

공학석사 학위논문

Total Energy System용 고성능
배열회수 열교환기 개발

지도교수 김 종 수

이 논문을 공인 학위논문으로 제출함



2002년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

냉동공조공학과

최 권 삼

최 권 삼의 공학석사 학위논문을 인준함

2004년 6월

주 심 공학박사 최 광 환



위 원 공학박사 정 석 권



위 원 공학박사 김 종 수



목 차

ABSTRACT	i
Nomenclature	iii
제 1 장 서론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 종래의 연구	3
1.2.1 배열 회수 열교환기에 대한 연구 및 적용 사례	3
제 2 장 Total Energy System과 Bayonet tube의 개요 및 특징 ..7	
2.1 Total Energy System의 원리	7
2.2 Bayonet tube의 작동원리	9
제 3 장 실험 장치 및 방법	11
3.1 튕니 나선 환형 bayonet tube의 제작	11
3.2 실험 장치의 구성	15
3.3 실험 방법	18
3.3.1 온도 측정 및 압력 측정	18
3.3.2 냉각수 유량 및 배기가스량 측정	18
제 4 장 실험 결과 및 고찰	19
4.1 Byonet tube를 이용한 배열회수용 열교환기의 열전달 특성	19

제 5 장 결 론 36

참고문헌 38

감사의 글 40

Development of high performance waste heat recovery heat exchanger for the Total Energy System

Kwon-Sam Choi

Department of Refrigeration and Air conditioning Engineering,
Graduate school,
Pukyong National University

ABSTRACT

In this study, high performance waste heat recovery heat exchanger for the Total Energy System was developed using the bayonet tube with spiral serrated fins. Especially, this heat exchanger of bayonet tube type has operated well double water passes mechanism and characteristics. Also it was possible to manufacture easily by using conventional equipment. A cooling water passes down inner tubes to thimble form tubes, then flow back up as it boils. The heat exchanger of bayonet tube type was composed of steel tube with 7 channels(i.d: 14 mm, i.d: 31.6 mm) and spiral serrated fins. The performance tests were conducted under the next conditions : A cooling water flow rate was 273 kg/h, 400 kg/h and 550 kg/h, engine rpms were varied from 750 rpm to 3500 rpm.

From the experimental result, waste heat recovery was 9.21 when engine rpm was 3500, and pressure drop was 15 ~ 260 mmHg/m³. The effectiveness of heat exchanger was about 0.74 ~ 0.89. The performance of heat exchanger was evaluated by using the ϵ -NTU method. In the study, the NTU of the heat exchanger was 2.33.

Nomenclature

A	Area	[m ²]
C	Heat capacity rate	[KJ/K]
c _p	Specific heat	[J/kg · K]
m	Mass flow rate	[kg/h]
Nu	Nusselt Number	
Pr	Prandtl Number	
Q	Heat transfer rate	[W/m ²]
Re	Reynolds Number	
T	Temperature	[K]
v	Velocity	[m/s]
V	Exhaust gas flow rate	[m ³ /h]
W	Cooling water flow rate	[kg/h]

Greek symbols

ϵ	Effectiveness	
μ	Viscosity	[kg/s · m]

Subscripts

c	Cooling water section
h	Exhaust gas section
i	Inlet
o	Outlet
max	Maximum
min	Minimum

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

호텔, 병원, 레저타운, 오피스 빌딩, 아파트나 공장 등에서 종래에 조명이나 동력으로 사용하는 전기는 한전으로부터 공급받으며, 난방과 급탕 등의 열에너지는 석유, 가스 등의 연료를 사용하여 보일러를 가동하는 것이 일반적인 방법이었다. 그러나 최근에는 건물이나 공장 등의 현지에서 엔진을 설치하여 발전을 구동시키고, 전기를 생산함과 동시에 엔진의 배기가스와 냉각수 열을 회수하여 난방 및 급탕의 열원으로 이용하고 연료가 가진 에너지를 total로 이용하는 고에너지효율의 Total Energy System 적용이 증가하고 있다. TES의 경우, 전력 생산비가 기존의 1/3 정도로서 매우 저렴하며, 현지에서 전기를 생산하므로 송전 손실이 없으며, Gas Engine Heat Pump System이나 비상발전도 접할 수 있는 이점이 있다.

오늘날 우리나라는 물론 전 세계적으로 에너지 자원에 대한 부족과 환경 보호에 대한 국제 협약으로 산업 구조의 개선과 변화가 요구되고 있다. 특히 비산유국이면서 에너지 자원의 대부분을 수입에 의존하고 있는 우리나라의 경우, 에너지 사용량의 증가에 따른 에너지 절약의 필요성이 절실히 인식되고 있다. 따라서 1970년부터 선진국에서 연구되어 실용화 되고 있는 에너지 효율이 80% 이상인 TES(Total Energy System)이 국내에도 보급단계에 이르러 그 수요가 급진적으로 증대되고 매년 300%이상의 증가율을 보이고 있으며, 5,000억 원 이상의 국내시장이 형성되고 있다. 국내에서는 한국가스공사 등에서 이 사업을 적극 추진 중에 있다. 특히, 부산의 경우에도 롯데 호텔 등의 대형 건물이나 하수처리장의 슬러지 소각열 회수 및 다연료 소비형 공장 등에 설치되어 있으며,

도시가스 회사에서 사업을 수행중에있다. 그러나 TES의 핵심 부품인 엔진 배기가스의 배열회수 열교환기의 경우 전량 수입에 의존하고 있어 국내 개발이 시급한 단계이다. 또한 배열회수 열교환기의 수입에 따른 가격상승이 초기 투자비의 증가요인으로 작용함에 따라 수요증대에 제한 요소가 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 나선 형 bayonet tube를 사용한 배기가스-물 방식의 엔진 배열회수기를 개발하여 국산화함과 동시에 고성능화·소형화하여 선진국으로도 수출하고, 소각로나 공장과 같은 다량의 배열이 버려지는 곳에서의 배열회수 열교환기로도 활용하고자 한다.

본 연구에 사용된 bayonet tube형 열교환기는 보일러에 적용되고 있는 형식으로 특히 고온의 가스를 이용한 분야에 사용되고 있다. 이러한 bayonet tube의 외 표면에 나선형 돌기환을 부착시켜 전열면적을 높이하고자 하였다. 배가스 열교환기 내부에 배기가스의 와류를 유도하는 배플 형상의 판을 삽입하여 열전달 성능을 높여서 고온의 배기가스뿐만 아니라 중저온의 배기가스를 효과적으로 회수 할 수 있는 최적의 배열회수 열교환기를 개발하고자 한다.

1.2 종래의 연구

1.2.1 배열 회수 열교환기에 대한 연구 및 적용 사례

종래에 열교환기에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔으며, 유체의 상태 [1)고온 고압 2)유체의 점도 3)Fouling 상태 4)Slurries 5)열에 민감한 유체 6)공기로 냉각하는 경우 7)부식성이 강한 유체 등], 효율에 따른 열교환기 선정 등이 이미 정립되어 있는 상태이며, 열교환기 설계프로그램의 개발을 통해 Shell & Tube 열교환기 등은 이미 설계, 활용되고 있다.

일반적으로 배가스를 회수는 하는 열교환기는 응축형 열교환기로서 종류는 분류 방법에 따라 여러 가지로 나눌 수 있으며 열교환기를 구성하는 주요 관 및 핀 등 전열면 재료의 형상과 배열방법에 따라 나누며 여러 문헌들에서는 나관형, 핀튜브형, 셸&튜브형, 플레이트핀튜브형, 로핀형, 하아핀형, 히트파이프형 등으로 구분하여 사용하고 있다.

가. 가정용 응축형 열교환기 동향

응축형 보일러는 가스보급이 활성화된 유럽지역에서부터 먼저 개발되어 사용되었다. 유럽지역에서는 1970년도 후반에 네덜란드에서 처음으로 소용량 규모인 난방용 응축형 보일러가 개발되었으며, 응축형 보일러가 최초로 등장한 이후 유럽지역 각지에서 응축형 보일러 개발이 경쟁적으로 진행되었으며 이때 개발된 응축형 보일러들은 Agpo, Hydrotherm, Nefit, Remcha, Viessmann, DWS, Schaffer, Vaillant 및 Okomix 보일러 등이 있다.

Agpo 보일러는 네덜란드에서 최초로 개발되었으며, Agpo 보일러는 2개의

열교환기가 알루미늄 주물로 연결되어 있으며 가스버너의 연소실은 대기압 상태이다. 그리고 2차 열교환기에서는 배가스의 온도를 150°C까지 냉각하며 수증기는 90°C의 배가스 통로에서 응축하게 된다. 이때 생성한 응축수는 보일러의 하부에 모여 밖으로 배출된다. 또한 열교환기에 있어서의 급수 흐름방향은 상향류 구조로 설계되어 있다.

Nefit 보일러 형상이 매우 작을 뿐만 아니라 비교적 둘의 용량이 적기 때문에 벽면에 설치할 수도 있다. 보일러 내에 들어 있는 2개의 열교환기는 각각 10개의 흰 튜브(fin tube)로 구성되어 있으며, 열교환기의 소재를 알루미늄 주물을 사용한 다른 보일러에 비하여 내식성의 알루미늄 합금을 사용하여 일체형 열교환기로 만든 것이 특징이다.

Remeha 보일러는 한 세대의 단독주택에서 주로 사용되는 전형적인 응축형 보일러로서 회주철재 열교환기에 배가스중에 함유되어 있는 수증기의 응축을 위하여 알루미늄재질의 흰튜브 열교환기를 부가하여 설치한 것이 특징이다. 또한 알루미늄 열교환기의 흰튜브 간격이 좁고 흰의 두께도 비교적 작은 것을 사용하였으며, 응축형 열교환기의 아랫부분에는 알루미늄 나관을 성치하여 응축수의 흐름이 원활하다.

Viessmann 보일러의 열교환기는 스테인리스 강관을 사용하여 제작되었으며 열교환기의 위치는 보일러 연소실의 아래 부분에 설치되어 있고, 열교환기의 강관 사이에는 Tubulator를 설치하여 전열효과를 증대시켰으며 열교환기 주위에 온수용 저장탱크가 있다. 또 열교환기의 출구부분에서 연소배가스와 응축수가 함께 배출되며 이때 생성한 응축수는 보일러 아래 부분에 모여 따로 배출되도록 설계되었다.

나. 산업용 보일러용 응축형 열교환기 동향

미국 Con Edison Co.에서는 응축형 절탄기를 기름을 연료로 사용하는 곳에 설치하여 응축형 절탄기의 제반 성능에 대한 실험을 수행한 바 있다. 성능실험에 사용한 응축형 열교환기의 전열관은 미국의 CHX Co.에서 개발한 스테인리스 강관을 응축수 등으로부터 보호하기 위하여 관표면 전체를 테프론막으로 씌운 형태를 취하였으며, 배가스에 노출된 관 이외의 다른 부위 표면도 동일한 테프론으로 보호하였다. 열교환기 전열관 내부에는 보일러에서 가열된 온수가 흐르고 바깥쪽에 배가스가 흐르는 상태로 설치하였다.

영국 British Steel Tinplate Co.에서 개발한 Ceecon 응축형 절탄기의 열교환기는 크게 3부분으로 나누어 고찰 되었는데, 첫째 배가스의 현열 전열부로서 배가스는 응축현상이 일어남이 없이 냉각된다. 배가스의 온도는 응축온도 이상을 유지시키며 이러한 부분의 열교환기 재질은 환튜브를 사용하였다. 둘째로는 배가스에 포함된 수증기가 전열면에서 응축이 일어나는 부위로서 스테인레스 재질인 나관이 사용되었다. 셋째는 배가스의 조절부로서 배가스에 함유되어 있는 물방울을 제거시키는 부분이었다.

스웨덴의 Fagersta Co.에서는 배가스의 온도를 산과 수증기의 응축온도 이하까지 낮추어 열교환기의 전열면을 부식시키지 않고 냉각시키는 방법을 개발하였다. 이 열교환기는 전열관 내부에 배가스가 흐르고 바깥쪽으로는 냉각수가 흐르는 구조이다.

일본의 NEDO는 도시가스를 연료로 하는 보일러의 연소가스를 사용하여 건조역에서 응축역까지의 광범위한 전열면 온도에서의 열전달 실험을 응축형 열교환기에 적용시켜 실험하였다.

다. 히트파이프식 배가스 열교환기

히트 파이프를 이용한 보일러의 배가스 배열을 회수, 공급공기를 예열하는 장치가 고안되었다. 공기 예열기는 보일러에서 배출되는 배가스의 현열을 회수하여 연소용 공기를 예열·공급함으로서 보일러의 배가스 손실을 줄여 효율을 증가시켜 주는 필수 설비이다. 일반 산업용 보일러의 절탄기 및 공기 예열기를 포함한 여러 분야에 널리 활용되고 있으나 발전용에 적용은 아직 일반화되지 않은 실정이며, 미국의 몇몇 발전소에 공기 예열기용으로 활용되고 있다. 하지만 히트 파이프의 우수한 특성 때문에 이의 효율적인 활용을 위하여 외국에서는 활발한 연구가 수행되고 있으며 주로 보일러 배가스의 에너지를 회수방안으로 이루어지고 있고 경우에 따라서는 배가스중의 오염물질 제거 설비에 적용을 위한 연구도 수행되고 있다. 히트 파이프 공기 예열기는 여러 개의 단위 히트 파이프의 집합체로 구성되며 설치 및 교체가 용이하도록 다단구조물로 이루어진다. 배가스 측과 연소용 공기 측의 유동방향에 따라 수직형이나 수평형으로 설치될 수 있다. 수평형인 경우 수평면을 기준으로 하부에 위치하도록 구배를 주어 설치함으로서 중력에 의해 작동 유체의 귀환이 원활해지도록 되어 있다. 작동유체로서는 주로 물, 나프탈렌, 톨루엔 그리고 Downtherm 계통이 주종을 이룬다. 이들 작동유체는 일반적으로 설비의 운전온도에 따라 고온부, 중간부, 저온부로 분리 적용되기도 하며 단일유체가 사용되기도 한다.

제 2 장 Total Energy System과 Bayonet tube의 개요 및 특징

2.1 Total Energy System의 원리

TES의 기본적인 원리는 Fig 2.1에 나와 있는 것처럼 연료의 100%를 사용하여 엔진을 구동하여 발전을 통해 37.5%의 전기를 만들어 내고, 버려지는 다량의 폐열을 회수하여 얻은 열을 냉방이나 난방으로 사용하여 에너지의 효율을 극대화 시키는 것이다.

특히 회수하는 열중에 엔진냉각수는 엔진 내부의 표면에서 직접적으로 냉각수를 순환시켜 열을 회수하기 때문에 열회수에 큰 어려움이 없으나, 배기가스에 의해 버려지는 열을 효과적으로 회수하는데 문제점이 있다. 그래서 본 연구에서는 배기가스의 효과적인 열회수를 통하여 에너지 효율을 80% 이상으로 향상시킬 수 있는 배열회수 열교환기를 개발하였다.

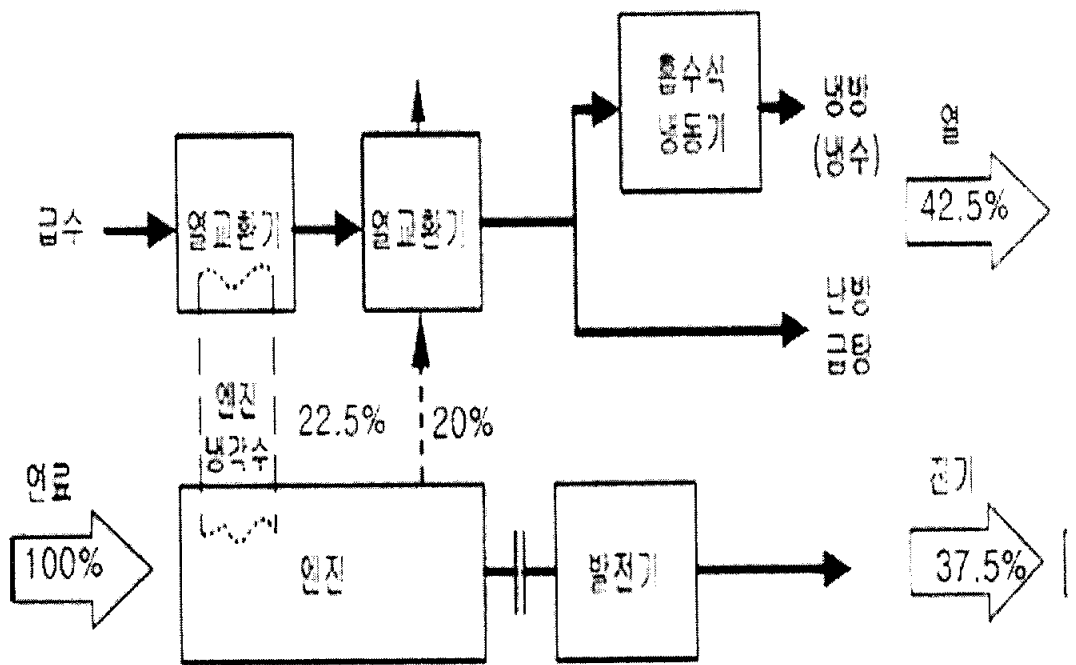


Fig. 2.1 Schematic diagram of Total Energy System.

2.2 Bayonet tube의 작동원리

본 연구에 사용되어진 bayonet tube의 원리는 Fig 2.2에 나타난 형상과 같이 배기가스가 열교환기 내부의 전열관 주변을 전체적으로 통과해서 나가고, 냉각수는 일반적인 형식으로 전열관 내부를 통과하도록 되어있다. 하지만 bayonet tube는 일반적인 관이 관 내부를 한 통로로 흐르게 되어 있는 것에 비해 전열관 내부를 다시 이중관으로 만들어 냉각수가 두 번 열을 받을 수 있는 구조로 되어 있다. 이중관으로 되어 있는 관은 냉각수가 일차적으로 내부 관을 통하여 내려오면서 토출되는 방향의 물에 의하여 열을 회수하고, 이차적으로 토출되는 외부 관을 통하여 이동하면서 다시 주변의 배기가스의 열을 회수하며 이동하여 열을 회수 할 수 있는 형상으로 만들어져 있다. 이러한 bayonet tube는 배열을 회수하는 냉각수가 2중으로 열을 흡수하게 함으로 해서 기존의 시스템에 비해 보다 효율적으로 열을 흡수할 수 있다는 장점이 있다.

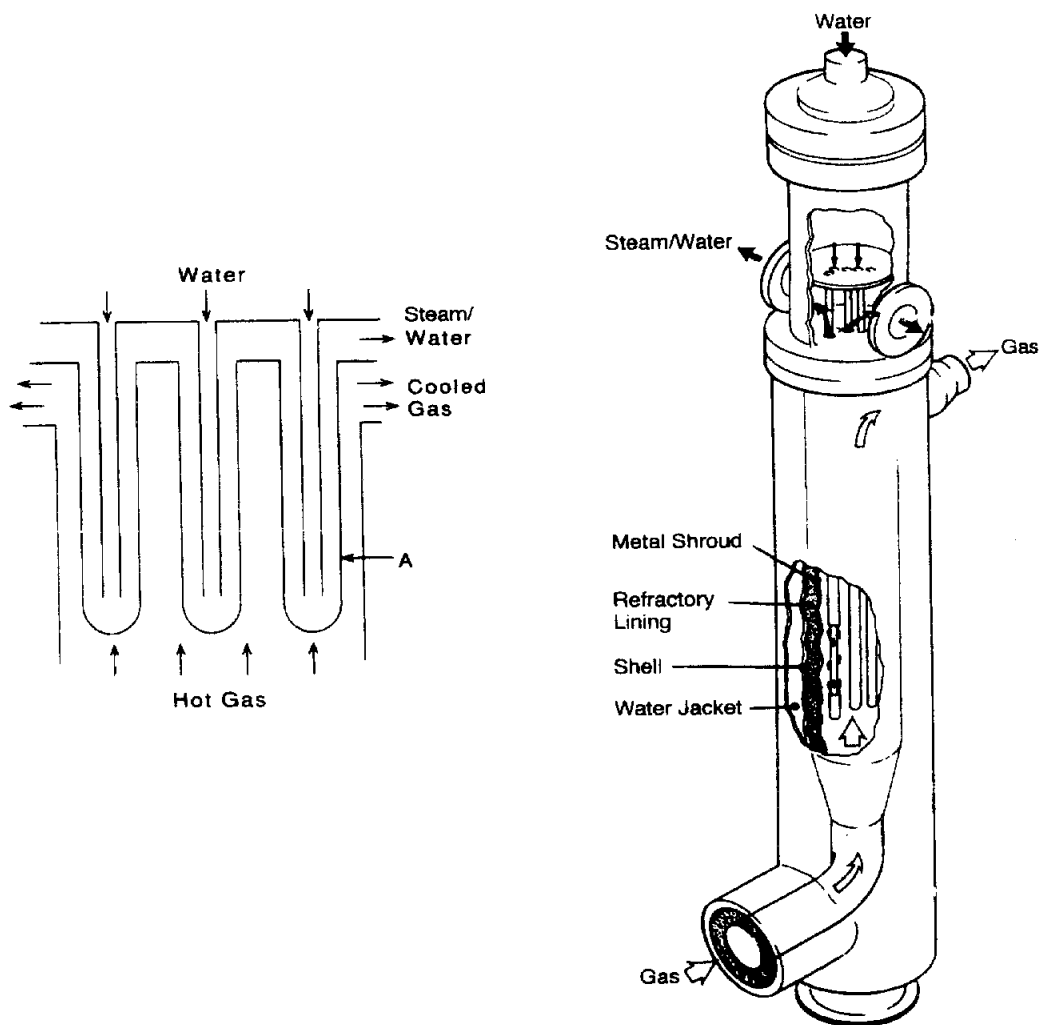


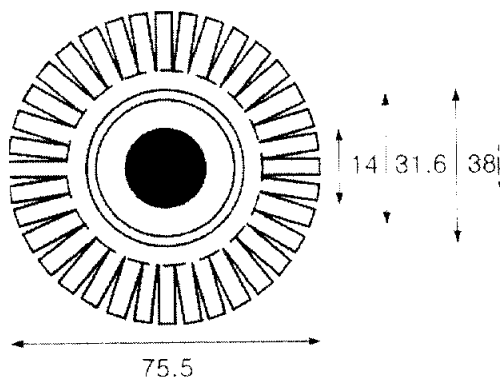
Fig. 2.2 Bayonet tube waste heat exchanger.

3. 실험 장치 및 방법

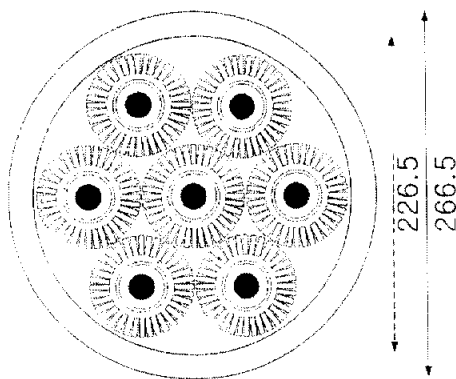
3.1 톱니 나선 형 bayonet tube의 제작

본 연구에 사용하기 위해 제작한 Bayonet tube는 Fig. 3.1의 (a)와 같이 외측관은 두께 2.5 mm 내경이 31.6 mm이고, 내측관은 두께 1.2 mm 내경이 14 mm인 이중관 구조로 되어 있다. 외측관 표면에 길이 12.5 mm, 넓이 4 mm, 두께 1.2 mm의 나선 톱니형을 부착하여 단일 관을 제작하였다. 제작한 단일 관은 380 mm의 길이로 만들어 7개의 관군으로 구성하여 열교환기를 제작하였고, 열교환기의 내부는 열전달 성능을 높이기 위해 배기가스의 와류를 유도할 수 있도록 나선형의 평판을 제작하여 shell측에 부착하였다. 열교환기의 윗 부분에는 냉각수가 모여서 각 단일 관에 고르게 분배 되도록 냉각수가 모이는 작은 공간을 만들고, 바로 아랫부분에 배기가스의 열을 회수한 냉각수가 모여서 토출될 수 있는 공간을 만들어서 전체 bayonet tube를 이용한 배가스 열교환기를 제작하였다.

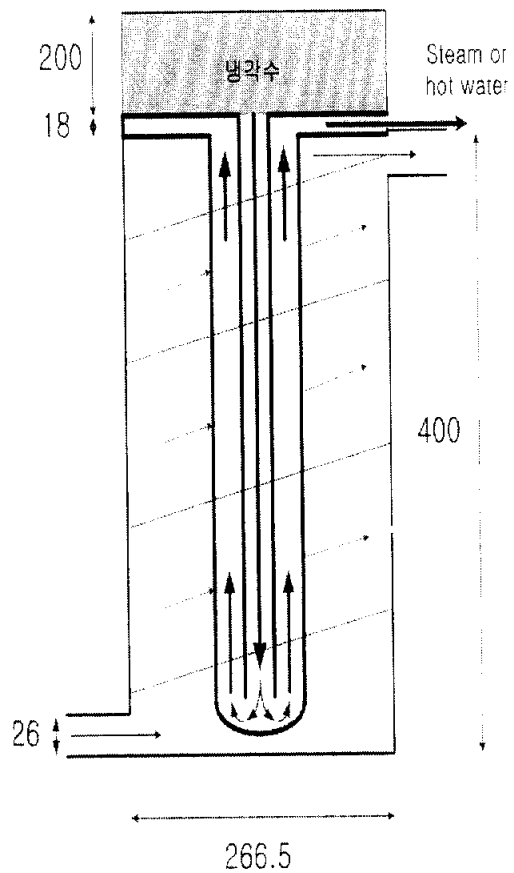
톱니형 환은 1턴에 36개의 환을 가지고 있고, 단위길이(m)당 275턴을 가지고 있다. 톱니형 환의 전열면적을 계산하면 $1.7 \text{ m}^2/\text{m}$ 이 되는데, 단일관의 단위길이당 전체 전열면적은 $1.82 \text{ m}^2/\text{m}$ 이 된다.



(a) Cross sectional area of test tube



(b) Front view



(c) Side view

Fig. 3.1 Specification of the waste heat recovery heat exchanger.

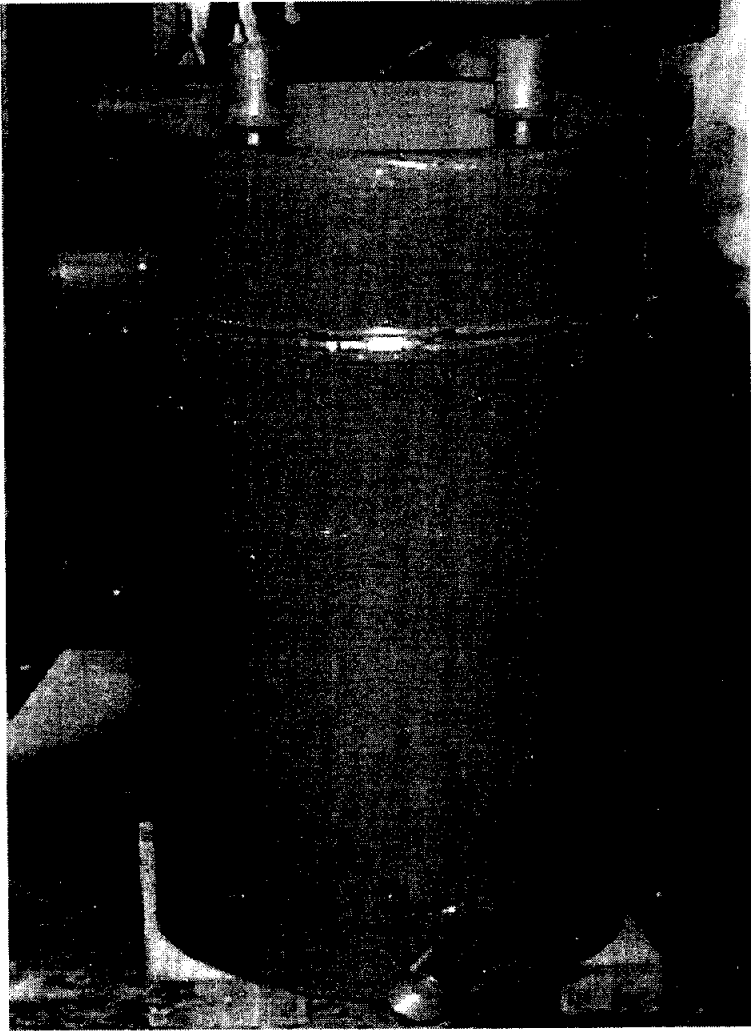


Photo. 3.1 Photograph of the waste heat
recovery heat exchanger

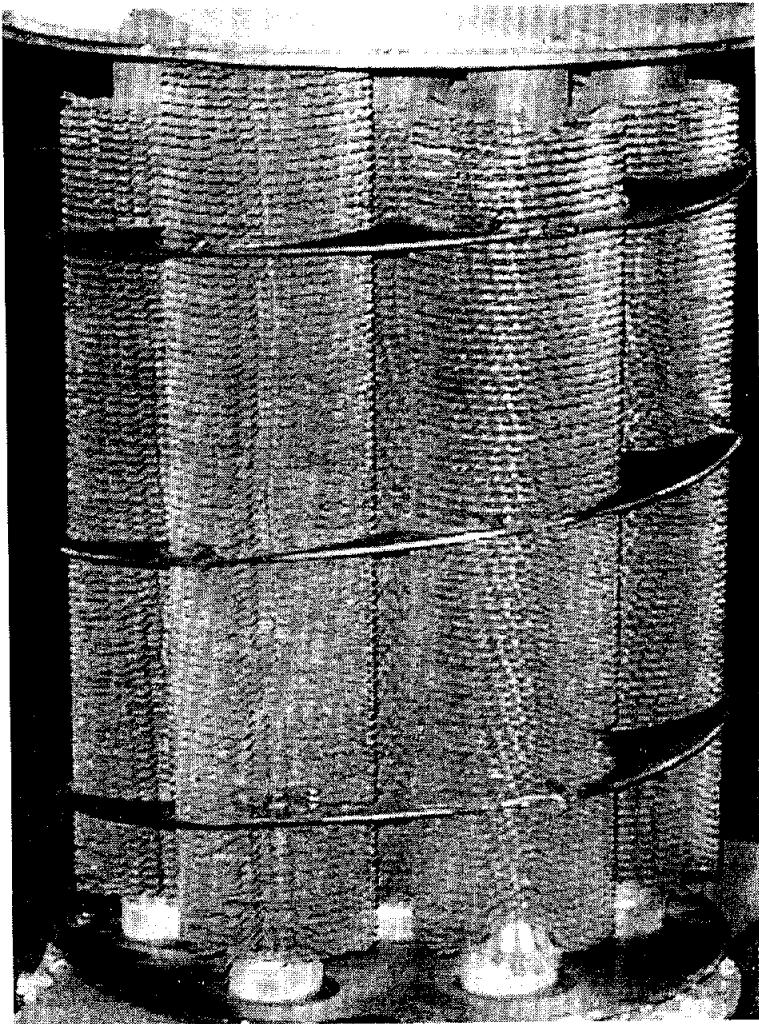


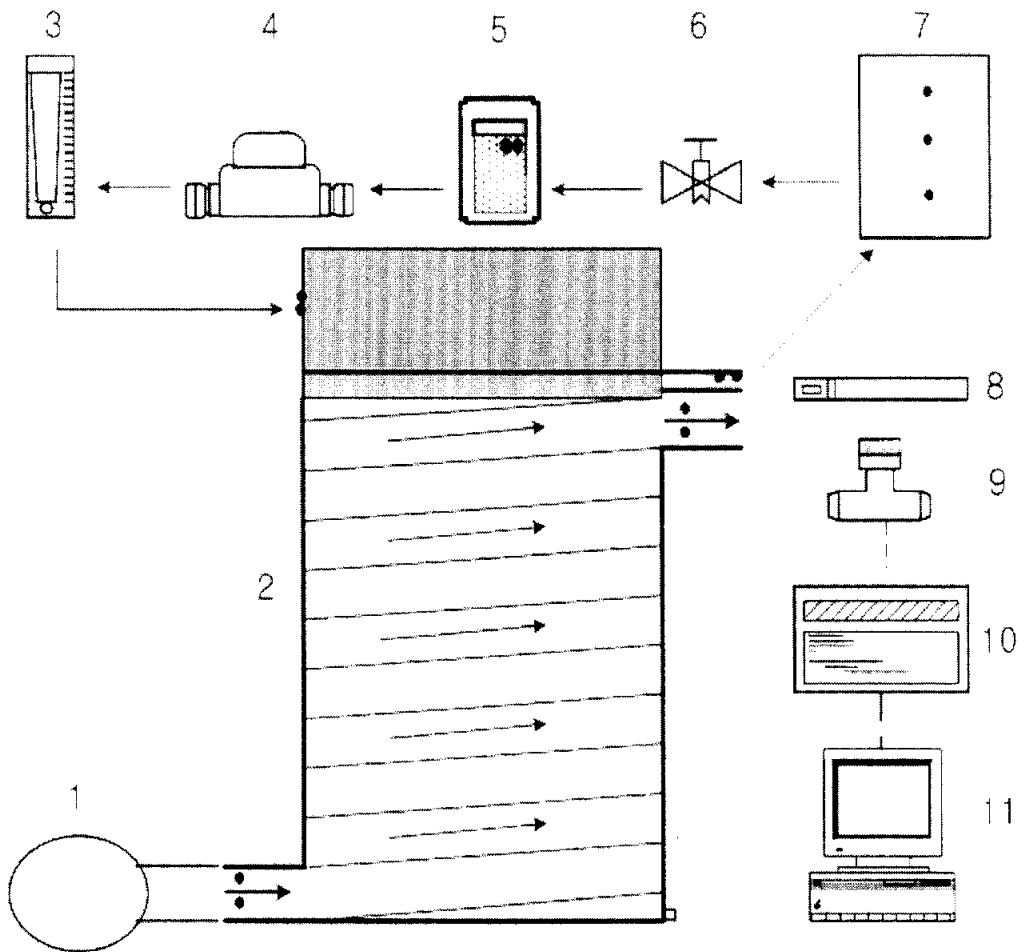
Photo. 3.2 Photograph of the inside of the waste
heat recovery heat exchanger

3.2 실험 장치의 구성

Fig. 3.2에서 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험장치는 bayonet tube를 이용한 배열회수 열교환기를 중심으로 구성되며, 세부적으로 열원부, 계측부, 제어부, 시험부로 구성되었다.

열원부로는 373~555K의 배기가스를 배출하는 2900 cc급(Ssangyong Motorss, 2,874 cc, OM602 Diesel)의 디젤엔진이 사용되었다. 계측부는 다점의 온도를 측정하기 위한 T type 열전대와 냉각수 유량을 측정을 위한 체적식 유량계, 풍량과 차압 측정을 위한 열선 풍속계 와 차압계가 사용되었으며, 이러한 계측장비들로 측정한 데이터를 수치화하여 기록하고 저장하기 위해 Hybrid Recorder(yokogawa,DR-230)와, 이와 인터페이스를 위한 PC로 구성되어 있다. 제어부는 유량을 제어하기 위한 니들 밸브와 양정펌프 그리고 펌프를 제어하기 위한 인버터(LG, IS3)로 이루어졌다.

시험부는 bayonet tube를 이용한 배열회수 열교환기($\pi \times 133 \times 133 \times 400$ mm)로 만들어졌고, 외부는 세라믹 울을 이용해 단열시켰다.



- | | | |
|---------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| 1. Engine | 2. Waste heat recovery heat exchanger | 3. Flow Meter |
| 4. Water pump | 5. Inverter | 6. Needle valve |
| 7. Circulation bath | 8. Air velocity transmitter | 9. Differential pressure gauge |
| 10. Data Logger | 11. Computer | |

Fig. 3.2 Schematic diagram of the experimental apparatus.

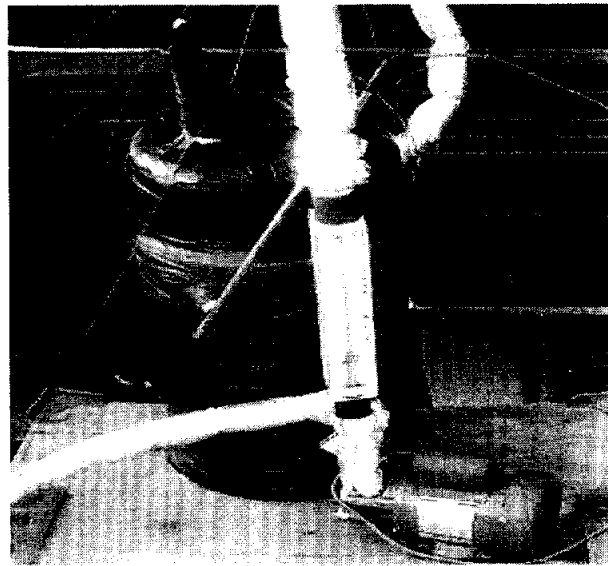
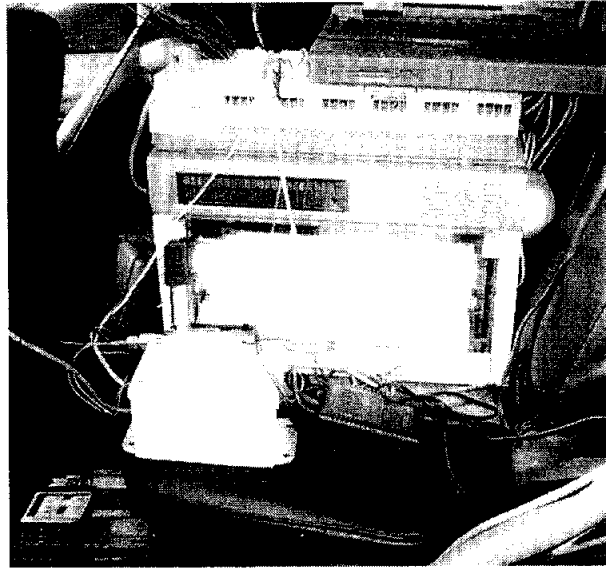


Photo. 3.3 Photograph of the experimental apparatus

3.3 실험 방법

3.3.1 온도 측정 및 압력 측정

배기가스의 온도는 엔진의 rpm 조절에 의해 99~280°C까지 변화시키면서 배열회수 열교환기에 공급하였다. bayonet tube를 이용한 배열회수 열교환기의 열회수 성능을 알기 위해 T형 열전대를 배열회수 열교환기의 배가스 입구와 출구부분에 2점씩, 냉각수의 입구와 출구 부분에 2점씩 부착하였고, 순환하는 냉각수 전체가 얻은 회수 열량을 알기 위해 순환 탱크 내부에 3점을 부착하였다. 또한 열교환기 내부를 통과하는 배기가스의 차압을 측정하기 위해 열교환기의 배기가스 입출구에 각각 8 mm의 관을 삽입하여 차압계를 연결하였다. 이렇게 부착한 열전대와 차압계는 직접 데이터로그(Yokogawa, DR-230)와 연결되어 PC에 모든 측정값을 받아 프로그램 상에서 처리하도록 하였다. 본 실험에서 사용된 열전대는 항온조에서 표준 온도계로 보정하였으며, 온도측정에서의 편차는 보정 값에 대해 $\pm 0.2(K)$ 정도를 나타냈다.

3.3.2 냉각수 유량 및 배기가스량 측정

순환탱크에서 토출되는 냉각수의 알맞은 조절을 위해 Needle valve를 달아 1차적으로 유량을 조절한 후 양정펌프에 연결된 인버터를 통해 세부 유량을 조절하였다. 유량을 측정하기 위해 사용된 유량 측정기는 체적식 유량계(Dwyer .Int.)였으며, 유량 측정에 앞서 전자저울로서 상기 유량계를 보정했다.

배기 가스량은 엔진의 rpm을 통해 조절하였으며, 배기량은 열선풍속계(Dwyer .Int)를 배기가스의 토출측에서 측정하여 직접 데이터로그(Yokogawa, DR-230)와 연결되어 PC에서 측정값을 받아 데이터 처리를 하였다.

제 4 장 실험 결과 및 고찰

4.1 Bayonet tube를 이용한 배열 회수용 열교환기의 열전달 특성

배열회수 열교환기는 배기가스의 온도와 풍량에 배기가스가 내부를 통과하는 동안 전열관을 통해 냉각수로 회수하는 목적을 가지고 있다. 본 실험에서는 나선 톱니환형 bayonet tube 열교환기의 열회수 성능을 평가하기 위해 먼저 냉각수의 유량을 273 kg/h, 400 kg/h와 550 kg/h로 변화 시켜가면서 엔진의 rpm 조절을 통해 배기가스의 온도와 풍량을 변화시켰을 경우의 열전달 특성과 배열 회수 성능을 실험하였다.

먼저 실험에 사용된 엔진의 rpm 변화에 따른 배기가스의 온도와 열교환기를 통과하는 배기가스량을 측정하여 Fig. 4.1와 Fig. 4.2에 나타내었다. rpm의 증가에 따라 온도와 배기량 모두 거의 선형적으로 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 배기가스의 온도는 99~280°C로 변화되는 것을 확인했고, 배기가스량은 40.6~212 m³/h로 변화하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4.3의 (a)~(k)는 냉각수의 유량을 273, 400, 550 kg/h로 각각 일정하게 유지한 조건에서, 엔진의 rpm을 750~3500까지 변화시켜 가면서 시간에 따른 배기가스와 냉각수의 입·출구 온도를 측정한 것이다. 이를 통해 배열회수 열교환기의 열전달 성능 및 배열회수 성능을 측정하였다. Fig. 4.3에 나타난 각각의 데이터들이 조금씩 차이가 나는 점은 실험을 수행하면서 엔진의 초기 예열시간의 차이와 냉각수 유량의 차이로 인해 발생한 것이다. 냉각수의 유량이 많아질수록 그 온도차이는 작아지면서 전체적인 회수 열량은 큰 변화를 나타내지 않았다. 일반적으로 엔진의 변화를 통해 배기가스가 안정되는 시간은 10~15분 정도가 소요되는 것을 알 수 있었다.

회수열량 계산에 사용된 식은 (1)과 같다.

$$Q = m c_p \Delta T \quad (1)$$

Fig. 4.4는 엔진의 rpm을 변화시켜서 배기가스의 온도와 풍량을 바꾸었을 때, 냉각수가 회수하는 열량을 나타내었다. 99°C의 배기가스가 40.6 m³/h로 배기가스 열교환기를 통과할 때 열교환기는 0.73 kW의 열량을 회수하였고, 107°C의 배기가스가 79.5 m³/h로 열교환기를 통과할 때에는 1.77 kW를 회수하였다. 또한 147°C에 141.3 m³/h의 배기가스에서는 2.87 kW의 열을 회수하였고, 280°C에 212 m³/h의 배기가스에서는 9.21 kW의 열량을 회수할 수 있었다.

Fig. 4.5는 배열회수 열교환기 내부에 있는 나선 튜브형 bayonet tube의 단위 길이당 회수하는 열량을 나타내었다.

Fig. 4.6은 실험을 통해 배열회수 열교환기를 통한 총괄 열전달 계수는 34 W/m²K인 것을 알 수 있었다. Fig. 4.7은 ε -NTU의 관계를 나타내었다.

$$Re_D = \frac{4m}{\pi D \mu} \quad (2)$$

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{\frac{4}{5}} Pr^{0.4} \quad (3)$$

$$Re_{D,max} = \frac{u_{max} D}{\nu} \quad (4)$$

$$Nu_D = C_2 C Re_{D,max} Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

식(2)와 (3)은 냉각수와 통과하는 내부에서의 열전달율을 얻기 위한 관계식

이고, 식(4)와 (5)는 배기가스 측에서의 열전달률을 구하기 위한 관계식으로 사용하였다.

열교환기의 성능 해석을 하기위해 ϵ -NTU법을 사용하였다. 사용된 유용도와 관련된 식은 식(6)이고, NTU 관계식은 식(7)이다.

$$\epsilon = \frac{C_c (T_{c,u} - T_{c,i})}{C_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (6)$$

$$NTU = -\left(\frac{1}{C_r}\right) \ln[C_r \ln(1 - \epsilon) + 1] \quad (7)$$

$$U = \frac{NTU \times C_{\min}}{A} \quad (8)$$

식 (6)에서 $C_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i})$ 항은 최대 가능 열전달율이며, $C_c (T_{c,u} - T_{c,i})$ 항은 실제 열전달율로 정의되어진다. 유용도(Effectiveness)와 NTU에 의한 열교환기 성능 평가는 일반적으로 행하여지며 널리 알려진 방법이다. 따라서 본 연구에서는 ϵ -NTU 방법에 의한 나선 튜니환형 bayonet tube를 이용한 배열회수 열교환기의 성능을 알아보았다. 실험에 사용된 배열회수 열교환기의 유용도는 0.75가 나왔고, NTU는 1.57정도가 나왔다. 이 수치들은 열교환기 최적 조건에 부합되는 조건으로 여겨지므로 배열회수 열교환기의 최적설계 및 제작을 할 수 있었다.

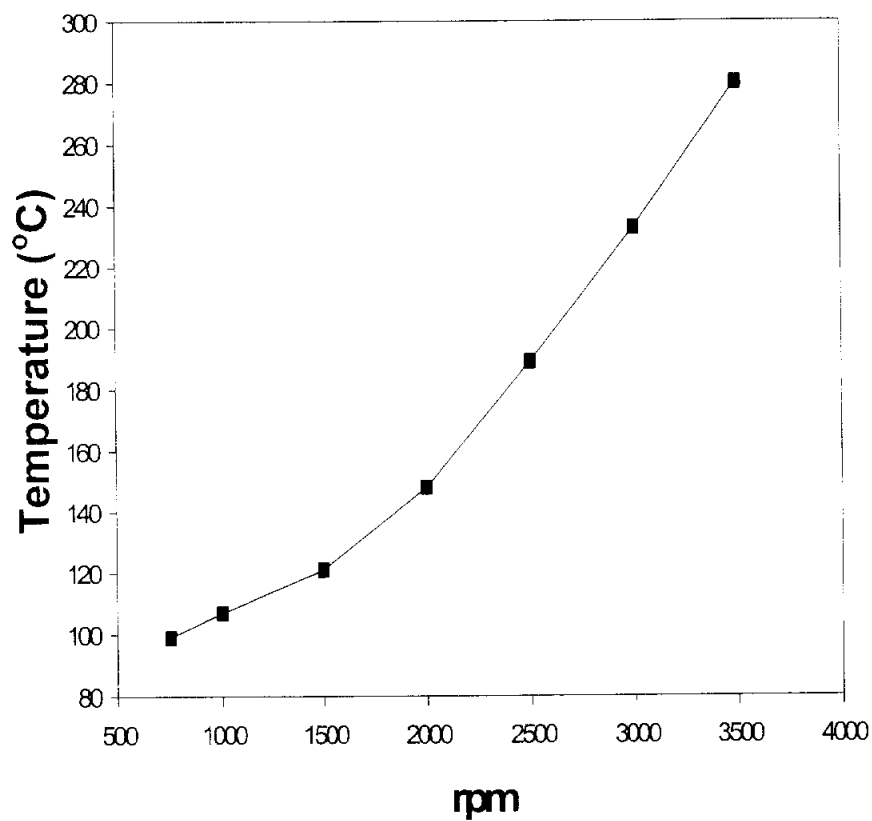


Fig. 4.1 Variation of exhaust gas temperature according to engine rpm.

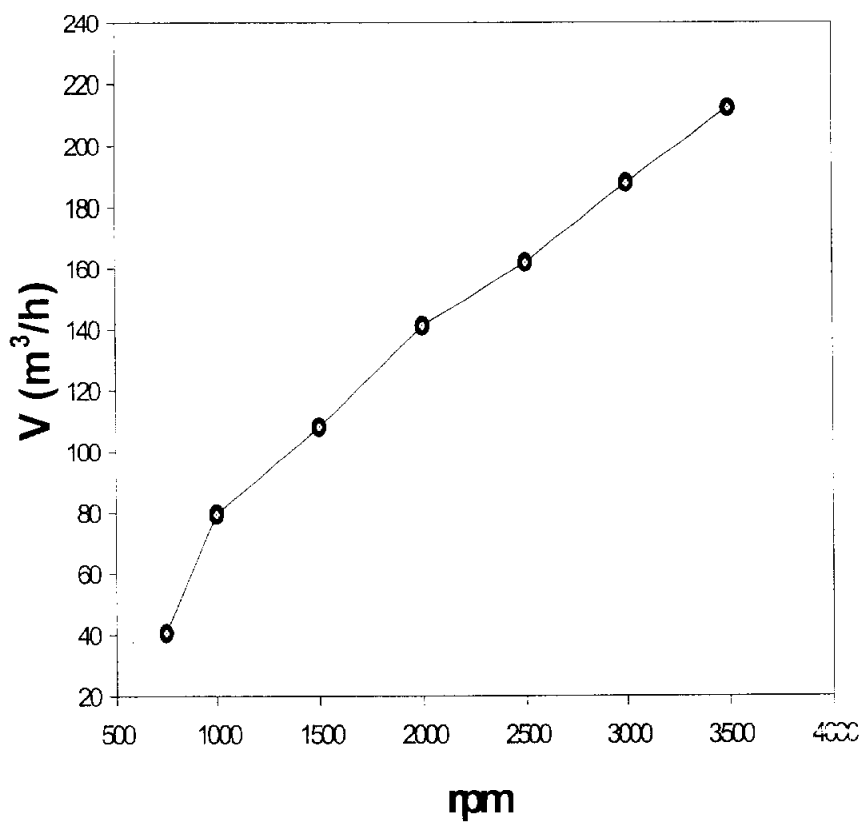
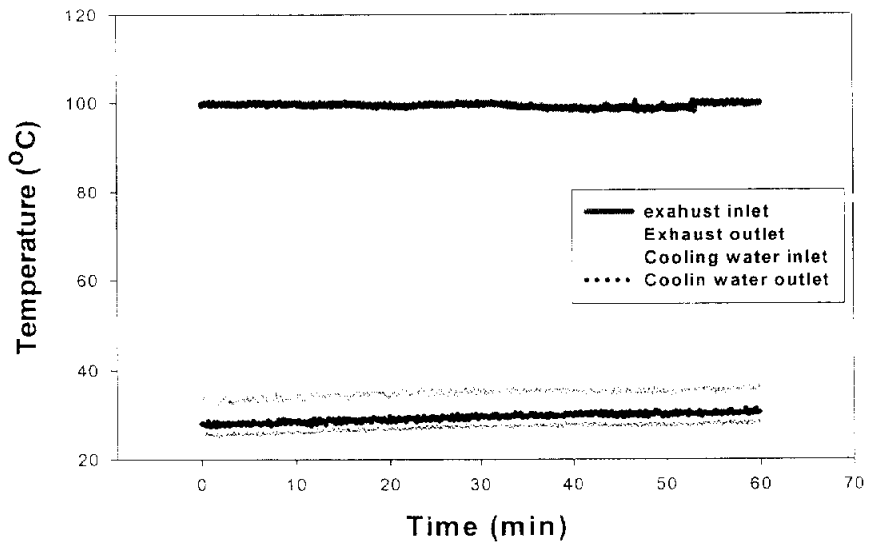
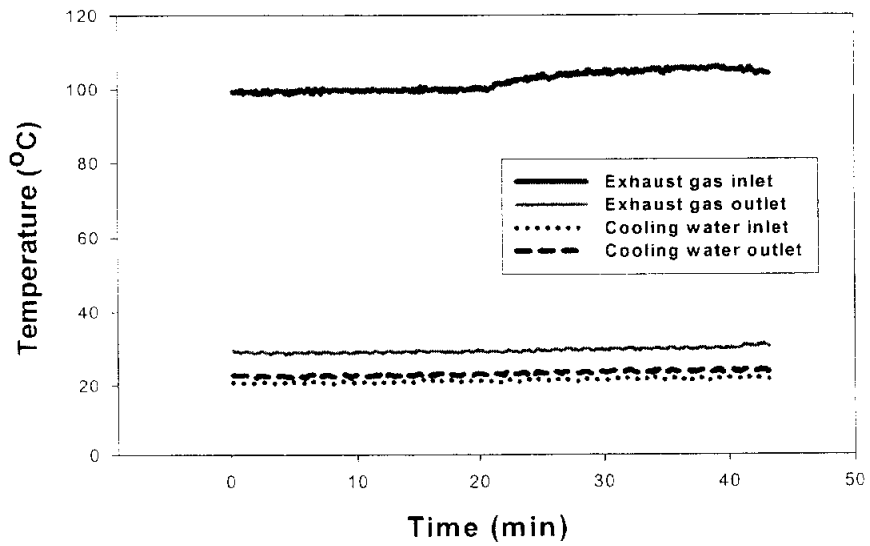


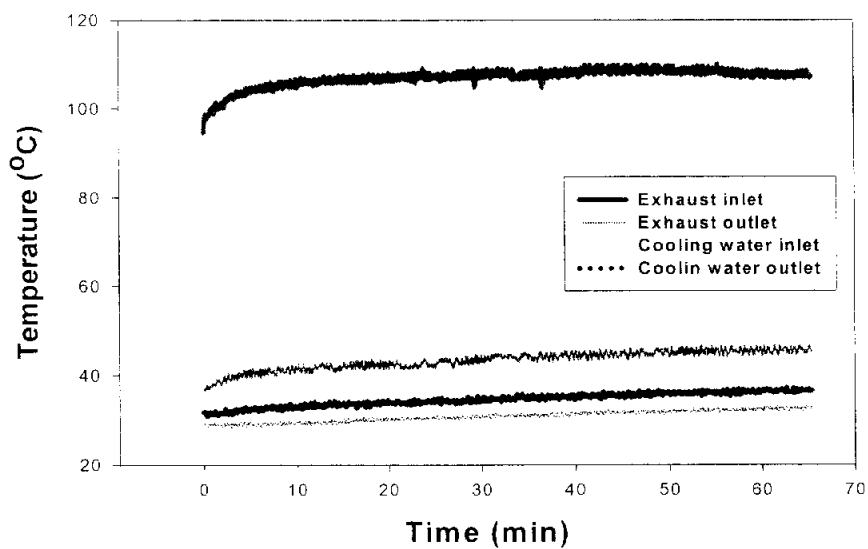
Fig. 4.2 Variation of exhaust gas flow rate according to engine rpm



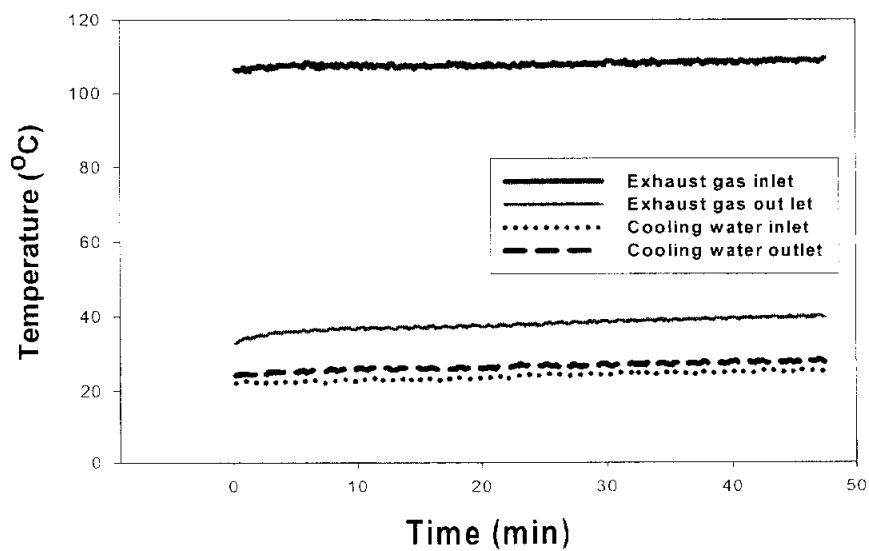
(a) Engine rpm = 750, $W = 273$ kg/h



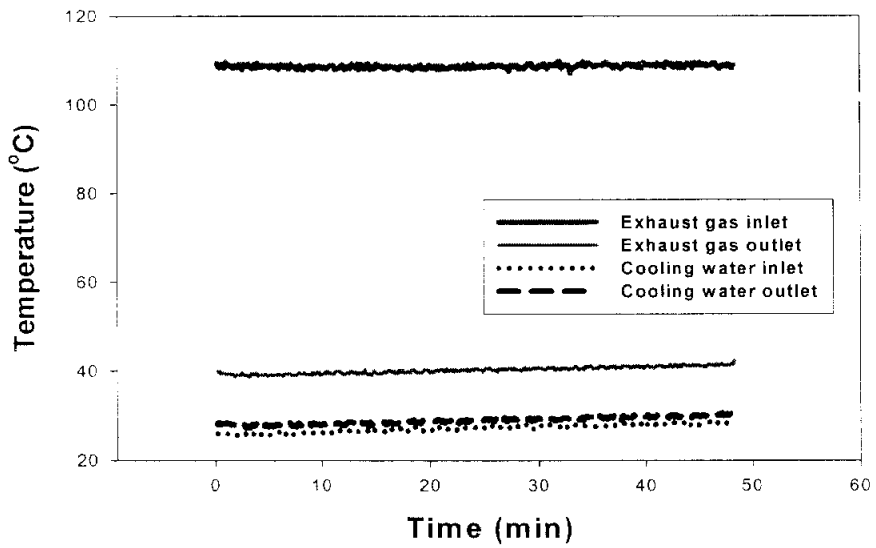
(b) Engine rpm = 750, $W = 400$ kg/h



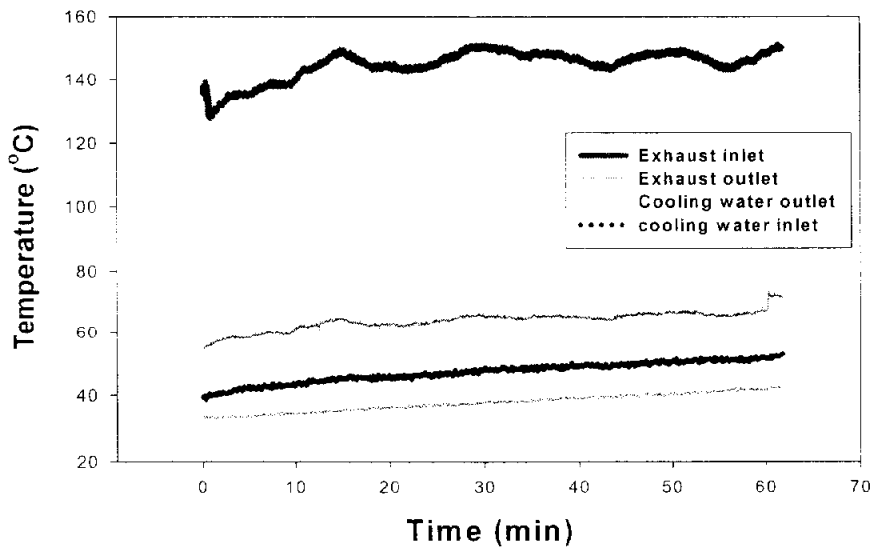
(c) Engine = 1000, W = 273 kg/h



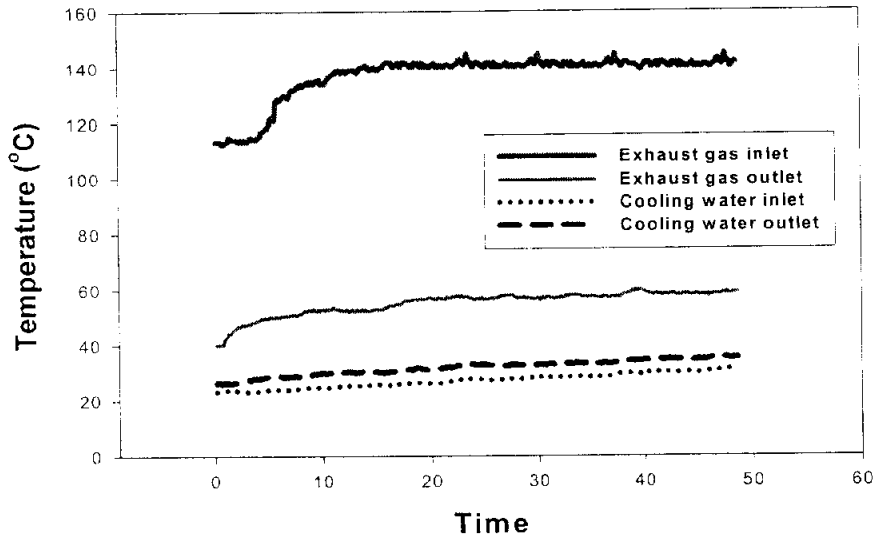
(d) Engine = 1000, W = 400 kg/h



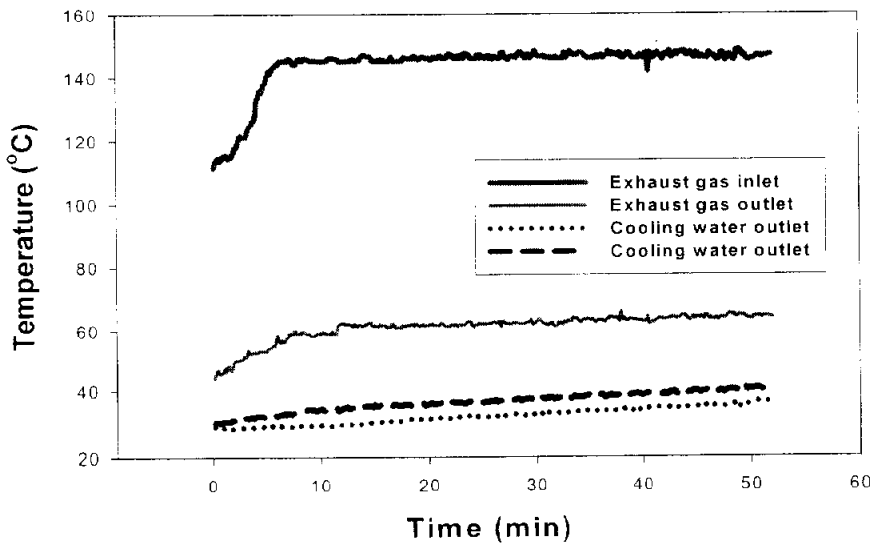
(e) Engine = 1000, $W = 550$ kg/h



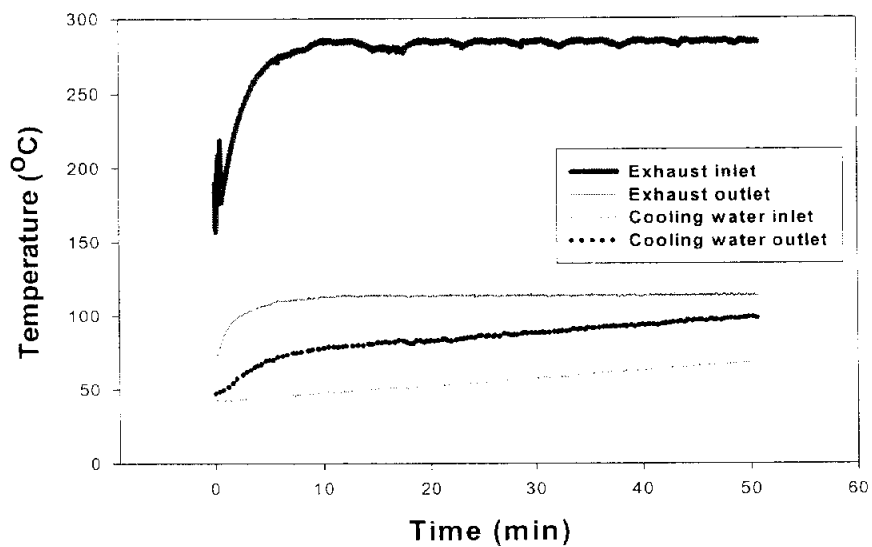
(f) Engine rpm = 2000, $W = 273$ kg/h



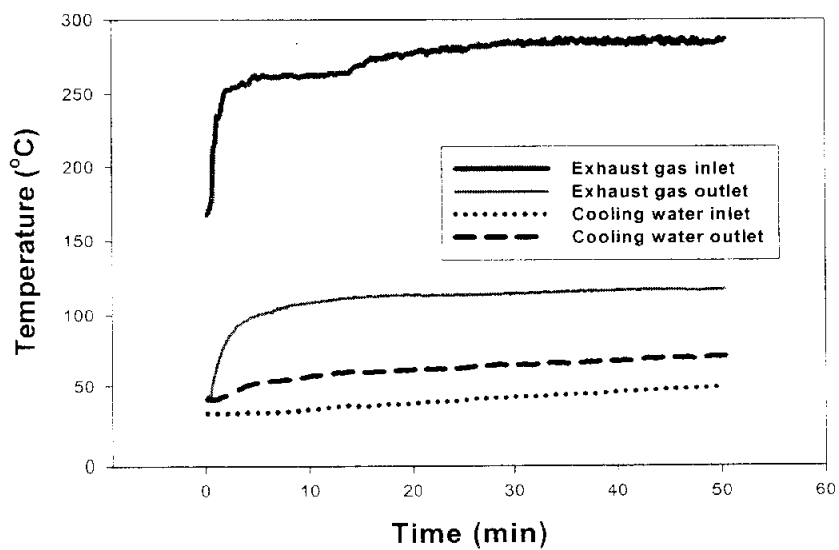
(g) Engine = 2000, W = 400 kg/h



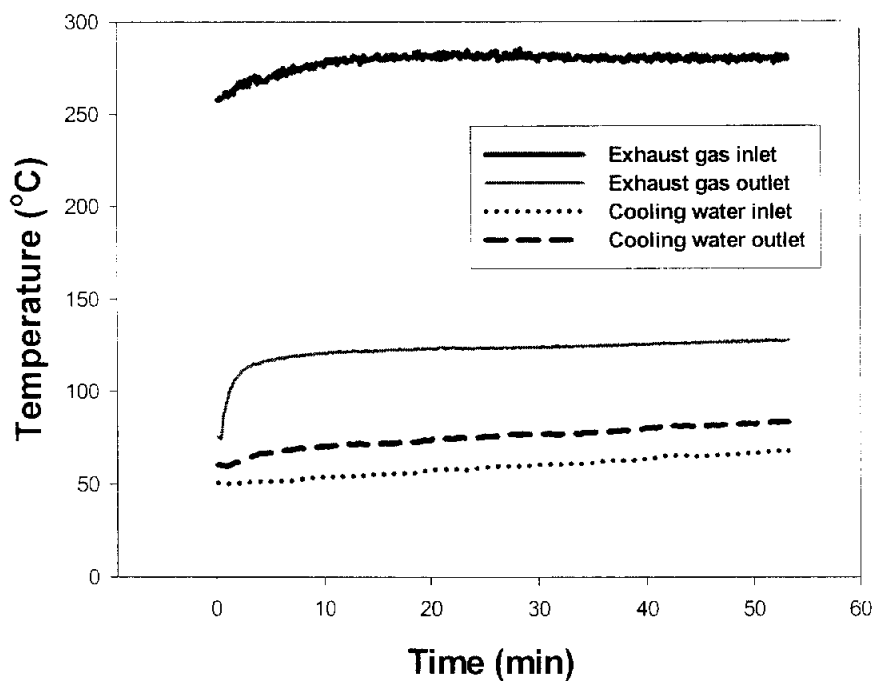
(h) Engine = 2000, W = 550 kg/h



(i) Engine rpm = 3500, $W = 273$ kg/h



(j) Engine = 3500, $W = 400$ kg/h



(k) Engine = 3500, W = 550 kg/h

Fig. 4.3 Inlet and outlet temperature profile according to the variation of exhaust gas and cooling water

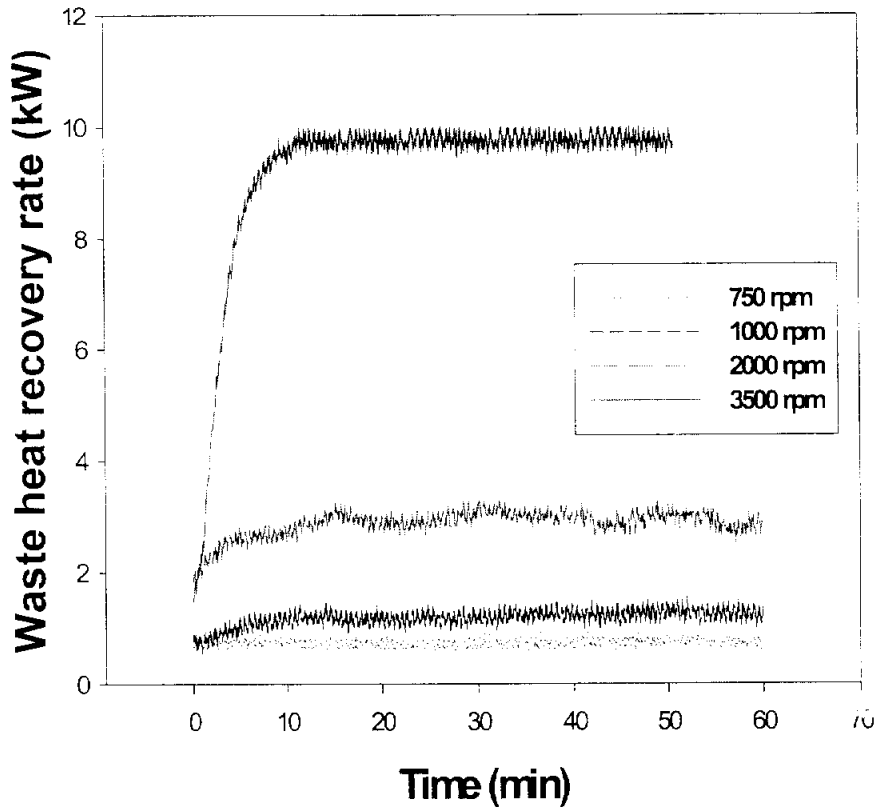


Fig. 4.4 Variation of heat transfer rate according to engine rpm.

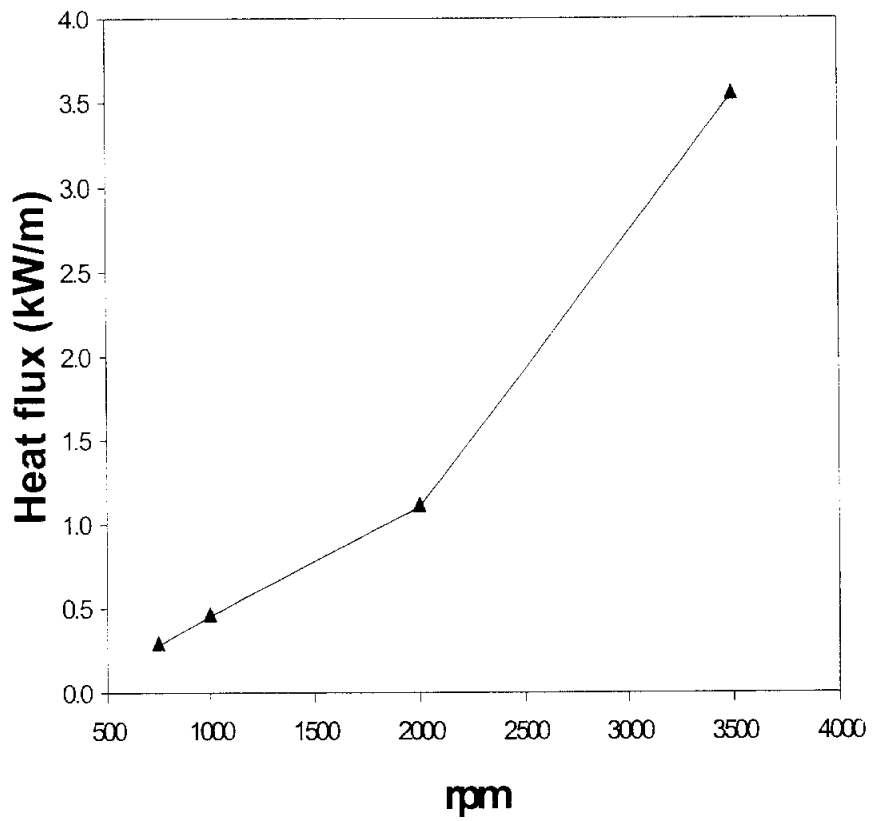


Fig. 4.5 Variation of heat flux according to engine rpm.

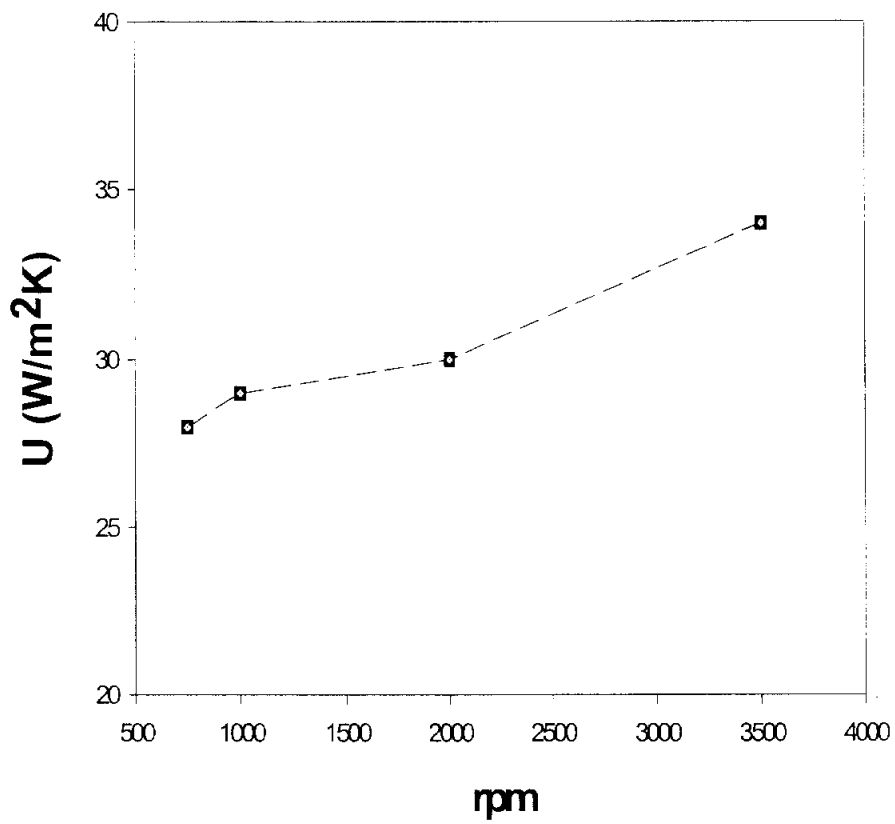


Fig. 4.6 Variation of heat transfer coefficient according to engine rpm.

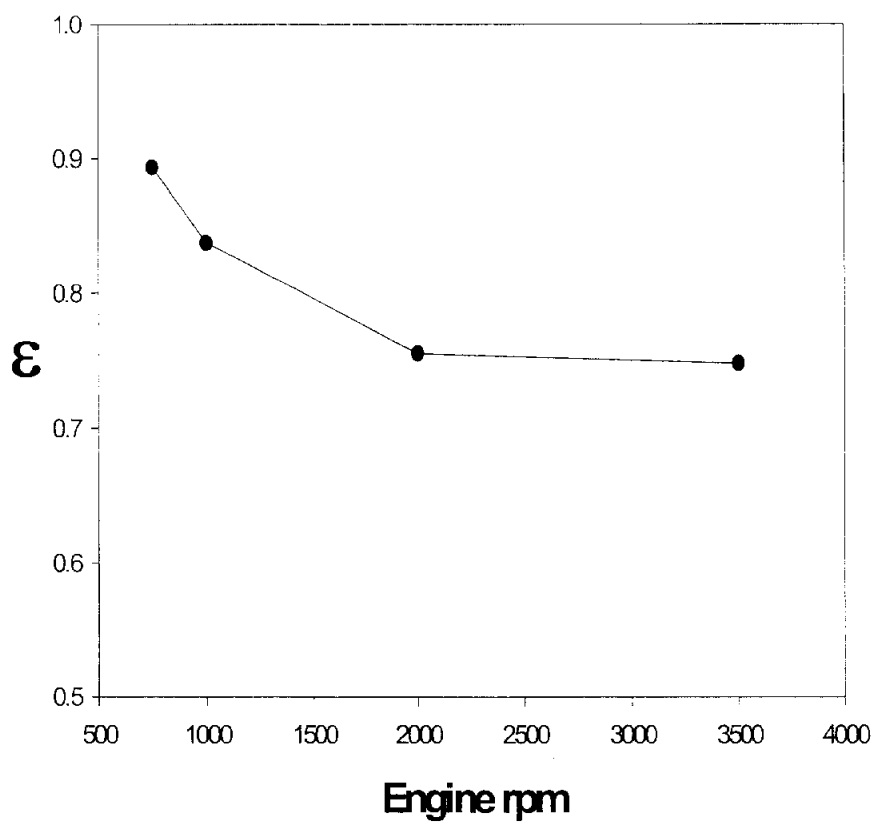


Fig. 4.7 Variation of effectiveness
according to engine rpm.

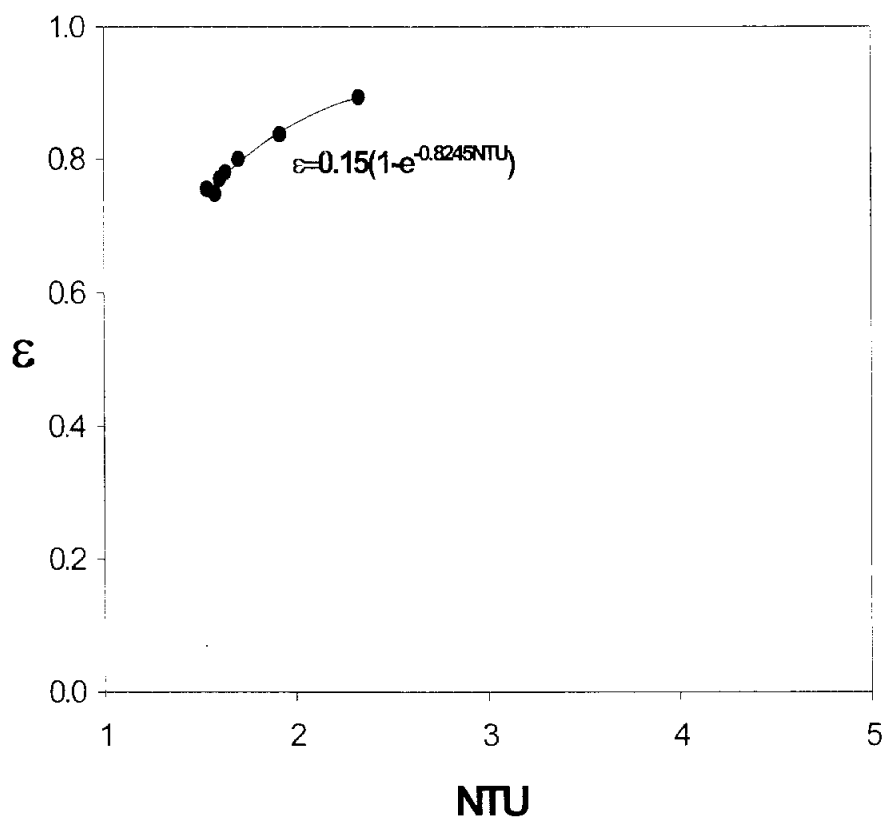


Fig. 4.8 Effectiveness to NTU.

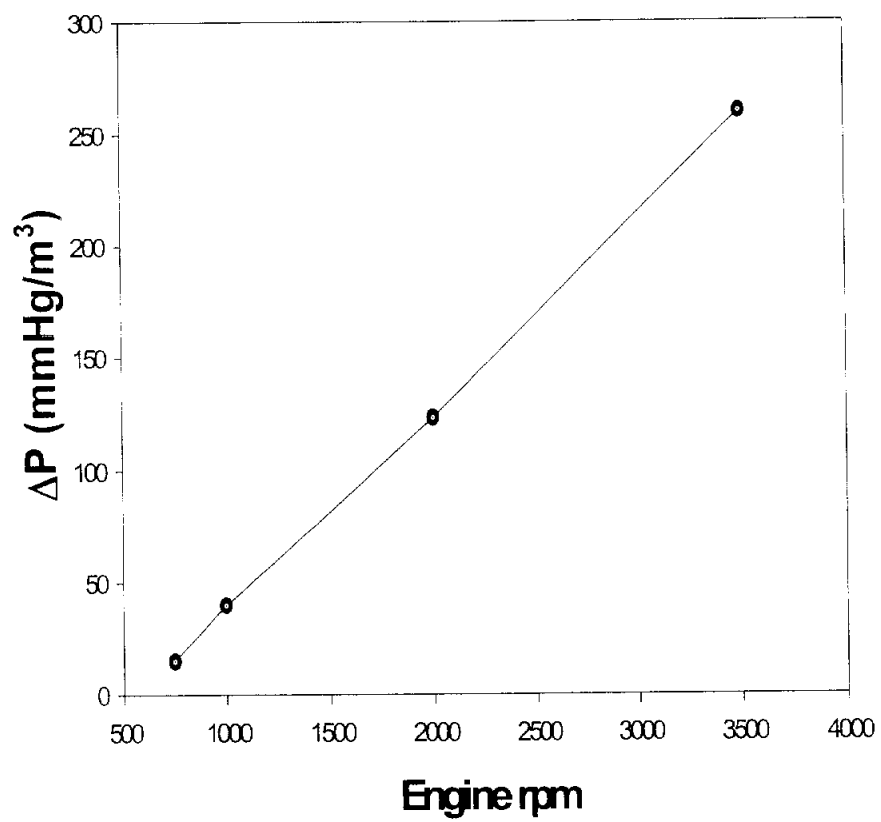


Fig. 4.9 Variation of pressure drop according to engine rpm.

4. 결 론

본 연구에서는 고성능 고효율의 나선 톱니형 bayonet tube를 이용한 TES용 배열회수 열교환기를 제작하여 열전달 특성 및 열교환기 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 보일러에 적용되고 있는 bayonet tube를 이용해 나선 톱니형을 부착해서 배열회수 열교환기에 적용함으로써 고효율·고성능의 열전달 성능을 가지는 열교환기를 제작할 수 있었다.
- (2) 엔진의 rpm을 750~3500까지 변화시켰을 때에 배기가스의 온도와 배기량을 측정한 결과 온도는 99~280°C까지 나타났고, 배기량은 40.6~212 m³/h 까지 측정되었다.
- (3) 냉각수 유량을 273 kg/h로 유지하면서 엔진의 rpm을 750~3500까지 조절하여 배기가스의 온도는 99~280°C로 변화시키고, 배기량은 40.6~212 m³/h로 변화시켰을 때에 최대 열회수량은 3500 rpm에서 9.21 kW이었고, 열교환기를 통과한 냉각수는 65°C에서 96°C까지 증가시킬 수 있었다.
- (4) 냉각수 유량을 273, 400, 550 kg/h로 변화시켰을 경우의 전체 열회수량은 큰 변화를 보이지 않았다.
- (5) 배열회수 열교환기 내부에 전열관인 나선 톱니형 bayonet tube의 단위 길이당 최대 열유속은 3500 rpm에서 3.54 kW/m로 나타났다.

- (6) 배기가스의 열회수량을 측정한 결과 버려지는 배기가스 열량의 75% 이상을 회수하였다.
- (7) 열교환기 성능 해석을 위해 ϵ -NTU법을 사용하여 조사한 결과 유효도는 0.75~0.9가 나왔고, NTU는 1.57~2.33으로 나타나 배기가스의 양이 많아질수록 전열면적이 증가되어야함을 알 수 있었다.
- (8) 총괄열전달계수는 $34 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 로 나타났다.
- (9) 배열회수 열교환기에서 배기가스 측의 압력손실은 $15 \sim 260 \text{ mmHg/m}^3$ 으로 나타나 압력손실로 인한 엔진 출력의 문제는 없는 것을 확인했다.

참고문헌

1. Heat Exchanger Design Handbook, Bell House Inc. (1998)
2. Kern D. Q., Process Heat Transfer, McGraw Hill International Edition (1965)
3. Heat Exchanger, Hemisphere Publishing Corporation (1981)
4. 열교환기 기술과정, 한국가스석유기기협회 (2000)
5. 고성능보일러 개발에 관한 연구성과보고서, 일본산업기계공업회 (1998)
6. 열교환기 설계핸드북, 일본공학도서주식회사 (1986)
7. 민의동, 열교환기 이론과 설계, 영풍문고 (1996)
8. 열교환기의 설계와 계산, 일본산업도서 (1965)
9. G. F. Hewitt, G. L. Shires, T.R. Bott, Process Heat Transfer, U.S.A., pp. 491-498 (1994)
10. Hinchley, P., Waste heat boilers: problems and solutions, Chem. Eng. Prog. (1977)
11. Hinchley, P., Waste heat boiler systems, in Heat Exchanger Design Handbook, Hemisphere Publishing, New York, chap. 3.16. (1984)
12. Shields, C. D., Dryout in horizontal hairpin waste heat boiler tubes, AIChE Symp. Ser., 69(131),55. (1973)

13. S. S. Hsieh, C. T. Liauh, and W. S. Han, Thermal performances of heat exchangers applicable to waste heat recovery systems, *Applied Energy*, vol. 29, pp. 191-200. (1998)
14. YUNUS A. CENGEL, "Heat transfer", McGraw-Hill, pp. 570-620.
15. Cho, S. M., Park, Y. J., Kim, C. S. and Seo, W. B., Development of waste heat recovery technology in Iron and Steel making process, *Proceeding of 14th Workshop for the technique of energy saving*, pp. 361-365. (1999)
16. G. F. Hewitt, G. L. Shires and Y. V. Polezhaev, *International Encyclopedia of HEAT & MASS TRANSFER*, CRC Press, New York, pp. 551-555. (1997)
17. Frank P. Incropera, David P. Dewitt, *Introduction to Heat Transfer*, John Wiley & Sons, Inc. (1996)
18. Webb, R. L., *Principles of Enhanced Heat Transfer*, Wiley, New York. (1994)

감사의 글

지금까지 저의 논문을 지도하여 주신 김종수 교수님께 먼저 깊은 감사를 드리며, 논문 심사를 위해 애써 주시고 학문적인 조언을 아끼지 않으셨던 오후규 교수님, 김영수 교수님, 김종수 교수님, 윤정인 교수님, 최광환 교수님, 정석권 교수님 그리고 김은필 교수님께도 깊은 감사의 말씀드립니다.

이 논문이 나오기까지 저를 도와준 실험실 박사과정에 있는 용반이와 수저이, 그리고 논문이 나오기까지 실험부터 모든 것을 도와준 상훈이와 태진에게 정말 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 공기조화 실험실에 있는 모든 후배님들께 정말 감사합니다.

그리고 지금까지의 제가 있기까지 저의 묵묵히 저를 지켜봐 주시면서 언제나 걱려를 아끼지 않았던 부모님께 감사하며, 언제나 변함없는 마음으로 저를 뒷바라지 해주며 저와 함께해준 저의 처에게 이 작은 결실을 바칩니다.