



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

공학전문석사 학위 연구보고서

가스터빈 연소기 스트레이너 형상에
따른 압력강하 특성에 관한 연구

A Study on the Pressure Drop Characteristics
According to the Shape of a Gas Turbine
Combustor Strainer

2022년 2월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

김 준 구

가스터빈 연소기 스트레이너 형상에 따른 압력강하 특성에 관한 연구

지도교수 황 원 태

이 프로젝트 연구보고서를 공학전문석사 학위
연구보고서로 제출함

2022년 2월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
김 준 구

김준구의 공학전문석사 학위 연구보고서를
인준함

2022년 2월

위 원 장 _____ 김 국 현 (인)

위 원 _____ 황 원 태 (인)

위 원 _____ 문 승 일 (인)

국문초록

가스터빈 연소기는 고온부품으로서 연료노즐 내부에 설치되는 스트레이너의 압력강하를 측정하는 설비가 없어, 실제 가스터빈 유동에서의 스트레이너 형상별 압력강하 특성을 파악하기 위한 이론적, 실험적 연구를 수행하였다. 스트레이너를 통과하는 유동은 관성력의 영향으로 인해 속도에 대한 압력강하가 비선형적인 관계를 보이는 Non-Darcy 유동이며, 측정된 압력강하 데이터와 Forchheimer 이론식을 통해 스트레이너 고유의 투과율과 관성저항인 Ergun 상수를 도출하였다

서울복합발전소 가스터빈 M501GAC 기종의 매쉬타입과 포러스타입의 연소기 스트레이너를 설치하여 기본상태, 철가루 5, 10, 20 g이 투입된 조건에서 유입되는 공기의 압력과 유량을 변화시키면서 실험을 진행하였으며, 각 경우에 대해 스트레이너 고유의 투과율과 관성저항인 Ergun 상수를 나타내었다. 또한 실험을 통해 도출한 스트레이너 형상계수를 180 MW 정격출력 실제 가스터빈 유동에 적용하여 Forchheimer식을 통해 압력강하를 예측하였으며, 기본상태 기준 매쉬타입은 0.74 bar, 포러스타입은 1.06 bar의 압력강하가 형성된다는 것을 확인하였다.

실제 서울복합발전소 1, 2호기의 스트레이너 형상을 달리하여 운전 후 연소실 노즐 평균압력을 비교하여 약 0.3 bar의 압력강하 차이가 나는 것을 확인하였다. 또한 스트레이너의 압력강하에 따른 발전출력 변화량과 가스터빈 효율을 확인하였으며, 180 MW 출력 기준에서 매쉬타입을 설치한 가스터빈이 포러스타입을 설치한 가스터빈보다 발전출력은 약 2.2 % 높은 것을 확인하였다.

주요어 : Non-Darcy유동, Forchheimer 방정식, 매쉬타입 스트레이너, 포러스타입 스트레이너, 투과율, Ergun상수

목 차

제 1 장 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 기존의 연구	3
1.3 연구 방법	4
제 2 장 스트레이너 유동 특성	5
2.1 스트레이너의 종류와 특징	5
2.1.1. Y형 스트레이너	5
2.1.2. C형 스트레이너	6
2.1.3. Cone형 스트레이너	6
2.2 속도에 따른 스트레이너 유동 특성	9
2.2.1. 다르시의 법칙	9
2.2.2. Non-Darcy 유동	10
2.2.3. Forchheimer 이론식	11
제 3 장 스트레이너 유동 압력강하 특성	12
3.1 실험 장치 및 방법	12
3.2 신뢰도 검증	16
3.2.1 기압시험	16
3.2.2 T-분포(Student's Distribution)	19
3.3 실험 결과 및 고찰	23
3.3.1 압력강하	23
3.3.2 투과율 및 Ergun상수	30

제 4 장 가스터빈 연소기 압력강하 특성	34
4.1 Forchheimer 이론식 기준 압력강하 예측	34
4.2 실제 가스터빈 유동 압력강하 특성	36
4.2.1 스트레이너 압력강하 및 발전출력	36
4.2.2 스트레이너 압력강하 및 가스터빈 효율	38
제 5 장 결론	41
참고문헌	44
Abstract	46

그 립 목 차

그림 1.1 가스터빈 연소실 개략도	2
그림 1.2 가스터빈 연소기 스트레이너 설치위치	2
그림 2.1 Y형 스트레이너 개략도	5
그림 2.2 C형 스트레이너 개략도	6
그림 2.3 Cone형 매쉬타입 스트레이너	7
그림 2.4 Cone형 포러스타입 스트레이너	8
그림 2.5 다르시의 법칙 실험 개략도	9
그림 3.1 스트레이너 압력강하 실험 장치 개략도	12
그림 3.2 스트레이너 압력강하 실험 장치	14
그림 3.3 철가루	15
그림 3.4 기압시험 결과	18
그림 3.5 정규분포와 T-분포의 관계	19
그림 3.6 매쉬타입 스트레이너 $\frac{1}{\mu_f U_D} \left(\frac{\Delta P}{L} \right)$ 와 $\left(\frac{U_D}{\nu} \right)$ 선형관계	27
그림 3.7 포러스타입 스트레이너 $\frac{1}{\mu_f U_D} \left(\frac{\Delta P}{L} \right)$ 와 $\left(\frac{U_D}{\nu} \right)$ 선형관계	28
그림 3.8 매쉬타입과 포러스타입 스트레이너 압력강하 실험결과 비교	29
그림 3.9 매쉬타입 스트레이너 압력강하에 따른 투과율과 Ergun상수 관계	31
그림 3.10 포러스타입 스트레이너 압력강하에 따른 투과율과 Ergun상수 관계	32
그림 4.1 가스터빈 연소기 연료노즐 압력과 발전출력 관계	37
그림 4.2 브레이튼 사이클 T-S선도	38
그림 4.3 서울복합 가스터빈 1,2호기 T-S선도	40

표 목 차

표 2.1 매쉬타입 스트레이너 물성치	7
표 2.2 포러스타입 스트레이너 물성치	8
표 3.1 유량계 및 차압계 사양	13
표 3.2 실험조건표	15
표 3.3 실험모델 기압시험 조건	16
표 3.4 기압시험 진행과정	17
표 3.5 T-분포 표	20
표 3.6 T-분포를 이용한 평균값과 신뢰구간	22
표 3.7 매쉬타입 스트레이너 압력강하 실험 결과표	24
표 3.8 포러스타입 스트레이너 압력강하 실험 결과표	25
표 3.9 매쉬타입 스트레이너 압력강하에 따른 투과율과 Ergun상수 ...	31
표 3.10 포러스타입 스트레이너 압력강하에 따른 투과율과 Ergun상수 ·	32
표 4.1 서울복합발전소 연료상태량	34
표 4.2 가스터빈 연소기 스트레이너 압력강하 이론식 예측값 ...	35
표 4.3 서울복합발전소 가스터빈 운전조건	36
표 4.4 브레이튼 사이클 경계조건	39

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

현재 한국의 LNG 복합발전 산업은 2020년 정부의 탄소중립정책 선언에 따라 기존 화석연료 중심의 에너지 체계를 대체하는 LNG발전의 기술개발에 적극 투자함으로써 온실가스 감축정책을 가속화하여 저탄소 전환을 촉진하고자 한다. 특히, LNG 복합발전은 가스터빈 연소기에서 이루어지는 연소과정을 안정화하여 최소한의 질소산화물 (NOx)을 배출하는 것이 매우 중요하다.

가스터빈 연소기에서 사용되는 스트레이너 (strainer)는 뛰어난 경제성과 유지보수의 편리 등 장점으로 인해 발전용 플랜트, 선박 등 산업 및 일반적인 유체기계에 폭 넓게 사용된다 [1]. 스트레이너 설치의 주 목적은 스트레이너 후단부에 배관 내 오물, 녹, 용접 슬러그 및 기타 이물질 등의 유입을 차단하여 내부 시스템의 안전한 운전을 보장하는 것이다 [1]. 스트레이너는 유체 시스템을 보호하기 위하여 사용하지만, 유체역학적 측면에서는 관로내의 저항체로 시스템 내 작동유체의 압력강하를 일으키는 저항체로 고려된다. 그러므로 이물질을 설계기준까지 걸러주면서도 적은 압력강하를 일으켜 유체시스템의 효율을 높이는 방향으로 설계해야한다 [1].

실제 가스터빈 유동에서는 그림 1.1과 같이 연소실에서 압축된 공기와 스트레이너를 통과한 연료가 혼합되어 연소가 이루어진다. 스트레이너의 설치 위치는 그림 1.2와 같이 연소기 연료공급 노즐 전단에 설치되어있다. 흔히 스트레이너의 높은 압력강하가 기전으로 작용해 연소실 내의 온도 및 압력 불균형을 야기하여 가스터빈의 출력을 저하시키는 원인으로 작용한다. 하지만 가스터빈 고온부의 연료노즐에 설치되는 스트레이너의 압력강하를 측정하는 설비가 없어 실제 가스터빈 유동에서의 스트레이너 정확한 압력강하 예측은 힘들며 연소기 전단의 압력추이를 관찰하여 얻은 트렌드를 통한 경험식에 의존하는 것이 일반적이다.

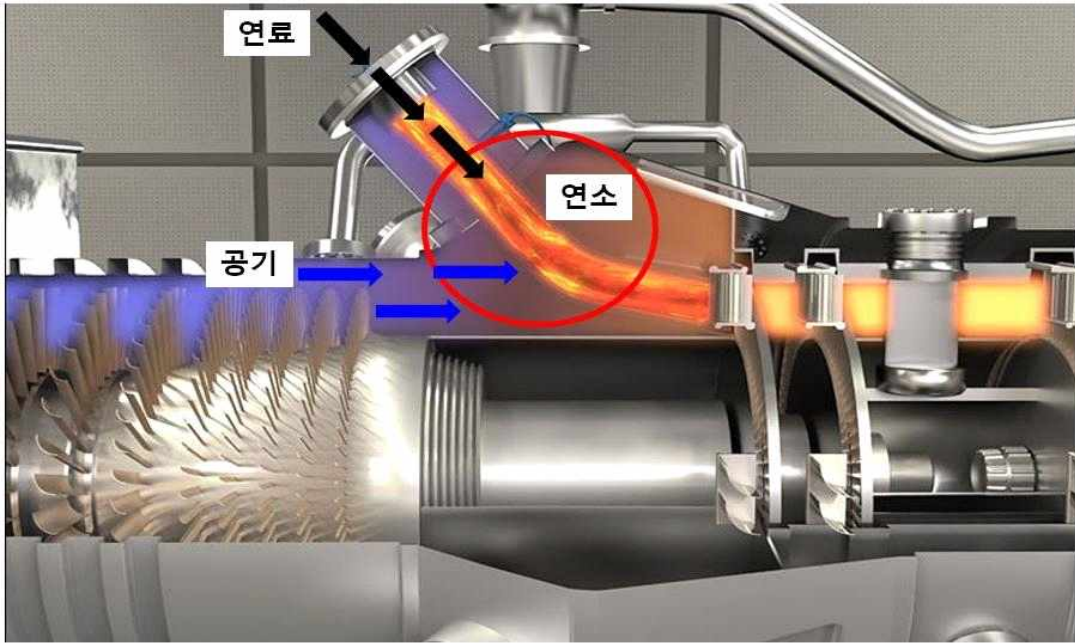


그림 1.1 가스터빈 연소실 개략도 [2]

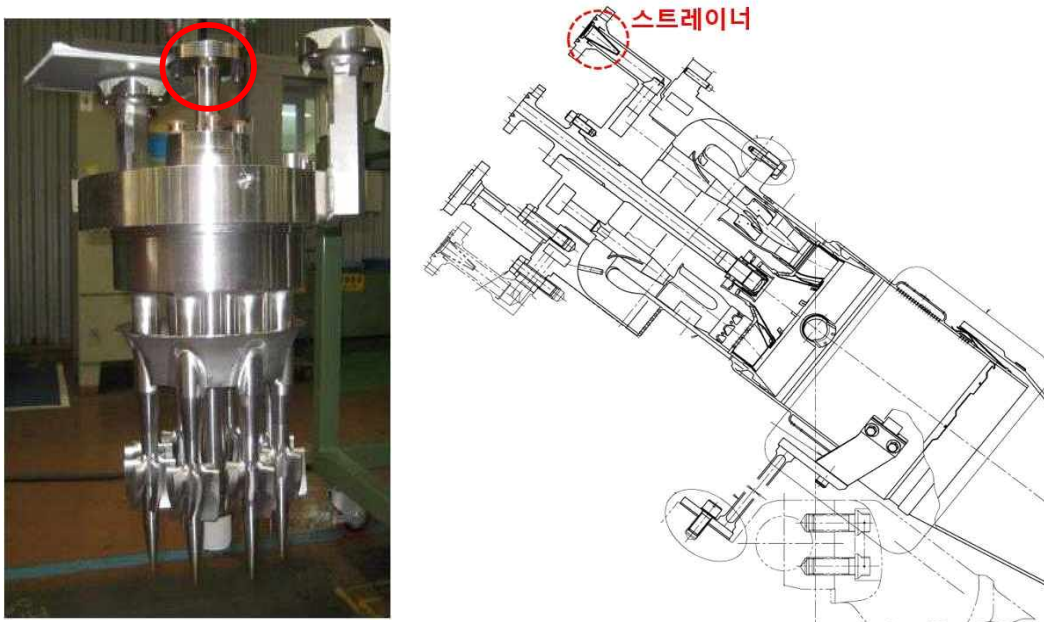


그림 1.2 가스터빈 연소기 스트레이너 설치위치 [2]

본 연구에서는 실제 가스터빈 연소기에 사용하는 스트레이너의 형상별 압력강하 특성에 대한 실험을 통해 가스터빈 출력 및 효율의 관계에 대해 연구하고자 하며, 크게 2가지 측면에서 기대효과가 예상된다.

첫 번째는 운영적 측면이다. 연구를 통해 가스터빈 연소실의 압력 정보를 예측하여 연소동압센서¹⁾를 효율적으로 감시할 수 있으며 일정한 출력 기준에서 스트레이너의 압력강하를 예측하여 주기적인 연소기 정비가 가능하다. 또한, 가스터빈 연소실의 압력손실을 대비하여 연료의 공급량, 공기량을 미리 예측하여 경제적 효과를 기대할 수 있다.

두 번째는 설계적 측면이다. 스트레이너 형상별 압력강하 특성을 바탕으로 하여 향후 가스터빈 국산화 설계 시 출력별 최적 연소물성치를 적용한 저녹스 버너²⁾ 개발에 기여할 수 있다.

1.2 기존의 연구

다공성재(porous media)란 고체의 내부에 다수의 작은 공극을 갖는 형태를 말한다 [3]. 스트레이너도 다공성재에 포함되는 수많은 설비 중의 하나이다. 산업현장에서 쓰이는 다공성재는 크기가 크고 내부형상은 미세하여 실험적인 방법으로는 분석이 매우 힘들며, 주로 유동해석 프로그램인 ANSYS CFX를 사용하여 미세한 형상에 대해 세부적인 모델링을 할 수가 없어 전체에 대해 포러스 도메인 경계조건을 적용하여 수치해석 기법을 사용하는 것이 일반적이며 경제적인 해석방법이다 [3].

다공성재의 압력강하는 주로 액체로켓용 분사기에 적용되어 많은 연구가 이어왔으며, 특히 Bazarov(1993)는 다공성재를 이용한 다양하고 새로운 형태의 분사기에 대해 모사추진제 유량에 따른 액적 평균 직경 측정을 수행하였으며, 낮은 압력강하에서도 뛰어난 미립화 성능을 나타냄

1)연소동압센서 : 가스터빈 연소기 고온,고압에 노출되는 연소기의 안정적인 운전을 위한 반영구적인 감시센서

2)저녹스버너 : 연료 및 공기의 혼합특성을 조절하거나 산소농도와 화염온도를 조절하는 등의 방법으로 질소산화물의 저감효율이 있는 버너

을 밝혀내었다 [3]. 국내에서는 액체로켓용 분사기의 설계 및 개발을 위해 다공성재를 통과하는 압력강하 특성에 관한 실험적 연구를 통해 pore 크기에 따른 투과율과 Ergun 상수를 다공성재 압력강하와 pore의 크기에 대한 함수로 일반화하여, 이를 범용 수치해석코드인 FLUENT 를 사용한 수치해석에 적용하여 실험으로부터 얻어진 결과와 비교 검증하였다 [3].

발전용 가스터빈 스트레이너는 콘타입 (cone-type)으로서 형상은 복잡하나 크기가 매우 작아 압축공기 유로설비의 압력과 유량 측정설비가 갖춰지면 충분히 실험적 연구를 통해 압력강하 측정이 가능하지만, 아직까지 발전용 가스터빈 스트레이너의 압력강하에 관한 연구사례는 없는 것으로 파악된다.

1.3 연구 방법

본 연구에서는 발전 산업용 가스터빈의 설계 및 개발에 활용하기 위해 서울북합발전소 1,2호기 가스터빈 M501GAC 기종에서 사용하고 있는 두 가지 타입의 스트레이너를 사용하여 발전소에서 실험적 연구를 진행하였다. 압축공기 유로설비에서 두 가지 타입의 스트레이너를 설치하여 철가루를 5, 10, 20 g 추가하면서 압력강하 실험을 10번 반복수행 하였으며, 측정 결과를 기준으로 하여 스트레이너 고유의 투과율 및 Ergun 상수를 도출하였다. 측정된 압력강하 데이터와 Forchheimer 이론식을 실제 가스터빈 유동에 적용하여 압력강하를 예측하였다. 또한, 두 가지 타입의 스트레이너를 실제 발전소 가스터빈에 설치하여 압력강하 추이를 관찰하였으며, 나아가 스트레이너 압력강하가 발전소 출력과 효율에 미치는 영향을 연구하였다.

제 2 장 스트레이너 유동 특성

2.1 스트레이너의 종류와 특징

스트레이너는 기본적으로 외면을 둘러싸는 몸체와 내부에 이물질을 여과해주는 필터로 구성된다. 필터는 작동유체 내 이물질을 여과하기 위한 목적으로 사용되며, 일반적으로 판금(sheet metal)을 가공하여 여과하고자 하는 대상의 크기에 따라 필터에 와이어 매쉬를 겹치거나, 다공판을 레이저로 가공하여 사용한다.

2.1.1 Y형 스트레이너

Y형 스트레이너는 그림 2.1과 같이 본체 형태가 Y형으로서 직선 유로 상에 설치되며 유동손실을 적게 하기 위해 일반적으로 45° 경사진 방향으로 원통형 필터망이 내부에 설치되어 있다 [4]. 발전소에서는 주로 취수(해수)배관에 설치되어 외부로부터 유입되는 이물질을 걸러내어 설비를 보호하는 역할을 한다. 그러나 설치공간의 여건과 이물질이 쌓였을 때 수시로 청소를 위한 분해를 해야 한다는 불편함이 있다.

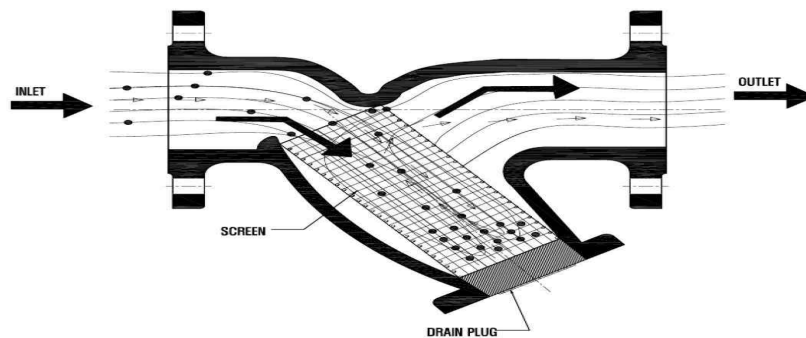


그림 2.1 Y형 스트레이너 개략도

2.1.2 C형 스트레이너

C형 스트레이너는 그림 2.2와 같이 앞서 언급한 Y형 스트레이너의 설치여건, 이물질 제거에 따른 문제점을 보완하여 여과면을 C자형으로 개선하여 설계하였다 [4]. 유입구와 유출구가 일직선상에 위치하고 있어 유체의 저항이 적고 상부에 덮개가 있어 이물질 제거와 여과망 청소를 효율적으로 할 수 있으며 분해, 조립을 편리하게 할 수 있도록 설계되었다.

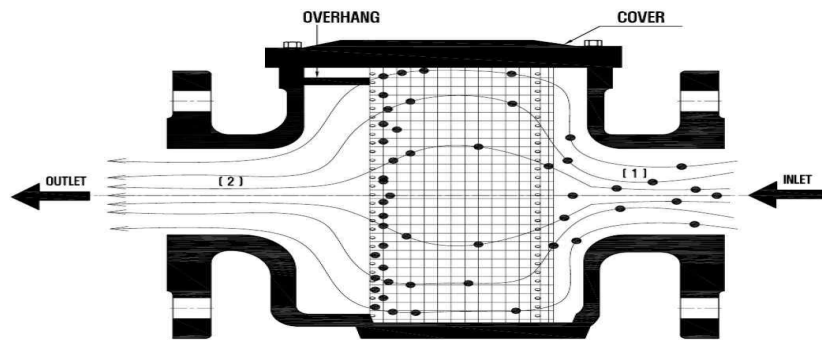


그림 2.2 C형 스트레이너 개략도

2.1.3 Cone형 스트레이너

Cone형 스트레이너는 입구에서 출구로 갈수록 좁아지는 원추형으로서 플랜트 및 장비를 시운전하기 전에 배관내부를 세척하기 위해 주로 사용한다. 또한 발전용 가스터빈에서 연소실과 터빈보호를 위해서 연료배관 내에 설치되어 있다. M501GAC 가스터빈 기종은 2가지 타입의 Cone형 스트레이너를 사용한다. 타공판 내부에 미세철망을 덧댄 매쉬타입과 타공판을 원뿔 모양으로 레이저 가공 한 포러스타입이다.

본 연구에서는 Cone-type의 2가지 스트레이너에 대해 같은 조건에서 실험을 하여 압력강하 특성을 연구하고자 한다. 그림 2.3과 2.4에 실험에 사용할 두 가지의 스트레이너를 나타내었다.



그림 2.3 Cone형 매쉬타입 스트레이너

표 2.1 매쉬타입 스트레이너 물성치

재질	SUS 316L
직경 (m)	0.042
길이 (m)	0.085
특징	<ul style="list-style-type: none"> · 4 layers wire net · layer punching metal



그림 2.4 Cone형 포러스타입 스트레이너

표 2.2 포러스타입 스트레이너 물성치

재질	SUS 316L
직경 (m)	0.042
길이 (m)	0.085
특징	· porous by laser machined

2.2 속도에 따른 스트레이너 유동 특성

2.2.1 다르시의 법칙(Darcy's Law)

다르시의 법칙은 관로내의 압력강하를 예측하는 방정식이다. 이 유체 역학적 실험식은 물리적 현상으로부터 유도된 경험식으로 작동유체가 다공성 매질을 통과하며 일으키는 압력강하를 예측하는 공식으로 공학, 지질학 등 다양한 분야에 적용이 된다. 다르시가 실험한 개략도를 그림 2.5 와 같이 나타내었다.

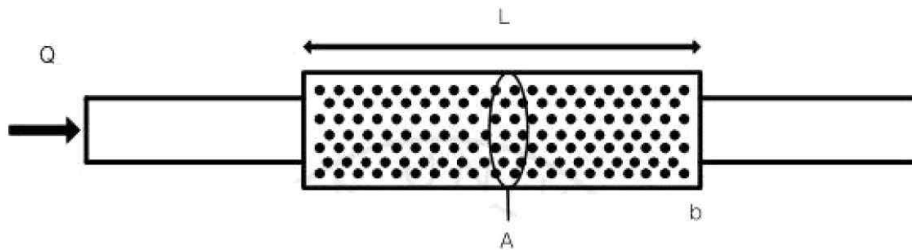


그림 2.5 다르시의 법칙 실험 개략도

고속이 아닌 저속의 유동이 다공성재를 통과하는 경우, 다공성재 내부의 압력강하는 내부의 형상으로 인해 결정되는 점성저항에 의해 발생하게 되며 이때의 유동을 Darcy 유동이라고 한다. 본 연구의 스트레이너와 같은 다공성재를 통과하는 유체의 흐름에 대하여 Darcy's Law는 식(2.1) 과 같이 정의된다 [3].

$$Q = - \frac{KA}{\mu_f} \frac{\Delta P}{L} \quad (2.1)$$

여기서 Q 는 체적유량, ΔP 는 압력강하, A 는 시스템 내 유체의 흐름

방향에 수직인 단면적, L 은 스트레이너의 유동방향 길이, μ_f 는 점성계수 (dynamic viscosity)를 말한다.

K 는 스트레이너의 형상인자인 투과율(permeability)로, 유체가 스트레이너를 얼마나 쉽게 통과하는지를 나타내는 척도이다. 투과율은 다공성체에 따라 다른 값을 가지며, 선행연구에 의해 수많은 실험적, 수치적 연구가 진행되어 왔다. Darcy's Law는 일반적으로 식(2.2)과 같이 나타낸다 [3].

$$\nabla P = -\frac{\mu_f}{K} U_D \quad (2.2)$$

여기서 $\nabla P = \Delta P/L$ 이며, U_D 는 스트레이너를 통과하는 내부 유체의 평균속도를 의미하며, 위 식(2.2)을 통해 스트레이너를 통과하는 속도와 압력강하는 선형적인 관계를 나타낼 수 있다 [3].

2.2.2 Non-Darcy 유동

다르시의 법칙은 유체의 속도가 저속일 때 즉, 점성저항에 의해서만 압력손실이 발생하는 경우에만 적용이 가능하다. 고속의 유동이 스트레이너를 통과하는 경우, 내부의 압력강하는 기존의 점성저항뿐 아니라, 높은 속도로 인해 발생하는 관성저항(inertia resistance)의 영향을 받아 압력강하가 속도에 대해 비선형적인 관계를 나타내는데, 이를 Non-Darcy 유동이라 일컫는다. 압력강하를 무차원화한 마찰인자(friction factor, f_K)를 투과율 기준 Reynolds 수(Re_K)의 함수로 식(2.3)과 같이 표현하였다 [3].

$$f_K = \frac{1}{Re_K} + C_E \quad (2.3)$$

여기서 C_E 는 스트레이너를 통과하는 고속유동에서 관성력의 영향에 의해 발생하는 압력강하를 결정하는 관성저항인 Ergun 상수이다. 그리고 ρ_f 는 유체의 밀도, μ_f 는 유체의 점성계수를 나타낸다. 또한 f_K 와 Re_K 는 각각 식(2.4), (2.5)과 같이 정의한다.

$$f_K = \frac{K^{\frac{1}{2}}}{\rho_f U_D^2} \left(\frac{dP}{dx} \right) \quad (2.4)$$

$$Re_K = \frac{\rho_f U_D K^{\frac{1}{2}}}{\mu_f} \quad (2.5)$$

2.2.3 Forchheimer 이론식

일반적으로 가스터빈에서 스트레이너와 같은 다공성재를 통과하는 유체의 경우는 고속유동이며, Non-Darcy 유동의 압력강하를 나타낸다. Forchheimer 이론식은 Darcy's Law에 관성저항으로 인한 압력강하를 추가하여 나타내며 식(2.6)과 같이 정의한다.

$$\nabla P = -\frac{\mu_f}{K} U_D - \frac{C_E}{\sqrt{K}} \rho_f U_D^2 \quad (2.6)$$

본 연구에서는 공기유동에서 실험을 통해 스트레이너를 통과하는 유체의 압력강하를 구하고, Forchheimer 이론식을 적용하여 실험 조건별 스트레이너 고유의 투과율(K)과 관성저항인 Ergun 상수(C_E)를 도출한 후, 가스터빈 유동에 다시 Forchheimer 이론식을 적용하여 실제 가스터빈에서 스트레이너에 형성되는 압력강하를 예측하고자 한다.

제 3 장 스트레이너 유동 압력강하 특성

3.1 실험 장치 및 방법

스트레이너를 통과하는 공기유동에서의 압력강하를 파악하기 위한 실험장치의 개략도를 그림 3.1에 나타내었다.

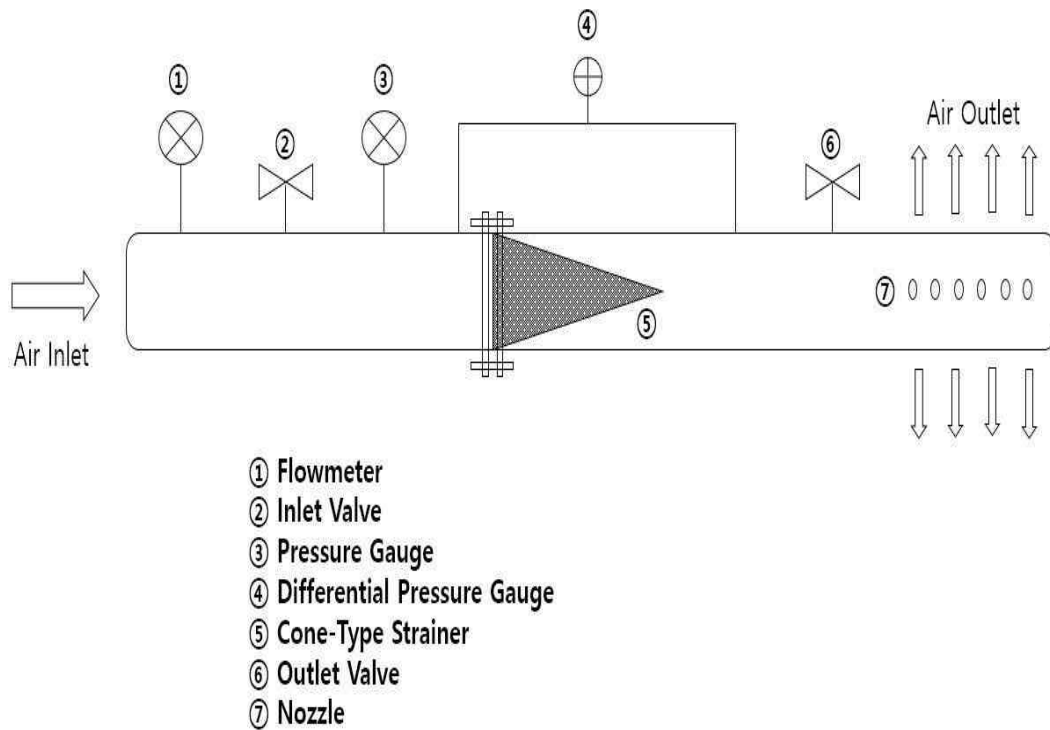


그림 3.1 스트레이너 압력강하 실험 장치 개략도

실험유체는 발전소의 압축공기를 사용하였으며, 스트레이너의 직경을 기준으로 배관을 선정하였고 압축공기의 압력조건을 기준으로 실험을 위한 계측기를 선정하였다. 유량계 및 차압계의 사양을 표3.1에 나타내었다.

표 3.1 유량계 및 차압계 사양

 <p>유량계</p>	Model	Suto. S421
	Accuracy	1.5% of reading +0.3% full scale
	Repeatability	0.025% of reading
	Ambient Temperature	-30 ~ +70°C
	Material	SUS 316L
	Operating Pressure	0 ~ 5 MPa
	Flow Range	0 ~ 500 m ³ /h
	Power Supply	15 to 30 Vdc
 <p>차압계</p>	Model	APT3500
	Accuracy	±0.04% of Span
	Ambient Temperature	-40 ~ +85°C
	Working Pressure Limits	0 ~ 25 MPa
	Hydrostatic Test Pressure	38 Mpa
	Power Supply	12 to 45 Vdc

압축공기를 Inlet Valve를 통해 조절한 후 배관을 통해 유입되는 공기의 유량을 달리하며 진행하였으며, 측정된 데이터는 공기의 온도, 유량, 압력, 압력강하 값 등이 있다. 실험은 공기압력을 1~6 bar로 1 bar씩 승압하면서 6구간을 기준으로 설정하여 유량 및 압력강하 값들을 측정하였으며, 공기의 유속은 18~29 m/s 인 범위에서 진행하였다. 이는 Re_K 가 1보다 큰 영역으로서 스트레이너 내부의 압력강하가 속도에 대해 비선형적인 관계를 나타내는 Non-Darcy 유동영역에 해당한다. 그림 3.2에 실제 제작한 실험 장치를 나타내었으며, 스트레이너가 결합되는 부분의 체결력을 높이기 위하여 플랜지의 홈에 오링(O-ring)과 고무개스킷(rubber gasket)을 선정하여 조립하였다.

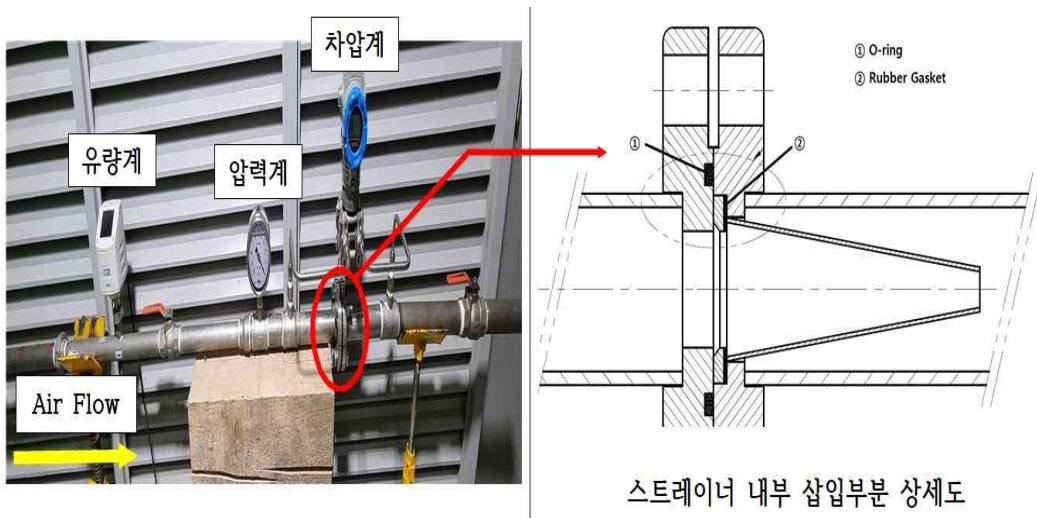
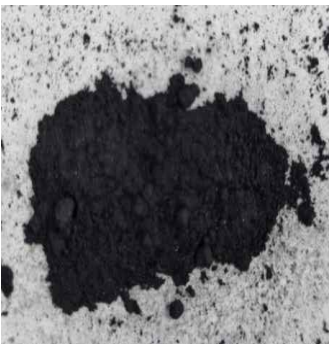


그림 3.2 스트레이너 압력강하 실험장치

실험은 서울복합 발전소에서 수행했으며, 실제 연소기 스트레이너 내부에서 발견되는 실제 이물질과 비슷한 입자크기와 자성을 띤 철가루를 사용하였으며, 2가지 타입의 스트레이너에 대해 약 0.5 mm의 철가루 (iron particle_그림3.3 참조)를 5, 10, 20 g 투입하면서 압력강하 측정실험을 10번 수행 하였다. 표 3.2에 실험조건표를 나타내었다

표3.2 실험조건표

실험 일시	2021.03.02. ~ 03.23						
실험 장소	서울복합발전소 내						
실험 조건	아래 조건 하 압력강하 측정실험 10번 수행						
	매쉬타입 / 포러스타입	 <p>그림3.3 철가루</p>					
	① 기본상태						
	② 철가루 5 g 투입						
	③ 철가루 10 g 투입						
	④ 철가루 20 g 투입						
실험조건							
밸브개도	Inlet	5%	15%	40%	50%	70%	100%
	Outlet	100%	100%	100%	100%	100%	100%
압력 (Pa)		100,000	200,000	300,000	400,000	500,000	600,000
평균온도(℃)		23					
점성계수(Pa·s)		1.81e-05					
유체흐름 단면적(m ²)		1.25e-03					
스트레이너 직경(m)		0.042					
스트레이너 길이(m)		0.085					

3.2 신뢰도 검증

3.2.1 기압시험

기압시험이란 배관이나 압력용기 등의 시험체가 요구되는 밀폐구조 (기밀성)를 만족하는지 여부를 검사하는 시험을 의미한다. 대부분의 기압시험은 시험체가 설치 완료된 후 접합부 등의 이상 유무를 확인하여 누출여부를 검사한다. 계측장치를 설치 전 스트레이너를 배관플랜지 내 삽입한 상태의 실험모델에 대해서 표 3.3와 같이 기압시험을 실시하였다.

표 3.3 실험모델 기압시험 조건

유체종류	최고 사용압력	시험압력	압력 측정기구	기밀 유지시간
공기	6.0 bar	8.5 bar	압력계	30분

일반적으로 기압시험은 시험압력을 상용압력의 1.25 배 이상으로 하고, 30분동안 시험압력을 유지하면 합격으로 판정한다. 실험에서 최고사용압력은 6.0 bar 이며, 약 1.4 배인 8.5 bar를 기압시험 압력으로 설정하였다. 그리고 단계적으로 승압하여 기압시험 압력에 도달하였을 때 이상이 없고 30분 동안 기밀을 유지한 후 상용압력으로 압력을 내려 팽창, 누설 등이 없으면 합격으로 판정하였다. 또한 고압가스 안전관리법을 준수하여 기압시험에 필요한 최소 인원으로 시험을 실시하고 주변에 안전 방호 시설 하에 긴급한 경우 대피하기 좋도록 하고 2차적으로 인체에 피해가 발생하지 않도록 조치한 후 시험압력까지 서서히 승압하여 기압시험을 실시하였다. 기압시험을 진행하는 과정을 표 3.4에 나타내었고 30분 (기밀유지시간)동안 상용압력의 1.4배인 8.5 bar의 상태에서도 누설 없이 일정한 압력을 유지하는 것을 그림 3.4를 통해 확인하였다.

표 3.4 기압시험 진행과정

	
<p>기압시험 모델</p>	<p>시험 전 주변 안전조치</p>
	
<p>14:29 밸브30% OPEN (4.5 bar)</p>	<p>14:30 밸브50% OPEN (8.1 bar)</p>
	
<p>14:50 밸브100% OPEN (8.5 bar)</p>	<p>15:05 30분경과 시험 종료 (8.5 bar)</p>

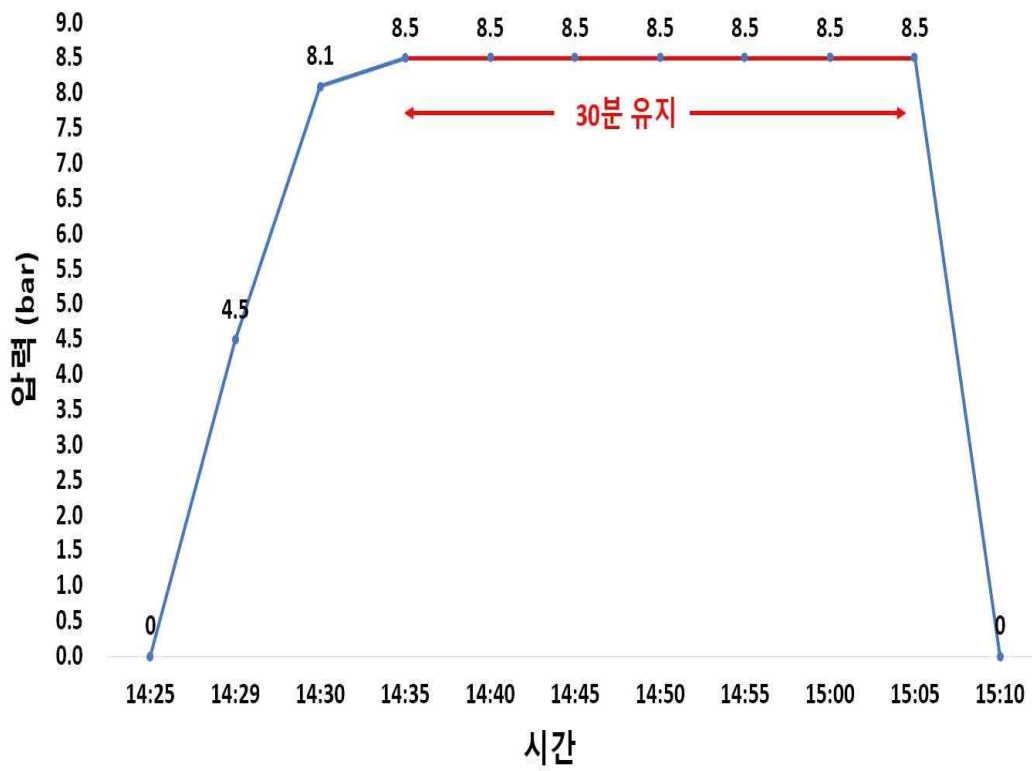


그림 3.4 기압시험 결과

3.2.2 T-분포(Student's T Distribution)

T-분포(Student's T Distribution)란 표본평균을 표준화시키는 과정에서 모집단의 평균과 표준편차를 모르는 정규모집단에서 표본크기가 작은 경우 모평균에 대한 추정과 검정을 하거나 신뢰구간을 만들 때 사용하는 통계분포이며 그림 3.5에 T-분포를 개략적으로 나타내었다. 일반적으로 샘플의 크기, 즉 자유도가 30 이하인 경우 정규분포 대신사용하며 자유도가 커질수록 T-분포는 정규분포의 곡선과 거의 동일한 형태의 분포를 보인다.

본 연구에서는 실험한 데이터 10개에 대해서 T-분포를 적용하여 표본평균에 대한 95%의 신뢰구간의 불확도를 구하여 신뢰성 검증을 하였다.

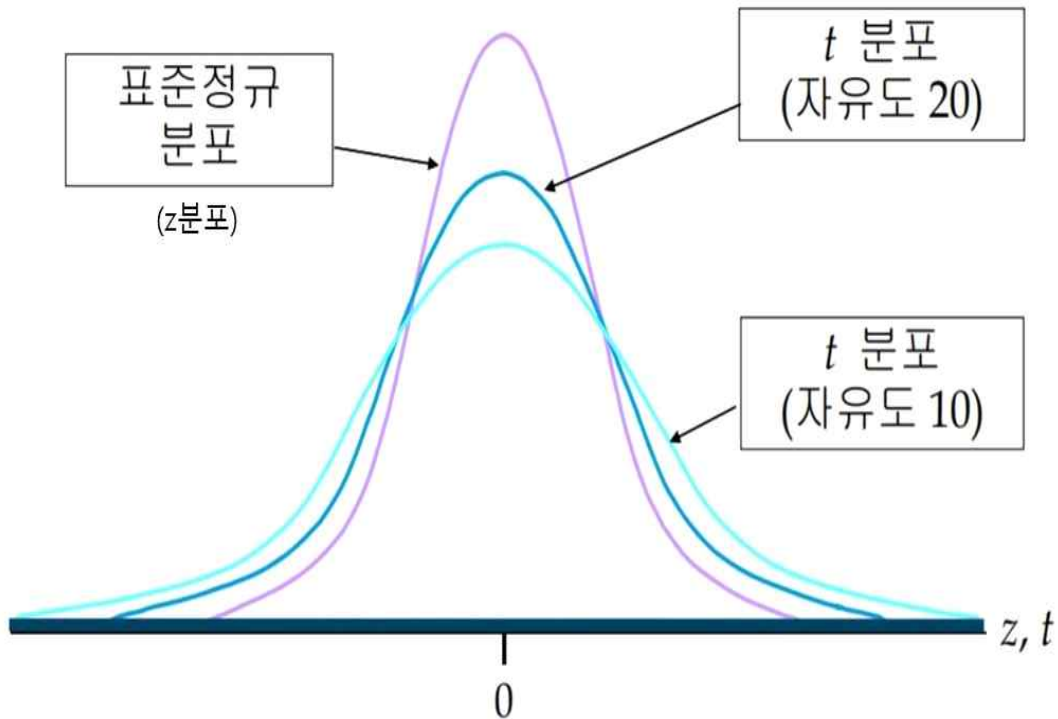


그림 3.5 정규분포와 T-분포의 관계 [5]

T-분포는 정규모집단으로부터 크기 n인 표본을 무작위로 추출했을 때 표본통계량 t는 자유도(n-1)인 T-분포를 따르며 식(3.1)로 나타낸다.

$$t_{n-1} = \frac{\bar{X} - \mu}{s / \sqrt{N}} \quad (3.1)$$

여기서 \bar{X} 는 표본평균, μ 는 모평균, s 는 표본 표준편차, N 은 샘플의 개수를 의미한다. 또한, 샘플의 개수가 30 이하인 경우 T-분포 표본의 신뢰구간(δ)은 식(3.2)과 같이 표현하며, T-분포 테이블은 표 3.5에 나타내었다.

$$\bar{X} - t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \delta \leq \bar{X} + t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.2)$$

표 3.5 T-분포 표

Degrees of freedom (v)	Amount of area in one tail (α)							
	0.0005	0.001	0.005	0.010	0.025	0.050	0.100	0.200
1	636.6192	318.3088	63.65674	31.82052	12.70620	6.313752	3.077684	1.376382
2	31.59905	22.32712	9.924843	6.964557	4.302653	2.919986	1.885618	1.060660
3	12.92398	10.21453	5.840909	4.540703	3.182446	2.353363	1.637744	0.978472
4	8.610302	7.173182	4.604095	3.746947	2.776445	2.131847	1.533206	0.940965
5	6.868827	5.893430	4.032143	3.364930	2.570582	2.015048	1.475884	0.919544
6	5.958816	5.207626	3.707428	3.142668	2.446912	1.943180	1.439756	0.905703
7	5.407883	4.785290	3.499483	2.997952	2.364624	1.894579	1.414924	0.896030
8	5.041305	4.500791	3.355387	2.896459	2.306004	1.859548	1.396815	0.888890
9	4.780913	4.296806	3.249836	2.821438	2.262157	1.833113	1.383029	0.883404
10	4.586894	4.143700	3.169273	2.763769	2.228139	1.812461	1.372184	0.879058
11	4.436979	4.024701	3.105807	2.718079	2.200985	1.795885	1.363430	0.875530
12	4.317791	3.929633	3.054540	2.680998	2.178813	1.782288	1.356217	0.872609
13	4.220832	3.851982	3.012276	2.650309	2.160369	1.770933	1.350171	0.870152
14	4.140454	3.787390	2.976843	2.624494	2.144787	1.761310	1.345030	0.868055
15	4.072765	3.732834	2.946713	2.602480	2.131450	1.753050	1.340606	0.866245
16	4.014996	3.686155	2.920782	2.583487	2.119905	1.745884	1.336757	0.864667
17	3.965126	3.645767	2.898231	2.566934	2.109816	1.739607	1.333379	0.863279

표 3.5를 통해 샘플 10개의 95%의 T-분포 신뢰구간은 식(3.3)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, 샘플 10개에 대한 자유도는 9이며, 95%의 오차 범위 분포에 대한 α 값은 0.025이다.

$$\delta_{U_D/v} = 2.262 \times \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (3.3)$$

$\delta_{U_D/v}$ 을 구하기 위해서는 실험조건에 따라 유체속도(U_D)만 변하므로 식(3.3)을 적용하여 나타낼 수 있다. 반면에, 실험조건에 따라 압력강하(ΔP)와 유체속도(U_D) 모두 변하는 $\delta_{(\Delta P/L)/\mu_f U_D}$ 을 구하기 위해서는 오차의 전파공식을 적용하여야 하며 식(3.4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_{(\Delta P/L)/\mu_f U_D} = \overline{(\Delta P/L)/\mu_f U_D} \times \sqrt{\frac{s_U^2}{U^2} + \frac{s_{\Delta P}^2}{\Delta P^2}} \quad (3.4)$$

앞 장에서 제시한 Forchheimer 이론식(식2.6)으로부터 스트레이너의 투과율(K)과 관성저항인 Ergun 상수(C_E)를 구하기 위하여 $\delta_{U_D/v}$ 와 $\delta_{(\Delta P/L)/\mu_f U_D}$ 의 신뢰구간을 두 가지 타입의 스트레이너(mesh, porous)에 대해 계산하였으며 10번 반복 실험하여 얻은 측정값의 평균값을 기준으로 신뢰구간 오차는 $\delta_{U_D/v}$ 와 $\delta_{(\Delta P/L)/\mu_f U_D}$ 을 기준으로 적용하였다. 두 결과 모두 신뢰구간 내 측정값의 평균값이 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 이를 바탕으로 실험결과에 대한 타당성을 검증하고, 투과율과 Ergun 상수의 도출과정이 적합함을 밝혀내었으며 표 3.6과 같이 나타내었다.

표 3.6 T-분포를 이용한 평균값과 신뢰구간

		U_D/v		$(\Delta P/L)/\mu_f U_D$	
		평균	신뢰 구간	평균	신뢰 구간
매쉬 타입	기본상태	6.27e+06	6.17e+06 ~ 6.36e+06	6.01e+07	5.83e+07 ~ 6.18e+07
	5 g 투입	6.33e+06	6.23e+06 ~ 6.42e+06	1.54e+08	1.51e+08 ~ 1.58e+08
	10 g 투입	6.31e+06	6.21e+06 ~ 6.39e+06	2.51e+08	2.45e+08 ~ 2.58e+08
	20 g 투입	6.30e+06	6.21e+06 ~ 6.40e+06	3.67e+08	3.56e+08 ~ 3.78e+08
포러스 타입	기본상태	6.38e+06	6.30e+06 ~ 6.47e+06	7.62e+08	7.37e+08 ~ 7.88e+08
	5 g 투입	6.34e+06	6.26e+06 ~ 6.42e+06	1.64e+08	1.59e+08 ~ 1.69e+08
	10 g 투입	6.38e+06	6.31e+06 ~ 6.46e+06	2.73e+08	2.68e+08 ~ 2.79e+08
	20 g 투입	6.38e+06	6.30e+06 ~ 6.46e+06	3.89e+08	3.81e+08 ~ 3.98e+08

3.3 실험결과 및 고찰

3.3.1 압력강하

스트레이너를 통과하는 공기유동에서의 압력강하를 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 이때, 스트레이너를 통과하는 유체는 Non-Darcy 유동으로서 압력강하는 앞 장에서 제시한 Forchheimer 이론식으로 표현된다.

$$\nabla P = -\frac{\mu_f}{K} U_D - \frac{C_E}{\sqrt{K}} \rho_f U_D^2 \quad (3.5)$$

식(3.5)은 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{\mu_f}{K} U_D - \frac{C_E}{\sqrt{K}} \rho_f U_D^2 \quad (3.6)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu_f}{K} U_D + \frac{C_E}{\sqrt{K}} \rho_f U_D^2 \quad (3.7)$$

$$\frac{1}{\mu_f U_D} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) = \frac{C_E}{\sqrt{K}} \left(\frac{U_D}{\nu} \right) + \frac{1}{K} \quad (3.8)$$

식(3.8)에서 $\frac{1}{\mu_f U_D} \left(\frac{\Delta P}{L} \right)$ 와 $\left(\frac{U_D}{\nu} \right)$ 는 기존의 연구에서 선형적인 관계를 보인다고 알려져 있다 [3][11]. 또한, 식(3.8)에서 y절편이 $1/K$ 이고, 직선의 기울기가 C_E/\sqrt{K} 임을 알 수 있다.

두 가지 타입 스트레이너에 대해 표3.2 실험조건과 같이 압력강하 실험을 한 결과 철가루 투입량이 많아질수록 압력강하가 증가하고, 포러스 타입 스트레이너가 매쉬타입 보다 압력강하가 더 크다는 것을 확인할 수 있었으며, 압력강하 실험결과를 표 3.7, 3.8과 같이 나타내었다.

표3.7 매쉬타입 스트레이너 압력강하 실험 결과표

압력조건(Pa)		100,000	200,000	300,000	400,000	500,000	600,000
기본상태 압력강하(ΔP) (Pa)	1회	102	157	206	257	306	380
	2회	100	160	204	248	308	378
	3회	102	157	205	256	320	394
	4회	102	156	203	248	306	381
	5회	101	159	204	255	315	384
	6회	107	160	210	263	313	397
	7회	101	166	208	260	317	392
	8회	104	160	206	259	328	398
	9회	102	163	213	252	313	394
	10회	103	161	212	256	328	388
첼가루5g투입 압력강하(ΔP) (Pa)	1회	211	340	480	650	850	1037
	2회	218	344	475	648	844	1016
	3회	208	350	471	642	854	1031
	4회	211	339	485	654	856	1074
	5회	205	344	477	653	824	1031
	6회	221	343	484	641	861	1028
	7회	223	351	489	659	871	1017
	8회	219	338	488	642	874	1066
	9회	217	341	496	651	857	1016
	10회	205	359	477	644	846	1033
첼가루10g투입 압력강하(ΔP) (Pa)	1회	410	651	856	1058	1348	1791
	2회	408	647	851	1036	1338	1756
	3회	403	658	848	1053	1341	1748
	4회	399	639	861	1024	1323	1823
	5회	416	641	866	1038	1361	1798
	6회	409	649	855	1062	1351	1797
	7회	404	645	841	1044	1348	1833
	8회	401	641	857	1021	1341	1778
	9회	398	658	838	1034	1358	1750
	10회	411	639	869	1066	1321	1814
첼가루20g투입 압력강하(ΔP) (Pa)	1회	692	984	1276	1540	1898	2441
	2회	682	995	1278	1538	1864	2420
	3회	679	987	1254	1543	1872	2449
	4회	692	983	1267	1541	1898	2438
	5회	690	969	1268	1528	1920	2410
	6회	677	990	1238	1549	1948	2438
	7회	700	974	1288	1550	1943	2560
	8회	702	978	1249	1546	1910	2324
	9회	688	987	1241	1541	1905	2389
	10회	698	986	1273	1551	1878	2396

표3.8 포러스타입 스트레이너 압력강하 실험 결과표

압력조건(Pa)		100,000	200,000	300,000	400,000	500,000	600,000
기본상태 압력강하(ΔP) (Pa)	1회	112	190	261	339	418	506
	2회	110	188	260	337	416	510
	3회	113	191	258	340	419	511
	4회	112	191	261	340	420	515
	5회	121	194	265	337	430	528
	6회	114	190	266	345	425	525
	7회	114	196	261	343	432	524
	8회	116	194	267	343	436	535
	9회	114	195	273	350	433	539
	10회	119	196	272	352	447	550
철가루5g투입 압력강하(ΔP) (Pa)	1회	264	394	563	705	921	1136
	2회	264	395	578	711	923	1134
	3회	263	390	569	723	931	1141
	4회	260	389	554	689	918	1127
	5회	259	397	546	704	923	1125
	6회	270	402	560	703	925	1139
	7회	264	405	575	712	917	1122
	8회	269	399	573	709	911	1148
	9회	267	397	561	700	934	1137
	10회	266	397	556	699	928	1130
철가루10g투입 압력강하(ΔP) (Pa)	1회	429	689	928	1199	1495	1979
	2회	427	685	923	1225	1485	1944
	3회	422	696	920	1229	1488	1936
	4회	417	677	933	1227	1470	2011
	5회	434	679	938	1191	1508	1986
	6회	428	687	927	1199	1498	1985
	7회	423	683	913	1211	1495	2021
	8회	420	679	929	1256	1488	1966
	9회	417	696	910	1238	1505	1937
	10회	430	677	941	1226	1468	2002
철가루20g투입 압력강하(ΔP) (Pa)	1회	711	1023	1348	1712	2050	2632
	2회	701	1035	1350	1720	2016	2611
	3회	699	1026	1326	1725	2024	2640
	4회	712	1022	1339	1698	2049	2629
	5회	710	1009	1340	1711	2072	2601
	6회	697	1030	1310	1705	2100	2629
	7회	720	1014	1360	1730	2095	2751
	8회	722	1018	1321	1705	2062	2515
	9회	708	1027	1313	1719	2057	2580
	10회	717	1025	1345	1722	2030	2587

먼저 매쉬타입 스트레이너에 대해 기본상태, 철가루 5, 10, 20 g을 투입하여 얻은 실험결과의 평균값을 이용해 식(3.8)을 계산하여 그림 3.6에 나타내었으며, $\frac{1}{\mu_f U_D} \left(\frac{\Delta P}{L} \right)$ 와 $\left(\frac{U_D}{\nu} \right)$ 의 관계가 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 매쉬타입 스트레이너는 기본상태에서 압력이 증가할수록 완만한 기울기를 보이는 반면, 철가루 투입량이 늘어날수록 경사진 기울기를 보이는 형태를 확인하였다. 각 그래프의 기울기와 Y절편을 구하기 위하여 각 실험결과 추세선을 식(3.9), (3.10), (3.11), (3.12)에 나타내었다.

포러스타입 스트레이너에 대해서도 기본상태, 철가루 5, 10, 20 g을 투입하여 얻은 실험결과의 평균값을 이용해 식(3.8)을 계산하여 그림 3.7에 나타내었으며, $\frac{1}{\mu_f U_D} \left(\frac{\Delta P}{L} \right)$ 와 $\left(\frac{U_D}{\nu} \right)$ 의 관계가 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 마찬가지로 포러스타입 스트레이너도 기본상태에서 압력이 증가할수록 완만한 기울기를 보이며, 철가루 투입량이 늘어날수록 경사진 기울기를 보이는 형태를 확인하였다. 실험결과 추세선을 식(3.13), (3.14), (3.15), (3.16)에 나타내었다.

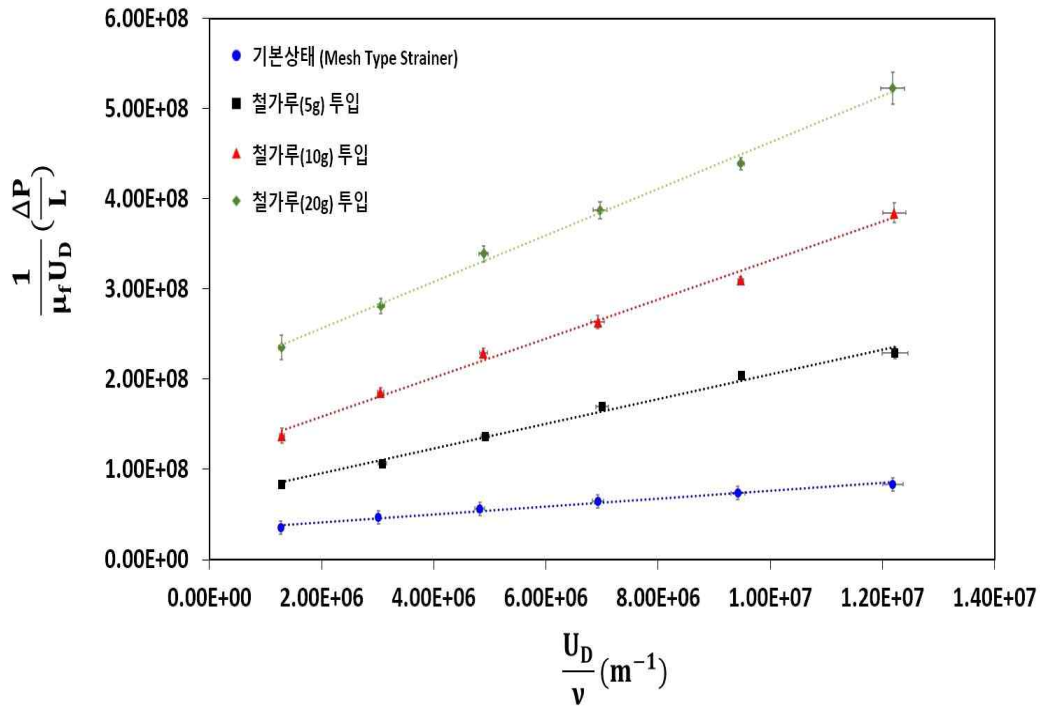


그림 3.6 매쉬타입 스트레이너 $\frac{1}{\mu_f U_D} \left(\frac{\Delta P}{L} \right)$ 와 $\left(\frac{U_D}{\nu} \right)$ 의 선형관계

매쉬타입 스트레이너(Mesh Type Strainer)

$$\text{기본상태} : \frac{1}{\mu_f U_D} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) = 4.18 \frac{U_D}{\nu} + 3.31e+7 \quad \text{식(3.9)}$$

$$\text{철가루(5g)투입} : \frac{1}{\mu_f U_D} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) = 12.9 \frac{U_D}{\nu} + 6.78e+7 \quad \text{식(3.10)}$$

$$\text{철가루(10g)투입} : \frac{1}{\mu_f U_D} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) = 21.6 \frac{U_D}{\nu} + 1.15e+8 \quad \text{식(3.11)}$$

$$\text{철가루(20g)투입} : \frac{1}{\mu_f U_D} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) = 25.7 \frac{U_D}{\nu} + 2.04e+8 \quad \text{식(3.12)}$$

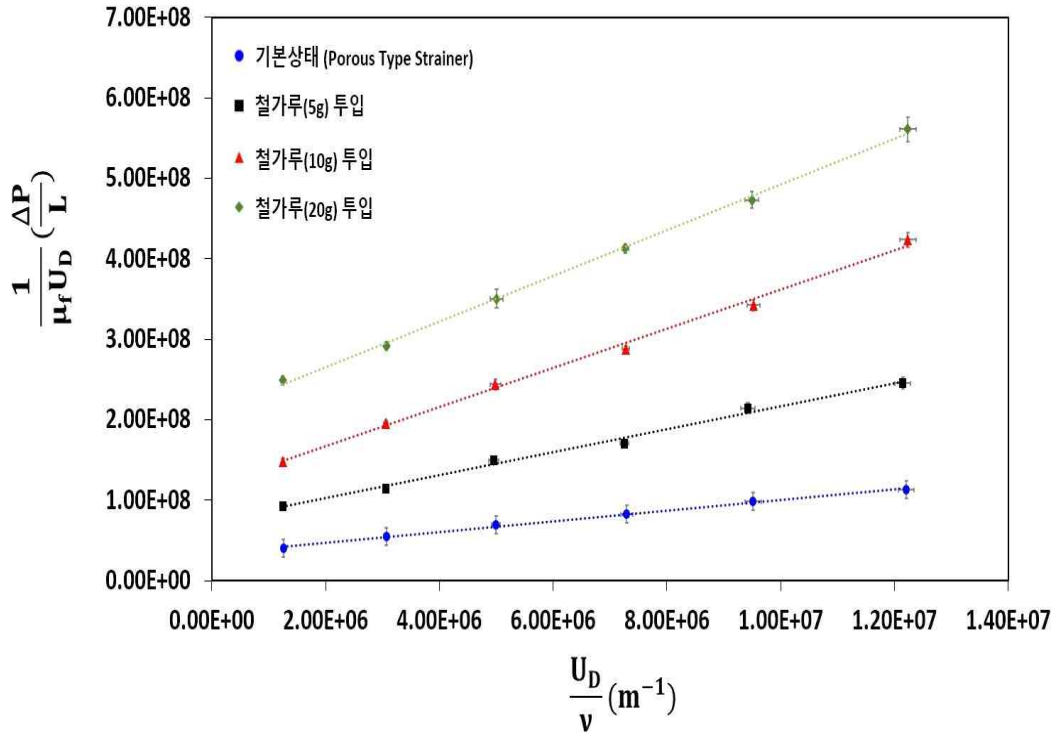


그림 3.7 포러스타입 스트레이너 $\frac{1}{\mu_f U_D} \left(\frac{\Delta P}{L} \right)$ 와 $\left(\frac{U_D}{\nu} \right)$ 의 선형관계

포러스타입 스트레이너(Porous Type Strainer)

$$\text{기본상태} : \frac{1}{\mu_f U_D} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) = 7.28 \frac{U_D}{\nu} + 3.15e+7 \quad \text{식(3.13)}$$

$$\text{철가루(5g)투입} : \frac{1}{\mu_f U_D} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) = 16.1 \frac{U_D}{\nu} + 6.83e+7 \quad \text{식(3.14)}$$

$$\text{철가루(10g)투입} : \frac{1}{\mu_f U_D} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) = 26.1 \frac{U_D}{\nu} + 1.11e+8 \quad \text{식(3.15)}$$

$$\text{철가루(20g)투입} : \frac{1}{\mu_f U_D} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) = 30.1 \frac{U_D}{\nu} + 2.01e+8 \quad \text{식(3.16)}$$

두 가지 타입 스트레이너 압력강하 측정실험 결과를 비교하기 위하여 그림 3.8에 나타내었다.

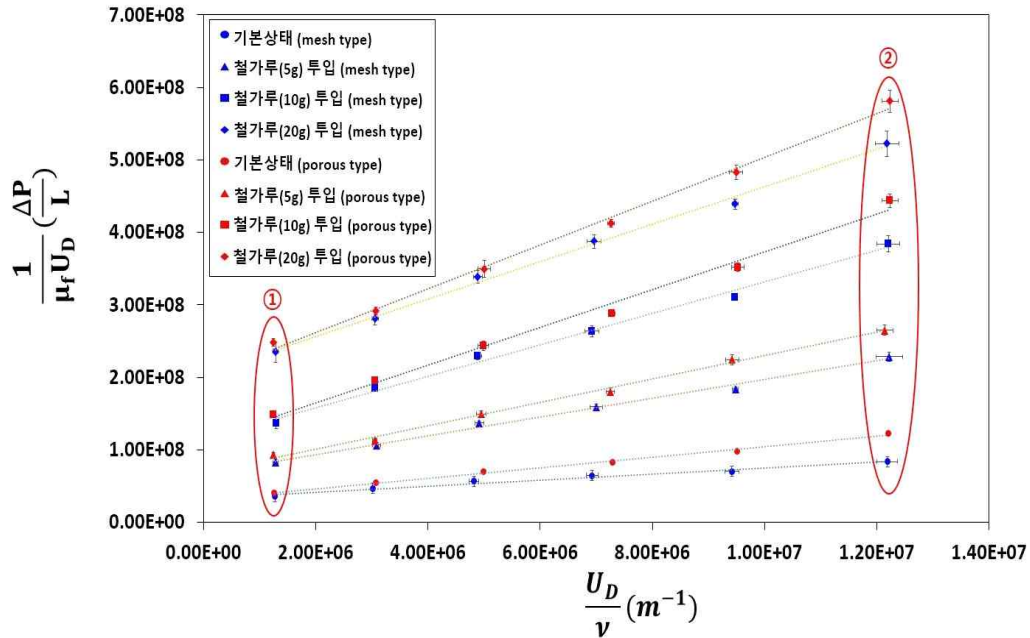


그림 3.8 매쉬타입과 포러스타입 스트레이너 압력강하 실험결과 비교

두 가지 타입 스트레이너 모두 작동유체의 유량이 증가할수록 비어 있는 기본상태 스트레이너 보다 외부의 이물질이 유입될 시 기울기와 y 절편이 모두 증가하는 것을 실험을 통해 확인하였다. 그리고 포러스타입 스트레이너가 매쉬타입보다 일반적으로 압력강하가 크다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 영역①과 같이 유속이 느린 구간에서는 스트레이너를 통과하기 전 입구압력이 100,000 Pa이며 평균 약 0.015%의 압력강하가 발생하였고, 영역②와 같이 유속이 빠른 구간에서는 스트레이너를 통과하기 전 입구압력이 600,000 Pa이며 평균 약 0.037%의 압력강하가 발생함을 확인하였다. 이러한 결과를 살펴보았을 때 상대적으로 입구압력이 낮고 유량이 작음(저속) 구간에서 압력강하는 스트레이너 형상에는 크게 영향을 받지 않는 반면, 입구압력이 높고 유량이 큼(고속) 구간에서는 상대적으로 촘촘하게 레이저 가공을 한 포러스타입의

스트레이너가 매쉬타입에 비해 유량의 진행방향으로 상대적으로 저항을 많이 받아 압력강하가 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

3.3.2 투과율 및 Ergun상수

이러한 결과로부터 작동유체가 공기인 경우, 실험을 통해 측정한 데이터를 바탕으로 식 (3.8)로부터 직선의 기울기가 C_E/\sqrt{K} 이고, y절편이 $1/K$ 임을 이용하여, 스트레이너 투과율(K)과 관성저항인 Ergun 상수(C_E)를 도출할 수 있다.

기본상태, 철가루 5, 10, 20 g을 투입했을 경우 두 가지 스트레이너를 통과하는 공기의 압력강하에 따른 투과율과 Ergun상수를 표 3.9, 3.10에 나타내었으며, 그래프를 그림 3.9, 3.10에 나타내었다.

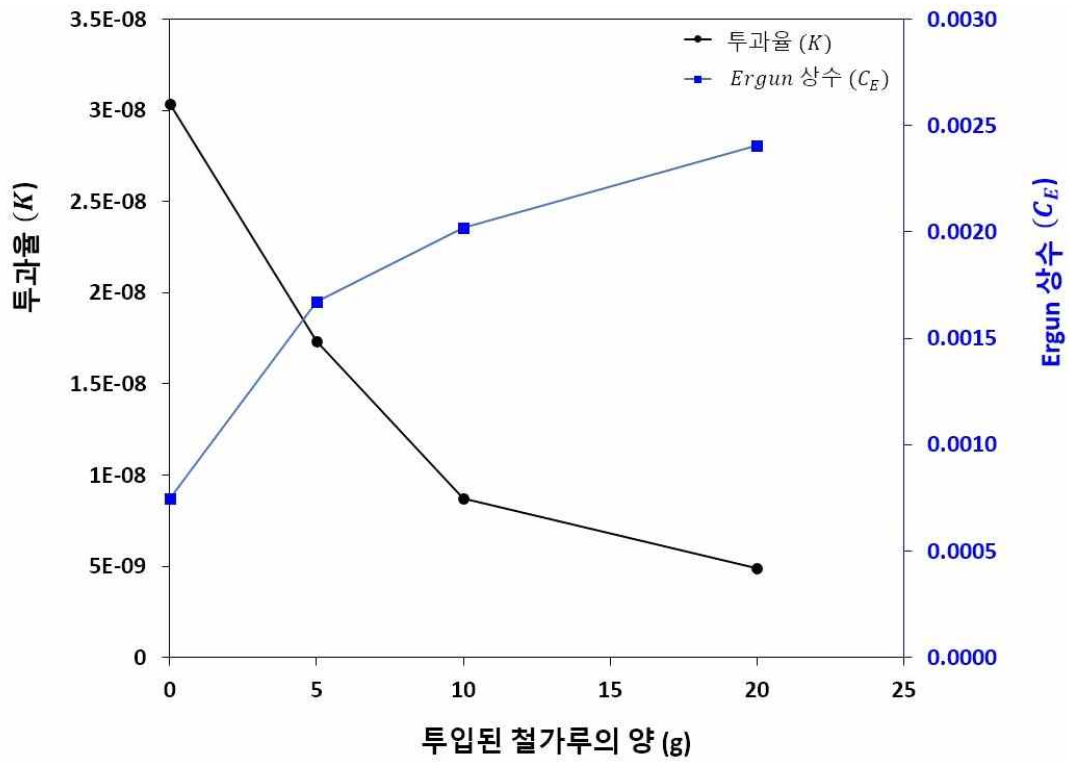


그림 3.9 매쉬타입 스트레이너 압력강하에 따른 투과율과 Ergun상수 관계

표 3.9 매쉬타입 스트레이너 압력강하에 따른 투과율과 Ergun상수

매쉬타입 스트레이너	투과율(K)	Ergun상수(C _E)
기본상태	3.03e-08	7.48e-04
철가루(5 g) 투입	1.73e-08	1.67e-03
철가루(10 g) 투입	8.69e-09	2.01e-03
철가루(20 g) 투입	4.89e-09	2.41e-03

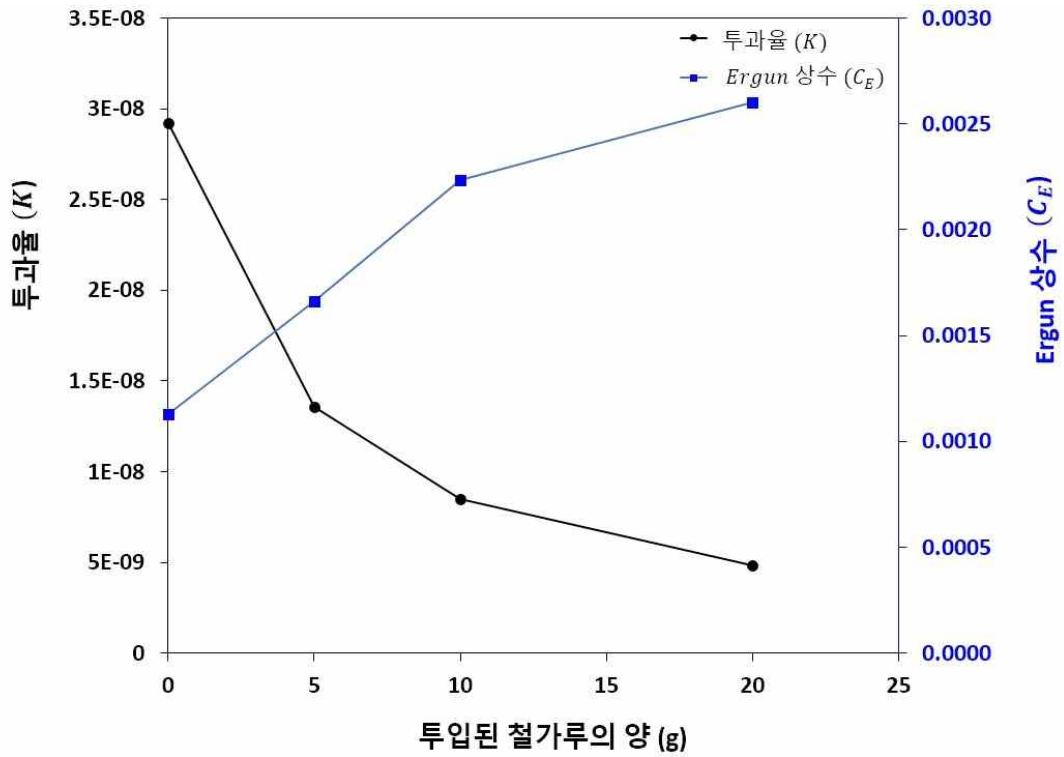


그림 3.10 포러스타입 스트레이너 압력강하에 따른 투과율과 Ergun상수 관계

표 3.10 포러스타입 스트레이너 압력강하에 따른 투과율과 Ergun상수

포러스타입 스트레이너	투과율(K)	Ergun상수(C _E)
기본상태	2.91e-08	1.13e-03
철가루(5 g) 투입	1.35e-08	1.66e-03
철가루(10 g) 투입	8.47e-09	2.23e-03
철가루(20 g) 투입	4.81e-09	2.61e-03

작동유체를 공기로 하여 실험한 결과 두 가지 타입의 스트레이너 모두 기본상태에서 철가루 투입량이 많아질수록 투과율은 감소하는 것을 확인하였고, Ergun 상수는 증가하는 것을 확인하였으며, 그림 3.9, 3.10로부터 스트레이너의 투과율과 Ergun 상수는 외적 요인 (철가루 투입량)에 따라 반비례 그래프를 형성하는 것을 확인하였다.

또한 매쉬타입 스트레이너가 포러스타입 스트레이너보다 투과율이 크다는 것을 확인하였고, Ergun 상수는 작다는 것을 확인하였다. 그림 3.9, 3.10으로부터 얻은 스트레이너 압력강하의 실험결과와 비교를 하여, 스트레이너에 형성되는 압력강하가 클수록 투과율이 작고, Ergun 상수는 크다는 것을 확인할 수 있었다.

투과율이 작다는 의미는 스트레이너를 통과하는 유체가 저항을 크게 받아 압력강하가 크게 형성된다는 의미이며, Ergun 상수가 크다는 것은 스트레이너를 통과하는 유체에 의한 관성저항이 많이 형성된다는 의미이다. 즉, 스트레이너에 형성되는 압력강하가 클수록 투과율은 작고 Ergun 상수는 커지며, 압력강하가 작을수록 투과율은 크고 Ergun 상수는 작아진다는 것을 확인하였다.

제 4 장 가스터빈 연소기 압력강하 특성

4.1 Forchheimer 이론식 기준 압력강하 예측

3장에서 작동유체가 공기인 경우 두 가지 스트레이너를 통과하는 유체의 압력강하 특성에 대해 살펴보았다. 실험을 통해 확인한 스트레이너 기본상태 고유의 투과율과 Ergun 상수를 실제 가스터빈 연소기 스트레이너를 통과하는 연료의 고속유동에 적용하여 Forchheimer 이론식을 통해 스트레이너에 형성되는 압력강하를 예측할 수 있으며, 앞서 언급된 바와 같이 식 (3.5)로 나타낼 수 있다.

$$\nabla P = -\frac{\mu_f}{K} U_D - \frac{C_E}{\sqrt{K}} \rho_f U_D^2$$

또한 서울복합발전소 가스터빈 출력 180 MW을 기준으로 하여 연료 상태량을 표 4.1에 나타내었다.

표 4.1 서울복합발전소 연료상태량

연료종류	NG (Natural Gas)
가스터빈 출력 (MW)	180
연소기 노즐 당 공급유량 (m ³ /s)	0.09
공급압력 (Bar)	18
속도 (m/s)	47
온도 (°C)	473
밀도 (kg/m ³)	7.34
점성계수 (Pa·s)	1.11e-05

앞 장에서 구한 두 가지 타입 스트레이너 투과율(K), Ergun상수(C_E)와 표 4.1의 서울복합발전소 연료상태량을 식 4.1에 대입하였다. 실제 가스터빈 연소기 스트레이너에 기본상태 및 앞서 실험한 기준인 철가루 5, 10, 20 g 누적되었을 경우 압력강하 계산 결과를 아래 표 4.2와 같이 나타내었다.

표 4.2 가스터빈 연소기 스트레이너 압력강하 이론식 예측값

구분	압력강하 (bar)	
	매쉬타입	포리스타입
기본상태	0.74	1.06
철가루 5 g	2.01	2.30
철가루 10 g	3.50	3.88
철가루 20 g	5.66	6.12

Forchheimer 이론식을 통해 압력강하 예측값을 계산한 결과 철가루가 없는 기본상태 기준 매쉬타입은 0.74 bar, 포리스타입은 1.06 bar의 압력강하가 형성되는 것을 확인할 수 있었으며, 포리스타입 스트레이너가 매쉬타입보다 압력강하가 평균 0.36 bar 큰 것으로 확인하였다. 앞서 실험 결과와 같이 실제 가스터빈 연소기 유동에서도 포리스타입 스트레이너가 매쉬타입보다 압력강하가 크다는 것을 확인하였다. 그림 4.1에 가스터빈 연소기 스트레이너 유동의 압력강하를 비교하여 나타내었다.

4.2 실제 가스터빈 유동 압력강하 특성

4.2.1 스트레이너 압력강하 및 발전출력

스트레이너 형상에 따른 실제 가스터빈 유동의 압력강하와 발전출력 변화를 확인하기 위하여 같은 운전조건 하에 서울복합발전소 가스터빈 1호기에는 포러스타입 스트레이너를 설치하고 2호기에는 매쉬타입 스트레이너를 설치하여 발전출력 변화를 확인하였다. 표 4.3에 서울복합발전소 가스터빈 운전조건을 나타내었다.

표 4.3 서울복합발전소 가스터빈 운전조건

구분	1호기 가스터빈	2호기 가스터빈
Class	M501GAC	
Cone-Strainer Type		
	포러스타입	매쉬타입
IGV 개도	+25° 고정	+25° 고정
측정시간	21.05.23 23:20 ~ 24. 01:35	

IGV³⁾를 25도로 고정하여 같은 운전조건에서 스트레이너 타입만을 차이를 두어 약 2시간 동안 운전하였다. 실제 가스터빈 연소기에는 스트레이너 차압을 측정하는 설비가 없어 스트레이너를 통과한 연소실 내 연료 노즐 배관 최종단의 평균압력과 가스터빈 발전출력을 그림 4.1과 같이 나타내었다.

3) IGV(Inlet Guide Vane) : 가스터빈 연소실에 공급되는 공기량을 조절하는 고정익

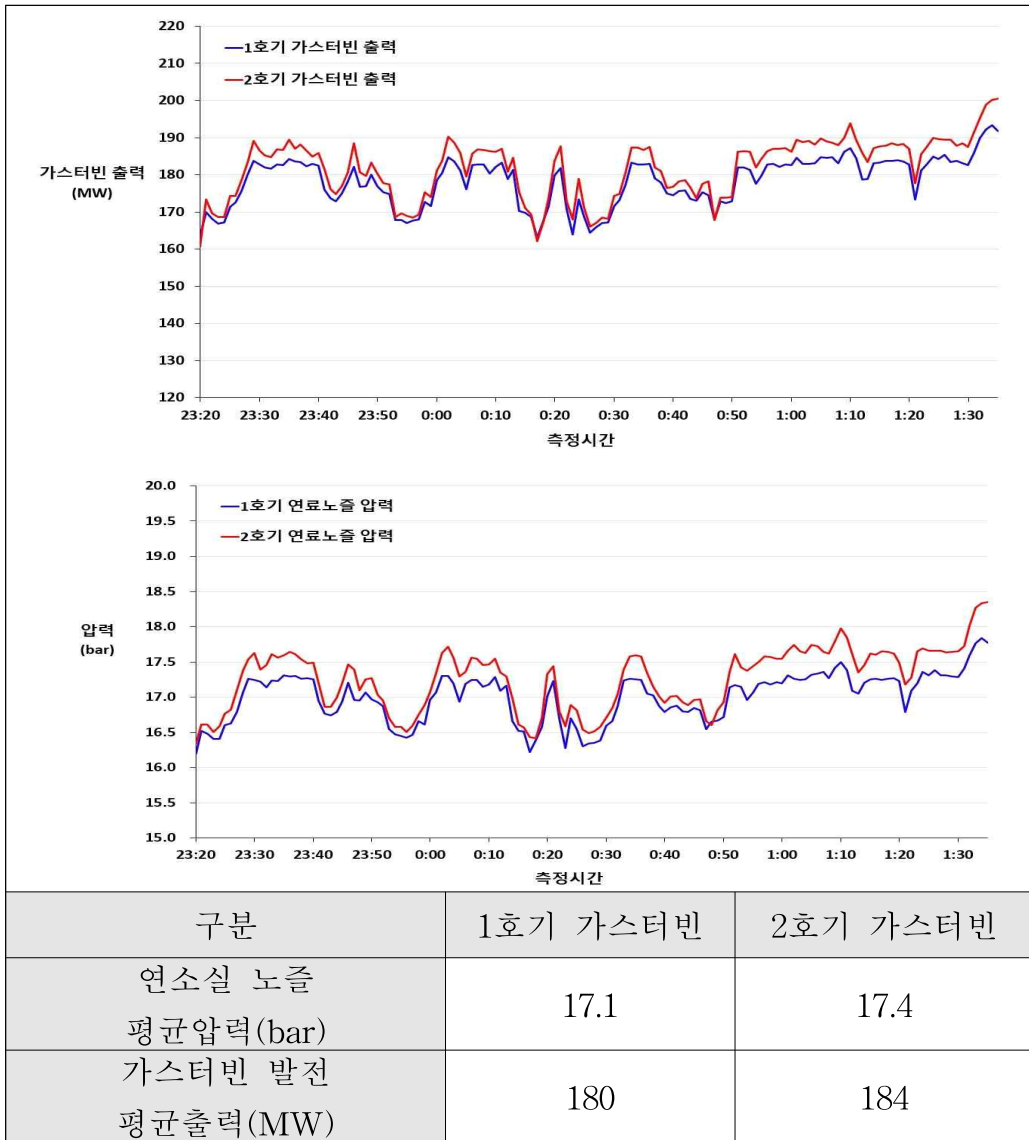


그림 4.1 가스터빈 연소기 연료노즐 압력과 발전출력의 관계

그림 4.1로부터 가스터빈 연소기 연료공급 노즐의 압력이 클수록 발전 출력이 크다는 것을 알 수 있다. 포러스타입 스트레이너를 설치한 1호기 가스터빈의 연소기 연료노즐의 평균압력이 매쉬타입 스트레이너를 설치한 2호기 가스터빈의 연소기 연료노즐 평균압력보다 약 0.3 bar 낮다는 것을 확인하였고, 평균 발전출력은 약 4 MW, 2.2 % 차이가 나는 것을 확인하였다. 즉, 압력강하가 클수록 발전출력이 낮아지는 것을 확인하였다.

이는 앞서 Forchheimer 이론식을 통해 압력강하를 예측한 0.36 bar와 매우 근접한 값이라는 것을 확인할 수 있으며, 이를 바탕으로 Forchheimer 이론식 기준 압력강하 예측의 타당성을 검증하고, 스트레이너의 투과율과 Ergun상수 도출과정이 적합함을 밝혀내었다.

4.2.2 스트레이너 압력강하 및 가스터빈 효율

가스터빈의 원리는 열역학적으로 브레이튼 사이클로 설명된다. 압축기를 통과한 압축공기와 연료가 만나 고온, 고압의 가스를 생성하여 가스터빈을 가동하여 전력을 생산한다. 브레이튼 사이클은 그림 4.2와 같이 2개의 등압과정과 2개의 단열 과정으로 되어있다.

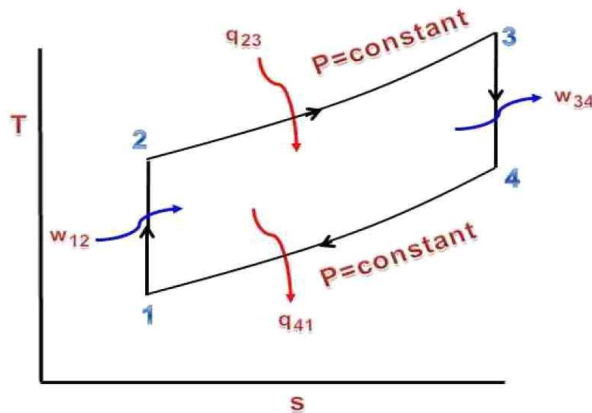


그림 4.2 브레이튼 사이클 T-S선도 [6]

공기는 1에서 2까지 등엔트로피 과정을 따라서 압축이 되며, 2에서 3으로 등압에서 가열이 된 후에 등엔트로피 과정으로 3에서 4로 팽창을 한다. 가스터빈의 효율은 식 4.1과 같이 나타낼 수 있으며, w 는 단위유량 당 일의 출입량, q 는 단위유량 당 열의 출입량을 나타낸다.

$$\eta_{GT} = \frac{w_{34} - w_{12}}{q_{23}} \quad (4.1)$$

표 4.4 브레이튼 사이클 경계조건

구분	가스터빈 1호기	가스터빈 2호기
발전출력	180 MW	
초기온도(T_1)	대기온도 (293 K)	
초기압력(P_1)	대기압	
최대온도(T_{max})	1773 K	
최대압력(P_{max})	17.1 bar	17.4 bar

일반적으로 가스터빈 효율을 계산하기 위한 응용프로그램인 MATLAB CANTERA를 이용하여 표 4.4와 같이 경계조건을 주어 효율을 계산하였다. 가스터빈 180MW의 발전출력 하에 초기온도 및 압력은 대기상태를 기준으로 하였고 최대온도는 가스터빈 M501GAC 기종의 터빈입구온도 1,500℃를 적용하였다. 단, 시간 당 공급되는 연료의 총량은 고려하지 않았으며, 최대압력은 압축기를 통과한 공기와 연료가 혼합되어 연소가 일어나기 직전의 압력인 연소실 노즐 평균압력을 적용하였다.

가스터빈 1호기와 2호기는 연소기 스트레이너 타입을 제외한 나머지 경계조건은 모두 동일하므로 연소실 노즐 평균압력만을 변수로 설정하였고, 연료의 공급량을 제외한 스트레이너의 압력강하에 따른 효율을 브레이튼 사이클 기준으로 계산하여 가스터빈 1,2호기의 T-S선도를 그림 4.3에 나타내었다.

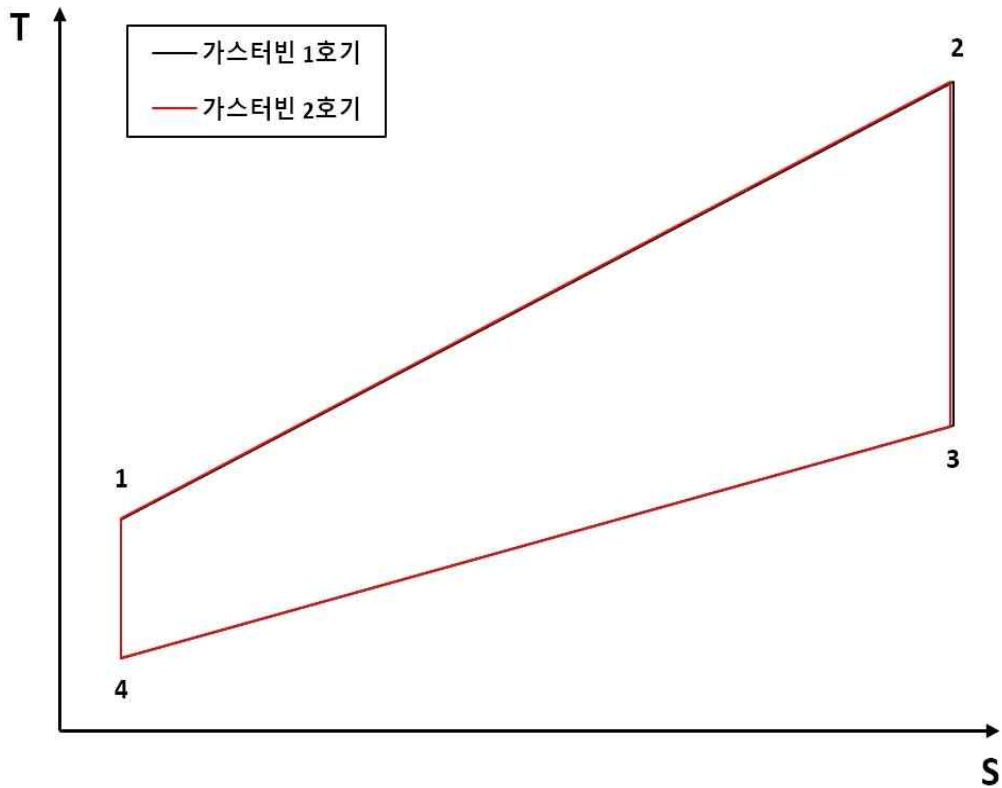


그림 4.3 서울복합 가스터빈 1,2호기 T-S선도

MATLAB CANTERA를 통해 도출한 가스터빈 1,2호기의 효율선도를 살펴본 결과 거의 차이가 나지 않고 같은 T-S선도를 나타나는 것으로 확인하였다. T-S선도에서 사각형의 면적은 효율을 의미하며, 실제로 효율을 계산한 결과 1호기의 경우 52.01 %, 2호기의 경우 52.23 % 로 약 0.22 % 차이로 2호기의 효율이 약간 큰 것으로 확인하였다.

제 5 장 결론

가스터빈 연소기는 고온부품으로서 연료노즐 내부에 설치되는 스트레이너의 압력강하를 측정하는 설비가 없어, 실제 가스터빈 유동에서 스트레이너의 형상별 압력강하 특성을 파악하기 위한 실험적, 이론적 연구를 수행하였다. 서울복합발전소 가스터빈 M501GAC 기종에서 사용하는 매쉬타입과 포러스타입의 스트레이너를 사용하여 공기유동에서의 형상에 따른 압력강하 특성과 실험을 통해 압력강하 특정 상수를 도출한 후, 실제 가스터빈 시스템에 적용하여 가스터빈 연소기 스트레이너를 통과하는 유동의 압력강하를 이론식으로 예측하였다. 또한 서울복합발전소 1,2호기의 출력량을 비교하여 스트레이너 형상에 따른 발전출력 및 효율을 수치적으로 해석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 스트레이너를 통과하는 유동은 관성력의 영향으로 인해 속도에 대한 압력강하가 비선형적인 관계를 보이는 Non-Darcy 유동이며, Forchheimer 이론식을 통해 압력강하를 계산할 수 있다. 압력강하 특성을 파악하기 위해, 매쉬, 포러스 타입 스트레이너를 설치하여 기본상태, 철가루 5, 10, 20 g을 추가하면서 압력강하 실험을 10번 반복 수행하였다. 유입되는 공기의 압력과 유량을 변화시키며 실험을 진행하였으며, 스트레이너 고유의 투과율과 관성저항인 Ergun 상수를 도출할 수 있음을 확인하였다.

2. 포러스타입 스트레이너가 매쉬타입보다 압력강하가 더 큰 것으로 확인했으며, 유속이 빨라질수록 압력강하 차이가 크다는 것을 확인하였다. 또한, 압력강하에 따른 스트레이너의 투과율과 Ergun상수를 관계를 파악하였으며, 기본상태와 철가루 투입량에 따른 투과율과 Ergun상수를 Forchheimer식을 통해 도출하였다. 그리고 T-분포도를 이용해 앞서 실험한 10개의 데이터에 대해 95%의 신뢰구간의 불확도를 구하였다.

3. 실험을 통해 도출한 매쉬, 포러스 타입 스트레이너 고유의 투과율과 Ergun상수를 실제 180 MW 정격출력 가스터빈 연소기 스트레이너를 통과하는 연료의 고속유동에 적용하여 Forchheimer식을 통해 압력강하를 예측하였으며, 기본상태 기준 매쉬타입은 0.74 bar, 포러스타입은 1.06 bar의 압력강하가 형성된다는 것을 확인하였다. 검증을 위해 서울복합발전소 가스터빈 1,2호기에 매쉬타입과 포러스타입 스트레이너를 설치 후 연소실 노즐 평균압력을 비교하여 약 0.3 bar의 압력강하 차이가 나는 것을 확인하여 Forchheimer식을 통해 예측한 압력강하와 거의 일치하는 것을 확인하였다. 또한, 스트레이너의 압력강하에 따른 발전출력 변화량과 가스터빈 효율을 확인하였으며, 180 MW 출력기준에서 매쉬타입을 설치한 가스터빈이 포러스타입을 설치한 가스터빈보다 발전출력은 약 2.2% 높은 것을 확인하였다.

본 연구가 시사하는 바는 크게 두 가지로 생각해 볼 수 있다.

첫째, 가스터빈 운영적 관점이다. 매쉬타입과 포러스타입의 스트레이너는 고유형상에 의해 약 0.3 bar의 압력강하 차이가 있음을 본 연구에서 확인하였다. 가스터빈에 같은 연료의 압력이 공급되는 조건에서는 압력강하가 상대적으로 작은 매쉬타입 스트레이너를 사용하면 연료의 손실을 줄이고 발전출력을 높게 생산해 낼 수 있다. 즉, 가스터빈의 운영적 관점에서는 매쉬타입 스트레이너를 사용하는 것이 유리하다고 판단할 수 있다.

둘째, 가스터빈 유지정비적 관점이다. 가스터빈 연소기 스트레이너의 설치목적은 연료배관 내 이물질을 걸러주는 역할이다. 본 연구를 통해 포러스타입이 매쉬타입 스트레이너보다 투과율이 작은 것을 확인하였다. 투과율이 작다는 것은 같은 이물질을 상대적으로 잘 걸러주어 기기의 신뢰성을 높인다는 것을 의미한다. 즉, 가스터빈 유지정비적 관점에서는 포러스타입 스트레이너를 사용하는 것이 유리하다고 판단할 수 있다.

현재 서울복합발전소는 상업운전을 시작한지 약 1년 정도 밖에 안되는 신생발전소이며, 두 가지 타입의 스트레이너 중 무엇이 발전소 전체적인 관점에서 유리하다고 판단하기는 아직 이르다. 하지만 본 연구를 통해 얻은 결과는 가스터빈 운영 및 설계 관점에는 크게 이점을 가져다 줄 것으로 예상된다. 스트레이너 압력강하 데이터를 기초로 하여 가스터빈 운영자는 연소기에 공급되는 연료와 공기의 압력 등을 실시간으로 제어하여 최적의 출력을 생산해낼 수 있다. 또한, 본 연구결과를 토대로 연소기 출력별 연료의 최적 물성치를 적용하여 저녹스 버너 설계 개발에도 기초자료가 될 것이라 사료된다.

참 고 문 헌

1. 정일선. "선박용 스트레이너 압력강하 해석에 관한 연구." 국내석사학위논문 동아대학교 대학원, pp. 1-12, 2013.
2. Korea Midland Power CO.,LTD, Seoul CCPP, GT O&M Manual (4290-3300-ZM-420-001), 2018
3. 서민교. "다공성재를 통과하는 압축성 유체의 압력강하 특성에 관한 연구." 국내석사학위논문 한국항공대학교 대학원, pp. 1-39, 2013
4. B. K. Shin and C. H. Kwon, "Comparison of Flow Characteristics for the Development of a C-Type Strainer with Its Inlet and Outlet on a Straight Line", Journal of Digital Convergence, pp. 258-260, 2016.
5. 「T분포표」, 위키백과(2021), <https://ko.wikipedia.org/wiki/T분포표>
6. 항공과학원리 "열기관_열효율 계산", 한국우주항공연구원, pp. 2-4, 2012
7. M. Vidal et al, Evaluation of lower flammability limits of fuel - air - diluent mixtures using calculated adiabatic flame temperatures, Journal of Hazardous Materials 130, 2005.
8. 유경식·이현규·조진수, "챔퍼가 적용된 타공판의 압력 강하 특성에 대한 연구", 한국항공우주학회지, 2019.
9. 정일선 외, "타공형 스트레이너의 압력강하 예측을 위한 다공성모델링", 한국마린엔지니어링학회지 제 37권 제4호, 2013.
10. 김용유. "다공성 매체에서의 유체 흐름에 대한 전산모사." 국내석사학위논문 조선대학교 대학원, pp. 14-20, 2019.
11. Bazarov, "New Class of Porous Injectors for Combustion Chambers and Gas Generators", AIAA, pp. 78-1952, 1993
12. Kathleen R. Dupre, "Relating Porous Media Structure to the darcy-forchheimer Model", Boston University College Engineering, 2020

13. Fox, W.R., and McDonald T.A “Introduction to Fluid mechanics”, pp. 401-436, 2004
14. Bejan, A., and Nield, A.D., “Convection on porous media”, 2006
15. Physics for Scientists and Engineers A Strategic Approach with Modern Physics Randall D. Knight Third Edition, PEARSON, 2014.
16. Korea Midland Power CO.,LTD, Seoul CCPP, PAR-C Software Program

Abstract

A Study on the Pressure Drop Characteristics According to the Shape of the a Gas Turbine Combustor Strainer

Kim Jun Gu

Department of Engineering Practice
Graduate School of Engineering Practice
Seoul National University

Since the gas turbine combustor is a high-temperature component and there is no facility to measure the pressure drop of the strainer installed inside the fuel nozzle, theoretical and experimental studies were performed to understand the pressure drop characteristics of each strainer shape in the actual gas turbine flow. The flow through the strainer is a Non-Darcy flow in which the pressure drop with respect to velocity has a non-linear relationship due to the influence of inertial force, and the Ergun coefficient which is the intrinsic transmittance and inertia resistance of the strainer, is derived through the measured pressure drop data and Forchheimer's theory.

By installing a mesh type and porous type combustor strainer of the Seoul Combined Cycle Power Plant gas turbine M501GAC model, the experiment was conducted while varying the pressure and flow rate of the incoming air under the condition that 5, 10, 20 g of iron powder was added. The strainer's intrinsic transmittance and inertia resistance, Ergun's coefficient, are shown. In addition, the pressure drop was predicted through the Forchheimer equation by applying the strainer shape factor derived through the experiment to the actual flow of the 180 MW rated output gas turbine. It was confirmed that a pressure drop of 0.74 bar for the mesh type and 1.06 bar for the porous type was formed based on the basic condition.

In fact, by comparing the average pressure of the combustion chamber nozzles after operation with different strainer shapes of Seoul Combined Cycle Power Plant Units 1 and 2, it was confirmed that there was a difference in pressure drop of about 0.3 bar. In addition, the amount of change in power generation output and gas turbine efficiency according to the strainer pressure drop were confirmed. Based on 180MW power generation output, the gas turbine with the mesh type strainer had about 4MW higher power generation output than the gas turbine with the porous type strainer. The efficiency of the gas turbine with the mesh type was about 0.22% higher than that of the gas turbine with the porous type.

keywords : Non-Darcy flow, Forchheimer Equation, Mesh Type
Strainer, Porous Type Strainer, Transmittance, Ergun
Coefficient

Student Number : 2020-23036