서 찾아낸 학생의 어려움은 가역과정과 관련된 경우가 많았다. 학생들은 가역과정을 막연하게 ‘거꾸로 되돌아갈 수 있는 과정’으로 생각하였으며, 카르노 기관이 가역적으로 작동하는 이상기관이라고 생각함에도 불구하고 카르노 기관의 각 과정이 가역과정인 이유에 대한 설명을 하지 못하였다. 또한 열역학과 관련된 수식들을 사용함에 있어서 필요한 구속조건을 제대로 인지하지 못하였는데, 특히 가역과정과 관련된 구속조건에 대한 인지가 부족하였다. 한편 p - V 그림의 해석에 있어서 계의 상태 변화가 선으로 표시되는 준정적 과정들을 가역과정과 동일하게 취급하는 경우가 많았다. 이와 관련하여 연구 2에서의 스티링 기관의 예와 같이 준정적 과정임에도 불구하고 마찰이 존재하거나 온도 차가 나는 두 물체가 접촉하는 등, 가역과정이 아닌 경우를 생각할 수 있다. 사실 교과서 문제를 해결할 때에는 준정적 과정과 가역과정을 동일시해도 대부분의 문제를 해결할 수 있기 때문에 이 부분에 대한 지식은 가르치는 교사나 배우는 학생들 모두 인지하기가 상당히 어렵다. 그 외에 학생들

은 열역학 제2법칙을 적용할 수 있는 상황 및 열역학 제2법칙에 의한 계의 최종상태에 대한 예측에 어려움을 겪고 있었다.

한편, 연구 2에서는 열역학 제2법칙과 관련된 문제를 해결하는 과정에서 나타나는 학생들의 사고의 특징을 관찰할 수 있었다. 관찰 결과에 따르면, 학생들은 자신이 옳다고 확신하는 명제나 지식들을 중심으로 자신이 확신하지 못하는 지식들을 수정하거나 새로운 조건을 추가하였다. 따라서 열역학 제2법칙에 대한 주요 명제들을 학생들에게 확실하게 인식시키는 것이 학생들의 개념 변화를 돕는데 중요한 역할을 할 것으로 생각된다.

6.3. 교과서 분석을 통해 살펴본 교수학습에서 고려해야 할 측면들

열역학 제2법칙을 설명함에 있어서 대부분의 일반물리학 교과서에서 제시하는 내용은 열역학 제2법칙에 대한 다양한 정성적 설명들, 카르노 기관을 포함하여 열기관에 대한 설명과 이의 열역학 제2법칙과의 관계, 엔트로피의 두 가지 정의(클라우지우스 정의, 볼츠만 정의), 엔트로피를 이용한 열역학 제2법칙에 대한 설명, 카르노 기관에서의 엔트로피 개념의 적용 등이다. 이 절에서는 이러한 내용들을 설명할 때 생각할 수 있는 논쟁점을 살펴보고, 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해에 비추어 봤을 때 교과서 서술에서 보완이 필요한 부분을 논의하였다.

6.3.1. 교과서에 제시된 다양한 설명방식에서 나타나는 논쟁점들

연구 1에서의 교과서 분석 결과에 따르면 열역학 제2법칙의 내용 전개

방식은 다양하며, 열역학 제2법칙을 정량적으로 표현하기 위해 핵심적으로 사용되는 엔트로피도 다양한 방식으로 도입되는 것으로 나타났다. 이는 열역학 제2법칙에 대한 교수방법이 현재까지 정형화되어 있지 않고 다양한 방식으로 가르쳐지고 있음을 의미한다. 여기에서는 교과서마다 다양하게 제시되고 있는 측면들을 정리하여 교수학습에 있어서 고민해야 할 부분들에 대해 논의하였다.

(1) 교과서 내용 전개 순서

연구 1에서 분석한 8권의 교과서들은 내용 전개 방식에 있어서 크게 두 가지 흐름으로 나눌 수 있다. 첫 번째 흐름은 열역학 제2법칙에 대한 역사적 발달 방식을 따르는 것이다. 열기관에 대한 고찰을 통해 열역학 제2법칙에 대한 두 가지 서술, 즉 클라우지우스 서술과 켈빈-플랑크 서술을 유도하고, 클라우지우스 엔트로피를 도입하여 계의 엔트로피 변화량 계산을 설명한 후에, 이를 이용하여 사건의 방향성을 예측한다. 세부적으로는 열역학 제2법칙의 다양한 서술들 사이의 관계를 중시하는 교과서가 있었고(Hecht, 1996), 클라우지우스 엔트로피를 이용한 계의 엔트로피 변화량 계산 방법을 강조한 교과서(Halliday *et al.*, 2008)가 있었다. 이 설명 유형의 가장 큰 문제점은 클라우지우스 엔트로피가 어떻게 사건의 방향성과 연결되는지를 알기 어렵다는 것이다.

한편, 엔트로피 개념을 직관적으로 이해하기 위해서는 통계역학적 관점을 내포하고 있는 볼츠만 엔트로피로부터 열역학 제2법칙을 가르쳐야 한다는 주장이 있었다(Reif, 1999; Schoepf, 2002). 이를 충실히 반영한 교과서가 Chabay & Sherwood(2002)의 교과서이다. 이 교과서는 볼츠만 엔트로피 식을 이용하여 엔트로피가 사건의 방향성과 어떻게 연결되는지를 보여준 후에 클라우지우스의 엔트로피 개념을 도입한다. 이러한 설명은 엔

트로피 개념이 어떻게 사건의 방향성과 연결되는지를 직관적으로 이해하는데 도움을 준다는 장점은 있지만 볼츠만 엔트로피 식을 이용하여 물리학에서 자주 다루는 열역학적 상황들에 대한 계산을 하는 것이 어렵기 때문에 이러한 설명에도 한계가 있다.

이 두 가지 서술을 절충하는 방안이 클라우지우스 엔트로피를 먼저 제시한 후에 볼츠만 엔트로피를 제시하고, 클라우지우스 엔트로피와 볼츠만 엔트로피의 관계를 통해 엔트로피는 사건의 방향성과 관련된 물리량을 서술하는 방식이다. 볼츠만 엔트로피와 클라우지우스 엔트로피의 동등성을 설명하는 과정과 관련하여 Swarts & Miner(1997)는 등온팽창과정에서 두 식이 같음을 보였으며, Chabay & Sherwood(2002)는 온도 차가 나는 두 물체의 열적 접촉 과정을 통하여 통계역학적 온도는 엔트로피와 열의 이동량에 의해 결정됨을 보였다. 하지만 Swarts & Miner(1997)의 설명은 일반화된 설명이 아니며 Chabay & Sherwood(2002)의 설명은 미분 개념을 사용해야 하므로 학생들에게 직관적으로 이해되는 설명인지의 여부를 확인할 필요가 있다. 즉, 모든 설명 유형에 장단점이 있는 만큼 엔트로피에 대한 직관적 이해를 중시하느냐, 엔트로피 변화량에 대한 계산을 중시하느냐, 아니면 이 두 가지 모두를 충족시키면서 볼츠만 엔트로피와 클라우지우스 엔트로피 사이의 관계를 잘 설명하는 데 초점을 둘 것이냐에 따라 수업 방식을 결정해야 할 것이다.

(2) 열역학 제2법칙에 대한 다양한 서술들을 어디까지 소개할 것인가

연구 1에 따르면 교과서에 제시된 열역학 제2법칙과 관련된 서술은 8가지이다. 이와 관련하여 교과서 설명이나 수업을 할 때 8가지 서술을 모두 소개할 필요가 있는가가 논쟁의 여지가 될 수 있다. Hecht(1996)는 8가지 서술을 모두 제시하고 있으며 각 서술들 사이의 관계에 대한 설명

을 많이 제공한 반면, Halliday *et al.*(2008)은 켈빈-플랑크 서술과 클라우지우스 서술을 중심으로 열역학 제2법칙을 기술하였으며 서술들 사이의 관계를 보여주지는 않았다. 열역학 제2법칙에 관한 중요한 서술에는 켈빈-플랑크 서술, 클라우지우스 서술, 확률을 이용한 미시적 관점의 서술이 있다. 켈빈-플랑크 서술과 클라우지우스 서술은 에너지 전환과 전달의 방향성을 보여주는 서술로서 모든 교과서에서 다루고 있으며, 열역학적 확률로 사건의 방향성을 설명하는 열역학 제2법칙에 대한 표현도 열역학 제2법칙이 나타나는 이유를 설명해주는 서술이기 때문에 중요하다. 하지만 조작적으로 정의하기 어려운 추상적인 서술들도 있는데, 예를 들면 ‘고립계에서 에너지는 질적으로 점차 저하된다.’ 또는 ‘에너지는 고립계에서 점차 흩어지려고(disperse/dissipative) 한다.’와 같은 서술들의 경우, ‘질적으로 저하된다’라는 표현과 ‘흩어진다’는 표현의 의미가 명확하지 않으며, 따라서 추가적인 설명이 필요하다. 참고로 일부 학자들은 학생들에게 엔트로피에 대한 구체적이고 올바른 설명을 제공해주기 위해 ‘무질서도’ 대신 ‘에너지의 퍼짐 또는 분산 정도’, 또는 ‘계의 균질한 정도’로 가르치자고 주장하였으며(Lambert, 2002; Leff, 1996; Rodewald, 1990), 이는 ‘고립계에서 에너지는 흩어지려고 한다.’는 표현과 일맥상통한다. 이와 같은 설명의 도입이 열역학 제2법칙을 이해하는 데 있어서 핵심적인지의 여부는 추가 연구가 필요할 것으로 보이며, 만약 이러한 설명이 반드시 필요하다면 열역학 제2법칙과 관련된 다양한 현상들과 결부시켜 설명하는 것이 용어의 의미를 명확하게 전달하는 데 도움이 될 것이다.

(3) 클라우지우스의 엔트로피를 도입하는 방식

또 하나의 논쟁거리가 될 수 있는 측면은 클라우지우스 엔트로피 개념을 어떻게 도입할 것인가에 대한 문제이다. Halliday *et al.*(2008)은 클라우

지우스 식에 대한 특별한 설명 없이 ‘엔트로피는 식 $dS = \delta Q/T$ 로 주어진다.’는 서술만을 제공하고 있는데, 이러한 설명방식을 선택한 이유는 거시적 관점으로 엔트로피가 무엇인지를 정의하는 것 자체가 어렵고, 클라우지우스가 이 식을 유도해 낸 과정 자체가 단순하지 않기 때문인 것으로 생각된다(Clausius, 1867; Cropper, 1986). 교과서들 중에서는 카르노 기관에 대한 설명으로부터 이 식을 유도해내는 경우가 있는데(Giancoli, 2000), 그 경우에도 최종적으로 유도한 식 $dS = \delta Q/T$ 이 사건의 방향성과 어떻게 관련되는지를 직관적으로 판단하기 어렵다. 무질서도를 식 $dS = \delta Q/T$ 와 연결한 경우에는(Young & Freedman, 2008) 무질서도라는 용어가 엔트로피를 설명하기에 부적합하다는 주장이 있을 뿐만 아니라(Lambert, 2002; Styer, 2000), 무질서도가 무엇인지를 새로이 정의해야만 한다. 특히 이 식은 가역과정에서만 적용할 수 있는데, 가역과정 자체가 열역학에서는 매우 특수한 경우이기 때문에 직관적으로 이 식을 이해하는 것은 거의 불가능에 가까운 것으로 판단된다. 이러한 측면에서 클라우지우스 식을 사건의 방향성과 연결시켜 설명하는 것은 학생들의 인지적 부담을 증가시키며 설명을 한다고 하더라도 그 설명이 명료하지 않을 가능성이 높다. 따라서 Halliday *et al.*(2008)과 같이 귀납적으로 다양한 사건들을 먼저 제시하고 이러한 사건들이 클라우지우스 엔트로피를 이용하여 얼마나 잘 설명되며 유용한지를 보여주는 것도 학생의 인지적 부담을 줄이면 서도 이 식의 중요성과 편리성을 보여주는 한 가지 방안이 될 것이다.

6.3.2. 학생의 이해에 기반한 교과서 설명 고찰

이 절에서는 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해와 관련된 기존의 연구결과에 비추어 볼 때, 교과서 설명 중 개선이 필요한 측면들에 대한 내용을 살펴보았다.

(1) 비가역성 개념을 사용할 수 있는 물리적 상황

대부분의 일반물리학 교과서에서는 열역학 제2법칙을 다음과 같은 진술문과 함께 도입한다.

‘이 세상에는 에너지 보존법칙만으로는 설명할 수 없는 현상들이 있다. 예를 들어 온도가 다른 두 물체가 접촉했을 때 저온에서 고온으로의 열의 이동은 실제로 일어나지 않는다. 고무공을 떨어뜨리면 몇 번 튀어오르다가 결국 바닥에 멈추지만, 바닥에 가만히 놓여있는 고무공이 스스로 튀어오르는 일은 일어나지 않는다(Serway, 2000, p. 670).’

즉, 일반물리학 교과서를 살펴보면 열역학 제1법칙만으로는 자연에서 일어나는 사건들을 충분히 기술할 수 없기 때문에 열역학 제2법칙을 도입한다는 기술은 나타나 있지만, 열역학 제2법칙을 어떤 상황에서 적용할 수 있는지에 대해서는 정보는 나타나지 않는다. 다만 ‘실세계에서 일어나는 모든 일이 비가역적이다.’라는 문장을 통해 우리가 관찰하는 모든 자연현상에 열역학 제2법칙이 적용되어야 된다고 주장하고 있다. 하지만 물리학 학습에서 역학, 전자기학, 현대물리 등을 학습할 때는 열역학 제2법칙을 다루는 경우가 거의 없다. 이는 역학이나 전자기학, 현대물리학이 다루는 계와 열역학이 다루는 계의 구성 입자 수가 다르며, 따라서 많은 수의 입자들의 운동을 다룰 때 나타나는 열역학 제2법칙에 의한 비가역성이 거의 나타나지 않기 때문인데, 이러한 차이에 대해 언급한 교과서는 찾아보기가 상당히 어렵다.

한편 연구 3에 따르면 학생들은 열역학을 단순히 ‘열과 관련된 현상을 다루는 역학의 한 분야’로만 인식하고 있으며, 열역학 문제를 열역학 제2법칙에 대한 고려 없이 뉴턴의 운동법칙을 이용하여 해결하려고 하였다.

즉, 열역학 제2법칙을 설명할 때에는 입자 수가 소수일 때의 물체의 운동과 입자 수가 굉장히 많을 때 계의 상태 변화를 비교함으로써 열역학 제2법칙이 입자 수가 많은 상황에서 적용됨을 강조할 필요가 있다.

(2) 열역학 제2법칙에 대한 서술

열역학 제2법칙을 사용할 수 있는 조건에 대한 이해뿐만이 아니라, 열역학 제2법칙이 적용되면 계가 최종적으로 어떠한 상태에 도달하는지에 대한 정보 또한 열역학 제2법칙을 이해하는 데 핵심이 된다.

연구 1에서의 연구결과에 따르면 교과서에서는 열역학 제2법칙에 대한 다양한 서술들을 제공하고 있었으며, 6.3.1절에서는 이러한 다양한 서술들 중 어디까지를 학생들에게 제공할 필요가 있는가에 대한 논의를 하였다. 여러 서술들 중에서 ‘고립계에서 에너지는 흩어지려고 한다.’는 표현은 열역학 제2법칙에 의해 계가 최종적으로 어떤 상태로 이동하려고 하는지를 알려주기 위한 표현으로 보인다. 하지만 연구자는 에너지가 흩어진다는 표현이 어떤 상태를 지칭하는 것인지 애매하다는 지적을 하였다.

만약 이 표현이 계의 최종 상태를 알려주기 위한 표현이라면, ‘고립계에서 사건은 항상 열역학적 평형상태에 도달하는 방향(열적으로 접촉하고 있는 두 계의 온도, 역학적으로 상호작용하고 있는 두 계의 압력, 입자가 교환될 수 있는 두 계의 화학퍼텐셜이 같아지는 방향)으로 일어난다.’는 표현을 사용하는 것을 제안하고자 한다. 학생들이 열역학과 관련된 문제풀이에서 겪는 어려움 중 하나는 계가 최종적으로 평형상태에 도달하는지의 여부를 결정하지 못하는 데에 있음을 감안할 때, 열역학적 평형상태를 이용한 열역학 제2법칙에 대한 기술을 제시하는 것이 열역학 문제를 성공적으로 해결하는 데 도움을 줄 것으로 판단한다.

고립계는 최종적으로 열역학적 평형상태에 도달한다는 명제에 대한 이

해가 부족하면, 문제 해결에 있어서 학생들은 계가 최종적으로 평형상태에 도달하는지의 여부를 알 수 없으며 따라서 계의 상태를 기술하는 변수들인 온도, 압력 및 계의 내부에너지나 엔트로피 등의 변수들을 사용할 수 없다. 즉, 준정적으로 작동하지 않는 모든 과정에 대해서 열역학적 관점으로 문제를 해결할 수 없게 된다. 계의 나중상태를 예측하는 데 있어서 뉴턴의 운동법칙을 사용하는 것(즉, 뉴턴의 운동법칙을 입자 각각의 대해 도입하여 적절한 통계를 사용하여 계산을 하는 것)은 매우 복잡하다. 고립계의 열역학적 평형으로의 도달에 대한 이해는 열역학 문제 풀이의 중요한 전제조건이 되며, 따라서 열역학적 평형에 대한 이해를 강조하고 이를 이용하여 열역학 제2법칙을 이해하는 것이 필요하다.

(3) 엔트로피에 대한 정의

엔트로피를 ‘무질서한 정도’로 이해하는 것의 문제점에 대해서는 이미 여러 번 언급하였다. 무질서도라는 표현이 조작적으로 어떻게 정의되는지 알기가 어렵고, 단순히 배열이 어지러운 상태를 엔트로피가 높은 상태로 잘못 생각할 가능성이 있으며, 실제 엔트로피가 높은 열평형 상태의 경우 어지럽다기보다는 균일하게 관찰될 수 있다는 것이 문제점으로 지적되었다(Leff, 1996; Rodewald, 1990; Styer, 2000). 과거에는 엔트로피를 ‘무질서도’로 많이 정의하였으나, 오늘날 몇몇 교과서에서는 무질서도라는 표현을 쓰지 않거나(Halliday *et al.*, 2008), 무질서도라는 표현은 매우 주의해서 사용해야 한다는 주장이 교과서에도 제시되고 있다(Chabay & Sherwood, 2002).

한편 클라우지우스 식에 대한 직관적 이해가 어렵다는 것은 여러 연구자들이 공감하는 부분이며(Müller, 2007; Schoepf, 2002), 그래서 오늘날 대부분의 교과서에서 클라우지우스 엔트로피와 함께 볼츠만 엔트로피도 제

시하고 있다. 이러한 설명방식의 변화는 고등학교 교과서에서도 관찰할 수 있다. 7차 교육과정에 기반한 고등학교 교과서에서는 엔트로피를 무질서도로 정의하고 볼츠만 엔트로피 관점을 제시하는 경우는 적었지만, 2009 개정 물리Ⅱ 교과서 및 화학Ⅱ 교과서에서는 사건의 방향성과 확률을 연결시켜서 엔트로피 개념을 설명하고 있다. 하지만 6.3.1절에서 논의한 바와 같이 정량적인 계산을 위해서는 클라우지우스 엔트로피도 함께 다루는 것이 필요하다.

(4) 엔트로피를 이용한 열역학 제2법칙의 표현

열역학 제2법칙을 엔트로피 개념을 이용하여 표현하면 ‘고립계에서 엔트로피는 감소하지 않는다.’이다. 이 명제는 모든 교과서에서 명확하게 표현하고 있으나, 선행연구와 본 연구에 따르면 많은 학생들이 제대로 알지 못하고 있었다.

이 명제에 대해서 상당 수의 학생들이 엔트로피는 항상 증가하는 값이며, 증가할 때 사건이 자발적으로 일어난다고 생각하거나 엔트로피는 보존되는 양으로 생각하고 있었다. 모든 교과서에서 올바른 설명을 제공함에도 불구하고 학생들이 인지를 제대로 하지 못하는 것은 학생들이 ‘고립계’보다는 ‘엔트로피’에 초점을 두어 열역학 제2법칙을 이해하거나 ‘엔트로피’와 ‘에너지’ 개념을 헷갈려 하기 때문인 것으로 추정된다. 특히 연구 3의 열역학 제2법칙에 대한 학생의 기본 이해 조사 결과에서도 알 수 있듯이 학생들은 열역학 제2법칙을 학습할 때 엔트로피 개념을 이해하는 데 초점을 두며, 이 개념을 사용하는 데 필요한 구속조건에 대한 관심은 상대적으로 적은 것을 확인할 수 있었다. 이 부분에 대한 학생의 이해를 돕기 위해서는 ‘고립계’를 강조하는 문구를 삽입하고, 문제풀이과정에서 이 명제를 지속적으로 강조할 필요가 있다. 또한 이에 대한 개념

변화를 위한 적절한 전략들을 사용하는 것이 필요하다.

(5) 가역과정과 카르노 기관에 대한 서술

본 연구에서 찾아낸 학생의 어려움 중 가장 중요한 부분이 가역과정에 대한 이해이다. 학생들은 열역학적 가역과정, 역학적 가역과정, 그리고 화학에서의 가역반응을 혼동하고 있었으며, 가역과정의 성립조건에 대해 잘 알지 못하였다. 한편, 연구 1에서는 가역과정과 관련하여 교과서에 서술된 열역학적 가역과정의 의미, 성립 조건, 작동과정에 관한 기술을 분석하였다.

대부분의 일반물리학 교과서에서는 가역과정을 ‘거꾸로 되돌릴 수 있는 과정’으로 소개하였는데, 연구자는 거꾸로 되돌린다는 것의 조작적 정의가 불명확함을 문제점으로 지적하였다. 한편 어떤 열역학적 과정이 가역적이기 위한 조건으로서 주로 ‘과정이 준정적이어야 하며, 마찰과 난류와 같은 것이 존재하지 않아야 한다.’가 교과서에 제시되고 있다. 하지만 ‘거꾸로 되돌릴 수 있는 과정’이 어떻게 ‘준정적인 과정’과 연결되는가에 대한 부분과 ‘준정적인 과정은 어떻게 작동이 이루어지는 과정인가’에 대한 부분이 교과서에 구체적으로 기술되어 있지 않다. 한편, 가역과정의 조건으로서 카르노가 강조했던 ‘온도 차가 나는 두 물체의 접촉이 없어야 한다’는 조건에 대해서는 교과서에서 언급하지 않는 경우가 많았다. 연구 2의 결과에 따르면 학생들은 이 조건에 대한 이해가 부족하여 열기관이 가역적으로 작동하는지의 여부를 결정하지 못한 경우가 있었으므로, 교과서에서는 이 조건을 명료하게 제시해 줄 필요가 있다.

p - V 그림과 관련해서는 매 순간 계의 상태를 표시할 수 있는 과정을 가역과정으로 정의하는 경우가 있는데, 연구 2에 따르면 p - V 그림에서 매 순간의 상태를 표시할 수 있는 과정 중 가역적이지 않은 과정을 생각할

수 있으며(예: 두 열원 사이에서 작동하는 스텔링 기관) 따라서 이 과정은 가역과정이 아닌 준정적 과정임을 강조할 필요가 있다.

가역과정의 대표적인 예로는 카르노 기관이 있다. 즉, 카르노 기관의 작동과정을 잘 이해함으로써 열역학에서의 가역과정의 작동방법에 대해 이해할 수 있다. 하지만 카르노 기관의 작동과정에 대한 교과서 그림을 살펴보면, 어떤 식으로 각 과정이 준정적으로 일어나는지에 대한 정보를 포함하고 있지 않은 경우가 많았다. 즉, 교과서 표현만으로는 가역과정은 어떠한 방식으로 작동하는 것인지에 대해 학생들이 머릿속에서 그려내지 못할 가능성이 크다.

(6) 구속조건의 제시

열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해와 관련된 주요 특징 중 하나는 문제를 풀이할 때, 구속조건에 대한 고려 없이 단순히 문제 상황에 제시된 변수와 관련된 식을 이용하여 변수에 값을 대입하여 문제를 풀이한다는 데에 있다. 이와 관련하여 교과서에는 명시되어 있으나 학생들이 간과하는 구속조건도 있으며, 교과서에 잘 명시되어 있지 않은 구속조건도 있었다.

학생들이 잘 인지하지 못하는 구속조건은 대체로 가역과정과 관련된 것들이다. 열역학에서는 가역과정 상황에서 유도된 식들이 있는데, 식 ' $dS = \delta Q/T$ '은 카르노 기관에 대한 분석에서부터 유도된 식으로서 (Cropper, 1986), 이 식은 가역과정에서만 쓸 수 있다는 설명이 모든 교과서에 나타나 있음에도 불구하고 학생들은 이 식을 비가역과정에서 잘못 사용하는 경향이 있었다. 식 ' $pV^\gamma = \text{일정}$ '은 단열과정에서 엔트로피가 증가하지 않는다는 가정 하에 유도된 식이지만, 교과서에서는 주로 단열과정에서 사용할 수 있다는 설명만 제시되며 가역과정에서만 사용할 수 있

다는 기술은 Hecht(1996) 교과서 외에는 찾아보기 어렵다(물론 일부 교과서에서는 단열과정(adiabatic process)이라는 표현 대신에 등엔트로피 과정(isentropic process)이라는 표현을 사용함으로써 이러한 어려움을 다소 줄여주기도 한다.). 이는 단열과정에 대한 설명이 주로 가역과정에 대한 설명보다 먼저 제시되기 때문인 것으로 생각된다. 이에 비추어 볼 때 단열과정에서의 ‘ $pV^\gamma = \text{일정}$ ’에 대한 식을 열역학 제1법칙을 다룰 때 제시할 것인지, 카르노 순환을 설명할 때 함께 제시할 것인지, 아니면 이 식에 대해 한 교과서에서 두 번 이상의 설명을 제공할 것인지에 대한 고민이 필요하다. 참고로 Hecht(1996) 교과서에서는 열역학적 과정의 가역성에 대한 정성적 설명을 먼저 제공한 이후에 단열과정에 대한 설명을 제시하였다.

(7) 교과서 개선방안

표 6.2는 지금까지 논의한 학생의 이해에 기반하여 교과서 설명을 고찰하고 개선방향에 대해 정리한 결과이다. 교과서에는 바르게 설명되어 있으나 학생의 이해가 부족한 경우(고립계에 대한 인식의 부족, 클라우지우스 식의 적용에 있어서의 구속조건 등)에는 학생의 이해를 높이기 위한 교육적 방법을 찾는 것이 필요하며, 교과서의 설명이 부족한 경우(가역과정에 대한 설명, 단열과정에서의 구속조건 등)에는 학생들이 잘 이해할 수 있도록 충분한 설명을 제공함과 동시에 이러한 설명을 제공하였을 때 학생의 이해가 증진되는지의 여부를 확인하는 것이 필요하다.

표 6.2 학생의 이해에 기반한 교과서 설명의 개선방향

| 주요개념 | 학생의 이해 | 교과서 설명 | 교과서 설명의 개선 방안 |
|----------|---|--|--|
| 열역학 제2법칙 | 열역학 제2법칙의 사용 조건에 대해 잘 알지 못함. | 열역학 제2법칙의 사용조건에 대한 기술이 없음. | 열역학 제2법칙은 입자 수가 굉장히 많아서($\sim 10^{23}$) 각각의 입자들의 상태에 대한 정보가 부족할 때 사용할 수 있음을 제시할 필요가 있음. |
| | 열역학 제2법칙에 의해 계의 나중 상태가 어떻게 되는지에 대한 예측을 잘 하지 못함. | 열역학 제2법칙에 대한 다양한 표현방법이 존재함. | 열역학 제2법칙에 대한 다양한 표현들 중에 어떠한 표현들을 가르칠 것인지에 대한 고민이 필요함. |
| | 열역학 제2법칙에 의해 계의 나중 상태가 어떻게 되는지에 대한 예측을 잘 하지 못함. | 고립계에서는 최종적으로 열역학적 평형상태에 도달한다는 서술이 부족함. | 열역학적 평형상태에 대해 소개하고, 열역학적 평형상태에 도달하는 상황 및 이 때의 계의 최종상태에 대한 안내가 필요함. |
| | 계의 엔트로피가 증가하면 사건이 비가역적으로 일어난다고 생각함. | 고립계의 엔트로피가 증가하면 사건이 비가역적으로 일어난다고 명시되어 있음. | ‘고립계’에 대한 강조가 필요함. |
| 엔트로피 | 클라우지우스 엔트로피에 대한 이해의 어려움. 엔트로피를 무질서한 정도로 생각함. | 대부분의 교과서가 클라우지우스 엔트로피를 중심으로 서술하고 있으나, 일부 볼츠만 엔트로피를 중심으로 서술하는 경우도 있음. | 물리학자들은 볼츠만 엔트로피를 중심으로 서술해야 한다고 주장하나, 교수 목적에 맞게 제시할 필요가 있음.(즉, 엔트로피 개념의 직관적 이해를 위해서는 볼츠만 엔트로피를 중심으로, 계산을 통한 사건의 방향성 예측을 위해서는 클라우지우스 엔트로피를 중심으로 서술할 필요가 있음.) |
| | 식 $dS = \delta Q/T$ 이 가역과정에서 성립함을 알지 못함. | 식 $dS = \delta Q/T$ 는 가역과정에서 성립함이 명시되어 있음. | 식 $dS = \delta Q/T$ 는 가역과정에서 성립함을 강조할 필요가 있음. |

| 주요개념 | 학생의 이해 | 교과서 설명 | 교과서 설명의 개선 방안 |
|---------------------------|---|--|--|
| 가역과정 | 열역학에서의 가역과정의 조건을 잘 알지 못함. | 열역학에서의 가역과정의 조건은 어느 정도 명시되어 있으나, 어떻게 작동시킬 수 있는지에 대한 구체적 표현이 부족함. | 가역과정에서 ‘거꾸로 되돌린다’는 것의 조작적 정의를 제시할 필요가 있음. 낱알 등을 이용하여 준정적으로 작동하는 과정에 대한 구체적인 설명을 그림과 함께 제공해야 하며, ‘온도차가 나는 두 물체의 접촉이 없어야 한다.’는 가역과정의 조건을 강조할 필요가 있음. |
| 단열과정 (단열과정에서의 구속조건) | ‘ $pV^\gamma = 일정$ ’ 은 단열과정에 적용된다고 생각함. | ‘ $pV^\gamma = 일정$ ’ 은 단열과정에 적용된다고 기술함. | ‘ $pV^\gamma = 일정$ ’ 은 가역단열과정에서 적용됨을 명시할 필요가 있음. |

6.4. 열역학 제2법칙의 효과적인 지도 방안

이 절에서는 지금까지의 논의를 바탕으로 열역학 제2법칙의 효과적인 지도 방안에 대해 제안하고자 한다. 교수의 목적에 따라 학생을 지도하는 방법, 즉 내용의 구성 방식 및 설명 방식은 다양해질 수 있다. 본 연구는 열역학 제2법칙과 관련된 문제 풀이 상황에서의 열역학 제2법칙과 가역과정에 대한 학생의 이해에 초점을 맞추고 있으며, 따라서 열역학 제2법칙과 관련된 주요 개념을 정확하게 이해하고 성공적으로 문제를 풀이하기 위한 지도방안에 대해 서술할 것이다.

6.4.1. 열역학 제2법칙과 관련된 개념적 지식의 조직화

문제 풀이에 성공하기 위해서는 최종적으로 문제 상황에 맞는 원칙을 찾아내고 이를 적절히 활용해야 한다. 이를 위해서는 머릿속에서 개념적 지식들 간의 조직화가 필요하다. 즉, 열역학 제2법칙과 관련된 주요 개념인 엔트로피와 가역/비가역과정에 대해 명확하게 이해해야 할 뿐만 아니라, 여러 가지 명제들 사이의 관계를 알고 있어야 한다.

열역학 제2법칙을 이해하는 데 필수적인 개념을 ‘엔트로피’와 ‘가역과정’이라고 했을 때, 개념의 의미를 명확하게 하고, 개념과 개념 사이의 관계를 잘 알기 위해 학생들은 다음과 같은 명제들을 인지해야 한다.

- 엔트로피, 온도, 내부에너지 등의 열역학적 상태함수(또는 상태변수)들은 계를 구성하는 입자수가 굉장히 많고 입자간 상대 운동이 존재할 때 사용할 수 있다.

- 어떤 고립계 안에서 열역학적 과정이 진행되고 있을 때, 고립계의 엔트로피가 일정하게 유지된다는 것은 그 과정이 가역적임을 의미하고, 엔트로피가 증가한다는 것은 그 과정이 비가역적임을 의미한다.
- 열역학에서 가역과정이란 매 순간순간 평형상태를 유지하는 준정적 과정으로서, 온도 차가 나는 두 물체의 접촉이나 마찰이나 난류 등이 존재하지 않아야 한다.
- 열역학적 계에서는 사건이 비가역적으로 진행되더라도 그 계는 최종적으로 열역학적 평형상태에 도달한다.
- $pV^\gamma = \text{일정}$, $dS = \delta Q/T$ 는 가역과정일 때만 사용할 수 있다.

여기에서는 학생들이 인지해야 할 주요 명제들, 개념 또는 명제들 사이의 관계, 이들을 사용할 때 필요한 구속조건을 그림으로 나타내었고, 이를 ‘개념들 간의 관계도’라고 명명하였다(그림 6.1 참고). 이러한 관계도를 중심으로 6.4.2절에서는 교수-학습 흐름도를 구성하였다.

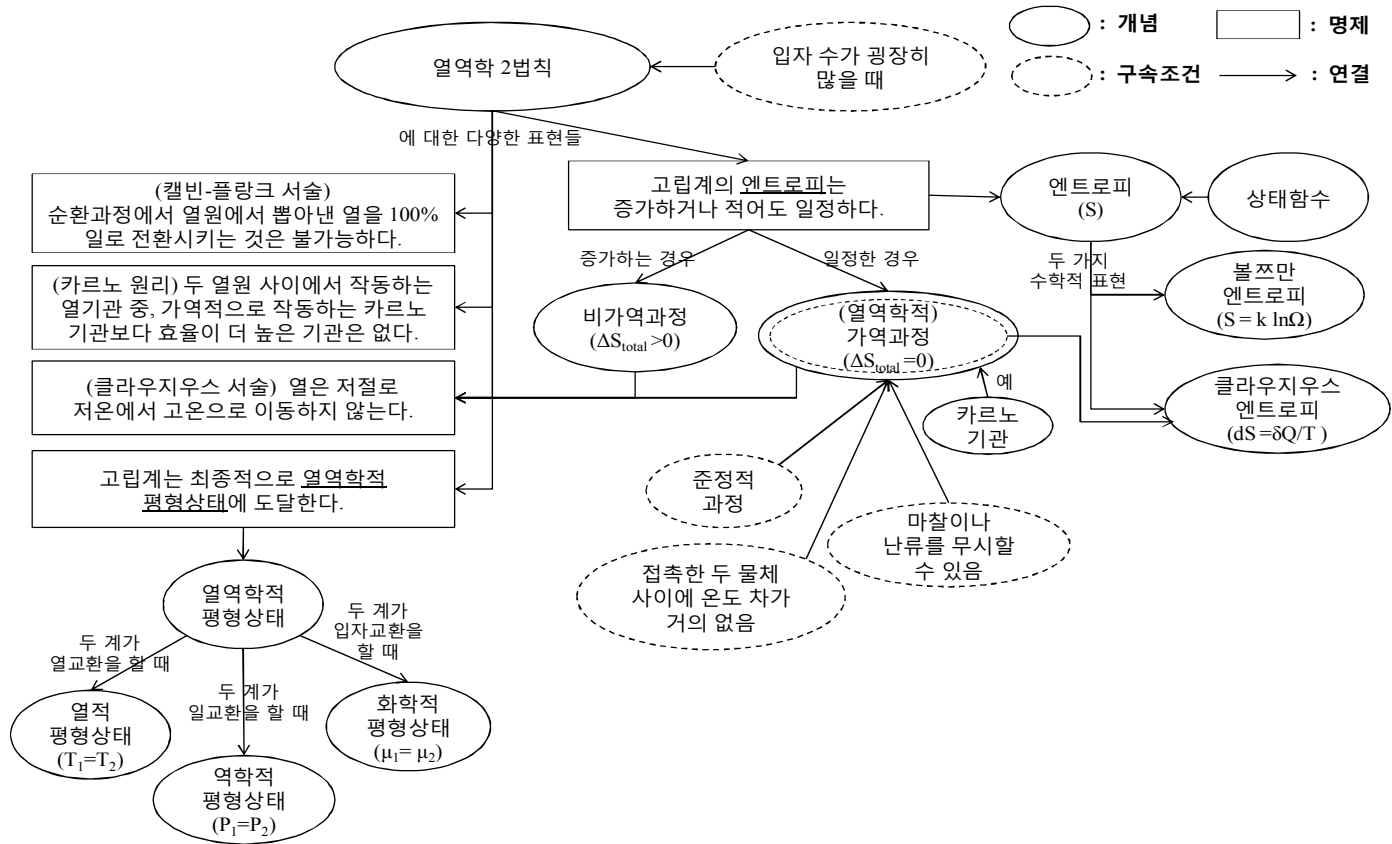


그림 6.1 열역학 제2법칙에서의 구속조건을 포함한 개념들 간의 관계도

그림 6.1에 대한 설명은 다음과 같다. 전체 구조의 핵심은 열역학 제2법칙에 대한 표현 중, ‘고립계의 엔트로피는 증가하거나 적어도 일정하다.’라는 부분이다. 먼저 열역학 제2법칙은 입자 수가 굉장히 많은 시스템에서 적용됨을 이해할 필요가 있다. 또한 열역학 제2법칙에 대한 다양한 표현들이 존재하는데, 여기에서는 전통적으로 중시되었던 표현들(클라우지우스 서술, 켈빈-플랑크 서술, 카르노 원리)과 함께 사건이 일어난 후의 최종 상태를 알려주는 열역학적 평형에 관한 서술을 포함시켰다. 이러한 열역학 제2법칙에 대한 다양한 표현들을 아우르고 이를 물리량으로 나타낼 수 있는 방법은 엔트로피 개념을 도입하는 것이다. 즉, 계의 엔트로피를 계산할 수 있으면 사건이 일어날 수 있는지 없는지, 또는 사건이 가역적인지 비가역적인지의 여부를 예측할 수 있다. 고립계의 엔트로피가 증가하면 비가역과정, 일정하면 가역과정이다. 계의 엔트로피 변화량은 볼츠만 엔트로피와 클라우지우스 엔트로피를 이용하여 계산할 수 있으나, 엔트로피에 대한 직관적 이해를 위해서는 볼츠만 엔트로피를 이용하는 것이 도움이 되며, 계산을 편리하게 하기 위해서는 클라우지우스 엔트로피를 이용하는 것이 도움이 된다. 그리고 계의 엔트로피 변화량을 계산할 수 있다면, 다양한 상황에서 고립계의 엔트로피 변화량을 계산하고 이를 바탕으로 사건이 일어날지의 여부와 그 과정이 가역과정인지의 여부를 확인해 보아야 한다.

한편, 열역학 제2법칙에 대한 개념 설명에 있어서 어려운 부분 중 하나는 ‘가역과정’에 대한 설명을 언제 어떻게 도입해야 하는가에 대한 것이다. 가역과정은 고립계의 엔트로피 변화 없이 사건이 일어나는 과정으로서, 열역학에서 중요한 과정이나 실제 관찰할 수 없는 매우 이상적인 과정이다. 이를 이해하기 위해 가역과정의 대표적인 예인 카르노 기관을 도입하여 설명하는 것이 필요하다. 또한 계의 엔트로피 변화량을 클라우

지우스 엔트로피를 이용하여 계산하기 위해서는 가역과정에 대한 이해가 필요한데, 가역과정은 계와 주위환경의 엔트로피 변화량을 계산하여 예측할 수 있는 만큼 이러한 측면에 주의를 기울여 열역학 제2법칙의 교수학습 흐름도를 작성할 필요가 있다.

6.4.2. 열역학 제2법칙의 교수학습 흐름도

여기에서는 지금까지 조사된 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해와 교과서 서술 분석, 열역학 제2법칙의 개념적 구조를 기반으로 하여 열역학 제2법칙의 물리적 내용을 잘 이해하고 성공적으로 문제를 해결하기 위한 일반물리학 수준의 교수학습 흐름도를 제시하고자 한다. 이해해야 할 주요 개념적 지식은 6.4.1절에서 논의한 명제들과 그림 6.1에서 제시한 개념 및 개념들 간의 관계, 그리고 관련된 구속조건들이다. 특히 본 연구에서는 다입자계의 특징을 강조하였으며, 가역과정에 대한 이해가 열역학 제2법칙과 관련된 문제해결에서 필수적임을 찾아내었다. 따라서 여기에서는 가역과정에 대한 이해를 학생들이 핵심적으로 알아야 할 중요한 목표 중 하나로 간주하였다.

(1) 전체 내용 흐름

먼저, 내용 제시에 있어서 전체적인 흐름에 대한 결정이 필요하다. 그림 6.1에 제시된 개념들의 위계를 고려했을 때 ‘열역학 제2법칙에 대한 설명 → 엔트로피 개념의 설명 → 엔트로피를 이용한 열역학 제2법칙의 설명 및 적용’ 순으로 전체 내용을 조직하는 것이 적절하며, 이는 대부분의 교과서에서 열역학 제2법칙에 대한 내용을 전개하는 형태이기도 하다. 특히 학생들은 자신이 확신하는 지식을 중심으로 애매모호한 지식들에 대해 자기 나름의 개념체계를 조직해 나감을 고려했을 때(연구 2의

결과), 고립계를 강조하면서 ‘고립계에서 엔트로피는 감소하지 않는다.’는 열역학 제2법칙에 대한 명제를 중심으로 전체 내용을 조직하는 것이 필요하며, 이와 관련된 예제를 많이 제시해 줄 필요가 있다.

한편, 연구 2와 연구 3의 결과에 따르면, 가역과정을 효과적으로 이해하기 위해서는 가역과정에 대한 정성적 이해와 정량적 이해가 동시에 필요하다. 정량적 이해를 위해서는 계의 엔트로피 변화량 계산이 필수적이며, 따라서 여기에서는 엔트로피 개념의 설명에 있어서 클라우지우스 엔트로피를 중심으로 내용을 기술할 것이다.

가역과정은 열역학 제2법칙에 있어서 중요한 개념인 동시에 엔트로피 변화량을 통해 계산이 가능하고 클라우지우스 엔트로피를 비롯한 여러가지 수식들의 구속조건 역할을 하기 때문에, 가역과정을 언제 소개하는 것이 적절한지에 대한 고민을 충분히 하여 전체 내용을 계획해야 한다.

연구자는 가역과정에 대한 이해를 돕기 위한 핵심적인 예가 카르노 기관임을 주장하였으며, 따라서 카르노 기관에 대해 자세하게 다루고자 한다. 아울러 스텔링 기관 등 다른 열기관과의 비교를 통해 학습자의 가역과정에 대한 이해를 증대시킬 수 있을 것으로 생각하였다.

엔트로피에 대한 직관적 이해를 돕기 위해서는 볼츠만 엔트로피에 대한 설명이 필요하다. 따라서 볼츠만 엔트로피와 클라우지우스 엔트로피가 어떤 관계를 갖는지 보여주는 과정이 필요하며, 이를 위해 Chabay & Sherwood(2002)가 제시한 방법인 온도 차가 나는 두 물체의 접촉 상황을 이용하여 최종적으로 클라우지우스의 엔트로피는 통계역학적인 온도를 정의하는 식임을 기술할 것이다.

그 외에 교수학습 흐름도를 작성함에 있어서 표 6.1에서 논의한 교과서 설명의 개선 방안들을 고려하였다. 열역학 제2법칙의 사용조건, 열역학 제2법칙의 다양한 서술들 중 어떤 서술을 제시할 것인가, 식

‘ $dS = \delta Q/T$ ’ 과 ‘ pV ’ = 일정’ 등의 사용 조건에 대한 고려가 필요하다. 이러한 모든 측면을 고려한 열역학 제2법칙에 대한 교수학습 흐름도는 표 6.3과 같으며 숫자 ①~⑩은 교수학습 진행순서를 의미한다. 단, 엔트로피 개념에 대한 직관적이고 정성적인 이해를 강조하는 경우에는 ⑤의 엔트로피 개념의 도입에 있어서 ⑨에서 제시한 볼츠만 엔트로피를 먼저 소개하고 ⑩에서 제시한 열적 평형 과정으로부터 클라우지우스 엔트로피를 유도한 후에, ⑥의 클라우지우스 엔트로피로부터 계의 엔트로피 변화량을 계산하는 과정을 도입할 수도 있다(...④→⑤→⑨→⑩→⑥→⑦→⑧).

표 6.3 열역학 제2법칙의 교수학습 흐름도

| 주요 흐름 | 각 부분에 대한 설명 | 기존의 교과서 설명과의 비교 |
|------------------------|---|--|
| ① 열역학 제2법칙의 도입 | 자연에는 에너지 보존법칙만으로는 설명이 불가능한 과정들이 존재함. | 기존의 교과서 진술 방식과 동일함. |
| ② 열역학 제2법칙의 다양한 서술들 설명 | 에너지 보존법칙에는 위배되지 않으나 일어날 수 없는 일들을 찾은 후, 열역학 제2법칙의 여러가지 표현들과 연결시킴. (예: 열평형 과정, 마찰에 의해 역학적 에너지가 내부에너지로 전환되는 과정, 확산, 열기관 상황 등) 열역학 제2법칙의 표현으로서 ‘고립계는 항상 열역학적 평형상태, 즉 두계가 열을 교환하는 경우에는 최종적으로 온도가 같아지고, 일을 교환하는 경우에는 압력이 같아지는 상태로 이동한다.’를 제시할 수도 있음. | 기존의 교과서처럼 열기관과 냉동기관을 이용하여 열역학 제2법칙을 진술할 수도 있음. |
| ③ 역학과 열역학의 비교 | ‘모든 물리적 상황이 비가역적인가?’라는 질문으로부터 역학적 상황(예: 단진자 운동)과 열역학적 상황에서의 사건의 가역성을 비교함. 특정 과정에 대해 사건을 촬영하여 비디오 테이프를 거꾸로 되돌렸을 때 이 과정이 시간에 | 기존의 교과서에 잘 제시되지 않는 설명임. |

| 주요 흐름 | 각 부분에 대한 설명 | 기존의 교과서 설명과의 비교 |
|---------------------------------------|---|---|
| | <p>거슬러 작동하고 있음을 알 수 없는 경우를 가역과정으로 정의한 후, 비가역성을 다루는 열역학 제2법칙은 매우 많은 입자들의 상호작용(또는 충돌)에 의해 나타남을 설명함. 참고로 실제 세계는 다입자계로 구성되어 있음.</p> | <p>가역과정의 의미에 대한 설명은 Chabay & Sherwood(2002)를 따름.</p> |
| <p>④ 열역학적 가역과정에 대한 설명: 카르노 기관의 도입</p> | <p>‘열역학적 과정 중에서 매우 이상적으로 간주할 수 있는, 거의 가역적으로 작동시킬 수 있는 과정은 어떤 과정인가?’라는 질문으로부터 카르노 기관에 대해 설명함.</p> <p>카르노 기관의 각 과정(단열과정, 등온과정)에 대한 설명에 있어서 가역적으로 작동시키기 위해 만족해야 하는 조건들(준정적 과정, 마찰이 없고 온도차가 나는 두 물체 사이에 접촉이 없어야 함.)을 설명하고, 작동과정에 대한 설명을 그림(또는 컴퓨터 시뮬레이션)과 함께 구체적으로 제시하며, 각 과정은 거꾸로 되돌릴 수 있는지의 여부를 ③에서의 가역과정의 기준에 의거하여 토의함.</p> <p>카르노 원리에 대한 설명을 제공함.</p> <p>여기에서 ‘$pV^\gamma = 일정$’이 가역단열과정에서만 성립됨을 설명할 수 있음.</p> | <p>기존의 교과서에서도 카르노 기관을 설명하면서 가역과정을 도입하는 경우가 많음.</p> <p>가역과정의 구속조건에 대한 충분한 설명이 필요함.</p> <p>‘$pV^\gamma = 일정$’은 일반적으로 단열과정에서 제시됨.</p> |
| <p>⑤ 엔트로피 개념의 도입</p> | <p>사건의 방향성을 예측하기 위해 도입하는 새로운 물리량이 ‘엔트로피’임을 설명함.</p> <p>엔트로피를 이용한 열역학 제2법칙 표현에 대해 설명함: 고립계에서 엔트로피는 감소하지 않는다.</p> <p>여기에서는 ‘클라우지우스 엔트로피’에 대해 먼저 설명함. (단, 엔트로피 개념의 정성적 이해를 강조할 경우 ⑨와 ⑩을 먼저 다룬다.)</p> | <p>기존의 교과서 진술 방식과 동일함.</p> |

| 주요 흐름 | 각 부분에 대한 설명 | 기존의 교과서 설명과의 비교 |
|--|---|--|
| ⑥ 클라우지우스 엔트로피 개념 도입 및 계의 엔트로피 변화량 계산하기 | <p>클라우지우스 엔트로피 $dS = \delta Q/T$ 를 도입하고, 가역과정 상황(예:가역등온팽창과정)과 비가역과정 상황(예:자유팽창과정)에서의 계의 엔트로피 변화량을 계산하는 방법을 설명함.</p> <p>가역과정에서만 $dS = \delta Q/T$ 이 성립함을 설명하며, 엔트로피는 상태함수여서 비가역과정의 경우에는 처음상태와 나중상태가 동일한 가역과정의 경로를 따라 엔트로피 변화량을 계산할 수 있음을 안내함. 아울러 실제 세계는 많은 입자들로 구성되어 있으므로, 자연현상은 비가역적임을 이야기할 수 있음.</p> | Halliday <i>et al.</i> (2008)의 설명방식을 따름. |
| ⑦ 비가역과정에서 고립계의 엔트로피 변화량 계산하기 | <p>비가역과정에서의 고립계의 엔트로피 변화량을 계산하고 이를 사건의 방향성과 연결시켜 서술함.</p> <p>비가역과정에서의 계의 최종 상태를 예측하는 문제를 풀 때 ②에서 제시한 고립계는 항상 열역학적 평형상태로 이동한다는 정보를 활용할 수 있음.</p> | <p>기존의 교과서에 제시되어 있으나, ‘고립계’를 더욱 강조할 필요가 있음.</p> <p>기존의 교과서에 잘 제시되지 않은 설명임.</p> |
| ⑧ 가역과정에서 고립계의 엔트로피 변화량 계산하기 | <p>카르노 열기관 상황에서 계와 주위 환경의 엔트로피 변화량을 계산하고 매 순간 고립계의 총 엔트로피 변화량이 0 이면 이 과정은 가역과정임을 주지시킴.</p> <p>연구 2의 상황과 같이 카르노 기관과 다른 열기관의 비교 활동을 통해 가역 과정에 대한 이해를 증대시킬 수 있음.</p> | 기존의 교과서에서 잘 제시되지 않은 설명임. |
| ⑨ 볼츠만 엔트로피 개념 도입 | 엔트로피 개념의 직관적 이해를 위해 볼츠만 엔트로피 $S = k \ln \Omega$ 와 열역학적 확률 개념을 도입함. | 기존의 교과서 설명과 동일함. |
| ⑩ 볼츠만 엔트로피와 클라우지우스 엔트로피의 연결 | 온도 차가 나는 두 물체의 열적 접촉을 이용하여 통계역학적 온도를 정의하고, 이로부터 클라우지우스 엔트로피를 정의함. | Chabay & Sherwood (2002)의 설명방식을 따름. |

(2) 세부적인 내용 설명

여기에서는 표 6.3에서 기술한 열역학 제2법칙의 흐름도에 대한 세부적인 내용들을 기술하겠다. 앞으로 제시되는 기호 ①~⑩은 표 6.3에 표시되어 있는 기호 ①~⑩에 각각 대응되는 설명들이다. 특히 역학과 열역학의 비교로부터 열역학 2법칙을 적용할 수 있는 상황에 대한 설명과 가역과정에 대한 설명을 자세하게 기술하였다.

① 열역학 제2법칙의 도입

열역학 제2법칙은 열역학 제1법칙으로는 설명할 수 없는 현상들, 즉, 사건이 일어나기 전 후의 에너지는 보존되나 사건의 방향성이 존재하는 경우를 기술하기 위해 도입된 개념이다. 바닷물에서 에너지를 뽑아서 로켓을 쏘아 올리거나 주변의 에너지를 모아서 정지해 있는 단진자를 움직이게 하는 일은 에너지 보존법칙에는 위배되지 않으나 실제로는 불가능한 일들이며, 이러한 현상들을 열역학 제2법칙을 이용하여 설명할 것임을 안내한다.

② 열역학 제2법칙의 다양한 서술들 설명

열역학 제2법칙에 대한 서술들을 도입하는 전통적인 방법은 열기관과 냉동기관에 대한 상황에 대하여 ‘열을 일로 100% 바꿀 수 있는 열기관은 불가능하다.’는 켈빈-플랑크 서술과 이와 동등한 표현으로서 ‘외부로부터의 에너지 유입 없이 저온에서 고온으로 열을 이동시킬 수는 없다.’는 클라우지우스 서술을 제시하는 것이다. 하지만 자연에서 관찰할 수 있는 거의 대부분의 사건들이 열역학 제2법칙으로 설명되며 따라서 다양한 사례들(열평형 과정, 마찰에 의해 역학적 에너지가 내부에너지로 전환되는 과정, 확산과정 등)로부터 귀납적으로 열역학 제2법칙에 대한 서술을 도출하

거나, 열역학 제2법칙에 대한 다양한 서술들을 먼저 제시한 다음에 이러한 관점으로 일상의 사례들을 해석하는 방법을 사용할 수 있다.

한편 ‘고립계에서 에너지는 흩어지려고 한다.’는 표현이나 ‘에너지는 전환되면서 질적으로 저하된다.’는 표현은 ‘에너지가 흩어진다.’는 표현이나 ‘에너지의 질적 저하’에 대한 조작적 정의를 알기가 어렵다. 따라서 ‘고립계는 최종적으로 열역학적 평형상태에 도달한다.’는 표현을 제시하고, 열을 주고받을 수 있는(열적 상호작용을 하는) 두 계는 최종적으로 온도가 동일해지며, 일을 주고받을 수 있는(역학적 상호작용을 하는) 두 계는 최종적으로 압력이 동일해지면서 일이라는 유용한 에너지가 계의 내부에너지로 전환됨을 설명해주는 방안도 생각해 볼 수 있다.

③ 역학과 열역학의 비교

여기에서 역학과 열역학을 비교하는 목적은 열역학에서 비가역성이 나타남을 학생들에게 주지시키기 위해서이다. 역학에서는 초기의 물체의 위치와 속도를 이용하여 앞으로의 물체의 운동상태를 예측하는 반면, 열역학은 굉장히 많은 수의 입자들을 다루기 때문에 입자 하나하나의 운동상태에 대한 고려 없이 통계적 방법을 사용한다. 비가역성과 관련된 핵심 부분은 많은 수의 입자를 다룰 때, 입자들의 운동상태에 대한 정확한 정보를 알아낼 수 없음에 있다. 비가역성의 근원과 관련하여 여러 연구자들이 비가역성의 근원을 명확하게 설명하는 일은 어려운 일이라고 기술하였으며 상당히 난해한 수식과 함께 비가역성을 증명하였는데(Baker, 1986; Eggarter, 1973; Frisch, 1958; Swendsen, 2008), 이를 이해하기 위해서는 적어도 대학 수준의 통계역학 이상의 지식이 필요하다.

그럼에도 불구하고 역학에서 다루는 사건들과 열역학에서 다루는 사건들의 비교를 통해, 비가역성은 많은 입자들의 충돌이나 상호작용에 기인

하며, 이 세상의 모든 물체들은 엄청난 수의 원자로 이루어져 있고 완벽한 강체는 존재하지 않기 때문에 모든 거시적 상황에서 비가역성이 나타난다고 설명할 수 있다. 이러한 설명은 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해를 증진시키는 데 필수적이다.

가역성과 비가역성을 구분하는 척도로는 Chabay & Sherwood(2002)가 도입했던 ‘어떤 과정을 녹화한 후에 비디오 테이프를 거꾸로 돌렸을 때, 이 과정이 시간에 거슬러 작동하고 있음을 구분할 수 있는지의 여부를 판단해보게 하는 활동’ 등을 사용할 수 있다. 이 방법을 활용하면 역학적 상황인 강체의 탄성충돌이나 공기저항이 없는 상황에서의 진자의 운동은 사건이 일어나는 방향에 관계없이 뉴턴의 운동방정식을 이용하여 상황을 기술할 수 있으며 따라서 가역적임을 판단할 수 있다. 한편, 공기저항이나 마찰이 존재하는 경우, 또는 입자가 비탄성 충돌을 하는 경우에는 사건을 시간을 거슬러 거꾸로 되돌렸을 때 뉴턴의 운동법칙으로 현상을 설명할 수 없으며 따라서 비가역적인 상황이다. 비가역적 상황을 잘 설명하기 위해서는 내부에너지 개념을 도입해야 하나 이 개념은 뉴턴의 운동 법칙에는 나타나지 않는다. 또한 열에너지(또는 내부에너지)를 다룬다는 것은 계가 수많은 입자로 구성되어 있고 각각의 입자들은 서로 다른 속도를 가지고 있음을 의미하며, 내부에너지는 순환과정에서 일과 같은 역학적 에너지로 100% 전환될 수 없다. 확산 등의 열역학 제2법칙과 관련된 또 다른 예들을 통해서도 비가역성은 입자 수가 굉장히 많은 상황에서 나타남을 설명할 수 있다. 이는 이후에 엔트로피를 미시적, 통계적 방법으로 설명하는 과정과도 연결된다.

한편, 시뮬레이션을 이용하여 많은 입자들이 서로 충돌할 때 비가역성이 나타남을 확인해 볼 수도 있다. Gislason(2010)은 5장에서 논의한 문제 1의 상황(Double chamber problem)을 시뮬레이션으로 구현하였다. 여기에

서 기체분자들은 뉴턴의 운동법칙에 따라 움직이나 기체의 압력은 최종적으로 양쪽이 거의 같아지며, 피스톤은 분자들의 충돌에 의해 요동(fluctuation)치는 모습을 보여주었다. 즉, 특정 조건에 대해 시뮬레이션을 통해 그 결과를 예측해보는 활동을 함으로서 학생들은 비가역성이 나타나는 조건에 대해 보다 명확히 이해할 수 있을 것으로 생각된다.

④ 열역학적 가역과정에 대한 설명: 카르노 기관의 도입

앞에서는 입자 수가 굉장히 많은 상황에서 비가역성이 나타난다고 주장하였으나, 다루는 입자 수가 많은 상황 속에서도 거의 가역적으로 작동한다고 볼 수 있는, 매우 이상적인 상황에 대해 고민해 볼 수 있다. 열역학에서의 가역과정은 이상화된 과정으로서, ' $dS = \delta Q/T$ ', ' $dE = TdS - pdV$ ', ' $pV^\gamma = \text{일정}$ '과 같이 상당 수의 수식들이 가역과정 상황에서만 적용되기 때문에 가역과정이 어떤 과정인지를 아는 것은 수학적 식을 정확하게 사용하기 위해서도 필수적이다. 또한 이 과정은 비가역적 상황에 비해 상대적으로 단순한 측면도 있어서, 사고를 할 때 불필요하고 복잡한 요소들(예를 들어 5장의 비가역 단열과정에서 나타나는 피스톤의 감쇄진동운동)을 제거하는 역할도 한다.

주어진 과정이 가역과정인지를 판단하기 위해서는 '③ 역학과 열역학의 비교'에서 논의했던 비디오 테이프를 거꾸로 돌려보는 활동을 수행하는 것이 필요하다. 예를 들면, 카르노 기관을 구성하는 4개의 과정(등온 팽창, 단열팽창, 등온압축, 단열압축)을 교과서 설명에 따라 준정적으로 작동시켜 보고 거꾸로 되돌려보는 활동을 수행하여, 한쪽 방향으로만 사건이 일어날 수 있는지 아니면 양쪽 방향으로 사건이 일어나는 것이 가능한지를 판단해보게 한다. 또한 카르노 기관의 각 작동과정과 비가역 단열과정, 비가역 등온과정과의 비교를 통해 열역학에서의 과정이 가역

적이기 위한 구속조건을 찾아내는 활동을 수행한다.

가역과정에 대한 구속조건과 관련해서는 주로 그 과정이 준정적이어서 매 순간순간 열역학적 평형상태에 놓여야 하며, 마찰 등이 존재하지 않아야 하고, 온도 차가 나는 두 물체가 직접적으로 접촉하지 않아야 한다는 서술이 보편적이다. 첫 번째 조건과 관련하여 매 순간 열역학적 평형상태로 간주할 수 있는 과정이란 어떤 과정인가에 대한 논의는 철학적인 논의가 될 수 있으며 학생들이 직관적으로 이해하기 어려울 수 있다. 두 번째 조건은 역학에서 주로 사용하는 조건이기 때문에 이해하기가 상대적으로 쉽다. 하지만 세 번째 조건은 교과서에서조차 자주 등장하지 않으며, 온도 차가 거의 나지 않은 두 계가 접촉한 상태로 계의 경계면에서 열의 형태로 에너지 전달이 일어난다는 것을 상상하는 일 또한 추상화된 과정이기 때문에 머릿속에서 그려내기 어렵다. 결국 학생들은 마찰이 없는 상황에서 거꾸로 되돌아갈 수 있을 것으로 예측되는 상황을 가역과정으로 정의할 가능성이 큰데, ‘거꾸로 되돌아갈 수 있다 없다’의 판단 또한 엔트로피를 ‘무질서도’로 정의하는 것과 같이 매우 자의적이기 때문에 판단을 내리는 데 있어서 도움이 되지 않는다. 특히 학생들이 가역과정의 대표적인 예로서 단진자 운동 등을 떠올린다면 열역학적 상황에서의 가역과정에 대한 이해는 더욱 어려워진다.

이와 관련하여 학생들에게 엔트로피 개념을 이용하면 어떤 열역학적 사건이 가역적인지의 여부를 확인할 수 있음을 알려준다. 가역과정은 수학적으로는 고립계의 엔트로피 변화량이 0인, 즉 $\Delta S_{sys} + \Delta S_{env} = 0$ 인 과정이다. 정량적인 계산을 통한 과정의 가역성 판단은 ‘⑦ 비가역과정에서 고립계의 엔트로피 변화량 계산하기’과 ‘⑧ 가역과정에서 고립계의 엔트로피 변화량 계산하기’에서 설명하도록 하겠다.

⑤ 엔트로피 개념의 도입

물리학에서는 모든 법칙이나 개념들을 정량화하여 수식으로 설명하는데, 사건의 방향성을 설명하기 위해 도입되는 새로운 물리량이 엔트로피이다. 즉, ②에서 제시한 열역학 제2법칙에 대한 다양한 서술들은 ‘고립계에서 엔트로피는 절대 감소하지 않는다.’라는 표현으로 정리될 수 있다. 일반물리학 수준에서 엔트로피는 주로 클라우지우스 엔트로피 ($dS = \delta Q/T$)와 볼츠만 엔트로피($S = k \ln \Omega$)가 다루어지는데, 계산을 통해 사건의 방향성을 결정하는데 교수의 초점을 둔다면 클라우지우스 엔트로피를 강조하고, 엔트로피 개념에 대한 정성적이고 직관적인 이해에 초점을 둔다면 볼츠만 엔트로피를 강조할 필요가 있다. 본 연구는 열역학 2법칙의 이해와 엔트로피 변화량의 계산에 초점을 두고 있으며 따라서 클라우지우스 엔트로피에 초점을 맞추어 교수내용을 전개하였다.

⑥ 계의 엔트로피 변화량 계산하기

정성적인 이해를 토대로 클라우지우스 엔트로피를 사건의 방향성과 연결시키는 것은 어렵다. 아직까지는 수식에 대한 직관적 이해를 위한 적절한 설명이 존재하지 않으므로, Halliday *et al.*(2008)에서 제시하는 것처럼 정성적 설명 없이 엔트로피는 $dS = \delta Q/T$ 로 정의됨을 설명하고, 가역과정 상황에서 이 식을 이용하여 계의 엔트로피 변화량을 계산하는 방법에 대해 학습한다. 한편, 매 순간의 계의 상태를 알 수 없는 비가역과정(예: 자유팽창과정)에서는 경로에 따른 적분을 할 수가 없으므로 이 식을 바로 사용할 수 없으며, 따라서 엔트로피가 상태함수임을 이용하여 처음상태와 나중상태가 동일한 가역과정 경로를 따라 엔트로피 변화량을 계산할 수 있음을 안내한다. 즉, 엔트로피는 상태함수이며, 식 $dS = \delta Q/T$ 은 가역과정에서만 사용할 수 있음을 여기에서 강조할 필요가 있다.

⑦ 비가역과정에서 고립계의 엔트로피 변화량 계산하기

열역학 제2법칙에 대한 이해 증진을 위해서는 고립계의 엔트로피 변화량을 계산하고 이를 사건의 방향성과 연결시키는 활동을 지속적으로 하는 것이 중요하다. 예를 들어 온도 차가 나는 두 물체가 접촉하는 경우, 처음에 온도가 높았던 물체는 열을 방출하면서 엔트로피가 감소하게 된다. 그럼에도 불구하고 저온의 물체와 고온의 물체를 모두 포함하는 총 엔트로피는 증가하며 따라서 이 과정은 비가역과정임을 강조할 필요가 있다.

한편 자유팽창과정이나 비가역 단열과정상황과 같이 준정적이지 않은 과정을 다룰 때에는 과정이 진행되는 동안의 계의 상태를 알 수가 없다. 따라서 계의 엔트로피 변화량을 계산할 때 식 $dS = \delta Q/T$ 을 바로 사용할 수 없음을 주지시켜야 하며, 열역학 2법칙에 의해 계는 최종적으로 열역학적 평형상태, 즉 열교환을 하는 두 계는 온도가 같아지며 일을 교환하는 두 계는 압력이 같아짐을 안내해 줄 필요가 있다. 물론, 계의 최종상태를 결정할 수 없는 흥미로운 상황들도 만들 수 있다. 예를 들면 수평으로 놓여있는 실린더 안에 기체가 들어있고 이 기체가 피스톤을 밀어내는 상황이 있는데, 실린더와 피스톤 사이에 마찰이 없으며 외부가 진공이고 피스톤을 강체로 가정한다(그림 6.2 참고). 이 경우에 기체 내부 압력과 진공인 외부의 압력은 동일해질 수가 없으며 따라서 피스톤은 기체로부터 지속적으로 일을 받아 무한히 이동하게 될 것이다.

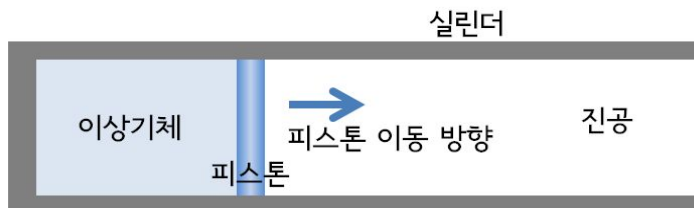


그림 6.2 수평으로 놓여있는 실린더에서의 피스톤의 운동

⑧ 가역과정에서 고립계의 엔트로피 변화량 계산하기

한편 가역과정을 이해하는 데 있어서 정량적 계산에 의한 판단 방법은 사건이 일어남에도 불구하고 고립계의 엔트로피가 일정하게 유지됨을 확인하는 것이다. 이를 위한 가장 좋은 소재가 카르노 기관일 것이다. 매 과정(등온과정 및 단열과정)마다 계의 엔트로피 변화량과 주위의 엔트로피 변화량을 계산한 후 그 합을 구하여 정량적으로 각 과정이 가역적인지의 여부를 판단할 수 있다.

Samiullah(2007)가 제안한 바와 같이 온도 차가 많이 나는 두 열원만을 이용하여 계의 온도를 T_1 에서 T_2 로 증가시킬 때와 온도가 다양한 수많은 열원을 이용하여 계의 온도를 T_1 에서 T_2 로 증가시킬 때의 고립계의 엔트로피 변화량을 비교해보거나, Van Ness(1983)가 제안한 바와 같이 기체가 들어있는 수직으로 세워진 주사기의 피스톤에 압력을 가하는 경우, 무거운 추를 하나 올려놓을 때와 매우 가벼운 추 여러 개를 순차적으로 올려놓을 때의 고립계의 엔트로피 변화량을 비교하는 활동 또한 가역과정과 비가역과정에 대한 구분 능력을 키우는 데 도움이 될 것이다.

⑨ 볼츠만 엔트로피 개념 도입

엔트로피에 대한 정성적 이해를 위해서는 볼츠만 엔트로피 개념을 도입하는 것이 필요하다. 압력, 온도, 부피, 입자 수 등으로 정의되는 거시 상태와, 계에 속한 입자 하나하나의 운동 상태(위치, 운동량)에 의해 결정되는 미시상태를 정의하고, 하나의 거시 상태가 갖는 미시 상태의 수에 의해 엔트로피가 정의됨을 설명한다. 특히 고립계 상황에서 미시상태 수가 크다는 것은 그만큼 사건이 일어날 확률이 크다는 것을 의미하며, 따라서 고립계에서는 미시상태 수가 증가하는 방향, 즉 엔트로피가 증가하는 방향으로 사건이 일어난다. 일반물리학 수준에서는 주로 동전던지기

기 등과 같은 일상생활의 맥락을 이용하여 비유적으로 볼츠만 엔트로피 개념을 설명하지만, 통계에 익숙하고 양자적 관점을 이해하고 있다면 이상기체를 이용하거나 간단한 고체모형을 이용하여 계의 엔트로피에 대해 논의할 수도 있다. 여기에서는 단순히 배열이 무질서한 상태가 항상 엔트로피가 높은 상태가 아님을 설명해야 하며, 이를 위해서는 Styer(2000)가 제안한 것처럼 어떤 상황이 더 무질서해 보이는지, 무질서한 상황이 항상 엔트로피가 큰 상황인지를 비교해보는 활동을 할 수 있다([부록 3]의 5차시 수업 자료 참고).

⑩ 볼츠만 엔트로피와 클라우지우스 엔트로피의 연결

볼츠만 엔트로피와 클라우지우스 엔트로피를 학습하였으면 온도 차가 나는 두 물체의 열적 평형상태로의 이동 상황을 이용하여 열역학적 온도를 정의할 수 있으며, 이 식이 바로 클라우지우스 식에 대응됨을 설명할 수 있다. 이는 Reif(1999)가 추천한 방법으로서, Chabay & Sherwood (2002, pp. 386-388)에서도 확인할 수 있다(3.3.4절의 ‘통계학적 온도로부터 식 $dS = \delta Q/T$ 의 유도’ 참고).

6.5. 결론 및 시사점

이 장에서는 지금까지 논의된 열역학 제2법칙과 관련된 학생의 이해에 대해 정리하고, 교과서 분석 결과를 고려하여 열역학 제2법칙의 지도 방안에 대해 살펴보았다.

열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해에 있어서는 전통적으로는 엔트로피 개념에 대한 이해의 어려움이나 고립계에 대한 인식의 부족 등이 논의되었다. 본 연구에서는 가역과정과 같은 이상적인 열역학적 과정에 대

한 이해의 어려움, 수식이나 법칙을 적용할 수 있는 구속조건에 대한 인식의 부족, 열역학 제2법칙을 적용할 수 있는 상황 및 열역학 제2법칙의 결과 나타나는 계의 최종상태에 대한 이해의 어려움을 추가적으로 찾아내었다.

교과서 분석에 있어서는 교과서 전체 흐름, 엔트로피 개념의 도입 방법, 열역학 제2법칙에 대한 서술 방식이 교과서마다 다양하다는 측면에 착안하여 내용 제시 순서나 설명에 있어서 논쟁이 될 만한 요소들을 살펴보았다. 다음으로 학생의 열역학 제2법칙에 대한 이해에 비추어 보았을 때 교과서 기술은 어떠한지, 어떤 방식으로 수정되는 것이 필요한지를 논의하였다. 교과서 분석 결과, ‘고립계에서 엔트로피는 감소하지 않는다.’나 ‘식 $dS = \delta Q/T$ 는 가역과정에서 사용할 수 있다.’와 같이 교과서에서 바르게 기술하고 있음에도 불구하고 학생들이 제대로 이해하지 못하는 부분도 있었고, 열역학 제2법칙의 적용조건이나 가역과정의 의미, 성립조건, 구체적인 작동방법에 대한 부분과 같이 교과서 설명이 불충분한 경우도 있었다. 교과서에 설명이 제시되어 있음에도 불구하고 학생들이 잘 인지하지 못하는 경우에는 특별한 교수학습전략을 고안할 필요가 있으며, 교과서 설명이 불충분한 경우에는 설명의 보완이 필요할 것으로 생각되었다.

이러한 논의를 바탕으로 본 연구에서는 열역학 제2법칙의 효과적인 지도방안을 제안하였다. 개념, 명제, 구속조건을 포함하는 열역학 제2법칙에 대한 개념 간 관계도를 그렸고, 이를 바탕으로 열역학 제2법칙에 대한 주요 개념을 잘 이해하고 성공적으로 문제를 해결하기 위한 교수학습 흐름도를 제안하였다. 연구자가 제안한 교수학습 흐름도는 가역과정에 대한 설명을 충실하게 하는 데 초점을 두고 있으며, 전체적인 흐름은 Halliday *et al.* (2008)의 설명방식과 유사하다. 하지만 세부적인 설명에 있

어서는 미시적 관점으로 열역학 제2법칙에 접근을 한 Chabay & Sherwood(2002)의 설명방식을 많이 차용하였다. 본 연구에서 제시한 교수 학습 흐름도의 특징으로는 역학과 열역학의 비교를 통하여 열역학 제2법칙을 적용할 수 있는 상황에 대한 논의를 포함시켰으며, 가역과정의 제시 순서에 대한 고려를 하였다. 가역과정을 학습함에 있어서 정량적 계산과 정성적 설명을 모두 제공하고자 하였으며, 카르노 기관의 작동과정에 대한 이해를 통해 가역과정에 대한 이해를 증대시킬 수 있을 것으로 생각하였다.

본 연구는 열역학 제2법칙을 가르칠 때 강조해야 할 핵심개념이 무엇인지, 개념들 사이의 관계는 어떠한지, 기존의 교과서에서는 관련 내용을 어떻게 제시하고 있었는지, 학생의 이해에 비추어 볼 때 어떠한 설명이 더 필요한지를 보여주고 있다. 이러한 정보들은 열역학 제2법칙의 교수 학습에 있어서 개념 사이의 유기적인 이해를 돕고, 학생의 선개념 중 과학적이지 않은 개념을 변화시키기 위한 구체적인 방법의 고안 및 교수-학습 자료를 개발하는 데 도움을 줄 것으로 생각한다.

7. 결론 및 제언

7.1. 요약

물리학 학습에서 가장 기본이 되는 것은 개념이나 법칙에 대한 이해이다. 지난 수십 년 동안 역학이나 전자기학 개념을 중심으로 학생의 선개념과 교수학습방안에 대한 연구가 진행되어 왔다. 하지만 열역학 분야, 특히 열역학 제2법칙은 자연 세계에서 사건의 방향성을 결정하는 가장 기본적인 법칙임에도 불구하고, 이에 대한 학생의 개념 및 어려움에 대해 조사한 연구는 상당히 찾기 어렵다.

본 연구는 일반물리학을 배우는 학생들의 열역학 제2법칙에 대한 이해 증진을 위한 기초연구로서, 특히 가역과정에 대한 내용을 중점적으로 다루었다. 일반물리학 교과서에서 열역학 제2법칙, 엔트로피, 가역과정에 대한 내용들이 어떻게 서술되어 있는지를 분석하였으며, 학생들에게 스텔링 기관과 카르노 기관의 비교 및 비가역 단열과정 상황을 제시한 후 문제를 해결할 때 나타나는 열역학 제2법칙과 가역과정에 대한 학생의 이해를 조사하였다. 이 결과를 바탕으로 열역학 제2법칙에 대한 효과적인 지도방안을 제시하였다.

연구 1에서는 8종의 일반물리학 교과서를 대상으로 열역학 제2법칙과 엔트로피에 대한 교과서 설명의 전체 흐름 및 수식의 도입 방식, 가역과정에 대한 정의, 카르노 순환에 대한 기술에 대해 분석하였다. 분석 결과, 교과서는 다양한 방식으로 열역학 제2법칙과 엔트로피 개념을 도입 또는 설명하고 있으며 각각이 갖는 장점이 다름을 확인할 수 있었다. 열역학 제2법칙에 대한 다양한 표현들을 제시하고 표현들 사이의 관계를 많이

보여주는 교과서, 엔트로피를 계산하는 데 초점을 두어 식 $dS = \delta Q/T$ 의 사용조건 및 방법을 자세하게 기술하고 열기관 사례들을 통해 직접 엔트로피 변화량과 자연의 방향성의 관계를 살펴보게 한 교과서, 엔트로피가 무엇인지 이해할 수 있도록 식 $S = k \ln \Omega$ 의 의미를 중심으로 기술된 교과서 등으로 구분할 수 있었다. 전통적으로 식 $dS = \delta Q/T$ 은 이해하기 어려운 식으로 취급되었는데, 이 식의 도입방법은 단순히 식만 제시하는 경우, 카르노 순환을 이용한 역사적 접근 방식을 취하는 경우, 통계학적인 온도로부터 식을 유도하는 경우 등 다양하였다. 식 $S = k \ln \Omega$ 을 설명하는 데 있어서는 주로 일상생활 맥락이 활용되었으나, 고체 모형을 이용하는 경우도 있었다. 한편, 열역학 제2법칙은 사건의 비가역성을 다루며, 열역학과 관련된 여러가지 수식을 사용할 때는 주로 열역학적 과정이 가역적일 때 사용할 수 있는 만큼 가역과정과 비가역과정에 대해서 잘 아는 것이 중요한데, 교과서에 제시되어 있는 ‘가역적으로 작동한다는 것’에 대해서는 그 의미가 모호하여 시스템을 가역적으로 작동시키기 위한 조작적 방법을 알기가 어렵다. 카르노 기관에 대한 설명에서도 피스톤이 가역적으로 작동하는 것을 잘 표현하지 못하였으며, 계와 주위 환경의 엔트로피 변화를 사건의 가역성과 연결하여 진술하는 것이 부족하였다.

연구 2에서는 스텔링 기관과 카르노 기관의 열효율을 비교하고 각 기관이 가역적으로 작동하는지의 여부에 대해 이론적으로 논의한 후에 이와 관련된 문제를 학생이 해결하는 활동을 수행하였다. 문항의 기본 아이디어는 ‘두 열원 사이에서 가역적으로 작동하는 열기관의 효율은 모두 동일하다.’는 서술과 ‘이상적인 스텔링 기관은 가역적으로 작동한다.’는 서술, 그리고 ‘이상적인 스텔링 기관의 효율은 카르노 기관보다 낮다.’는 세 서술 사이의 모순 관계를 학생들이 어떻게 해결하는가를 살펴보는 데

있다. 연구 참여자는 열 및 통계물리 과목을 수강하는 24명의 물리교육 전공 학생들이다. 스텔링 기관의 열효율에 대한 설명 분석에 따르면, 스텔링 기관은 재생기의 도움 없이는 두 열원 사이에서 가역적으로 작동할 수 없으며, 이 경우에 스텔링 기관의 열효율은 카르노 기관보다 낮다. 하지만 재생기를 도입하면 스텔링 기관과 카르노 기관의 효율이 동일함을 증명할 수 있다. 학생들은 스텔링 기관이 가역적으로 작동하는지의 여부를 결정하기 위해 계의 엔트로피에 대해 주로 논의하였으나, 엔트로피와 가역과정 사이의 관계에 대해서 잘 알지 못하였다. ‘계+주위환경’의 엔트로피 변화량이 0인 상황을 가역과정으로 생각하지 않고 계의 엔트로피 변화가 없는 경우나 계의 온도가 일정하게 유지되는 경우를 가역과정으로 생각하였다. 모순 상황에 대해서도 단순히 스텔링 기관은 비가역적으로 작동한다고 답하거나 잘 모른다고 응답한 경우가 많았다. 또는 자신이 불확실하게 알고 있는 지식을 바꾸거나 단순히 문제에 오류가 있는 것으로 취급함으로써 모순 상황을 해결하려고 하였다.

연구 3은 비가역 단열과정에 관한 과학고 학생들의 사고과정을 조사하는 연구이다. 본 연구에 참여한 학생들은 서울 시내 1개 과학고에 재학 중인 140명의 학생으로서, 이 학생들은 학교 수업을 통해 일반물리학 수준의 열역학을 학습하였다. 기본 질문으로서 학생들에게 가역과정의 대표적인 예를 기술하게 하였으며, 그 결과 학생들은 ‘단진자 운동’, ‘카르노 기관’, ‘화학평형에서의 정반응과 역반응’을 대표적인 예로 생각하였다. 이러한 예들은 고등학교 교과서에도 모두 등장하는 것들로서 역학적 상황과 화학적 상황을 제시한 학생들은 열역학에서 말하는 가역과정과는 다소 다른 개념을 가지고 있는 것으로 해석할 수 있다. 또한 학생들은 열역학의 통계적인 측면과 비가역성에 대해서는 고려하지 않은 채 열역학에 대해 역학을 열현상에 확장해서 적용한 학문분야로 인식하고 있었

다. 한편 학생들에게 제시된 문제풀이상황은 두 가지로서, 밀폐된 공간에서 좌우로 자유롭게 움직이는 피스톤의 운동에 대해 묻는 문항과 수직으로 놓여있는 주사기에서 피스톤 위에 물체를 갑자기 올려놓거나 치웠을 때의 피스톤의 운동을 묻는 문항이다. 이 문제 상황을 해결하기 위해 학생들은 주로 ' $pV = \text{일정}$ ' 이라는 수식을 사용하였는데, 사실 이 수식은 가역과정에서만 사용할 수 있으며 본 연구에서 제시된 상황과 같은 비가역 단열과정에서는 사용할 수 없다. 또한 많은 학생들이 단열상자 안에 있는 도막이나 단열 주사기에 놓인 피스톤이 멈추지 않고 영원히 진동할 것이라고 생각하였는데, 이는 열역학적 계를 역학적 에너지 보존 법칙으로 설명하려고 했기 때문에 생기는 문제이다. 수많은 입자들이 서로 충돌하는 상황에서 열역학 제2법칙이 적용된다는 것을 학생들은 잘 이해하지 못하였으며, 어떤 상황이 가역적이고 비가역적인지를 구분하지 못하였고, 비가역적인 상황에서 계의 최종상태가 어떻게 되는지에 대한 예측을 하지 못하였다. 특히 ' $pV = \text{일정}$ ' 을 이용하여 문제를 풀면 피스톤은 계속 진동한다는 결과를 얻기 때문에 몇몇 학생들은 자신의 문제풀이가 옳다는 잘못된 확신을 갖고 있었다.

연구 4에서는 지금까지 논의된 열역학 제2법칙과 관련된 학생의 이해에 대해 정리하고 교과서 분석 결과를 고려하여, 열역학 제2법칙과 관련된 주요 개념의 정확한 이해 및 성공적인 문제 풀이를 위한 지도방안에 대해 논의하였다. 본 연구에서는 교수학습 흐름도를 제시하였는데, 특징적인 측면으로는 역학과 열역학의 비교를 통하여 열역학 제2법칙을 적용할 수 있는 상황에 대한 논의를 포함시켰으며, 가역과정의 제시 순서에 대한 고려를 하였다. 가역과정을 학습함에 있어서 정량적 계산과 정성적 설명을 모두 제공하고자 하였으며, 카르노 기관의 작동과정에 대한 이해를 통해 가역과정에 대한 이해를 증대시킬 수 있을 것으로 생각하였다.

지금까지의 연구를 종합해 볼 때, 열역학 제2법칙을 잘 이해하기 위해서는 가역과정과 비가역과정에 대한 이해가 전제되어야 한다. 열역학적 과정을 살펴보면 거시적으로는 비가역적으로 사건이 진행되나 미시적으로 입자 하나하나의 충돌은 뉴턴의 법칙을 따르기 때문에, 열역학에서의 가역과정을 제대로 설명하기 위해서는 역학과 열역학의 차이에 대해 다루는 것이 우선되어야 된다. 아울러 미시세계와 거시세계를 구분하여 사고할 수 있도록 설명하고, 거시세계에서 가역과정이 어떻게 일어날 수 있는지 구체적으로 안내하는 장치가 필요하다.

7.2. 결론 및 시사점

본 연구는 열역학 제2법칙에 대한 학생의 이해를 증가시키기 위한 효과적인 지도 방안을 제시하는 것이 주요 목적이며, 이를 위해 이를 위해 일반물리학 교과서를 분석하고 학생의 문제풀이과정을 조사하였다.

열역학 제2법칙과 관련된 기존의 선행연구들은 학생이 겪는 어려움으로서 다음과 같은 것들을 지적하였다. 엔트로피 개념과 관련하여 클라우지우스 식인 $dS = \delta Q/T$ 에 대한 직관적인 이해가 어려우며, 엔트로피를 ‘계의 무질서한 정도’로 정의하는 것이 부적절하다고 주장하였다. 학생들은 엔트로피를 에너지와 같이 일종의 보존되는 양으로 생각하거나 고립계가 아닌 곳에서도 엔트로피가 증가하면 열역학 제2법칙이 성립하는 것처럼 생각하였으며, 식 $dS = \delta Q/T$ 이 가역과정에서만 적용된다는 사실을 알지 못하였다. 또한 여러 연구자들은 열역학 제2법칙의 주요 개념인 ‘엔트로피’ 개념을 어떻게 도입하는 것이 학생들이 엔트로피에 대한 구체적인 심상을 갖게 하는 방법일 것인가에 대해 초점을 두어 논의하였으며, 그 결과 전통적인 역사적 방법을 따르지 않고 통계학적 개념

($S = k \ln \Omega$)을 도입하거나 엔트로피를 에너지가 퍼져나가는 정도(degree of energy dispersion)로 정의하자는 의견이 제시되었다.

한편, 본 연구에서는 교과서 분석을 통하여 실제 교과서에서는 열역학 제2법칙이 어떻게 제시되어있는지 살펴보고, 통계학적인 도입 이외에 다른 형태의 도입이 가질 수 있는 장점에 대해서도 고찰하였다. 열역학 제2법칙에 대한 교과서의 진술이 다양함을 보여주고, 각 설명의 장단점에 대해 논의하였다. 한편, 개념에 대한 서술에 있어서는 가역과정에 대한 정의, 성립조건, 구체적인 작동방법에 대한 기술이 부족하며 특히 가역과정에서 고립계의 엔트로피가 일정함을 보여주는 예제가 부족함을 확인하였다.

열역학 제2법칙에 대한 학생들의 문제해결과정과 관련해서는 일반물리학 교과서에 자주 등장하는 등온과정이나 가역단열과정에 대한 엔트로피 변화량 계산 및 열역학 제2법칙의 적용에 대한 부분은 이주현(2007)에 의해 이미 조사되었다. 따라서 본 연구에서는 가역과정과 비가역과정에 대한 이해를 기반으로 열역학 제2법칙에 대한 이해를 확인해보는 설문을 구성하였다. 조사결과에 따르면, 학생들은 열역학에서의 가역과정의 조건에 대해 알지 못하였으며, 주위환경에 대한 고려 없이 한 순환과정 동안 계의 엔트로피 변화량이 0인 과정을 가역과정으로 생각하였다. 또한 가역과정에서만 사용할 수 있는 수식들($pV^\gamma = \text{일정}$, $dS = \delta Q/T$)을 비가역과정에서도 사용하였고, 엔트로피, 온도, 내부에너지 등을 정의할 수 있는, 상호작용하는 입자 수가 많은 열역학적 계에서 사건은 항상 열역학적 평형상태에 도달하는 방향으로 일어난다는 열역학 제2법칙에 대한 지식이 부족하였다.

위에서 설명하는 것들은 열역학에서의 가역과정에 대한 이해와 밀접한 관련이 있다. 이러한 측면을 고려하여 열역학 제2법칙의 효과적인 지도

방안에 대해 논의하고, 교수학습 흐름도를 제안하였다. 여기에서는 기존의 연구들이 주목하지 않았던 ‘역학과 열역학의 차이는 무엇인가?’, ‘열역학에서 가역과정에 대한 이해는 왜 중요한가?’ 등의 질문에 대한 중요성을 부각시키고 각 내용에 대한 설명방법을 모색하였다.

열역학 제2법칙의 지도에서 고려해야 할 주요 사항은 다음과 같다. 가역과정과 비가역과정에 대한 이해는 고립계의 엔트로피 증가 유무와 관련되는 열역학 제2법칙의 가장 기초적인 개념임에도 불구하고 가역과정에 대해 대부분의 교과서가 ‘거꾸로 진행시킬 수 있는 과정으로서 대표적인 예가 카르노 기관이다.’이상의 설명을 제공하지 않고 있다. 이를 개선하기 위해서는 역학과 열역학적 상황의 비교를 통해 열역학에서의 비가역성을 강조할 필요가 있다. 열역학은 단순히 역학에서 사용하던 수식을 확장한 것이 아니라, 많은 입자들의 충돌과 상호작용을 설명하는 과정에서 통계역학적 관점이 도입되었으며, 이로부터 역학에서는 다루지 않는 비가역성이 도입되었음을 이해해야 한다. 또한 열역학에서는 어떤 조건이 충족될 때 가역과정이라고 부르는지를 확인할 필요가 있으며, 엔트로피를 이용하여 주어진 과정이 가역적으로 작동하는지의 여부를 결정하는 것도 개념 이해의 핵심이 된다. 어떤 계에 대한 엔트로피 변화량에 대한 계산의 편이를 위해서는 볼츠만 엔트로피뿐만 아니라 클라우지우스 엔트로피를 강조하는 것도 필요하며, 이를 이용하여 고립계의 엔트로피는 절대 감소하지 않는 방향으로 사건이 일어남을 강조해야 한다. 최종적으로는 학생들이 열역학 문제를 해결함에 있어서 이상기체 상태방정식, 열역학 제1법칙, 열역학 제2법칙을 총체적으로 고려하여 문제를 풀 수 있도록 안내하여야 하며, 관련된 식을 사용할 때 구속조건에 대한 이해 또한 반드시 필요하다.

결론적으로 본 연구는 열역학 제2법칙과 관련된 주요 개념에 대한 다

양한 설명방식을 제시하였으며, 학생의 이해와 관련해서는 기존의 엔트로피 학습과 관련된 어려움뿐만 아니라 가역과정에 대한 이해와 관련된 어려움 및 구속조건과 관련된 어려움을 찾아내고, 역학과 열역학의 비교를 통해 열역학 제2법칙에서의 비가역성의 근원에 대해 논의하였다. 마지막으로 이를 종합한 지도방안을 탐색적으로 제시함으로써 열역학 제2법칙의 교수학습을 도울 수 있는 전체적인 모습을 제시했다는 것에 본 연구의 의의를 찾을 수 있다.

7.3. 후속 연구 과제

본 연구를 통해 얻은 시사점 및 연구의 한계점과 관련된 후속 연구를 제안하고자 한다.

첫째, 본 연구에서 사용한 열역학 제2법칙과 가역과정에 대한 학생의 이해를 조사하기 위한 문항은 서술형 문항으로서 학생의 이해에 대한 결과를 일반화하기 위해서는 객관식 문항을 개발하여 여러 집단에 투입할 필요가 있다. 나아가 역학에서의 FCI나 전자기학에서의 BEMA처럼 열역학 제2법칙에 대한 이해를 종합적으로 측정할 수 있는 문항의 개발이 필요하다.

둘째, 본 연구에서는 열역학 제2법칙과 관련된 주요 개념들을 이해하고 성공적인 문제해결을 위해 여러가지 요소들이 필요하다고 주장하였으나, 각 요소들이 개념 이해 및 문제 풀이에 얼마나 큰 영향을 주는지에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다. 특히 본 연구에서는 가역과정의 이해를 강조하고 있는데, 가역과정에 대한 이해가 얼마나 열역학 제2법칙 전반에 대한 이해 향상에 도움을 주는지에 대한 추가 분석이 필요하다.

셋째, 열역학에서의 가역과정은 실제 존재하지 않는 이상적인 과정으

로서 매우 추상적이어서 직관적인 이해가 어렵다. 가역과정에 대한 개념을 잘 설명할 수 있는 구체적 방안에 대한 지속적인 탐색이 필요하다. 아울러 열기관 상황에서의 가역과정에 대한 판단과 관련하여, 계와 주위 환경 사이의 상호작용 방법에 대한 고려 없이 열기관이 한 바퀴 순환하고 난 후의 계의 엔트로피 변화량이 0일 때 그 과정이 가역과정이라고 판단하는 학생들이 많았다. 이 학생들을 위해서는 인지갈등을 일으킬 수 있는 새로운 문제 상황 개발이 필요하다.

넷째, 본 연구에서 제시한 열역학 제2법칙에 대한 효과적인 지도 방안은 실제 현장에 적용해보지 못하였다. 현장에서 적용하였을 때 어떠한 어려움이 있는지를 파악하고, 이러한 수업을 통해 어떠한 부분이 개선되는지를 확인하여 그 효과를 검증해 보아야 한다. 아울러 열역학 제2법칙에 대한 이해를 돕기 위한 다양한 교육 자료의 개발도 필요하다.

참고문헌

- 고재걸, 박덕규, 박윤배, 신병현, 석창원, 최면숙, 이종선 (2004). 고등학교 물리Ⅱ (pp. 119-123). 서울: 청문각.
- 곽근식, 고재덕, 노석호, 박종용 (2004). 고등학교 물리Ⅱ (pp. 106-109). 서울: 상문연구소.
- 곽성일, 류상호, 김대규, 안중제, 이옥수, 김재혁, 남경식, 김익수 (2011). 고등학교 물리Ⅱ (pp. 90-96). 서울: 천재교육.
- 권성기 (2004). ‘열과 에너지’의 물리 오개념. 송진웅, 김익균, 김영민, 권성기, 오원근, 박종원. 학생의 물리 오개념 지도 (pp. 229-274). 서울: 북스힐.
- 권재술, 김범기, 문충식, 천조현, 최혁준, 김연수 (2002). 고등학교 물리Ⅱ (pp. 169-175). 서울, 교학사.
- 권재술, 이경호, 김연수 (2003), 인지갈등과 개념변화의 필요조건과 충분조건. 한국과학교육학회지, 23(5), 574-591.
- 김영민 (1991), 중학생의 전류개념 변화에 미치는 체계적 비유수업의 영향, 서울대학교 대학원 박사 학위 논문.
- 김영민, 김익균, 김성원, 박병윤, 정병훈, 박종원, 김재권, 권경필 (2011). 고등학교 물리Ⅱ (pp. 99-103). 서울: 교학사.
- 김익균 (2002). 구성주의와 물리개념 학습. 물리 교육학 총론Ⅱ. 김익균, 박윤배, 박종원, 송진웅, 최경희 (pp. 1-68). 서울: 북스힐.
- 김재영 (2004). 통계역학의 기초 다시 보기-메타동역학의 관점. 과학철학, 7(2), 21-63.
- 김희경, 이봉우 (2006). 학생들이 물리를 재미없고 어렵다고 생각하는 이유에 대한 분석. 새물리, 52(6), 521-529.
- 박봉상, 이태우, 김수용, 신근섭, 박영도, 이상욱, 조봉제 (2002). 고등학교

- 물리Ⅱ (pp. 126-133). 서울: 대한교과서.
- 박윤배 (2002). 물리 문제해결 학습과 지도. 물리 교육학 총론Ⅱ. 김익균, 박윤배, 박종원, 송진웅, 최경희 (pp. 69-136). 서울: 북스힐.
- 박종석, 윤 용, 정지오, 조은미, 류시경 (2012). 고등학교 화학Ⅱ (pp. 136-143). 서울: 교학사.
- 박종원 (1992). 상대론 기초 개념 변화에 있어서 초인지의 역할. 서울대학교 대학원 박사 학위 논문.
- 박종원 (2001). 학생의 물리 선개념. 물리 교육학 총론Ⅰ. 박종원, 최경희, 김영민 (pp. 13-69). 서울, 북스힐.
- 방형찬, 차동우, 이재일, 우정원, 박완규, 정혜경 (2002). 고등학교 물리Ⅱ (pp. 119-127). 서울: 천재교육.
- 서영진, 채희권 (2009). 일반화학 교재에 나타난 엔트로피 정의와 설명의 고찰. 대한화학회지, 53(1), 62-72.
- 송진웅 (2004). 학생의 과학 오개념 연구의 이론적 기초. 송진웅, 김익균, 김영민, 권성기, 오원근, 박종원. 학생의 물리 오개념 지도 (pp. 1-30). 서울: 북스힐.
- 이경호 (2007). 왜 학생들은 물리학을 어려워하는가?: 지식 신념틀을 이용한 물리학습의 어려움에 대한 구조적 분석을 향하여. 새물리, 54(4), 284-295.
- 이승희 (2006). 대학 전공 역학 학습에서 ‘학생의 어려움’과 그 해소방안: ‘Lagrange's Equation’ 학습을 중심으로. 서울대학교 대학원 석사 학위 논문.
- 이주현 (2007). 엔트로피 개념 이해의 특징과 어려움: 물리 전공 학생들의 문제 풀이 과정을 중심으로. 서울대학교 대학원 석사 학위 논문.
- 이주현, 송진웅 (2007). 물리 전공 학생들의 엔트로피 개념에 대한 이해의 어려움. 새물리, 55(4), 182-191.
- 이주현, 송진웅 (2009a). 일반물리학 교과서의 엔트로피 개념에 대한 설

- 명 분석. 새물리, 58(3), 340-352.
- 이주현, 송진웅 (2009b). 스텔링 기관의 열효율에 대한 설명방식 및 대학생들의 사고과정 분석. 새물리, 59(3), 229-239.
- 이춘우, 김영유, 류지욱, 김준태, 송영근, 이영직 (2002). 고등학교 물리Ⅱ (pp. 147-155). 서울: 중앙교육진흥연구소.
- 이희복, 이광복, 김종현 (2004). 고등학교 물리Ⅱ (pp. 113-119). 서울: 상문사.
- 장준성, 이성목, 이경운, 전영석, 손정우 (2003). 고등학교 물리Ⅱ (pp. 116-121). 서울: 지학사.
- 정용재 (2004). 연결주의적 관점의 개념학습 방안으로서 '전형적 인식상황(TPS)'의 변화 : 초등학생의 힘의 작용에 관한 생각을 중심으로. 서울대학교 대학원 박사 학위 논문.
- 지영래 (2008). 열역학의 기본 개념 및 과정에 대한 대학생 이해의 특징과 어려움. 서울대학교 대학원 석사 학위 논문.
- 채광표, 송용갑, 김진만, 김성진, 정대영, 장동호 (2003). 고등학교 물리Ⅱ (pp. 122-129). 서울: 금성출판사.
- 최동식 (2000). 사회 열역학: 21세기 사회과학개론. 서울: 고려대학교 출판부.
- 최무영 (2008). 최무영 교수의 물리학 강의. 서울: 책갈피.
- 홍미영, 박윤배 (1995). 문제의 특성에 따른 대학생들의 화학 문제해결 과정의 차이 분석. 한국과학교육학회지, 15(1), 80-91.
- Abell, S. K. (2007). Research on science teacher knowledge. In S. K. Abell & N.G. Lederman (Eds.), Handbook of Research on Science Education (Volume II), (pp. 1105-1149). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.
- Alonso, M., & Finn, E. J. (1995). An Integrated Approach to Thermodynamics in the Introductory Physics Course. Physics Teacher, 33(5), 296-310.
- Anacleto, J., Ferreira, J., & Soares, A. (2009). When an adiabatic irreversible expansion or compression becomes reversible. European Journal of Physics, 30(3), 487-495.

- Anacleto, J., & Pereira, M. G. (2009). From free expansion to abrupt compression of an ideal gas. *European Journal of Physics*, 30(1), 177-183.
- Arons, A. B., & Redish, E. F. (1997). *Teaching introductory physics*. New York: John Wiley & Sons.
- Atkins, P. W., & De Paula, J. (2006). *Atkins' physical chemistry* (8th ed., pp. 870-875). Oxford; New York: Oxford University Press.
- Ausubel, D. P. (2000). *The acquisition and retention of knowledge : a cognitive view*. Dordrecht ; Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Baierlein, R. (1990). The meaning of temperature. *The Physics Teacher*, 28(2), 94-96.
- Baierlein, R. (1994). Entropy and the second law: A pedagogical alternative. *American Journal of Physics*, 62(1), 15-26.
- Baker, G. L. (1986). A simple model of irreversibility. *American Journal of Physics*, 54(8), 704-708.
- Ball, P. (2006). *Critical mass: How one thing leads to another*. New York: Farrar, Straus and Giroux. (이덕환 역(2008). *물리학으로 보는 사회: 임계 질량에서 이어지는 사건들*. 서울: 까치글방.)
- Besson, U. (2003). The distinction between heat and work: an approach based on a classical mechanical model. *European Journal of Physics*, 24(3), 245-252.
- Bindel, T. H. (2004). Teaching Entropy Analysis in the First-Year High School Course and Beyond. *Journal of Chemical Education*, 81(11), 1585-1594.
- Brush, S. G. (1976). *The kind of motion we call heat : A history of the kinetic theory of gases in the 19th century*. Amsterdam; New York: North-Holland Pub. Co.
- Carnot, S. (1988). *Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu sur les machines propres a developper cette puissance* [Reflections on the motive power of fire, and on machines fitted to develop that power]. In Thurston, R. H., &

- Mendoza, E. (Ed. and Trans.), Reflections on the motive power of fire: And other papers on the second law of thermodynamics (pp. 1-59). New York: Dover Publications. (Original work published 1824)
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2006). Thermodynamics : An engineering approach (5th ed.). Boston: McGraw-Hill/Higher Education.
- Chabay, R. W., & Sherwood, B. A. (2002). Matter & interactions (Vol. 1, pp. 342-375, 414-429). New York: Wiley.
- Chi, M. T. H., Feltovich, P. J., & Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5(2), 121-152.
- Christensen, W. M., Meltzer, D. E., & Ogilvie, C. A. (2009). Student ideas regarding entropy and the second law of thermodynamics in an introductory physics course. *American Journal of Physics*, 77(10), 907-917.
- Clausius, R. (1867). The mechanical theory of heat: With its applications to the steam-engine and to the physical properties of bodies. London: J. Van Voorst.
- Clausius, R. (1879). The mechanical theory of heat. London: Macmillan.
- Cochran, M. J., & Heron, P. R. L. (2006). Development and assessment of research-based tutorials on heat engines and the second law of thermodynamics. *American Journal of Physics*, 74(8), 734-741.
- Cockerham, R. P. B. H. L. (1969). Pressure of an ideal gas on a moving piston. *American Journal of Physics*, 37(7), 675-679.
- Cropper, W. H. (1986). Rudolf Clausius and the road to entropy. *American Journal of Physics*, 54(12), 1068-1074.
- Crosignani, B., Porto, P. D., & Segev, M. (1996). Approach to thermal equilibrium in a system with adiabatic constraints. *American Journal of Physics*, 64(5), 610-613.
- Curzon, A. E. (1969). A thermodynamic consideration of mechanical equilibrium in

- the presence of thermally insulating barriers. *American Journal of Physics*, 37(4), 404-406.
- Daub, E. E. (1969). Probability and thermodynamics: The reduction of the second law. *Isis*, 60(3), 318-330.
- Deacon, C. G., Goulding, R., Haridass, C., & de Young, B. (1994). Demonstration experiments with a Stirling engine. *Physics Education*, 29(3), 180-183.
- Dincer, I., & Cengel, Y. (2001). Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering. *Entropy*, 3(3), 116-149.
- Ding, L., Chabay, R., Sherwood, B., & Beichner, R. (2006). Evaluating an electricity and magnetism assessment tool: Brief electricity and magnetism assessment. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 2(1), 010105.
- Driver, R. (1981). Pupils' Alternative Frameworks in Science. *European Journal of Science Education*, 3(1), 93-101.
- Driver, R. (1989). Students' conceptions and the learning of science. *International Journal of Science Education*, 11(5), 481-490.
- Duit, R., & Kesidou, S. (1988). Students' understanding of basic ideas of the second law of thermodynamics. *Research in Science Education*, 18(1), 186-195.
- Duit, R. (1991). On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science Education*, 75(6), 649-672.
- Eggarter, T. P. (1973). A Comment on Boltzmann's H-theorem and time reversal. *American Journal of Physics*, 41(7), 874-877.
- Etkina, E. (2000). Weekly reports: A two-way feedback tool. *Science Education*, 84(5), 594-605.
- Frisch, H. L. (1958). An approach to equilibrium. *Physical Review*, 109(1), 22-29.
- Giancoli, D. C. (2000). *Physics for scientists & engineers* (3rd ed, pp. 516-539). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

- Gislason, E. A. (2010). A close examination of the motion of an adiabatic piston. *American Journal of Physics*, 78(10), 995-1001.
- Glynn, S. M., Yeany, R. H., & Britton, B. K. (1991). *The psychology of learning science*. NJ: L. Erlbaum Associates. (권성기, 임청환 역(2002). *구성주의적 과학학습 심리학*. 서울: 시그마프레스.)
- Granville, M. F. (1985). Student misconceptions in thermodynamics. *Journal of Chemical Education*, 62(10), 847-848.
- Halliday, D., & Resnick, R. (1974). *Fundamentals of physics* (pp. 401-417). New York: Wiley.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (1993). *Fundamentals of physics* (4th ed., pp.605-628). New York: Wiley.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2008). *Fundamentals of physics* (8th ed., pp. 476-555). Hoboken: Wiley.
- Hammer, D. (1996). More than misconceptions: Multiple perspectives on student knowledge and reasoning, and an appropriate role for education research. *American Journal of Physics*, 64(10), 1316-1325.
- Harrison, A. G., Grayson, D. J., & Treagust, D. F. (1999). Investigating a grade 11 student's evolving conceptions of heat and temperature. *Journal of Research in Science Teaching*, 36(1), 55-87.
- Hecht, E. (1996). *Physics : Calculus* (pp. 603-635). Pacific Grove, CA: Brooks/Cole Pub.
- Hestenes, D., Wells, M., & Swackhamer, G. (1992). Force concept inventory. *The Physics Teacher*, 30(3), 141-158.
- Hewson, P. W., & Hewson, M. G. A. B. (1984). The role of conceptual conflict in conceptual change and the design of science instruction. *Instructional Science*, 13(1), 1-13.
- Hobson, A. (1966). Irreversibility in Simple Systems. *American Journal of Physics*, 34(5), 411-416.

- Hoover, W. G., & Moran, B. (1979). Pressure-volume work exercises illustrating the first and second laws. *American Journal of Physics*, 47(10), 851-856.
- Jasien, P. G., & Oberem, G. E. (2002). Understanding of elementary concepts in heat and temperature among college students and K-12 teachers. *Journal of Chemical Education*, 79(7), 889-895.
- Johnstone, A. H., Macdonald, J. J., & Webb, G. (1977). Misconceptions in school thermodynamics. *Physics Education*, 12(4), 248-251.
- Kaufman, R., Marcella, T. V., & Sheldon, E. (1996). Reflections on the pedagogic motive power of unconventional thermodynamic cycles. *American Journal of Physics*, 64(12), 1507-1517.
- Kautz, C. H., Heron, P. R. L., Loverude, M. E., McDermott, L. C., Kaufman, R., Marcella, T. V., & Sheldon, E. (2005a). Student understanding of the ideal gas law, Part I: A macroscopic perspective, *American Journal of Physics* 73(11), 1055-1063.
- Kautz, C. H., Heron, P. R. L., Shaffer, P. S., & McDermott, L. C. (2005b). Student understanding of the ideal gas law, Part II: A microscopic perspective. *American Journal of Physics*, 73(11), 1064-1071.
- Kesidou, S., & Duit, R. (1993). Students' conceptions of the second law of thermodynamics - an interpretive study. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(1), 85-106.
- Kim, E., & Pak, S. J. (2002). Students do not overcome conceptual difficulties after solving 1000 traditional problems. *American Journal of Physics*, 70(7), 759-765.
- Kittel, C., & Kroemer, H. (1980). *Thermal physics*, New York: W. H. Freeman.
- Kolarczyk, B. (2010). Representing Entropy with Dispersion Sets. *Entropy*, 12(3), 420-433.
- Kozliak, E. I. (2004). Introduction of entropy via the Boltzmann distribution in undergraduate physical chemistry: A molecular approach. *Journal of*

- Chemical Education, 81(11), 1595-1598.
- Lambert, F. L. (2002). Entropy is simple, qualitatively. *Journal of Chemical Education*, 79(10), 1241-1246.
- Larkin, J., McDermott, J., Simon, D., P., & Simon, H. A. (1980). Expert and novice performance in solving physics problems. *Science*, 208(4450), 1335-1342.
- Lawson, R. A., & McDermott, L. C. (1987). Student understanding of the work-energy and impulse-momentum theorems. *American Journal of Physics* 55(9), 811-817.
- Lee, K. C. (2001). How to teach statistical thermal physics in an introductory physics course. *American Journal of Physics*, 69(1), 68-75.
- Lebowitz, J. L. (1993). Macroscopic laws, microscopic dynamics, time's arrow and Boltzmann's entropy. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 194(1-4), 1-27.
- Leff, H. S. (1996). Thermodynamic entropy: The spreading and sharing of energy. *American Journal of Physics*, 64(10), 1261-1271.
- Leff, H. S. (2012). Removing the mystery of entropy and thermodynamics - Part II. *The Physics Teacher*, 50(2), 87-90.
- Leff, H. S., & Jones, G. L. (1975). Irreversibility, entropy production, and thermal efficiency. *American Journal of Physics*, 43(11), 973-980.
- Leinonen, R., Asikainen, M., & Hirvonen, P. (2011). University students explaining adiabatic compression of an ideal gas - A new phenomenon in introductory thermal physics. *Research in Science Education*, 1-18.
- Leinonen, R., Räsänen, E., Asikainen, M., & Hirvonen, P. E. (2009). Students' pre-knowledge as a guideline in the teaching of introductory thermal physics at university. *European Journal of Physics*, 30(3), 593-604.
- Lewis, E. L., & Linn, M. C. (1994). Heat energy and temperature concepts of adolescents, adults, and experts: Implications for curricular improvements. *Journal of Research in Science Teaching*, 31(6), 657-677.

- Loverude, M. E., Kautz, C. H., & Heron, P. R. L. (2002). Student understanding of the first law of thermodynamics: Relating work to the adiabatic compression of an ideal gas. *American Journal of Physics*, 70(2), 137-148.
- Lowe, J. P. (1988). Entropy: Conceptual disorder. *Journal of Chemical Education*, 65(5), 403-406.
- Müller, I. (2007). *A history of thermodynamics*. Berlin: Springer.
- Mallinckrodt, A. J., & Leff, H. S. (1992). All about work. *American Journal of Physics*, 60(4), 356-365.
- Maloney, D. P., O'Kuma, T. L., Hieggelke, C. J., & Heuvelen, A. V. (2001). Surveying students' conceptual knowledge of electricity and magnetism. *American Journal of Physics*, 69(S1), S12-S23.
- Marcella, T. V. (1992). Entropy production and the second law of thermodynamics: An introduction to second law analysis. *American Journal of Physics*, 60(10), 888-895.
- McDermott, L. C. (2001). Oersted medal lecture 2001: Physics education research - the key to student learning. *American Journal of Physics*, 69(11), 1127-1137.
- McDermott, L. C., & Redish, E. F. (1999). Resource letter: PER-1: physics education research. *American Journal of Physics*, 67(9), 755-767.
- McDermott, L. C., & Shaffer, P. S. (1998). *Tutorials in introductory physics*, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- McMillan, C., & Swadener, M. (1991). Novice use of qualitative versus quantitative problem solving in electrostatics. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(8), 661-670.
- Meltzer, D. E. (2004). Investigation of students' reasoning regarding heat, work, and the first law of thermodynamics in an introductory calculus-based general physics course. *American Journal of Physics*, 72(11), 1432-1446.
- Miranda, E. N. (2008). What lies between a free adiabatic expansion and a quasi-

- static one?. *European Journal of Physics*, 29(5), 937-943.
- Moore, T. A., & Schroeder, D. V. (1997). A different approach to introducing statistical mechanics. *American Journal of Physics*, 65(1), 26-36.
- Mungan, C. E. (2003). Irreversible adiabatic compression of an ideal gas. *The Physics Teacher*, 41(8), 450-453.
- Novak, J. D. (2002). Meaningful learning: The essential factor for conceptual change in limited or inappropriate propositional hierarchies leading to empowerment of learners. *Science Education*, 86(4), 548-571.
- Nussbaum, J., & Novick, S. (1982). Alternative frameworks, conceptual conflict and accommodation: Toward a principled teaching strategy. *Instructional Science*, 11(3), 183-200.
- Osborne, R. J., Bell, B. F., & Gilbert, J. K. (1983). Science teaching and children's views of the world. *European Journal of Science Education*, 5(1), 1-14.
- Osborne, R. J., & Gilbert, J. K. (1980). A method for investigating concept understanding in science. *European Journal of Science Education*, 2(3), 311-321.
- Pathria, R. K. (1996). *Statistical mechanics*(2nd ed.). Oxford; Boston: Butterworth-Heinemann.
- Prigogine, I., & Stengers, I. (1984). *Order out of chaos: Man's new dialogue with nature*. Toronto: Bantam Books.
- Redish, E. F. (1994). Implications of cognitive studies for teaching physics. *American Journal of Physics*, 62(9), 796-803.
- Reif, F. (1995). Understanding and teaching important scientific thought processes. *Journal of Science Education and Technology*, 4(4), 261-282.
- Reif, F. (1999). Thermal physics in the introductory physics course: Why and how to teach it from a unified atomic perspective. *American Journal of Physics*, 67(12), 1051-1062.
- Reif, F., & Heller, J. I. (1982). Knowledge structure and problem solving in physics.

- Educational Psychologist, 17(2), 102-127.
- Rifkin, J., & Howard, T. (1980). *Entropy: A new world view*, New York: Viking Books.
- Rodewald, B. (1990). Entropy and homogeneity. *American Journal of Physics*, 58(2), 164-168.
- Rozier, S., & Viennot, L. (1991). Students' reasonings in thermodynamics. *International Journal of Science Education*, 13(2), 159-170.
- Sözbilir, M. (2007). A Study of Turkish Chemistry Undergraduates' Understandings of Entropy. *Journal of Chemical Education*, 84(7), 1204-1208.
- Salagaram, T., & Chetty, N. (2011). Enhancing the understanding of entropy through computation. *American Journal of Physics*, 79(11), 1127-1132.
- Samiullah, M. (2007). What is a reversible process? *American Journal of Physics* 75(7), 608-609.
- Saslow, W. M. (1999). An economic analogy to thermodynamics. *American Journal of Physics*, 67(12), 1239-1247.
- Schoepf, D. C. (2002). A statistical development of entropy for the introductory physics course. *American Journal of Physics*, 70(2), 128-136.
- Schrödinger, E. (1956). *What is life? : And other scientific essays*. Garden City: Doubleday.
- Scott, P., Asoko, H., & Leach, J. (2007). Student conceptions and conceptual learning in science. In S. K. Abell and N. G. Lederman (Eds.), *Handbook of research on science education (Volume I)*, (pp. 31-56). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.
- Seidman, K. & Michalik, T. (1991). The efficiency of reversible heat engines. *Journal of Chemical Education*, 68(3), 208-210.
- Serway, R. A., & Beichner, R. J. (2000). *Physics for scientists and engineers with modern physics*. Philadelphia: Saunders College Pub.

- Shannon, C., & Weaver, W. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423.
- Shulman, L. S. (1987). Knowledge and teaching foundations of the new reform. *Harvard Educational Review*, 57(1), 1-22.
- Song, J., & Black, P. J. (1991). The effects of task contexts on pupils' performance in science process skills. *International Journal of Science Education*, 13(1), 49-58.
- Strnad, J. (1984). The second law of thermodynamics in a historical setting. *Physics Education*, 19(2), 94-100.
- Styer, D. F. (2000). Insight into entropy. *American Journal of Physics*, 68(12), 1090-1096.
- Swaney, J. A. (1985). Economics, ecology, and entropy. *Journal of Economic Issues*, 19(4), 853-865.
- Swartz, C. E., & Miner, T. D. (1997). *Teaching introductory physics : a sourcebook*. Woodbury, New York: American Institute of Physics.
- Swendsen, R. H. (2008). Explaining irreversibility. *American Journal of Physics*, 76(7), 643-648.
- Szilard, L. (1964). On the decrease of entropy in a thermodynamic system by the intervention of intelligent beings. *Behavioral Science*, 9(4), 301-310.
- Thomas, P. L., & Schwenz, R. W. (1998). College physical chemistry students' conceptions of equilibrium and fundamental thermodynamics. *Journal of Research in Science Teaching*, 35(10), 1151-1160.
- Thomsen, J. S. (1960). Thermodynamics of an irreversible quasi-static process. *American Journal of Physics*, 28(2), 119-122.
- Timberlake, T. (2010). The statistical interpretation of entropy: An activity. *The Physics Teacher*, 48(8), 516-519.
- Tipler, P. A. & Mosca, G. (2004). *Physics for scientists and engineers*. New York: W. H. Freeman.

- Tobin, M. C. (1969). Engine efficiencies and the second law of thermodynamics. *American Journal of Physics*, 37(11), 1115-1117.
- Van Ness, H. C. (1983). *Understanding thermodynamics* (pp. 15-25). New York: Dover.
- Viard, J. (2007). Using the history of science to teach thermodynamics at the university level: The case of the concept of entropy. Retrieved July, 20, 2012, from <http://www.ihpst2005.leeds.ac.uk/papers/Viard.pdf>
- Viglietta, L. (1990). Efficiency' in the teaching of energy. *Physics Education*, 25(6), 317-321.
- Wark, K., & Richards, D. E. (1999). *Thermodynamics*. Boston: WCB/McGraw-Hill.
- White, R. T., & Gunstone, R. F. (1989). Meta learning and conceptual change. *International Journal of Science Education*, 11(5), 577-586.
- Woolnough, B. E. (1994). Why students choose physics, or reject it. *Physics Education*, 29(6), 368-374.
- Worthing, A. G. (1940). The temperature concept. *American Journal of Physics* 8(1), 28-30.
- Wright, P. G. (1970). Entropy and disorder. *Contemporary Physics*, 11(6), 581-588.
- Young, H. D., Freedman, R. A., & Sears, F. W. (2008). *Sears and Zemansky's university physics* (12th ed., pp. 646-701). San Francisco: Pearson Addison-Wesley.
- Yuri M, S. (2000). Thermodynamics and ecology. *Ecological Modelling*, 132(1-2), 11-22.

[부록1] 열기관에서의 열효율과 가역과정의 관계에 대한
 설문

열통계물리 및 교육 설문지 1 (2009. 3. 23)

Stirling 기관이 두 온도 $T_H = 800\text{ K}$,
 $T_L = 300\text{ K}$ 사이에서 그래프와 같이 작
 동한다. ($a \rightarrow b$ 와 $c \rightarrow d$ 는 등온과정, $b \rightarrow c$
 와 $d \rightarrow a$ 는 등적과정이다.)



- (1) 이상기관의 조건을 써 보자.
- (2) Stirling 기관의 순환과정을 T - S (온도 - 엔트로피) 그림으로 나타내
 보자.
- (3) 만약 카르노기관이 위의 Stirling 기관과 동일한 두 온도 사이에서
 작동한다면, 이때의 열효율을 구해보자.
- (4) 문제에서 주어진 Stirling 기관의 열효율은 동일한 두 온도 사이에
 서 작동하는 Carnot 기관의 열효율보다 높은가 낮은가 또는 같은가? 또,
 그 이유는 무엇인지 기술해보자.

열통계물리 및 교육 설문지 2 (2009. 3. 30)

질문1. Stirling 기관은 이상기관입니까? (예/아니오)

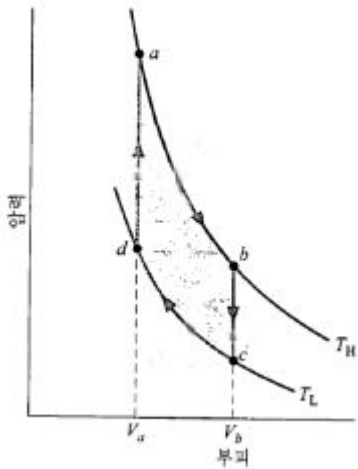
이상기관이 아니라면, 그 이유에 대해 짧게 서술해 보세요.

[참고] 이상기관의 조건 (Halliday *et al.*, 2008)

* 이상기관에서 모든 과정은 가역적이고, 쓸림이나 막흐름 등에 의한 에너지 손실은 발생하지 않는다.

질문2. Stirling 기관을 구성하는 각 과정이 가역적인지 아닌지에 대해 기술하고, 그 이유는 무엇인지 기술하세요.

(단, $a \rightarrow b$ 와 $c \rightarrow d$ 는 등온과정, $b \rightarrow c$ 와 $d \rightarrow a$ 는 등적과정이다.)



(1) $a \rightarrow b$:

(2) $b \rightarrow c$:

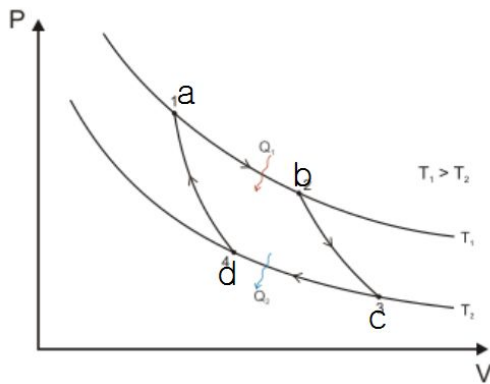
(3) $c \rightarrow d$:

(4) $d \rightarrow a$:

열통계물리 및 교육 설문지 4 (2009. 4. 1)

질문 1. Carnot 기관을 구성하는 각 과정이 가역적인지 아닌지에 대해 기술하고, 그 이유는 무엇인지 기술하세요.

(단, $a \rightarrow b$ 와 $c \rightarrow d$ 는 등온과정, $b \rightarrow c$ 와 $d \rightarrow a$ 는 단열과정이다.)



(1) $a \rightarrow b$:

(2) $b \rightarrow c$:

(3) $c \rightarrow d$:

(4) $d \rightarrow a$:

질문 2. 열역학에서의 가역과정이란 무엇인지 서술하고, 가역과정의 예를 하나 들어보세요.

[부록2] 비가역 단열과정에 대한 설문

[예비설문 1] (2010년 6월 시행)

안녕하십니까? 본 설문지는 학생들의 열역학 법칙에 대한 이해의 어려움을 살펴보기 위해 제작된 것입니다.

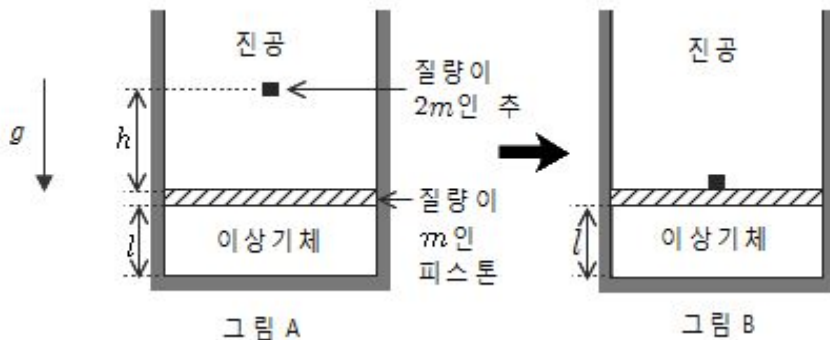
여러분의 응답 내용은 오직 연구 목적으로만 활용됩니다. 또한 인적 사항이나 응답 내용은 연구자들만 볼 수 있으며, 외부에 알려지지 않습니다.

성실하게 설문에 답해주시길 진심으로 부탁드립니다. 감사합니다.

2010년 6월 상황물리교육연구실 이주현

<※ 다음 물음에 답하시오>

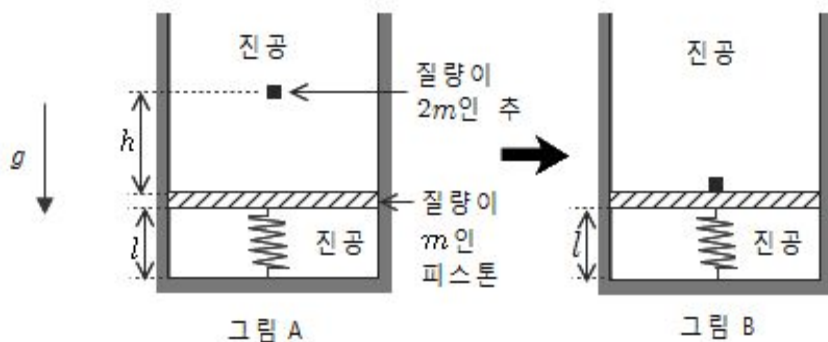
1. 아래 그림과 같이 단열이 된 실린더가 마찰이 없는, 질량이 m 인 단열재로 만들어진 피스톤에 의해 두 부분으로 나뉘어져 있다. 바깥부분은 진공인 반면, 안쪽에는 1 mol 의 단원자분자 이상기체가 들어있다. 피스톤과 실린더 바닥 사이의 거리는 l 이다.



이 상황에서 질량 $2m$ 인 추를 피스톤으로부터 h 만큼 높은 곳에서 떨어 뜨렸더니(그림A), 한참 후에 그림B와 같이 평형 상태에 도달하였다. 이때 기체의 부피를 살펴보았더니 처음과 동일했다. h 는 l 의 몇 배인가? (단, 추는 피스톤과 탄성 충돌을 하고, 추는 부피를 무시할 수 있을 정도로 매우 작다고 가정한다. 또한 실린더와 피스톤의 온도변화는 없다고 가정한다.)

2. 이상기체를 제거하여 진공 상태로 만들고, 아래 그림과 같이 스프링을 연결한 후에 1과 동일한 실험을 하였다. 이 상황은 앞의 상황 (1번의 이상기체를 채운 상황)과 동일한가, 또는 다른가?

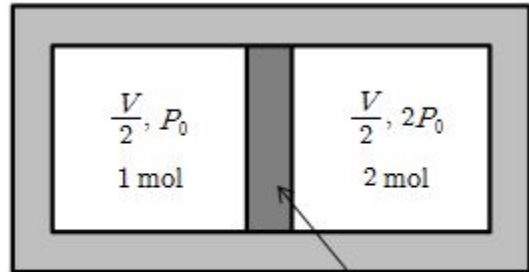
동일하다면, 그 이유를 설명하고, 다르다면 어떤 측면이 다른지 자세하게 기술하시오. 또는 (1번 문제의 상황이 성립하는지의 여부도 생각해 보시오. (즉, 자유롭게 자신의 의견을 기술하면 됩니다.)



[예비설문2] (2010년 7월 시행)

다음은 단열과정에 대한 학생의 생각을 알아보기 위한 예비설문입니다.
정실하게 답변해 주시기 바랍니다.

오른쪽 그림과 같이 체적 V 인 밀폐된 용기가 자유롭게 움직일 수 있는 피스톤에 의하여 같은 부피의 두 부분으로 구분되어 있다. 용기는 열 절연체이다. 각 부분에 각각 1몰과 2몰의 단원자 분자로 된 이상기체가 들어 있고 압력이 각각 P_0 와 $2P_0$ 인 초기 상태에서 피스톤이 운동을 시작하였다고 하자.



피스톤

피스톤에 마찰력이 전혀 작용하지 않고 피스톤이 운동하는 동안은 피스톤을 통하여 전달되는 열은 무시할 수 있다고 할 때 피스톤의 운동을 정성적으로 기술해보자.

[본 설문] (2010년 10월 말 시행)

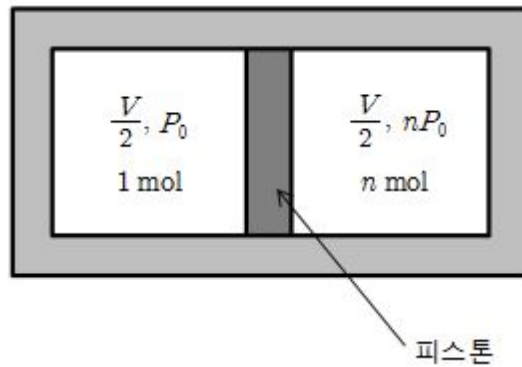
2 학년 반 번 이름:

※ 다음 질문들은 열역학 제2법칙에 대한 여러분들의 생각을 조사하기 위한 것으로서, 다음주 수업 및 연구자료로 활용될 것입니다. 아래의 질문에 성실히 응답해 주시기 바랍니다. (책이나 프린트를 참고해도 좋습니다.)

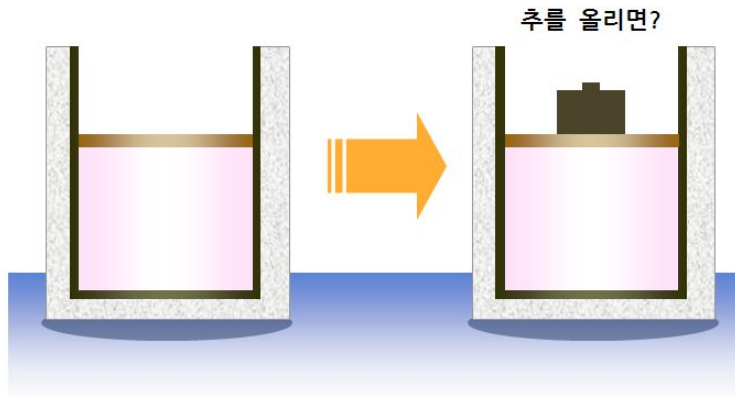
- ▶ 가역과정과 비가역과정에 대해서 구체적인 예를 들어서 기술해보자.
- ▶ 열역학 제2법칙에 대해서 기술해보자.
- ▶ 엔트로피에 대해서 기술해보자.
- ▶ 역학과 열역학의 공통점 및 차이점에 대해 기술해보자.
- ▶ 열역학 제2법칙 및 엔트로피와 관련하여 수업(또는 시험공부)을 통해 그 전에는 잘 몰랐지만 본인이 새롭게 알게 된 부분은?
- ▶ 열역학 제2법칙 및 엔트로피와 관련하여 여전히 잘 이해가 되지 않거나 헷갈리는 부분은?
- ▶ 열역학 제2법칙 및 엔트로피에 대해 학습할 때, 무엇을 아는 것이 가장 중요하다고 스스로 생각하는가? 그리고 그 이유는 무엇인가?

문제 1. 그림과 같이 체적 V 인 밀폐된 용기가 자유롭게 움직일 수 있는 피스톤에 의하여 같은 부피의 두 부분으로 구분되어 있다. 피스톤과 용기는 단열재로 만들어졌다. 각 부분에 각각 1몰과 n 몰의 단원자 분자로 된 이상기체가 들어 있고 압력이 각각 P_0 와 nP_0 인 초기 상태에서 피스톤이 운동을 시작하였다고 하자.

피스톤과 용기 사이에 마찰이 없다고 할 때, 피스톤의 운동에 대해 기술해보자. (단, $n > 1$ 로 가정한다.)



문제2. 그림과 같이 단원자 분자 이상기체 $n \text{ mol}$ 이 마찰 없이 자유롭게 움직일 수 있는 피스톤으로 막힌 실린더 안에 들어있다. 처음 상태에서 기체의 압력, 부피, 온도는 P_0, V_0, T_0 로 주어지며, 피스톤과 실린더는 단열 물질로 이루어져 있으며, 피스톤과 실린더 사이에 마찰이 작용하지 않는다. 계산의 편의를 위해 외부는 진공 상태라고 가정한다.



(1) 질량이 M 인 피스톤 위에 질량이 m 인 추를 올려놓았을 때, 피스톤의 운동에 대해 기술해보자. 만약 기체의 나중 상태 P', V', T' 을 예측할 수 있다면, 예측해보고 자신의 답에 대한 이유를 정성적으로 설명하고 정량적인 계산도 해 보자. 만약 피스톤이 평형상태에 도달하지 못하고 계속 진동운동을 한다고 생각하면 그 이유 또한 기술해보자. (정량적인 계산을 할 때 더 필요한 변수가 있다면 스스로 알아서 도입하면 됩니다.)

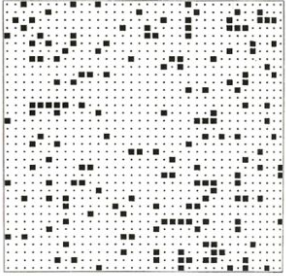
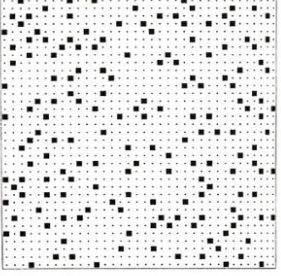
(2) 피스톤 위에 올려져 있던 질량 m 인 추를 들어내면 기체는 처음상태로 되돌아가겠는가? 아니면 처음 상태로 되돌아가지 않겠는가? 자신의 답에 대한 이유를 구체적으로 기술해보자.

[부록3] 과학고에서의 열역학 제2법칙에 대한 수업 내용

(수업 일시: 2010년 7-8월, 대상: 과학고 2학년 학생들)

| 차시 | 주요 개념 | 내용 |
|-----|-------------|---|
| 1차시 | 가역과정과 비가역과정 | <p>- 자연현상 중에서는 일어나지 않는 일들이 있다: 가역과정과 비가역과정</p> <p>* 가역과정: 어떤 사건을 비디오테이프로 찍은 후, 되돌려서 봤을 때 우리의 지식으로 충분히 설명이 가능한 과정(뉴턴 방정식을 충실히 따르는 과정)으로서, 주로 입자의 개수가 매우 적을 때 일어남. (예: 공기가 없는 경우에서의 진자의 운동, 입자 1-2개의 탄성충돌.)</p> <p>* 비가역과정: 어떤 사건을 비디오테이프로 찍은 후, 되돌려서 봤을 때 경험적으로 관찰된 적이 없는 과정으로서, 주로 상호작용하는 입자의 개수가 많을 때 일어남.</p> <p>⇒ 질문: “경험적으로 관찰된 적이 없는 과정”은 뉴턴의 역학법칙에 어긋나는 과정인가? 각 단계를 유심히 살펴보면 물리적으로 잘못된 구석이 하나도 없다. <u>모든 충돌은 물리학의 법칙을 그대로 따른다. 그러나 현실세계에서는 결코 일어나지 않는다.</u> 그러면 이러한 상황을 어떻게 설명할 수 있을까?</p> |
| | 엔트로피 개념의 도입 | <p>* 이러한 비가역과정을 <u>물리량으로 표현</u>하기 위해 도입된 개념: 엔트로피</p> <p>엔트로피라는 용어의 어원은 에너지 변환, 즉 "transformation of energy"임. 변환(transformation)에는 transfer(에너지 전달)와 conversion(에너지 전환)의 의미가 포함되어 있음. 단일한 열원에서 열을 뽑아내어 100% 일로 바꿀 수 없으며, 열은 저절로 저온에서 고온으로 이동할 수 없음. ⇒ 이로부터 열기관과 냉동기관에 대해 도입할 수 있음.</p> |

| 차시 | 주요 개념 | 내용 |
|-------|----------------------------------|---|
| 2-3차시 | 열기관, 냉동기관, 카르노기관, 가역과정, | <p>* 열기관: 고온에서 저온으로 열을 이동하여 일을 얻어내는 기관, 자동차 엔진.</p> <p>* 냉동기관: 기관에 일을 해 주어 열을 저온에서 고온으로 이동시키는 기관, 에어컨, 냉장고 등.</p> <p>* 카르노 기관: 두 열원사이에서 작동하는 가장 효율이 높은 기관, 카르노기관의 작동과정 및 각 과정에서의 해준 일, 유입된 열, 내부에너지 변화량에 대해 설명함. 열효율을 계산함.</p> <p>* 열역학에서 말하는 ‘가역과정’이란 무엇인가 (3가지) : 준정적, 마찰 등이 없어야 함. 온도차가 나는 두 열원이 접촉하지 않아야 함.</p> <p>⇒ 카르노 기관의 작동과정을 설명한 후에, 이 과정을 비디오카메라로 녹화한 후에 거꾸로 돌렸을 때 가능한 과정인지/불가능한 과정인지의 여부를 물어보고, 그 이유를 설명하게 함. 아울러 위의 3가지 조건 중 위배되는 부분이 있는지도 생각해보게 함.</p> <p>- 동일한 두 열원을 사용하는 열기관 중 카르노 기관의 효율이 가장 높은 이유에 대한 증명을 함께 살펴봄.</p> |
| 4차시 | 엔트로피 | <p>엔트로피란 무엇인가? 에너지 전환 및 전달의 방향과 관련된 물리량이며 두 가지 표현방법이 있다.</p> <p>* 클라우지우스의 표현: $\Delta S = \int dQ/T$ (~ 열역학적 계가 가지고 있는 에너지 중에서 일로 바꾸어 이용할 수 없는 에너지와 관련되나, 이를 유도하는 과정은 상당히 복잡함.)</p> <p>* 볼츠만의 표현: $S = k \ln \Omega$</p> <p>* 물리량으로서의 엔트로피의 특징: 상태함수</p> <p>* 클라우지우스 식을 이용하여 엔트로피 변화량 계산하기 (비가역 과정에서의 엔트로피 변화량 계산방법을 포함하여)</p> |

| 차시 | 주요 개념 | 내용 |
|-----|-------------------|---|
| | 엔트로피와 사건의 가역성의 연결 | * “고립계에서” 엔트로피가 증가하면 사건은 비가역적, 엔트로피가 일정하면 사건은 가역적, 엔트로피가 감소하면 사건이 일어날 수 없음. |
| | 카르노 기관과 엔트로피 | * 카르노 기관의 각 과정에서 계의 엔트로피와 주위의 엔트로피를 계산하고 이를 사건의 가역성과 연결하기. ⇒ ‘가역과정’이란, (계+주위환경)의 엔트로피가 증가하지 않는 과정을 의미한다. |
| | Gibbs 자유에너지 | * (화학시간에 주로 다루는) Gibbs 자유에너지와 열역학 제2법칙의 관계를 살펴봄 |
| 5차시 | 통계역학적 엔트로피 | <p>‘엔트로피’가 어떻게 자연의 방향성을 일컫는 척도가 될 수 있는가? ⇒ 통계역학적 관점으로 살펴보기</p> <p>엔트로피를 ‘무질서도’라고 정의했을 때 생기는 문제점(그림과 함께): 사람들은 주로 오른쪽 그림을 더 무질서하다고 생각한다. 하지만 왼쪽 그림을 만든 프로그램은 특별한 구속조건이 없는 반면, 오른쪽 그림을 만든 프로그램은 인접한 격자 기체가 없어야 한다는 조건이 주어져 있다. 즉, 오른쪽 그림을 만든 프로그램의 가능한 미시상태 수가 왼쪽 그림을 만든 프로그램에 비해 적으며, 따라서 무질서해 보이는 오른쪽 그림을 만든 프로그램의 엔트로피가 더 낮다(Styer, 2000).</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: small;"> <p>Fig. 2. A lattice gas configuration generated by the program Jan1.</p> <p>Fig. 3. A lattice gas configuration generated by the program Jan2.</p> </div> |

| 차시 | 주요 개념 | 내용 |
|----|-----------------------|---|
| | | <p>→ 즉, “무질서도”라는 용어는 물리적으로 정의하기 어려우며 매우 추상적인 용어임.</p> <p>* 엔트로피는 ‘가능한 미시상태 수’로 정의됨.</p> <p>* 위의 그림의 예를 이용하여 상태수의 의미에 대해 이야기를 함. → 엔트로피는 수학에서도 유용할 수 있음을 언급함(정보 엔트로피).</p> |
| | 상태수 예측하기 | <p>* 물리적 상황으로 돌아와서, 이상기체 상태에서 ‘온도’와 ‘부피’에 따라 상태수가 어떻게 바뀌는지 이야기 함. → 온도와 부피가 증가하면 상태수가 증가함.</p> |
| | 통계역학적 표현과 열역학적 표현의 연결 | <p>등온팽창과정에 대해서, 엔트로피에 대한 두 정의가 동등함을 증명함.</p> <p>열적 상호작용하는 상황에 대해 엔트로피를 이용하여 열역학적 온도를 정의하고, 이것이 클라우지우스 엔트로피 식의 형태임을 보임.</p> |

Abstract

Students' Understanding of the Second Law of Thermodynamics including Reversible Processes with Suggestions for Effective Instruction

Juhyeon LEE

Physics Education Major

Department of Science Education

The Graduate School

Seoul National University

In the areas of thermodynamics and statistical mechanics which consider many-particle systems, the notion of irreversibility, which is the core of the second law of thermodynamics, is appeared. However, the investigations of students' understanding of the second law with focused on many-particle systems and thermodynamic irreversibility were few. This study suggests several ideas for effective instruction of the second law of thermodynamics at the introductory physics level by analyzing explanations of the second law in physics textbooks and investigating students' understanding of the second law including reversible

processes.

This study consists of four parts. The first part analyzed the descriptions of the second law and related concepts appeared in introductory physics textbooks. The second part investigated students' understanding of the relationship between thermal efficiencies and the processes of heat engines, and the third part investigated students' understanding of irreversible adiabatic processes. Based on the results of three researches, as a final part, ways of how to explain the second law of thermodynamics were suggested.

The first research analyzed the forms of content flow, the introduction of mathematical formulas, descriptions of reversible processes, and the Carnot cycle in eight introductory physics textbooks. As a result of the analysis of the content flow with mathematical formulas, three types of characteristics were found. The textbooks focused on qualitative explanations of the second law, the quantitative calculation of $dS = \delta Q/T$, or an explanation of $S = k \ln \Omega$. Various methods were used to introduce $dS = \delta Q/T$: simply presenting the formula without any qualitative explanation, inducing the formula from Carnot's principle, inducing the formula from a definition of statistical temperature, etc. When $S = k \ln \Omega$ was explained, most textbooks used metaphors from everyday life situations while just one textbook used a solid model. In the descriptions of the reversible process and the Carnot cycle, it was found that the operational definition of a reversible process was ambiguous, that illustrations did not embody the reversible process, and that the questions to predict the direction of an event through entropy calculations were insufficient.

The second research discussed how to solve a contradiction among the three statements of 'all reversible heat engines operating between two reservoirs have the same efficiency', 'an ideal Stirling engine operates reversibly', and 'the efficiency of a Stirling engine is lower than the efficiency of a Carnot engine,' and analyzed

undergraduate students' thoughts about this contradiction. The participants were 24 students who took a course on thermal and statistical physics at university. The analysis of the explanations of a Stirling engine efficiency showed that a Stirling engine without regenerator cannot operate reversibly between two reservoirs and that the heat efficiency of the Stirling engine was lower than that of Carnot engine. However, if a Stirling engine has a regenerator, it can operate reversibly and the efficiency is equal to that of a Carnot engine. The analysis of students' responses showed that most students considered the entropy of a Stirling engine as the most important factor to determine whether the Stirling engine can operate reversibly or not. However, they did not understand clearly the relationship between entropy and a reversible process. Also, many of the participants gave incorrect answers to the question pertaining to the contradiction, with answers such as 'a Stirling engine cannot operate reversibly,' or 'I simply don't know.' It appeared to be caused by students' incomplete understanding of thermodynamic processes.

The third research investigated students' understanding of the movement of an adiabatic system toward an equilibrium state when the system changes irreversibly. The participants were 140 Korean students at a science high school, who had learned thermodynamics in their introductory physics class. A questionnaire that contained two situations involving an adiabatic double chamber and an adiabatic vertical syringe was given to the students. From the analysis, it was found that the students frequently used the formula ' $pV^\gamma = constant$ ' without any consideration of whether the process was reversible or not, although this formula should only be used for reversible adiabatic processes. In addition, the students predicted that the pistons for an adiabatic box or an adiabatic syringe would oscillate eternally because the students believed that the term 'adiabatic' indicated the conservation of mechanical energy or no entropy change of a system without any dissipative effects. They did not recognize the fact that the second law was derived from collisions

among many particles, and they did not distinguish between reversible and irreversible processes. Also, they suffered from difficulties in predicting the final state of a system after an irreversible process had been completed.

Based on the above findings, the ideas were suggested for effective instruction with a teaching-learning flow chart. In the flow chart, applications of the second law in various situations were emphasized so that students would recognize well the statement that ‘the entropy of an isolated system never decreases.’ The conditions for applying the second law through the comparison between classical mechanics and thermodynamics were discussed, and the timing of introducing ‘a reversible process’ was considered. To improve students’ understanding of a reversible process, providing both qualitative and quantitative explanations of a reversible process with a detailed description of an operating Carnot engine was suggested. Awareness of the restricted conditions pertaining to thermodynamics formulas would also contribute to increasing the ability of students to solve thermodynamic questions.

This study showed the various forms on explaining the second law and related concepts, found students’ understandings and difficulties related to the concepts of the second law including reversible processes, and suggested effective instruction methods to overcome students’ difficulties through the comparison between classical mechanics and thermodynamics and the provision of concrete explanations of a reversible process.

Keywords : the second law of thermodynamics, reversible process, entropy, students’ understanding, introductory physics, heat engine, adiabatic process

Student Number : 2007-30916