



저작자표시-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.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



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](#)

공학석사학위논문

4WD 하이브리드 자동차의
주행제어 알고리즘 개발

Development of Cruising Control Algorithm
for 4WD Hybrid Electric Vehicles

2012년 12월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

김형균

국문 요약

현재 전세계적으로 강화되는 환경 규제와 더불어 친환경적인 자동차를 개발하는 것이 화제이다. 이에 따라 하이브리드 전기 자동차(HEV) 개발이 가속화 되고 있으며, 하이브리드 방식을 4WD 자동차에 적용하기 위한 방법으로 Inline 시스템 방식인 4WD 하이브리드 시스템이 개발되었다. 4WD 하이브리드 시스템은 전륜은 Conventional 차량처럼 엔진 동력을 사용하여 구동이 되고, 후륜에 모터를 장착하여 4WD 기능을 구현한 시스템이다. Conventional 4WD 차량과 비교해 보았을 때, 동력을 분배해주는 트랜스퍼 및 프로펠러 샤프트 등이 없으므로 동력전달 손실을 줄일 수 있고 회생제동 및 Idle Stop & Go 기능을 구현하여 연비 개선을 기대할 수 있다. 이와 같은 연비 개선 방법 외에도 주행전략 측면에서 모터와 엔진의 작동 시점을 적절하게 제어해줌으로써 하이브리드 시스템의 장점을 극대화 할 수가 있다.

4WD 하이브리드 시스템의 주행 전략을 수립하기 위한 방법 중 하나로 백워드 시뮬레이션을 이용하는 방법이 있다. 백워드 시뮬레이션은 연비를 최적화하기 위한 방법으로써 최적 제어 이론 중 한가지인 Dynamic Programming(다이나믹 프로그래밍)을 이용하게 된다. 이 방법을 이용하여 주어진 사이클에서의 각 시간 별 엔진과 모터의 최적 작동지점을 분석함으로써 주행 전략을 수립할 수 있다. 또한 주행 전략의 유

효성을 입증하기 위하여 4WD 하이브리드 차량과 Conventional 4WD 차량의 포워드 시뮬레이션을 통해 연비 비교를 수행하였다.

주요어 : 4WD Hybrid Vehicles(4WD 하이브리드 자동차), Backward Simulation(백워드 시뮬레이션), Dynamic Programming(다이나믹 프로그래밍), Control Strategy(주행 전략), Cruising Control Algorithm(주행제어 알고리즘), Forward Simulation(포워드 시뮬레이션)

학번 : 2011-20703

목 차

국문 요약	i
목 차	iii
List of Figures	vi
List of Tables	viii
1. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구내용	3
2. 4WD 하이브리드 시스템	4
2.1 4WD 하이브리드 시스템 개요	4
2.2 등가 4WD 하이브리드 시스템	6
2.3 전/후륜 4WD 하이브리드 시스템	8
3. 백워드 시뮬레이션	11

3.3 Dynamic Programming(DP)	11
3.2 백워드 시뮬레이터	16
3.3 백워드 시뮬레이션 수행	18
4. 후륜측 구동모듈 용량 선정	21
4.1 후륜측 모터의 용량 선정	21
4.2 후륜측 감속비의 용량 선정	23
5. 연비 향상을 위한 주행전략 알고리즘	29
5.1 백워드 시뮬레이션 결과 분석	29
5.2 주행전략 조건	38
5.3 주행전략	41
6. 포워드 시뮬레이션	42
6.1 포워드 시뮬레이션 구성	42
6.2 포워드 시뮬레이션 결과	43

7. 결론	48
참고 문헌	50
Abstract	52
감사의 글	54

List of Figures

- Figure 2.1 4WD hybrid system
- Figure 2.2 Equivalent 4WD hybrid system
- Figure 2.3 Front/Rear wheel 4WD hybrid system
- Figure 2.4 Tire force ratio curve
- Figure 3.1 Optimal trajectory with several states
- Figure 3.2 Process of making decisions for optimality
- Figure 3.3 Process for choosing an optimal trajectory
- Figure 3.4 Main figure and select panel of the OC-SIM
- Figure 3.5 Results panel of the OC-SIM
- Figure 3.6 FTP-72 cycle
- Figure 3.7 Engine map
- Figure 3.8 Integrated engine map
- Figure 3.9 Characteristics of torque converter
- Figure 4.1 Braking power for FTP-72
- Figure 4.2 Efficiency map of the motor

- Figure 4.3 Traction force and resistance force
- Figure 5.1 Engine operating points
- Figure 5.2 Motor operating points
- Figure 5.3 Backward simulation results
- Figure 5.4 Backward simulation results
- Figure 5.5 Backward simulation results
- Figure 5.6 Required power plot for 4WD hybrid vehicle
- Figure 5.7 EV, engine and hybrid mode Areas
- Figure 5.8 Backward simulation result of driving mode
- Figure 6.1 Forward simulator for 4WD Hybrid Vehicle
- Figure 6.2 Forward simulation results
- Figure 6.3 Forward simulation results
- Figure 6.4 Forward simulation results
- Figure 6.5 Forward simulation result of driving mode
- Figure 6.6 Comparison of fuel economy between 4WD hybrid vehicle and conventional 4WD vehicle

List of Tables

Table 2.1 Data for tire slip model

Table 3.1 Gear ratio of 4WD hybrid vehicle

Table 4.1 Fuel economy according to reduction gear ratio

Table 5.1 Vehicle mode

Table 5.2 Conditions of cruising control algorithm

1. 서 론

1.1 연구 배경

현재 지구 온난화 및 에너지 자원의 고갈과 같은 환경 문제들로 인하여 차량의 연비 및 배출가스에 대한 규제가 강화됨에 따라 친환경적인 자동차를 개발하는 것이 화제이다. 이에 따라 하이브리드 전기 자동차(HEV), 전기 자동차(EV), 연료전지 자동차(FCV) 등 친환경적인 자동차의 개발이 가속화 되고 있다. 특히 이 중 HEV는 1990년대 말부터 이미 양산단계에 이르렀으며, 시스템의 효율을 높이기 위하여 지속적으로 개발되고 있다. HEV는 일반적으로 엔진과 모터 두 가지의 동력원을 사용하여 기존 내연기관 차량의 형태를 개선한 차량으로써 기존 인프라 시설을 이용할 수 있는 점과 차량의 효율을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. HEV는 시스템의 형태에 따라 크게 병렬형(parallel)과 직렬형(series)으로 나눌 수 있다. 병렬형 HEV는 엔진과 모터 두 가지 동력원이 차량을 구동시키는데 이용되며 같은 출력축 상에 구동력을 전달하는 형태로 이루어져 있다. 직렬형 HEV는 모터만이 차량을 구동시키는데 이용되며 엔진은 연료를 전기에너지로 변환시켜 모터와 배터리에 공급하는 형태로 이루어져 있다. 하지만 이와 같은 HEV 시스템들을 4WD 방식에 적용하기 위해서는 Conventional 4WD 차량과 같이 트랜스퍼 케이스 등과 같은 별도의 동력전달장치가 필요하게 되므로 공간적, 에너지 소비적 문제에서 비효율적인 측면이 생긴다. 이러한

문제를 해결하기 위해서 새로이 연구되고 있는 방법으로써 4WD 하이브리드 시스템이 개발되었다. 4WD 하이브리드 시스템은 전륜은 기존 내연기관 차량과 같이 엔진에 의해 동력이 전달되며, 이와는 별도로 후륜은 모터에 의해 동력이 전달되는 형태이다. 엔진과 모터를 이용하여 전/후륜에 모두 동력을 전달함으로써 4WD 기능을 구현할 수가 있다. Conventional 4WD 차량과 비교해 보았을 때, 동력을 분배해주는 트랜스퍼 케이스 및 프로펠러 샤프트 등이 없으므로 동력전달 손실을 줄일 수 있고 회생제동 및 Idle Stop & Go 기능 등을 구현함으로써 연비개선을 기대할 수 있다.

4WD 하이브리드 시스템의 효율을 높이기 위해서는 후륜측 구동 모듈의 용량 선정이 필요하다. 이 중 감속비에 따라 최대 등판 성능, 최대 속도 및 연비가 달라짐으로써 모터와 마찬가지로 설계할 때 고려해야 할 중요한 항목이다. 또한 단품적 측면 이외에도 주행 제어 전략을 통하여 시스템의 효율을 높일 수 있다. 주행 제어 전략은 운전자로부터 입력이 들어왔을 때 차량의 상황에 따라 엔진과 모터의 사용시점을 결정해 주는 제어 알고리즘으로써 각 시점에서 엔진과 모터의 고효율 구간만을 사용하여 시스템의 효율을 극대화 할 수 있다. 위와 같은 두 가지 측면을 고려함으로써 4WD 하이브리드 시스템의 성능을 향상시키는 것이 가능하다.

1.2 연구 내용

본 논문에서는 4WD 하이브리드 차량에서 후륜측 구동 모듈(모터 및 감속기)의 용량을 정하고 시스템의 효율을 높이기 위한 주행 제어 알고리즘을 개발하였다. 후륜측 구동 모듈의 용량 선정은 먼저 회생제동 에너지를 고려하여 모터의 용량을 선정한 후 백워드 시뮬레이션 및 차량 성능 관점에서의 제한 조건들을 고려하여 후륜측 감속비를 선정하였다. 백워드 시뮬레이션은 최적 제어이론 중 하나인 Dynamic Programming(다이나믹 프로그래밍)을 이용하여 수행하였으며, 주행 사이클은 FTP-72 모드를 이용하였다. 선정된 후륜측 구동모듈에 대한 전체 4WD 하이브리드 시스템의 백워드 시뮬레이션 결과로부터 각 시점에 따른 주행 모드(엔진, 모터, 하이브리드)를 분석하여 주행 제어 알고리즘을 구성하였다. 주행 제어 알고리즘은 배터리 SOC, 차량 속도, APS 등의 신호로부터 주행 모드를 결정해주는 역할을 하게 되며, 이를 검증하기 위하여 포워드 시뮬레이터를 구성한 후 4WD 하이브리드 모델과 Conventional 4WD 모델의 연비 비교를 수행하였다.

2. 4WD 하이브리드 시스템

2.1 4WD 하이브리드 시스템 개요

4WD 하이브리드 시스템은 전륜이 엔진에 의해 구동되고 후륜이 모터에 의해 구동됨으로써 4륜 구동이 가능한 형태를 가진다. 이를 간략히 나타내면 Fig. 2.1 과 같다. 엔진의 출력은 변속기를 지나 전륜에 구동력으로 쓰이거나 배터리 SOC가 부족할 때에 모터 및 배터리에 전기 에너지를 공급하는데 이용된다. 모터의 출력은 감속기를 지나 후륜에 구동력으로 쓰이며 감속시에는 회생제동을 이용하여 제동 에너지의 회수가 가능하다.

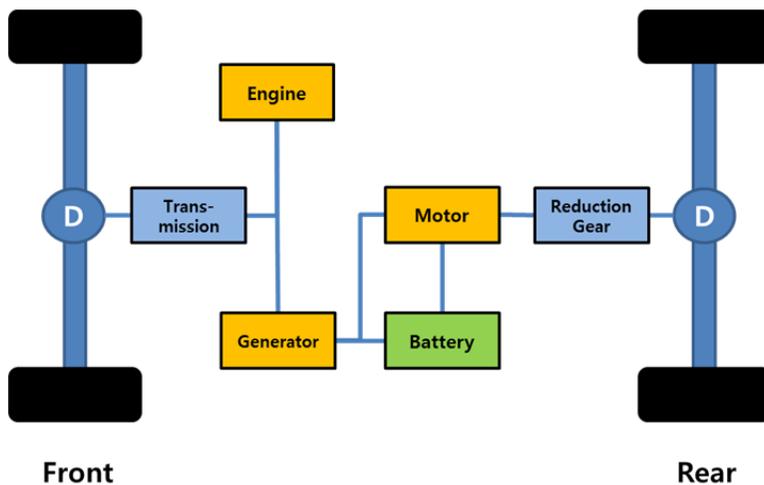


Figure 2.1 4WD hybrid system

Conventional 4WD 시스템과 비교해 보았을 때 엔진이 후륜측으로 동력을 전달할 필요가 없으므로 트랜스퍼 케이스 및 프로펠러 샤프트 등과 같은 동력 분배 장치가 필요가 없다. 그러므로 구조적으로 더 넓은 공간을 이용할 수 있으며 동력 전달에 따른 손실을 줄일 수가 있다. 또한 EV 주행 모드를 이용할 수가 있으므로 Idle Stop & Go 기능을 구현하여 엔진의 공회전에 의한 손실을 없앨 수가 있으며, 감속시에는 후륜측 모터에 의한 회생제동으로부터 연비 향상의 효과를 얻어낼 수가 있다.

병렬형 하이브리드 시스템과 동일 사양을 가진 상황에서의 비교를 해보면, 엔진의 경우는 변속기에 의해 사용 영역이 정해지므로 그 효과는 똑같다. 하지만 모터의 경우는 변속기와 감속기의 차이로부터 4WD 하이브리드 시스템이 병렬형 시스템에 비해 모터의 사용영역이 유연하지 않으므로 연비 저하가 생길 것임을 예측 가능하다. 하지만 4WD 시스템의 특성상 병렬형 시스템에 비해 안정적인 주행이 가능하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 백워드 시뮬레이션 수행에 앞서 4WD 하이브리드 시스템을 두가지 방법으로 정의하고자 한다. 첫번째는 전/후륜 구분 없이 같은 축상에 엔진과 모터를 연결하는 등가 4WD 하이브리드 시스템이며, 두번째는 전/후륜을 구분하여 첫번째 방법보다 실제 상황에 맞게 적용 가능한 전/후륜 4WD 하이브리드 시스템이다.

2.2 등가 4WD 하이브리드 시스템

등가 4WD 하이브리드 시스템은 실제의 4WD 하이브리드 시스템을 간소화시켜 모델링하는 방법이다. 그러므로 전/후륜 4WD 하이브리드 시스템에 비해 간단하고 쉽게 적용이 가능한 모델이다. 등가 4WD 하이브리드 시스템을 표현하기 위해 이용된 가정은 다음과 같다. 첫째는 타이어에 슬립이 없다는 가정이며, 둘째는 이상적으로 엔진과 모터의 동력이 구동력으로 모두 전달된다는 가정이다. 이러한 가정을 통해서 엔진과 모터의 출력축을 같은 축상으로 연결시킬 수 있다. 등가 4WD 하이브리드 시스템의 구성은 Fig. 2.2와 같다.

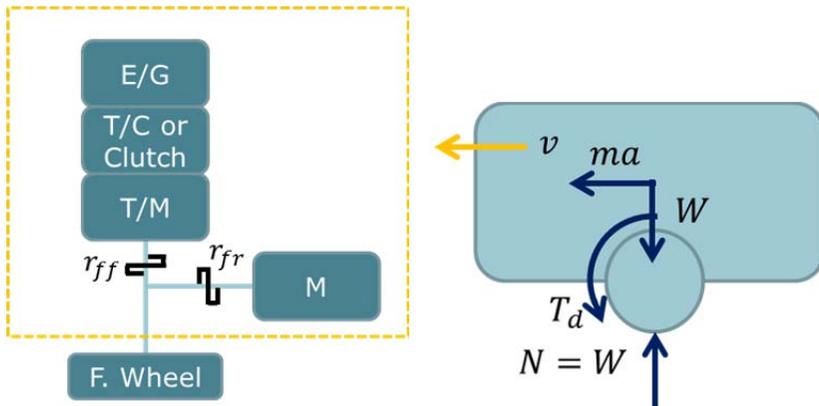


Figure 2.2 Equivalent 4WD hybrid system

엔진의 출력은 클러치(또는 토크 컨버터), 변속기를 지나서 바퀴에 전달되며, 모터의 출력은 감속기를 지나 변속기와 같은 출력축을 따라 바퀴에 전달된다. 이는 타이어에 슬립이 없는 상태에서 엔진과 모터의 출력이 구동력으로 모두 변환된다고 가정함으로써 등가 4WD 하이브리드 시스템의 표현이 가능하다. 일반적으로 시뮬레이션에 수행되는 주행 사이클에서는 가혹적인 주행 조건이 없으므로 타이어와 노면 사이에서의 전달 가능한 Tire Force의 최대치가 주행에 필요한 Traction Force보다 크게 유지되기 때문에 등가 4WD 하이브리드 시스템을 이용한 시뮬레이션 수행이 가능하다. 하지만 가혹적인 주행(예를 들면, 미끄러운 노면 또는 오르막 주행)을 평가하기 위해서는 등가 4WD 하이브리드 시스템을 이용하여서는 안되며 이와 같은 조건에 적용 가능한 전/후륜 4WD 하이브리드 시스템을 이용하여야 한다.

2.3 전/후륜 4WD 하이브리드 시스템

등가 4WD 하이브리드 시스템과는 달리 전/후륜 4WD 하이브리드 시스템은 전/후륜의 슬립 및 하중 분배에 따른 상황을 고려하게 되므로 더 현실적인 상황에 맞게 모델링이 가능하다. 전/후륜 4WD 하이브리드 시스템의 구성도는 Fig. 2.3과 같다.

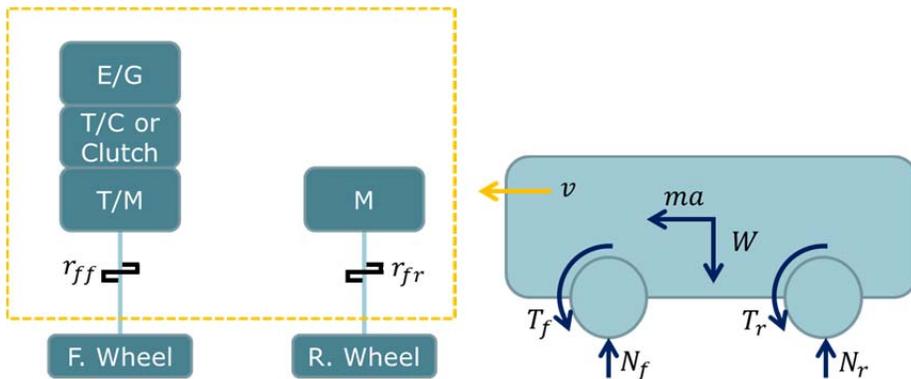


Figure 2.3 Front/Rear wheel 4WD hybrid system

엔진의 출력은 클러치(또는 토크 컨버터), 변속기를 지나 전륜에 전달되며, 모터의 출력은 감속기를 지나 후륜에 전달된다. 이는 각각 독립적으로 다른 동력축상에서 차량에 구동력을 제공한다. 타이어 슬립을 고려하게 되면, 전/후륜 하중 분배에 의한 최대 Tire Force를 구하여 이에 따른 Traction Force의 비율로부터 슬립을

을 구할 수 있다. 타이어 슬립을 고려하게 되므로 전/후륜에서 전달 가능한 Traction Force의 제한이 생기게 된다. 그러므로 일반적인 주행 조건에서는 등가 4WD 하이브리드 시스템의 결과와는 큰 차이가 없으나 가혹적인 주행 조건에서는 슬립에 의한 Traction Force의 제한으로부터 등가 4WD 하이브리드 시스템과는 다른 결과를 도출해 낼 수 있다.

본 논문에서 백워드 시뮬레이션을 수행하기 위한 모델로써는 전/후륜 4WD 하이브리드 시스템을 이용하였다. 이를 구현하기 위한 타이어 슬립 모델은 선형적으로 가정하였고 내용은 Fig. 2.4에 나타내었다. [6]

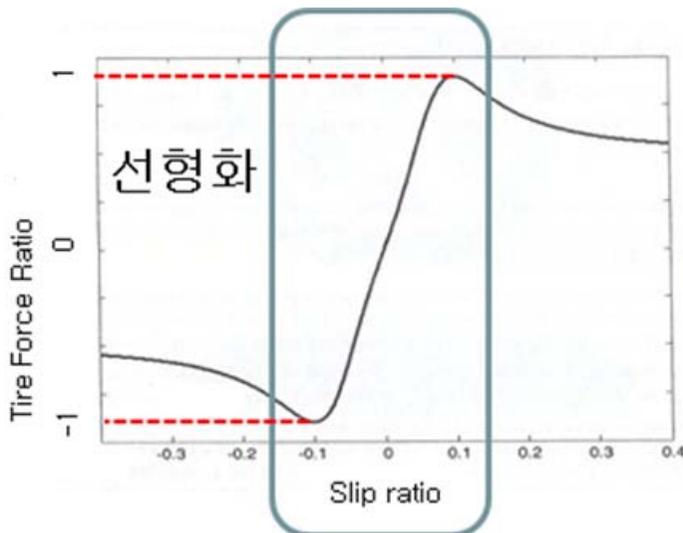


Figure 2.4 Tire force ratio curve

여기서 Slip Ratio와 Tire Force Ratio는 다음과 같이 나타낼 수 있다. [1]

Slip Ratio

$$\sigma_x = \frac{r_{eff}\omega_w - V_x}{V_x} \quad \text{during braking} \quad (2.1)$$

$$\sigma_x = \frac{r_{eff}\omega_w - V_x}{r_{eff}\omega_w} \quad \text{during acceleration} \quad (2.2)$$

Where, r_{eff} : 타이어 반지름

ω_w : 휠 속도

V_x : 차량 속도

Tire Force Ratio

$$\text{Tire Force Ratio} = \frac{\text{Traction Force}}{\text{Maximum tire Force}} \quad (2.3)$$

본 논문에서 타이어 슬립 모델을 이용하기 위하여 가정한 데이터는 Table. 2.1에 나타내었다.

Table 2.1 Data for tire slip model

Slip Ratio	-0.15	-0.1	0	0.1	0.15
Tire Force Ratio	-0.8	-1	0	1	0.8

3. 백워드 시뮬레이션

후륜측 구동모듈의 용량 선정 및 연비 향상을 위한 주행전략 알고리즘을 개발하기 위한 방안으로 백워드 시뮬레이션을 이용하였다. 본 논문에서 사용된 백워드 시뮬레이션은 서울대학교 재생에너지변환연구실(RECL)에서 개발한 OC-SIM의 Dynamic Programming(DP) Solver를 이용하였으며, 앞서 설명한 4WD 하이브리드 시스템을 이 Solver에 적용하였다. (참고문헌)

3.1 Dynamic Programming(DP)

하이브리드 시스템에 사용되는 대표적인 최적화 기반 제어에는 Dynamic Programming(DP), Pontryagin's Minimum Principle(PMP), Equivalent Consumption Minimization Strategy(ECMS)의 세가지 방법이 있다. 본 연구에서는 Dynamic Programming을 이용하여 백워드 시뮬레이션을 수행하였으며 이에 대해 간략히 설명하고자 한다.

최적 제어 이론 중 한가지인 Dynamic Programming은 기본적으로 Richard Bellman의 'Principle of optimality'에 기초하여 구성되며 다음과 같은 원리로 이해할 수 있다.

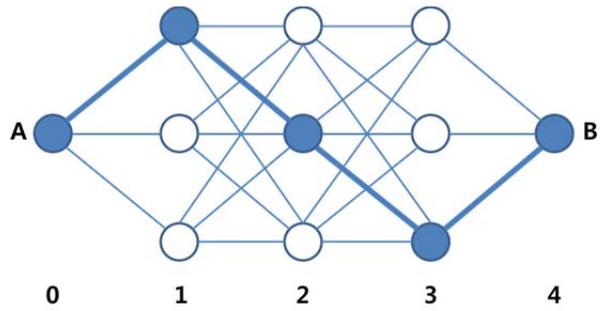


Figure 3.1 Optimal trajectory with several states

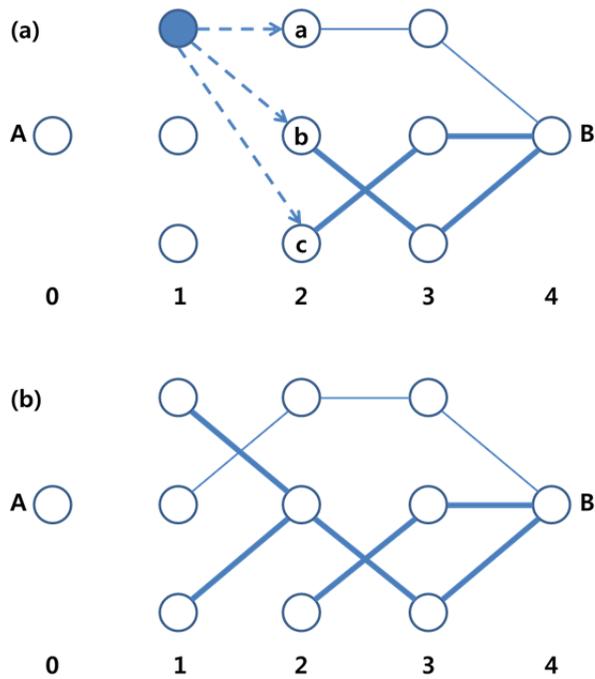


Figure 3.2 Process of making decisions for optimality

*하이브리드 연비 해석을 위한 최적화 기법, 2008

김남욱, 이대홍, 양시우, 박영일, 차석원

Fig. 3.1은 A(0)에서 B(4)로 진행되는 경로 중 각 state에서의 최적 경로를 나타내고 있다. 여기서 굵게 표시된 경로가 최적 경로이다. 만약 단계 2의 각 state에서 B(4)로 가는 최적 경로가 Fig. 3.2의 (a)와 같이 가정해보자. 여기서 단계 2-a에서 B(4)로 가는 경로는 단계 2-b의 경로에 비해 비용이 많이 들며, 단계 2-b, 2-c의 B(4)까지 가는 비용은 같다고 가정한다. 하지만, 이러한 최적의 경로는 단계 0에서 단계 2로 가는 최적 경로와는 관계가 없다. 결국 Fig. 3.2의 (a)와 같은 상황만을 보아서는 단계 2의 a, b, c 모두 가능한 상황이므로 A(0)에서 B(4)까지의 최적 경로를 결정할 수가 없다. 하지만 단계 1에서 B(4)까지의 최적 경로를 각 state에서의 경로를 확인해 보고 이 중 가장 최적으로 판단되는 경로를 선택한다. 단계 2의 각 state에서 B(4)까지의 최적 경로는 이미 결정되었으므로, 단계 1에서 B(4)까지의 최적 경로 또한 Fig. 3.2 (b)와 같이 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 순차적인 연산을 거쳐나가면 Fig. 3.1처럼 최적 경로를 찾을 수가 있다.

이러한 예의 경로 선택은 모든 경로를 비교 때 발생하는 소모적인 연산을 줄일 수 있으며 constraint를 쉽게 적용할 수 있기 때문에 하이브리드 시스템의 최적 연비 해석에 유용하다. [3], [10]

위와 같은 방법으로 하이브리드 시스템에 적용하게 되면, 각 시점에서의 배터리 SOC에 따른 모든 경로의 연료 소비량을 계산한 후에 초기 SOC와 말기 SOC의 값을 지정해 줌으로써 Dynamic

Programming 방법이 적용 가능한 최적화 문제로 나타낼 수 있다.
 이를 나타내면 Fig. 3.3과 같다.

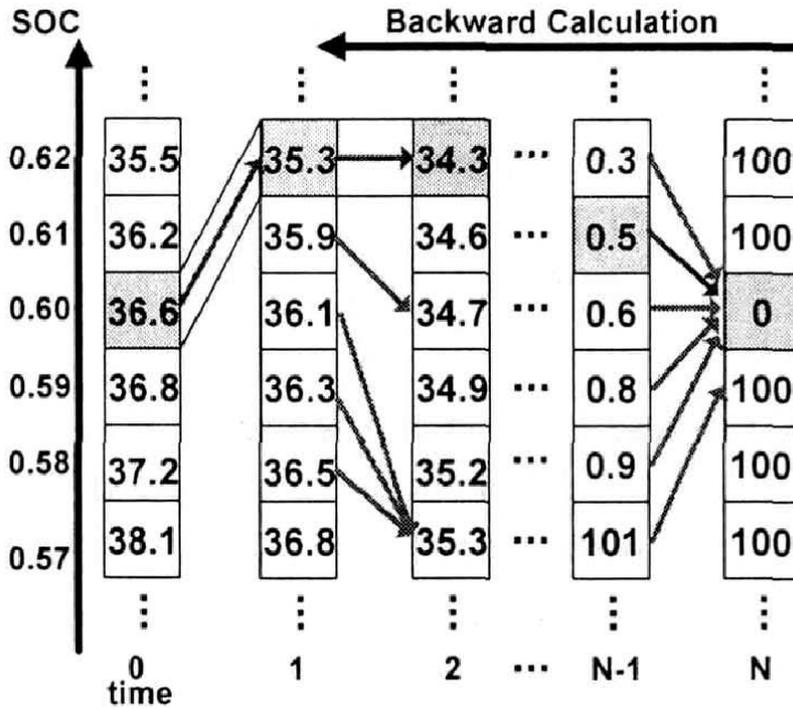


Figure 3.3 Process for choosing an optimal trajectory

*하이브리드 연비 해석을 위한 최적화 기법, 2008

김남욱, 이대홍, 양시우, 박영일, 차석원

Dynamic Programming을 수식으로 표현하면 다음과 같다. 총 단계수가 N 개이며, k 단계에서의 상태 변수를 $x(k)$, 제어 변수를 $u(k)$ 로 표현할 경우 최적화 문제는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\min_{u(k)} \sum_1^N L(x(k), u(k)) \quad (3.1)$$

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)) \quad (3.2)$$

k 단계에서 최종 단계까지의 $x(k)$ 의 최적 경로를 표현하면 다음과 같다.

$$J_{k,N}^*(x(k)) = \min\{L(x(k), u(k)) + J_{k+1,N}^*(x(k+1))\} \quad (3.3)$$

이와 같은 경로 최적화 문제는 백워드 방식으로 해석이 되며, 이를 통해 Dynamic Programming를 이용한 경로 최적 기법 및 제어 문제의 해법들이 유도된다. [2]

3.2 백워드 시뮬레이터

본 논문에서는 Dynamic Programming(DP) 기반의 백워드 시뮬레이터인 OC-SIM(서울대학교 재생에너지변환연구실)을 이용하였고, 앞서 설명한 두가지 동력계 시스템(등가 4WD 하이브리드 시스템, 전/후륜 4WD 하이브리드 시스템)을 구축하여 상기 시뮬레이터의 Dynamic Programming Solver에 적용하였다. 시뮬레이터의 구성은 Fig. 3.4 와 Fig. 3.5에 나타내었다. [4], [11]



Figure 3.4 Main figure and select panel of the OC-SIM

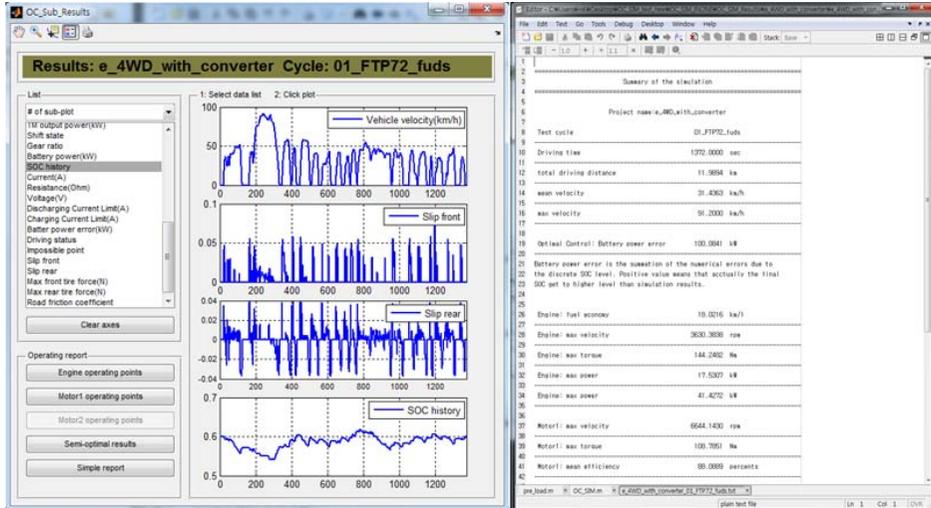


Figure 3.5 Results panel of the OC-SIM

3.3 백워드 시뮬레이션 수행

본 논문에서 시뮬레이션을 수행하기 위하여 FTP-72 사이클을 사용하였으며 이는 Fig. 3.6에 나타내었다.

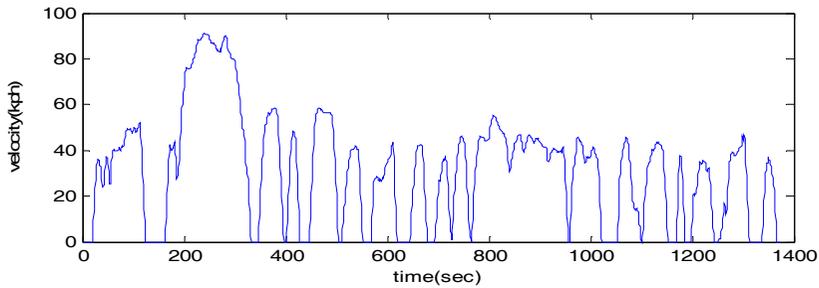


Figure 3.6 FTP-72 cycle

백워드 시뮬레이션은 후륜측 감속비 선정 및 주행전략 알고리즘을 개발하기 위하여 수행되었고 이에 따른 결과는 4장 및 5장에 첨부하였다. 시뮬레이션을 수행하기 위해 사용한 전륜측 구동 모듈의 데이터는 다음과 같다. 엔진은 2000cc 급으로써 Fig. 3.7과 같은 정상상태 엔진특성곡선(Engine Map)에 의한 근사화 된 모델을 사용하였으며 변속기의 기어비는 Table 3.1에 나타내었다. 여기서 엔진특성곡선의 각 라인은 연료소모량(g/s)을 나타낸다. 본 논문에서는 AMT(Automated Manual Transmission)를 사용하는 시스템을 고려하였지만, 만일 전륜 구동 모듈이 AT(Automatic transmission)를 사용하는 경우에는 Fig. 3.8과 같은 엔진과 토크컨버터의 결합 모델을 사용할 수가 있다. 결합 모델에서 사용된 토크컨버터의 특성은 Fig. 3.9에 나타내었다.

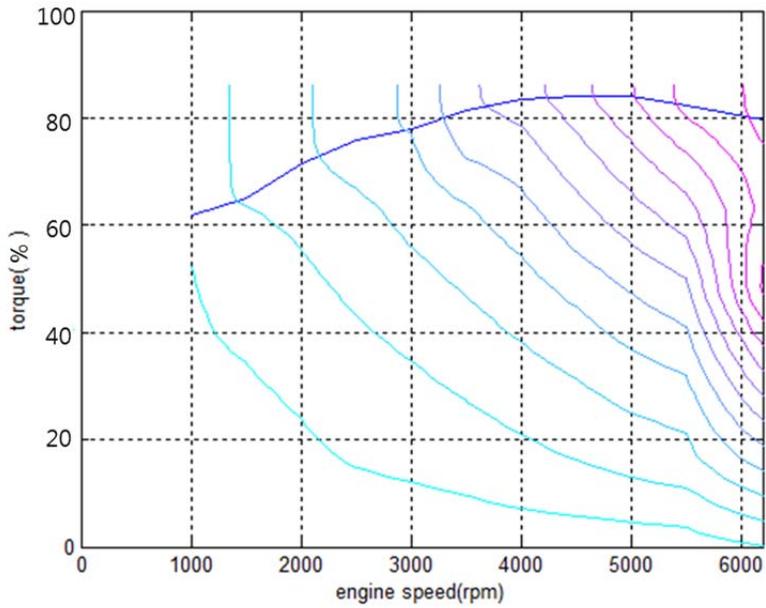


Figure 3.7 Engine map

Table 3.1 Gear ratio of 4WD hybrid vehicle

구분	단수						최종감속비
	1	2	3	4	5	6	
변속비	4.162	2.575	1.772	1.369	1.000	0.778	3.648

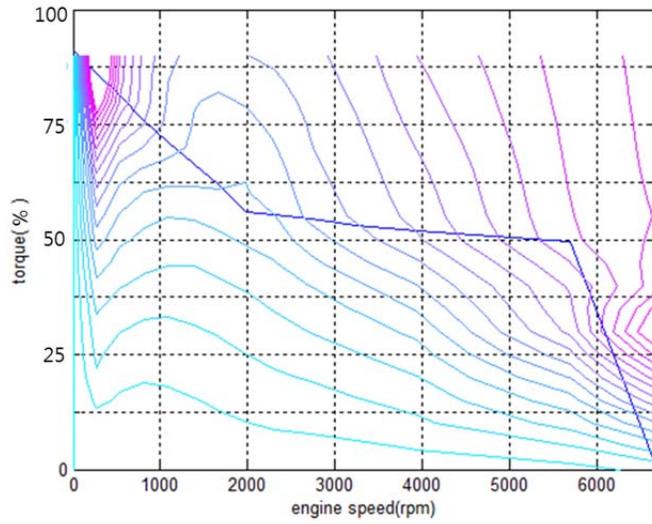


Figure 3.8 Integrated engine map

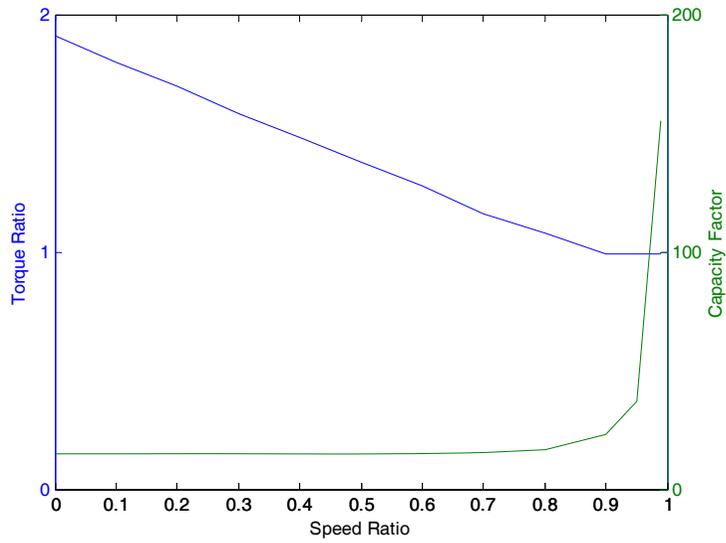


Figure 3.9 Characteristics of torque converter

4. 후륜측 구동모듈 용량 선정

4WD 하이브리드 차량은 엔진과 모터의 동력을 이용하여 구동하는 차량으로써 설계시 엔진과 모터의 용량이 적절하게 선정이 되지 않으면 높은 효율을 이끌어 낼 수가 없다. 그러므로 하이브리드 차량의 목적에 따라 다음 세가지로 분류하는 형태의 용량을 선정해야 한다. 첫 번째는 파워 어시스트형(power assist type)으로써 엔진의 동력이 주 동력원이며 모터는 엔진을 보조하는 역할을 한다. 두 번째는 거리 증대형(range extended type)으로써 모터의 용량이 크며 엔진은 주로 발전기를 구동하는데 이용된다. 세 번째는 표준형(standard type)으로써 엔진과 모터가 비슷한 용량을 갖는다. 본 논문에서는 4WD 하이브리드 시스템을 파워 어시스트형으로 선정하여 엔진의 용량은 Conventional 차량의 수준으로 선택한 후 후륜측 구동모듈인 모터와 감속기의 용량 선정을 수행하였다. [5]

4.1 후륜측 모터의 용량 선정

모터의 용량은 연비 개선 측면으로 접근함으로써 회생제동을 고려하여 모터의 용량을 선정할 수 있다. 하이브리드 시스템에서 회생제동에 의한 연비 개선량이 전체 연비 개선량의 약 40%로써 모터의 용량은 회생제동의 효율을 최대한 높일 수 있도록 선정되어야 한다. 연구대상 차량의 무게는 1800 kg으로써 이에 따른 FTP-72 사이클에서의 제동 동력 분포는 Fig. 4.1과 같다.

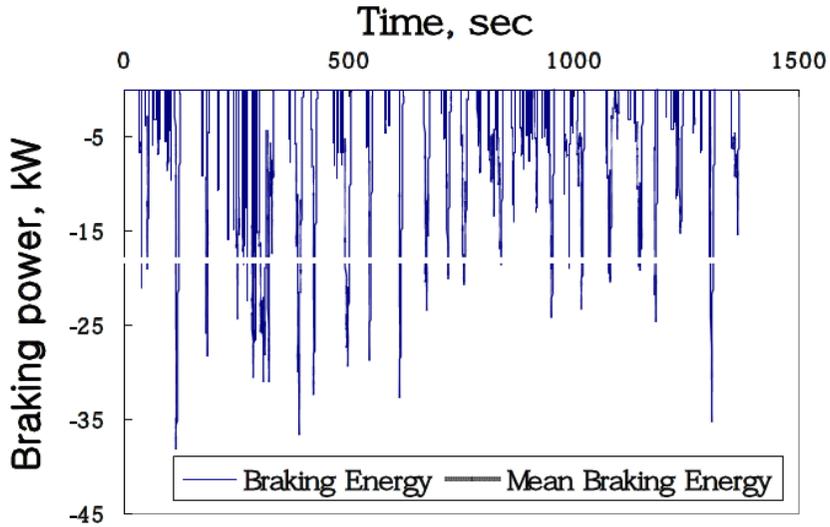


Figure 4.1 Braking power for FTP-72

*4륜구동 하이브리드 차량의 모터용량선정과 운전전략, 2002

김동현

여기서 감속시 유효 제동 영역의 범위에서는 회생제동만으로 제동하여 회생 제동 효과를 극대화시키고 최대 유효 제동 동력보다 큰 제동 동력이 필요할 때에는 추가로 유압 제동을 수행하여 요구 제동 동력을 만족시키게 함으로써 모터의 용량을 30 kW로 선정이 가능하다. [5]

4.2 후륜측 감속비의 용량 선정

후륜측 감속비의 용량 선정은 두가지 방법으로 고려해 볼 수 있다. 첫 번째는 앞서 모터의 경우와 마찬가지로 연비 개선 측면이며 두 번째는 차량 성능을 고려하는 방법이다. 먼저 첫 번째 방법을 적용하면 모터의 효율이 좋은 작동 지점을 사용하기 위하여 적절한 감속비를 선택하여야 한다. 이를 결정하기 위한 방법으로 백워드 시뮬레이션을 이용하였으며 시뮬레이션 수행을 위해 사용된 차량데이터는 앞서 설명한 전륜측 구동계 데이터와 30 kW급에 해당되는 모터 및 이를 충분히 커버할 수 있는 배터리 내부저항 모델을 이용하였다. 모터의 사양 및 효율은 Fig. 4.2에 나타내었고 감속비를 5~12까지 변화시켜 가면서 백워드 시뮬레이션을 수행해보았다. 여기서 차량의 무게는 1800 kg, 타이어 동반경은 0.337 m, 전면면적은 2.4 m², 공기저항계수는 0.456, 구름저항계수는 0.009를 이용하였으며, 초기 SOC와 말기 SOC는 0.6으로 설정하였다. 그 결과는 Table 4.1과 같다.

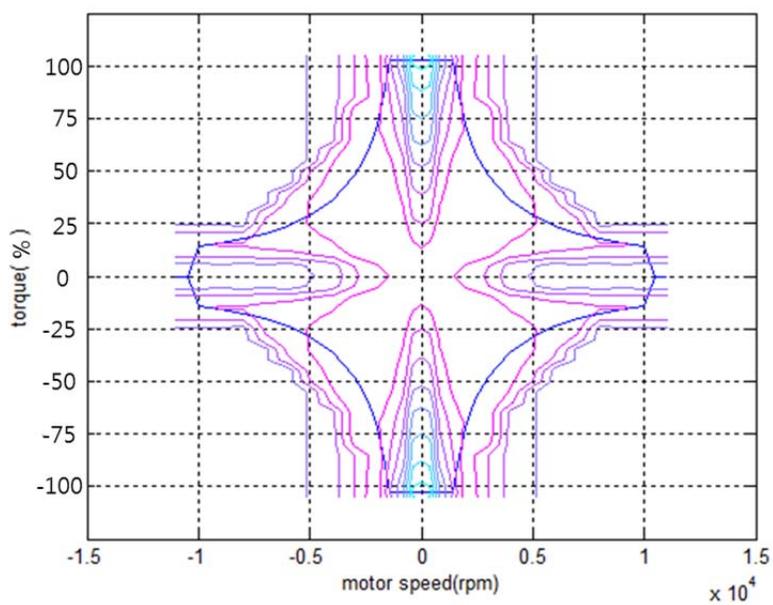


Figure 4.2 Efficiency map of the motor

Table 4.1 Fuel economy according to reduction gear ratio

0.6 to 0.6 (SOC)	
감속비	연비 (km/L)
5	24.93
5.5	25.12
6	25.24
6.5	25.27
7	25.28
7.5	25.26
8	25.18
8.5	25.1
9	24.97
9.5	24.87
10	24.71
10.5	24.59
11	24.45
11.5	24.32
12	24.15

연비 개선 측면을 고려한 결과로써는 후륜측 감속비가 7인 경우에 연비가 가장 좋게 나왔다. 하지만 이를 그대로 적용하게 되면 등판 성능이나 EV 모드 주행시의 최고속도 등과 같은 차량 성능면에서 문제가 발생할 수 있으므로 두 번째 방법인 차량 성능을 고려해 보아야 한다. 이와 같은 사항을 고려하기 위해서는 차량 동역학적인 주행력과 저항력을 비교함으로써 감속비를 선택할 수가 있다. 주행력은 모터의 토크가 감속기를 지나 바퀴에 전달되는 힘으로 계산이 가능하며, 저항력은 구름저항, 공기저항, 등판저항의 합으로써 나타낼 수 있다. 이를 차량 동역학적인 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$m\ddot{x} = ma = F_{trac} - (F_{drag} + F_{roll} + F_{grade}) \quad (4.1)$$

$$F_{drag} = \frac{1}{2}\rho C_d A v^2 \quad (4.2)$$

$$F_{roll} = fmg\cos\theta \quad (4.3)$$

$$F_{grade} = mgsin\theta \quad (4.4)$$

여기서, ρ 는 공기의 밀도, C_d 는 공기저항계수, A 는 차량의 전면적, v 는 차량의 속도, f 는 구름저항계수, m 은 차량의 질량, θ 는 경사각이다. 이러한 차량 동역학적 모델로부터 모터의 주행력과 차량의 저항력을 감속비에 따라 Fig. 4.3과 같이 나타낼 수 있다.

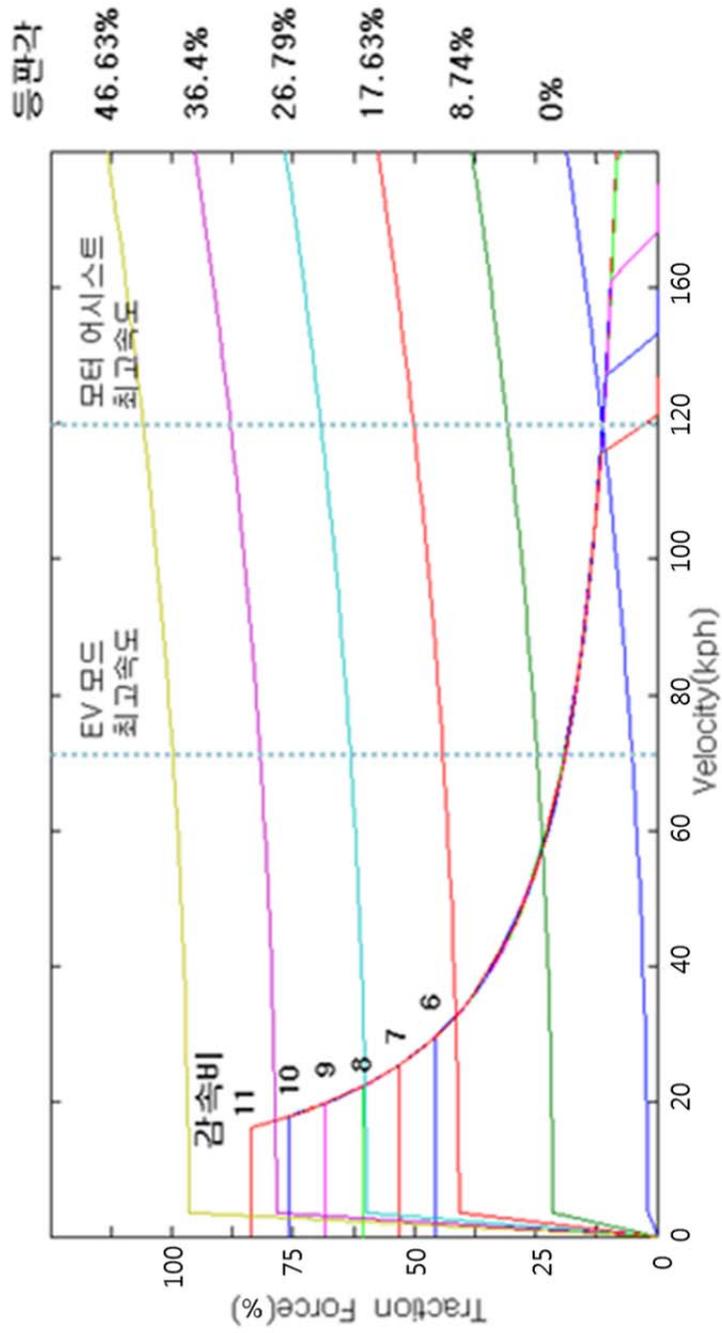


Figure 4.3 Traction force and resistance force

차량 성능을 고려할 경우 Fig. 4.3과 같이 세가지 사항을 고려할 수가 있다. 첫 번째는 등판 능력이며, 두 번째는 EV 모드에서의 최고 속도, 마지막으로 모터가 엔진의 파워를 어시스트가 가능한 최고 속도이다. 먼저 EV 모드 최고 속도(70 kph)를 고려해보면 그래프에 나타난 모든 감속비가 만족하는 것을 볼 수 있다. 하지만 모터 어시스트 최고 속도를 고려해보면 10 이하의 감속비를 가지는 경우에 적당하며, EV 모드에 주행 가능한 등판 저항을 20%로 고려하면 9이상의 감속비를 선택하는 것이 좋다. 그러므로 9~10 사이의 감속비 중 가장 연비가 좋은 감속비 9를 선정할 수가 있다.

5. 연비 향상을 위한 주행전략 알고리즘

5.1 백워드 시뮬레이션 결과 분석

본 논문에서는 연비 향상을 위한 주행전략 알고리즘을 개발하기 위해서 백워드 시뮬레이션의 결과를 이용하였다. 백워드 시뮬레이션은 앞서 설명한 사양의 데이터를 이용하여 수행하였으며 결과는 다음과 같다.

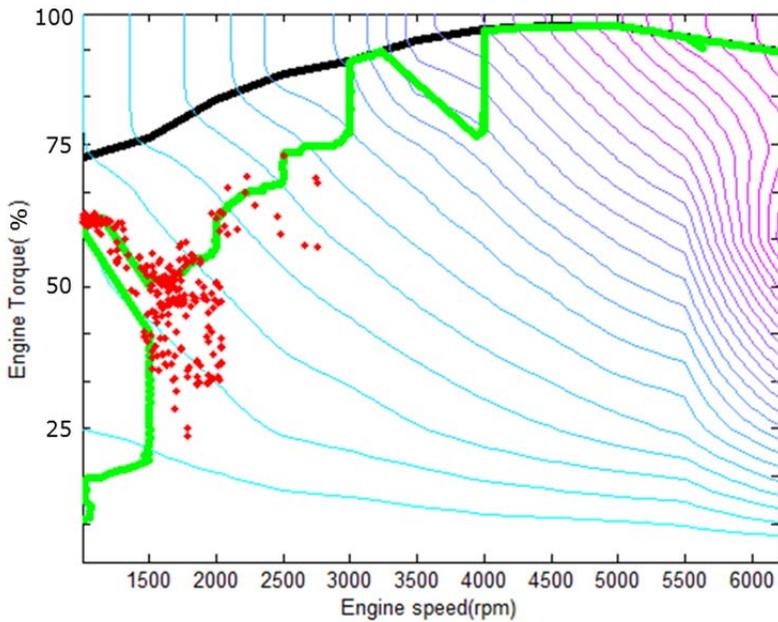


Figure 5.1 Engine operating points

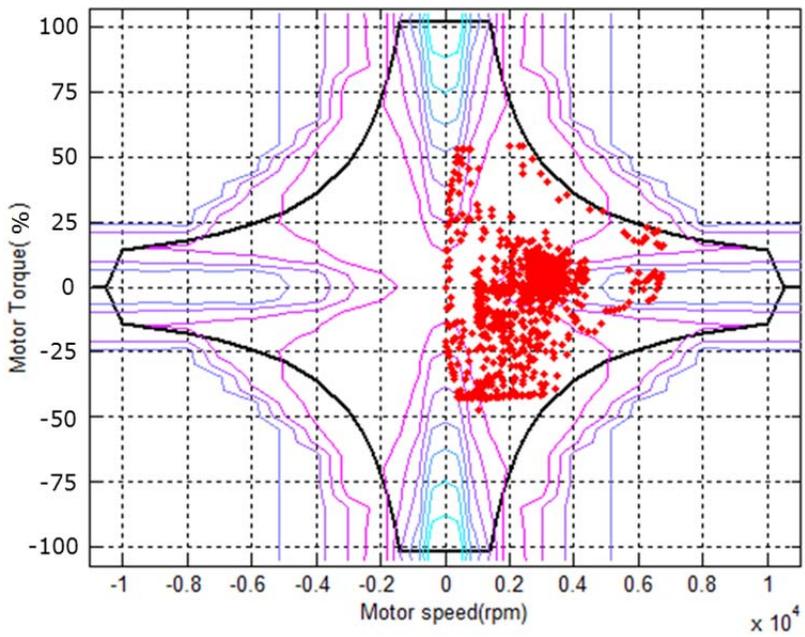


Figure 5.2 Motor operating points

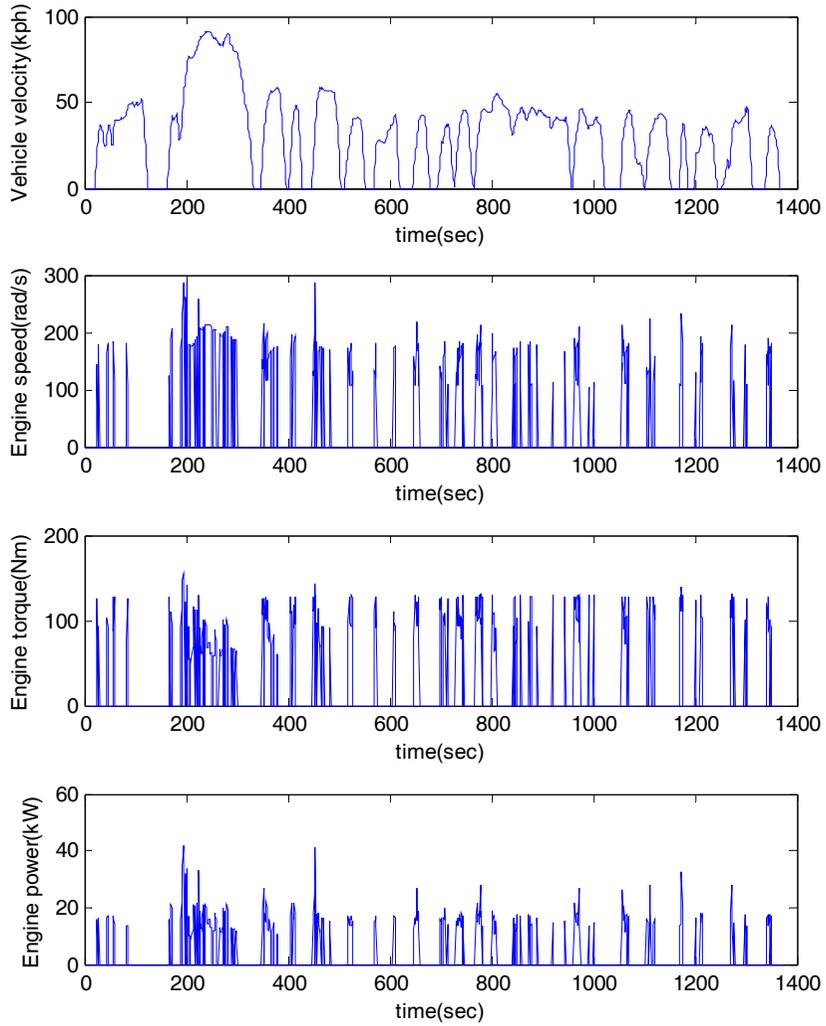


Figure 5.3 Backward simulation results

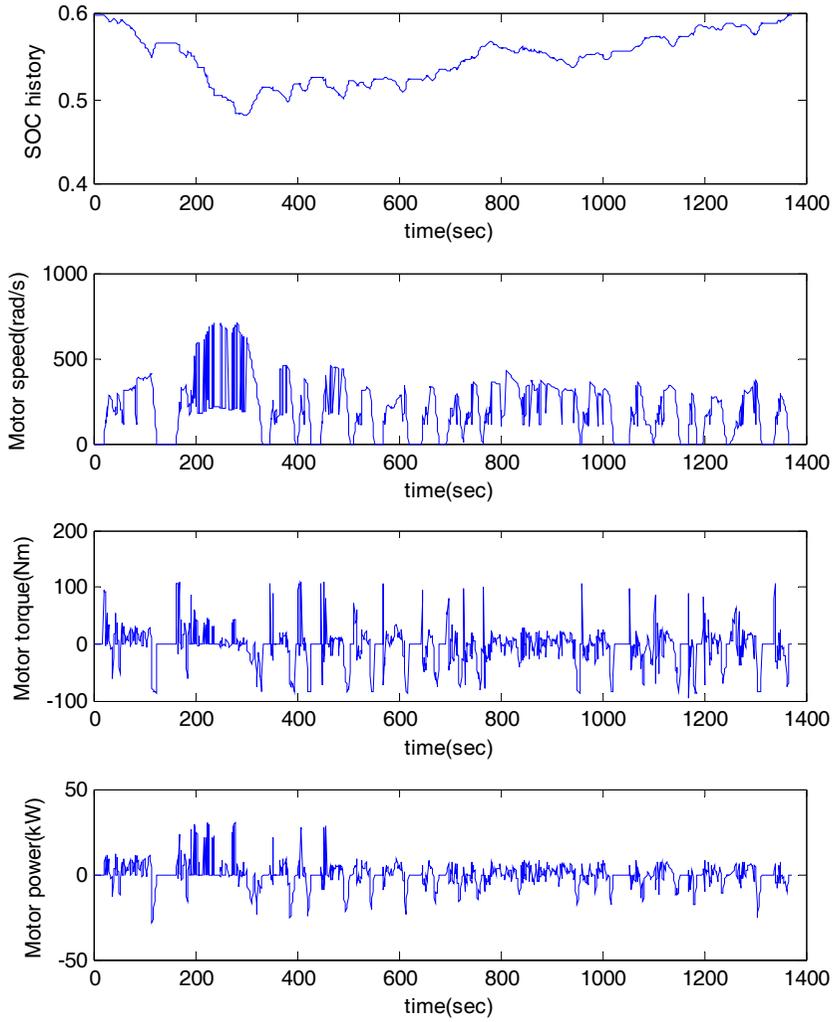


Figure 5.4 Backward simulation results

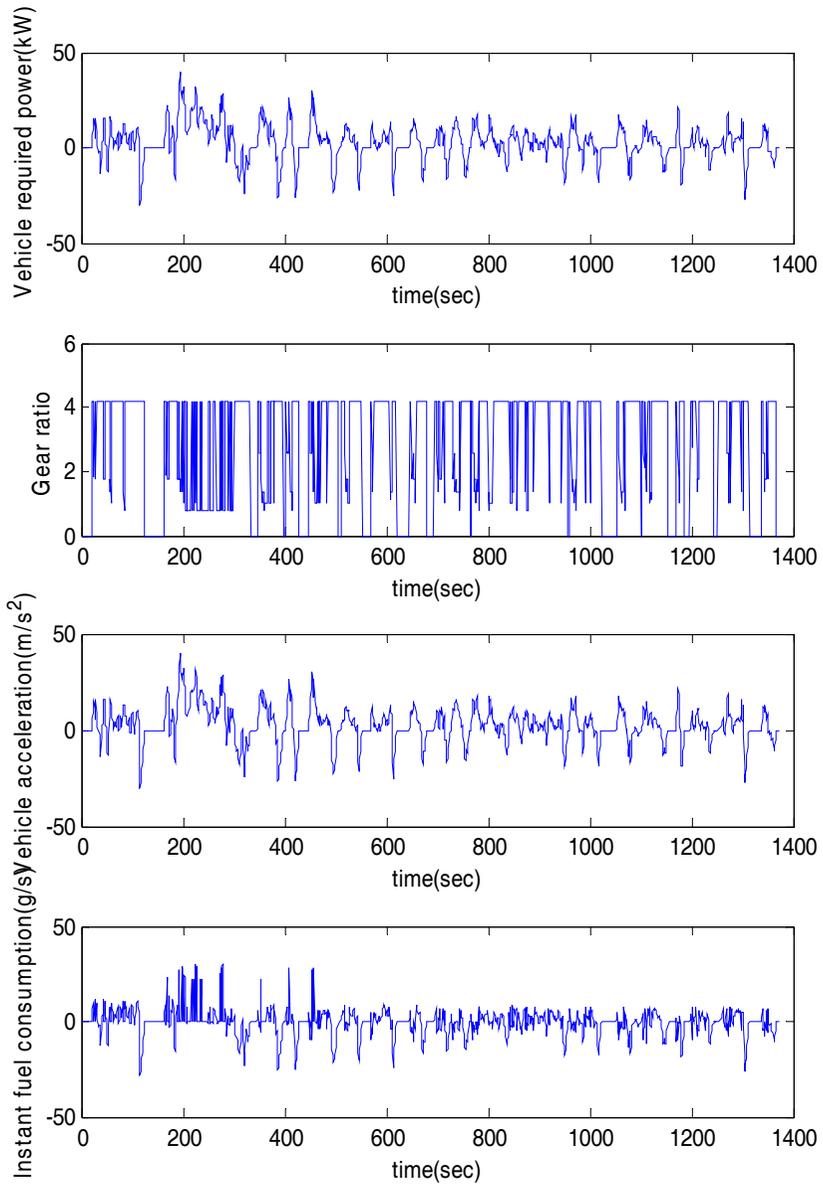


Figure 5.5 Backward simulation results

본 논문에서는 Fig. 5.1~5의 데이터 중에서 차량 요구 파워를 기준으로 모터 및 엔진의 사용 구간을 분석하여 룰베이스(rulebase) 기반의 주행전략 알고리즘을 적용하였다. 각 시점에 대한 속도 별 차량의 요구파워를 나타내면 Fig. 5.6과 같다.

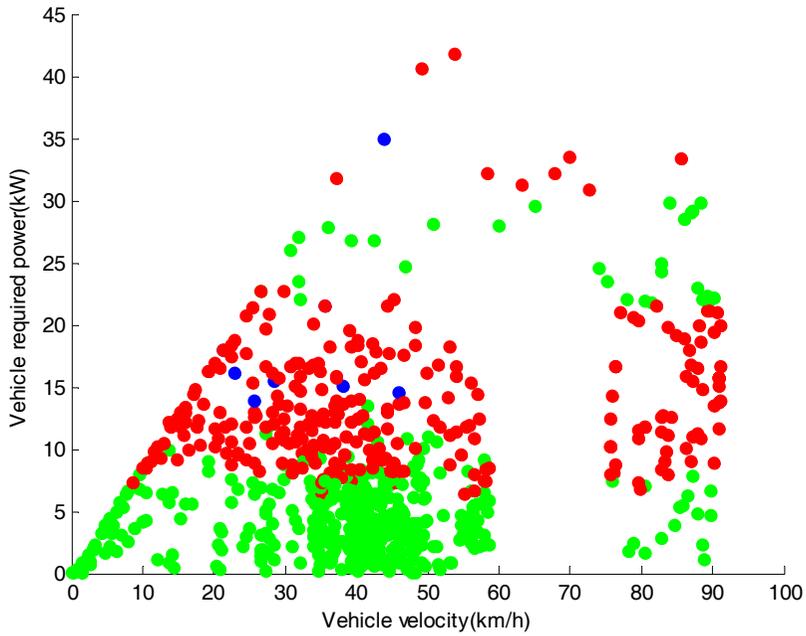


Figure 5.6 Required power plot for 4WD hybrid vehicle

여기서 파란색 점은 하이브리드 모드 작동지점으로써 엔진과 모터의 출력이 0보다 큰 지점이고, 초록색 점은 EV 모드 작동지점으로써 모터의 출력만이 차량을 구동하는데 사용되며 이와는 반대로 빨간색 점은 엔진 모드 작동지점으로써 엔진의 출력만이 사용된다. Fig. 5.6의 결과로부터 차량의 요구 파워를 기준으로 엔진과 모터 사용 영역을 구분할 수가 있다. 하지만 이는 이상적인 상황에서의 결과이므로 모터의 정격 출력, EV 모드 최고 속도 및 모터 어시스트 최고 속도 세가지 상황을 고려하여 Fig. 5.7과 같이 EV 모드, 엔진 모드, 하이브리드 모드의 요구 파워에 따른 영역을 설정할 수가 있다. 본 연구에서 사용한 모터의 정격 출력은 15 kW, EV 모드 최고 속도는 70 kph, 모터 어시스트 최고 속도는 120 kph 이다.

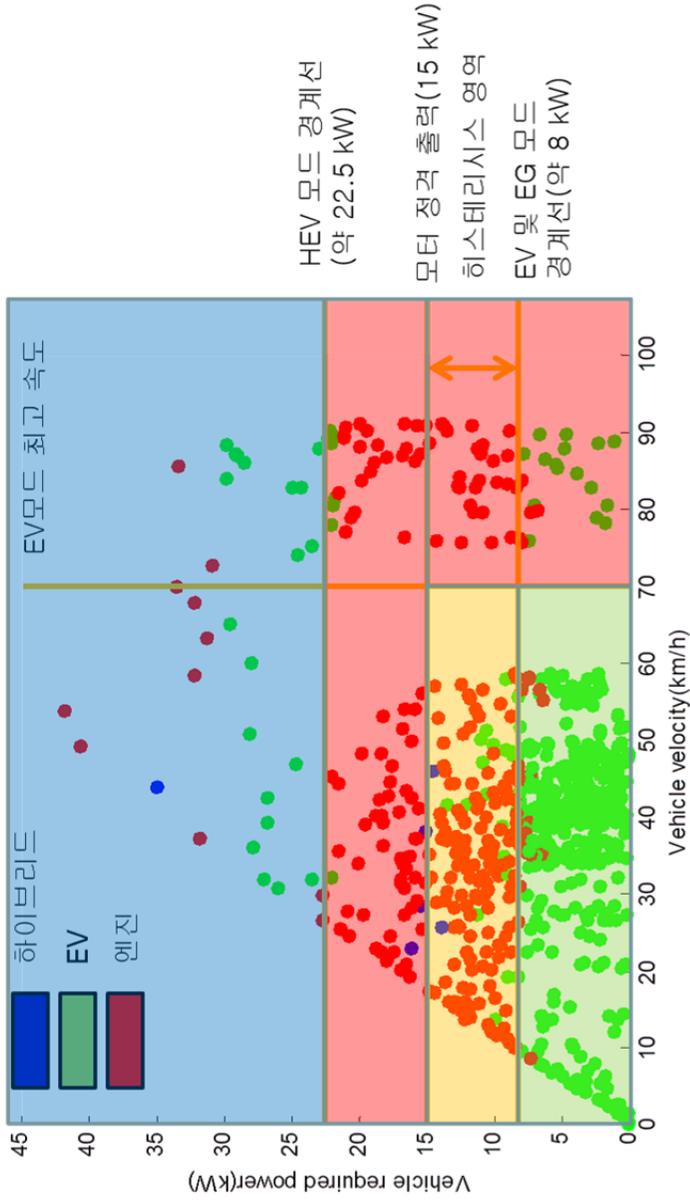


Figure 5.7 EV, engine and hybrid mode Areas

Fig. 5.7에서 하이브리드 모드 영역은 파란색으로, 엔진 모드 영역은 빨간색으로, EV 모드 영역은 초록색으로, 히스테리시스(hysteresis) 영역은 주황색으로 나타내었다. 먼저 백워드 시뮬레이션 결과에 나타나듯이 EV 모드 영역은 0~8 kW, 엔진 모드 영역은 15~22.5 kW로 선정할 수 있다. 여기서 엔진 모드와 EV 모드의 중간 영역인 히스테리시스 영역은 엔진과 EV 모드 구간이 같이 존재하게 되는 영역으로써 8 kW부터 15 kW 구간에 나타난다. 이 영역은 EV 모드 혹은 엔진 모드의 효율이 비슷하게 나타나는 구간으로 이전 주행 모드의 상태를 유지시키는 역할을 하게 된다. 예를 들면, 차량 속도 30 kph에서 5 kW의 출력을 요구하는 주행 중에 이를 10 kW의 출력을 내게 되면 EV 모드가 유지되며, 이와는 반대로 20 kW의 출력에서 10 kW로 출력을 감소시키면 엔진 모드가 유지 된다. 앞서 말한 EV 영역 외에도 22.5 kW 이상 구간에 EV 모드 영역이 존재하지만, 이는 모터의 정격 출력을 초과하는 구간으로써 모터만 작동할 경우 일정한 출력을 낼 수가 없으므로 22.5 kW 이상 구간을 하이브리드 구간으로 선정하였다. 그리고 EV 모드 최고 속도 제한으로부터 저출력(0~8 kW) 구간에 엔진 모드를 선정하였다. 또한 FTP-72 사이클의 특성상 120 kph 이상의 고속 구간이 존재하지 않으므로 Fig. 5.7에는 나타나있지 않지만, 모터 어시스트 최고 속도를 고려하여 120 kph 이상의 구간에서는 모든 출력에서 엔진 모드를 사용하게 된다.

5.2 주행 전략 조건

백워드 시뮬레이션 결과 분석을 통한 주행 모드 영역 선정 외에도 현실적으로 주행 전략을 적용하기 위하여 주행모드 대기 시간 및 SOC 범위에 따른 배터리 사용 제한 조건을 추가하여 주행 전략을 구성하였다. 먼저 주행모드 대기 시간을 적용함으로써 Fig. 5.8과 같이 백워드 시뮬레이션 상에 나타나는 잦은 주행모드의 변환을 억제시킬 수 있으며, SOC에 상태에 따라 모터의 사용 여부를 결정함으로써 배터리의 방전 및 과충전을 방지할 수 있다. Fig. 5.8에서의 각 모드에 대한 설명은 Table 5.1에 나타내었다.

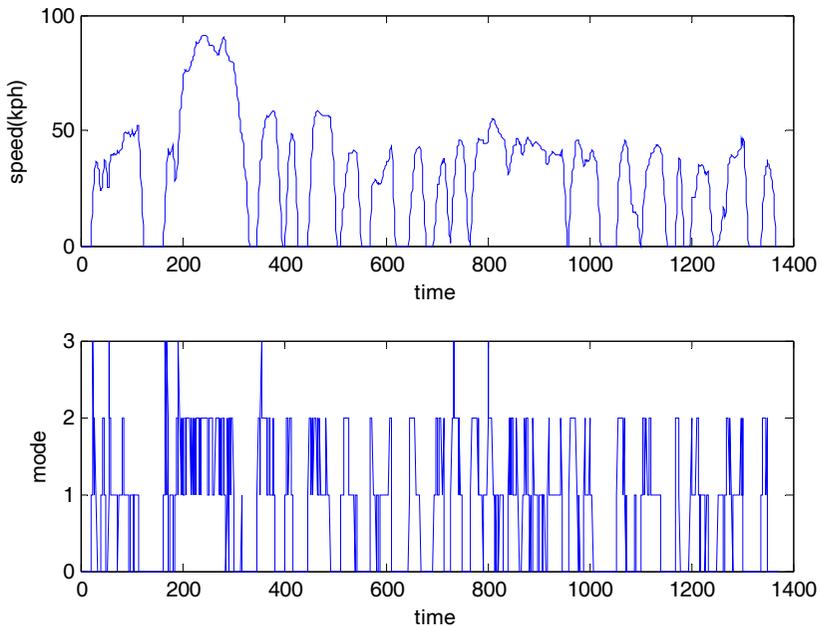


Figure 5.8 Backward simulation result of driving mode

Table 5.1 Vehicle mode

차량모드	내용
0	모터 출력 ≤ 0 , 엔진 출력 ≤ 0 정지 및 회생제동
1	모터 출력 > 0 , 엔진 출력 ≤ 0 EV 모드
2	모터 출력 ≤ 0 , 엔진 출력 > 0 엔진 모드
3	모터 출력 > 0 , 엔진 출력 > 0 하이브리드 모드

배터리 SOC는 Low SOC(0.4 이하), Mid SOC(0.4~0.6), High SOC(0.6 이상)과 같이 세가지 구간으로 나누어서 배터리가 일정수준(0.4~0.6)으로 유지될 수 있도록 주행전략을 구성하였다. 앞서 말한 주행 전략 조건들을 모두 나열하면 Table 5.2와 같다.

Table 5.2 Conditions of cruising control algorithm

주행전략조건	내용
모터 사용 가능 범위	모터 어시스트 : 120 kph 이하 EV 모드 : 70 kph 이하
주행모드 대기시간	5초
EV, 엔진, 하이브리드 모드 영역	EV 모드 : 0~8 kW 엔진 모드 : 15~22.5 kW 하이브리드 모드 : 22.5 kW 이상
히스테리시스 영역	8~15 kW
SOC 범위	Low SOC : 0.4 이하 Mid SOC : 0.4~0.6 High SOC : 0.6 이상

5.3 주행 전략

EV 모드는 모터만이 차량을 구동시키는데 이용이 되며 배터리 SOC 상태에 따라 엔진의 출력이 배터리를 충전하게 된다. Low SOC를 기준으로 SOC 상태가 0.4 이하에서는 엔진이 배터리를 충전시키게 되며, 0.4 이상에서는 엔진이 사용되지 않는다. 또한 EV 모드 최고속도 제한 조건에 따라 70 kph 이상인 구간에서는 EV 모드의 구동이 제한된다.

엔진 모드는 로드레벨링(load-leveling) 전략에 의해 구동된다. (참고문헌) 여기서 로드레벨링 전략은 엔진의 운전점을 고효율 지점에서 사용되도록 하는 방법으로써 BSFC(brake specific fuel consumption)의 효율이 좋은 영역에서 엔진을 사용한다. 차량의 요구 출력에 따라 엔진은 주로 OOL(optimal operating line) 상에서 작동하게 되며 여유 동력은 배터리를 충전시키는데 사용된다. [7]

하이브리드 모드는 배터리 SOC의 상태가 0.6 이상인 경우에는 모터의 출력이 우선시 사용되어 부족한 동력은 엔진이 보조하게 되며, 배터리 SOC의 상태가 0.6 이하인 경우에는 로드레벨링 전략에 의해 엔진의 출력은 22.5 kW로 고정되며 부족한 동력은 모터가 보조하게 된다.

6. 포워드 시뮬레이션

앞 장에서 개발한 주행전략의 유효성을 입증하기 위하여 포워드 시뮬레이션을 수행하였다. 4WD 하이브리드 차량의 포워드 시뮬레이터와 Conventional 4WD 차량의 포워드 시뮬레이터를 각각 구성하여 연비 향상율을 측정해 보았다.

6.1 포워드 시뮬레이터 구성

포워드 시뮬레이터의 구성은 매틀랩(Matlab) 시뮬링크(Simulink)의 Simdriveline Tool을 이용하여 개발하였으며, Fig. 6.1과 같다. 4WD 하이브리드 차량의 동력계는 배터리, 발전기, 모터, 엔진, 클러치, 변속기, 후륜축 감속기 및 차량 모델로 이루어져 있으며, 제어부는 HCU(Hybrid Control Unit)과 TCU(Transmission Control Unit)으로 이루어져 있다. 또한 운전자 모델을 구성하여 차량의 거동을 실제 환경과 유사하게 나타내었다. Conventional 4WD 차량의 시뮬레이션은 배터리, 모터 및 발전기의 작동을 제한함으로써 시뮬레이션을 수행할 수가 있다. [8]

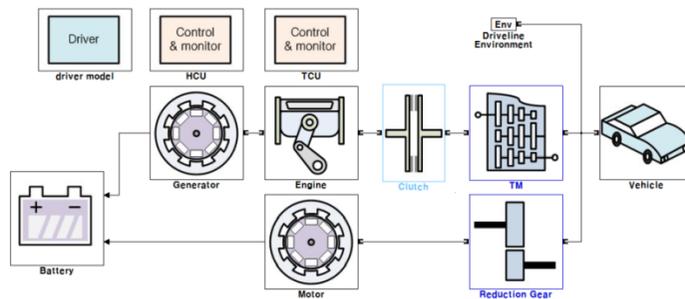


Figure 6.1 Forward simulator for 4WD Hybrid Vehicle

6.2 포워드 시뮬레이션 결과

4WD 하이브리드 차량의 포워드 시뮬레이션 결과를 Fig. 6.2~4에 나타내었다. 먼저 차량의 속도가 FTP-72 사이클을 잘 추종하고 있으며, 그에 따른 요구 파워 및 엔진과 모터의 출력 토크를 살펴 볼 수 있다. 백워드 시뮬레이션의 결과와 비교해 보았을 때 엔진의 사용 영역이 줄어들었지만, 이는 과도한 주행 모드의 변환을 방지하기 위한 주행 전략 조건에 따른 결과로써 포워드 시뮬레이션의 결과가 주행 전략을 잘 따라가고 있음을 알 수 있다. 주행 모드 변환 횟수는 Fig. 6.5에 나타내었고 백워드 시뮬레이션의 변환 횟수에 비해 줄어든 것을 볼 수 있다. 그리고 시뮬레이션의 초기 SOC를 0.55로 설정하여 말기 SOC가 0.549로써 일정하게 유지되는 상황을 나타냈다. 이로써 SOC 변화에 따른 연비 오차를 최소한으로 줄일 수 있었다. 또한 SOC의 상태가 0.4에서 0.6 이내의 범위에서 활용됨으로써 SOC 조건에 따른 주행 전략을 잘 추종하고 있음을 볼 수 있다. 최종적으로 주행 전략에 따른 4WD 하이브리드 차량의 성능을 나타내기 위한 지수로써 Conventional 4WD 차량과 4WD 하이브리드 차량의 연비 비교 결과를 Fig. 6.6에 나타내었다. 4WD 하이브리드 차량의 연비가 20.71 km/L로써 Conventional 4WD 차량의 연비인 15.31 km/L 비해 35.3 %의 향상률을 보였다.

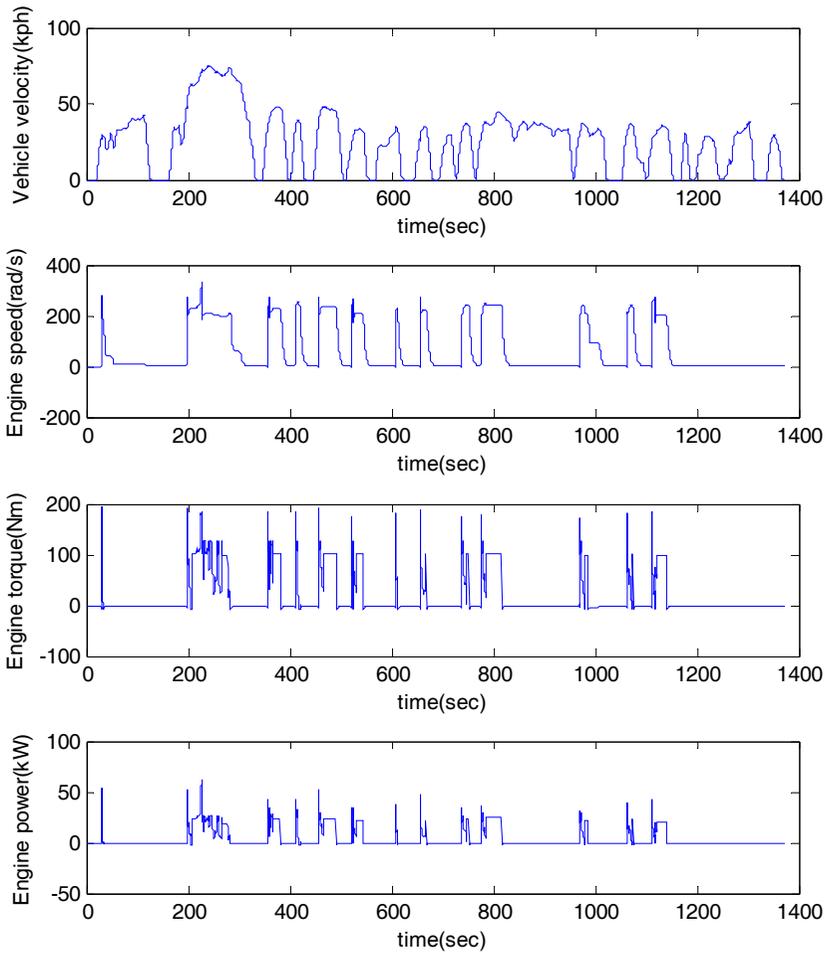


Figure 6.2 Forward simulation results

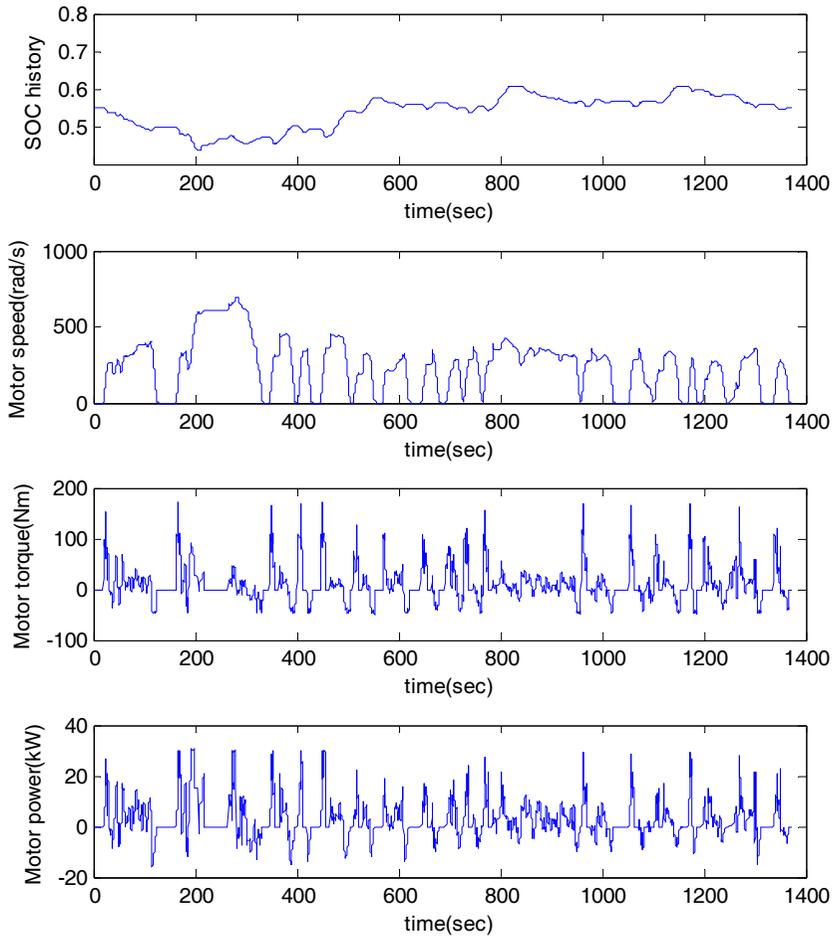


Figure 6.3 Forward simulation results

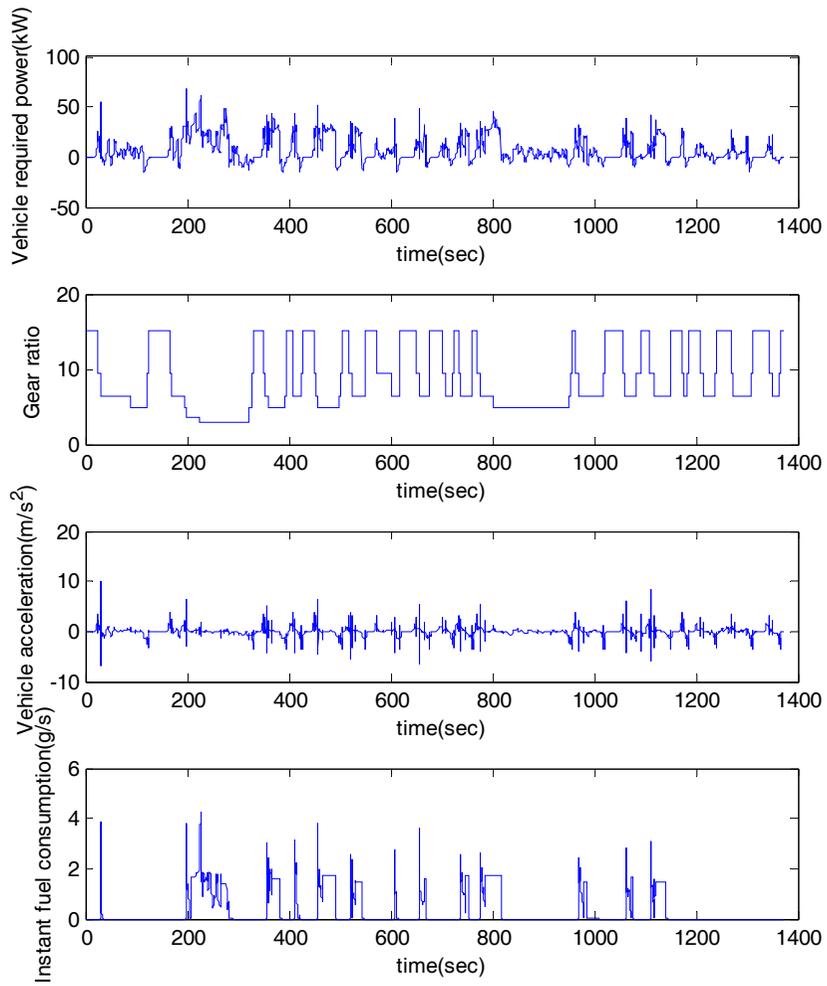


Figure 6.4 Forward simulation results

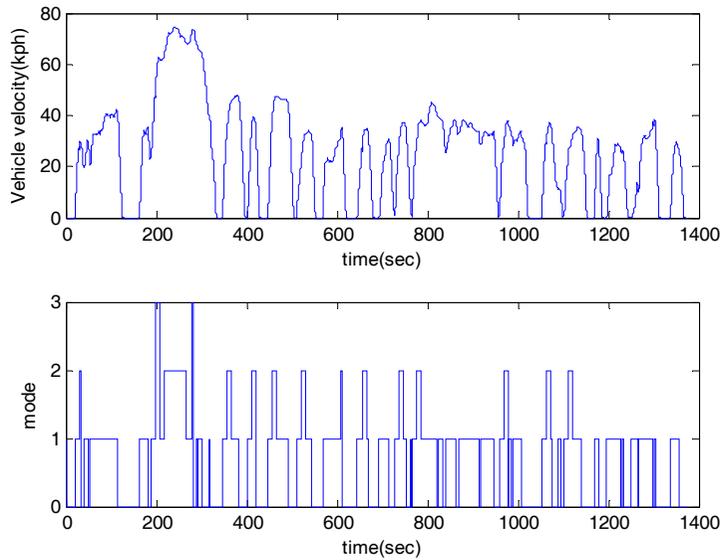


Figure 6.5 Forward simulation result of driving mode

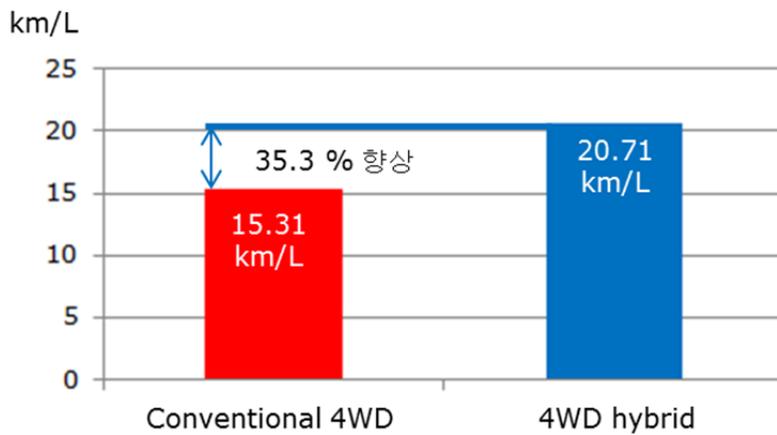


Figure 6.6 Comparison of fuel economy between 4WD hybrid vehicle and conventional 4WD vehicle

7. 결 론

본 논문에서는 4WD 하이브리드 시스템에 대하여 분석하고 연비를 향상시키기 위한 주행 전략 개발 방안으로써 백워드 시뮬레이션을 이용하였다. 또한 4WD 하이브리드 차량의 전륜 구동 모듈은 Conventional 차량의 구동 모듈의 사양으로 가정함으로써 후륜측 구동 모듈(모터 및 감속기)의 용량을 선정하는 방법에 대해 제시하였다. 마지막으로 주행 전략의 유효성을 입증하기 위하여 4WD 하이브리드 차량과 Conventional 4WD 차량의 포워드 시뮬레이터를 구성하여 연비 비교를 수행하였다. 세부적인 연구 결과는 아래와 같다.

- 1) 백워드 시뮬레이션을 수행하기 위한 4WD 하이브리드 시스템을 두가지 방법으로써 모델링 하였다. 첫 번째는 등가 4WD 하이브리드 시스템으로써 타이어의 슬립을 무시한 모델이며, 두 번째는 전/후륜 4WD 하이브리드 시스템으로써 타이어의 슬립과 전/후륜의 토크 분배를 고려한 모델이다.
- 2) 백워드 시뮬레이션을 수행하기 위한 방법으로 다이내믹 프로 그래밍을 이용하였으며, 각 동력계 단품의 데이터는 준정적 성능모델(엔진맵, 모터효율맵 등)로 구성하였다.
- 3) 후륜측 구동 모듈의 용량을 선정하기 위하여 연비 측면으로 백워드 시뮬레이션을 이용한 분석 및 차량 성능 측면으로 차

량동역학을 이용한 분석을 수행함으로써 후륜측 구동 모듈의 용량 선정 방법을 제시하였다.

- 4) 주행 전략의 개발을 위해 백워드 시뮬레이션 결과 중 각 시점에 대한 속도 및 차량 출력 작동 지점을 분석하여 차량 모드의 영역을 결정하였다. 이 외에도 차량 모드의 빈번도 및 배터리 SOC의 상태를 고려하는 조건을 추가함으로써 최종적인 주행 제어 알고리즘을 개발하였다.
- 5) 주행 전략의 유효성을 입증하기 위하여 4WD 하이브리드 시스템과 Conventional 4WD 시스템의 포워드 시뮬레이터를 구성하였고 연비 비교를 수행하였으며 35.3% 향상률을 보였다.

참고 문헌

1. Rajesh Rajamani, 'Vehicle Dynamics and Control', Springer, 2006
2. Donald E. Kirk, 'Optimal Control Theory', Prentice-hall, 1970
3. Namwook Kim, Dae Heung Lee, Siu Yang, Yoeng-il Park, Suk Won Cha, 'Optimization for Analyzing Fuel Consumption of HEVs', KSAE08-S0336, pp2042~2047
4. Namwook Kim, Yoeng-il Park, Howon Seo, Daeheung Lee, Suk Won Cha, 'A Backward Simulator for Calculating Optimal Control Trajectories', KSAE09-B0250
5. Dong Hyun Kim, 'Motor sizing and operation algorithm for a 4WD Hybrid electric vehicle', Master thesis, Sungkyunkwan University, Korea, 2002
6. Jongryeol Jeong, Changwoo Shin, Wonsik Lim, Suk Won Cha, Myeong Eon Jang, 'Development of Multiple Load Optimization Algorithm for Electric Vehicle based on Vehicle Dynamics Model', proceeding of KSAE fall conference, 2011
7. Bernd M. Baumann, Gregory Washington, Bradley C. Glenn, and Giorgio Rizzoni, 'Mechatronic Design and Control of Hybrid Electric Vehicles' IEEE/ASME Transactions of Mechatronics, Vol. 5, NO. 1, 2000
8. Chunhua Zheng, Namwook Kim, Daeheung Lee,

Wonsik Lim, Yoeng-il Park, Sukwon Cha, 'A Simulator for a Performance Test of HEVs', proceeding of KSAE fall conference, 2008

9. Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Ali Emadi, 'Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles', CRC Press, 2010
10. Frank L. Lewis, 'Applied Optimal Control and Estimation', Prentice-hall, 1992
11. Namwook Kim, 'Optimal Control of Hybrid Electric Vehicles Based on Pontryagin's Minimum Principle', Ph.D thesis, Seoul National University, 2008

Abstract

Development of Cruising Control Algorithm for 4WD Hybrid Vehicles

Hyungkyoon Kim

School of Mechanical and Aerospace Engineering

The graduate school

Seoul National University

A 4WD hybrid system has two powertrains, one is operated by engine for front wheels and another is operated by motor for rear wheels. This System was developed for substituting conventional 4WD vehicles. Advantages of 4WD hybrid system are follows. First, it has less power transfer loss because there are no transfer and propeller shaft. Second, fuel economy of this system can be improved by using regenerative braking and Idle Stop & Go. To maximize these advantages, it is important to establish the control strategy for driving status. One of the ways for establishing the control strategy is backward simulation by using Dynamic Programming. In this

research, establishing the control strategy was accomplished with backward simulation results. In order to prove the performance of this control strategy, comparing fuel economy between 4WD hybrid vehicle and conventional 4WD vehicle was conducted by using forward simulator.

Key Words : 4WD Hybrid Vehicles, Backward Simulation, Dynamic Programming, Control Strategy, Cruising Control Algorithm, Forward Simulation

Student Number : 2011-20703

감사의 글

RECL에 발을 들인지도 어느덧 2년이란 세월이 지났습니다. 연구실 배정을 받고 처음 본 종우와 컵라면을 사서 먹었던 것이 엇그제 같은데, 이제 벌써 졸업입니다. 먼저 2년동안 저를 지도해주신 차석원 교수님, 임원식 교수님, 박영일 교수님 너무 감사 드립니다. 악연인지 인연인지 얽히고 얽힌 창우형을 비롯해 대흥이형, 춘화누나, 호원이, 종렬이, 모성이형, 현섭이형, 종대, 기영이, 하이브리드 팀원들 모두 고마웠습니다. 그리고 영석이형, 훈이형, 익황이형, 승범이형, 준호형, 상훈이형, 윤호형, 구영이형, 태현이, 종우, 준열이, 연료전지 팀원들도 모두 고마웠습니다. 2년이란 세월을 돌이켜 생각해보니 많은 일들이 있었습니다. 승범이형의 한글 때문에 매주 했던 축구, 동해 바다로 떠난 여름 애틀, 314동에서 301동으로의 대이동, 항상 에피소드들로 가득했던 미팅 등등.. 모두 잊지 못할 추억으로 간직할 것 같습니다. 또한 졸업 논문 제출 서류 때문에 제가 종우에게 많이 부탁을 했었는데.. 종우야, 정말 고맙다. 마지막으로 언제나 뒤에서 저에게 후원을 해주신 아버지, 어머니께 감사의 말씀을 드리며 글을 마칩니다.