

## 톱니형핀이 부착된 2중 열교환관을 이용한 엔진 배열회수기에 관한 실험적 연구

임용빈† · 양태진\* · 김종수\*\*

(원고접수일 : 2005년 7월 22일, 심사완료일 : 2005년 8월 22일)

### An Experimental Study on the Heat Exchanger for the Engine Waste Heat Recovery Using Serrated Fins and Bayonet Tube

Yong-Bin Im† · Tae-Jin Yang\* · Jong-Soo Kim\*\*

**Abstract** : In this study, high performance waste heat recovery heat exchanger was developed using the bayonet tube with spiral serrated fins. Especially, heat exchanger of the bayonet tube type was operated well because of double water passes mechanism and characteristics. A cooling water passes down inner tubes to thimble-form tubes, then flows back up as it boils. The heat exchanger of bayonet tube type was composed of steel tube with 7 channels(I.D<sub>1</sub> 14mm, I.D<sub>2</sub> 31.6mm) and spiral serrated fins. The performance tests were conducted under the following conditions : A cooling water flow rate was 273 kg/h and engine rpm was varied from 750 rpm to 3500 rpm. From the experimental result, waste heat recovery was 9.21 kW when engine rpm was 3500, and pressure drop was 15 ~ 260 mmHg/m<sup>3</sup>. The effectiveness of heat exchanger was about 0.7 ~ 0.9. The performance of heat exchanger was evaluated by using the  $\epsilon$ -NTU method. In the study, the NTU of the heat exchanger was 1.57~2.33.

**Key words** : Bayonet tube(2중열교환관), Serrated fin(톱니형 핀),  $\epsilon$ -NTU(유용도-NTU), Engine waste heat recovery(엔진배열회수)

#### 기호설명

C : Heat capacity rate, kJ/K

$c_p$  : Specific heat, J/kg · K

m : Mass flow rate, kg/h

v : Velocity, m/s

V : Exhaust gas flow rate, m<sup>3</sup>/h

W : Cooling water flow rate, kg/h

Re : Reynolds number

Pr : Prandtl number

† 책임저자(부경대학교 냉동공조공학과 대학원), E-mail : iyongbin@hanmail.net, Tel : 051)620-1502

\* 부경대학교 냉동공조공학과 대학원

\*\* 부경대학교 기계공학부

NTU : mber of transfer unit

그리스 문자

$\epsilon$  : Effectiveness  
 $\mu$  : Viscosity, kg/s · m

하첨자

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

1. 서 론

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 실용화되고 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. 그러나 핵심 부품인 엔진 배기가스 배열회수 열교환기의 경우 전량 수입에 의존하고 있어 국내 개발이 시급한 단계이다. 또한 배열회수 열교환기의 수입에 따른 가격상승이 초기 투자비의 증가요인으로 작용함에 따라 수요 증대에 제한 요소가 되고 있다.

종래에 열교환기에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔으며, 유체의 상태 ①고온고압 ②유체의 점도 ③파울링 상태 ④슬러리 ⑤열에

민감한 유체 ⑥공기로 냉각하는 경우 ⑦부식성이 강한 유체 등), 효율에 따른 열교환기 선정 등이 이미 정립되어 있는 상태이며, 열교환기 설계프로그램의 개발을 통해 셸&튜브 열교환기 등은 이미 설계, 활용되고 있다.

일반적으로 배기가스의 열을 회수는 하는 열교환기는 응축형 열교환기로서 종류는 분류 방법에 따라 여러 가지로 나눌 수 있으며 열교환기를 구성하는 주요 관 및 흰 등 전열면 재료의 형상과 배열방법에 따라 나누며 여러 문헌들에서는 나관형, 흰튜브형, 셸&튜브형, 플레이트흰튜브형, 로흰형, 하이흰형, 히트파이프형 등으로 구분하여 사용하고 있다<sup>[2]-[7]</sup>.

종래연구로서는 O'Doherty et al.<sup>[10]</sup>은 공업용으로 사용되는 bayonet 열교환기를 설계, 제작, 실험하여 열교환기 효율이 70%를 넘는다고 보고하였고, Harpal et al.<sup>[11]</sup>은 층류-난류 천이 동안 공기로 채워진 bayonet 관에서의 강제대류에 대해 연구하였는데, 내부관의 열전도율, 레이놀드수, 관 길이-직경에 대한 영향을 분석하였다. Kayansayan<sup>[12]</sup>은 bayonet tube를 이용한 증발기, 응축기의 열적 설계방법에 대해 수치 해석적으로 연구하였다.

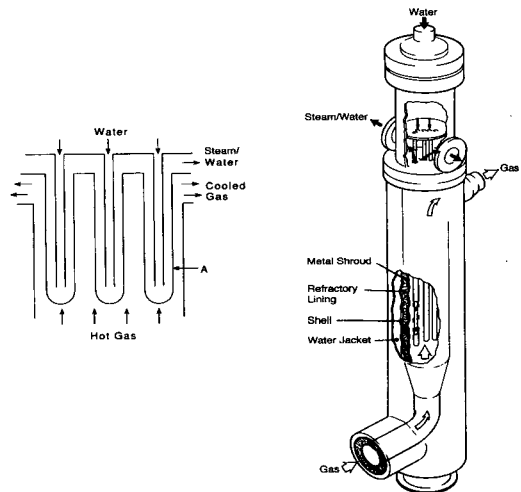


Fig. 1 Bayonet tube waste heat boiler<sup>[11]</sup>.

본 연구에 사용된 bayonet 관형 열교환기는 Fig. 1과 같다. 이러한 bayonet 관의 외부표면에

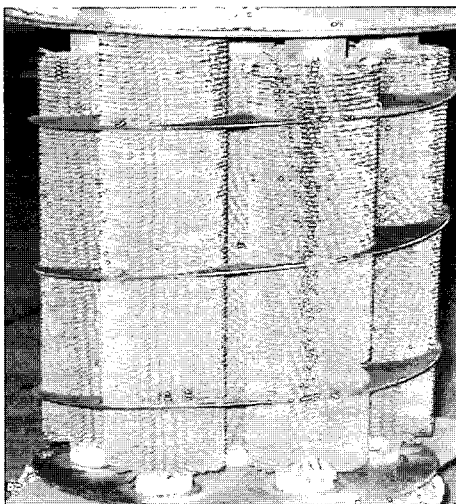
나선형 톱니원을 부착시켜 전열면적을 높이고자 하였다. 배기가스 열교환기 내부에 배기가스의 와류를 유도하는 배플 형상의 판을 삽입하여 열전달 성능을 높여서 고온의 배기가스뿐만 아니라 중저온의 배기가스를 효과적으로 회수 할 수 있는 배열회수 열교환기를 개발하고자 하였다.

## 2. 열교환기의 구조와 성능평가

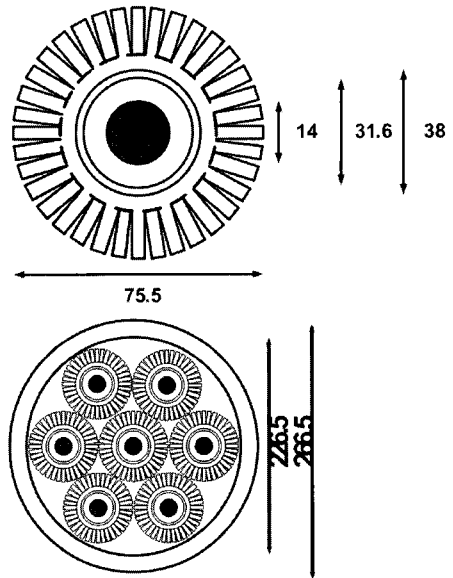
본 연구에 사용하기 위해 제작한 bayonet 관은 Fig. 2와 Fig. 3과 같으며, 외측관은 두께 2.5mm 내경이 31.6mm이고, 내측관은 두께 1.2 mm 내경이 14mm인 이중관 구조로 되어 있다. 외측관 표면에 길이 12.5mm, 폭 4mm, 두께 1.2mm의 나선 톱니원을 부착하여 단일 관을 제작하였다.

**Table 1 Specification of the waste heat recovery heat exchanger**

Heat exchanger volume(m <sup>3</sup> )	0.03
Total heat transfer area(m <sup>2</sup> )	4.165
Inlet tube diameter of cooling water(mm)	18
Inlet tube diameter of exhaust gas(mm)	26



**Fig. 2 Photograph of the waste heat recovery heat exchanger.**



**Fig. 3 Schematic of diagram of spiral serrated fins.**

제작한 단일관은 380mm의 길이로 만들어 7개의 관군으로 구성하여 열교환기를 제작하였고, 열교환기의 내부는 열전달 성능을 높이기 위해 배기가스의 와류를 유도할 수 있도록 나선형의 평판을 제작하여 셀측에 부착하였다. 열교환기의 윗부분에는 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 관을 이용한 배기가스 열교환기를 제작하였으며 Table 1에 나타내었다.

톱니형 원은 1턴에 36개의 원을 가지고 있고, 단위길이(m)당 275턴을 가지고 있다. 톱니형 원의 전열면적을 계산하면 1.7 m<sup>2</sup>/m이 되는데, 단일관의 단위 길이 당 전체 전열면적은 1.82 m<sup>2</sup>/m이 된다.

회수열량 계산에 사용된 식은 (1)과 같다.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \tag{1}$$

$$Re_D = \frac{4m}{\pi D \mu} \tag{2}$$

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} \tag{3}$$

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

$$Nu_D = C_2 C R e_{D, \max} Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0.25} \quad (5)$$

식(2)와 (3)은 냉각수가 통과하는 내부에서의 열전달율을 얻기 위한 관계식이고, 식(4)와 (5)는 배기가스 측에서의 열전달율을 구하기 위한 관계식으로 사용하였다. 열교환기의 성능 해석을 하기 위해 ε-NTU법을 사용하였다. 사용된 유용도와 관련된 식은 식(6)이고, NTU 관계식은 식(7)이다<sup>[8], [9]</sup>.

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

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

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

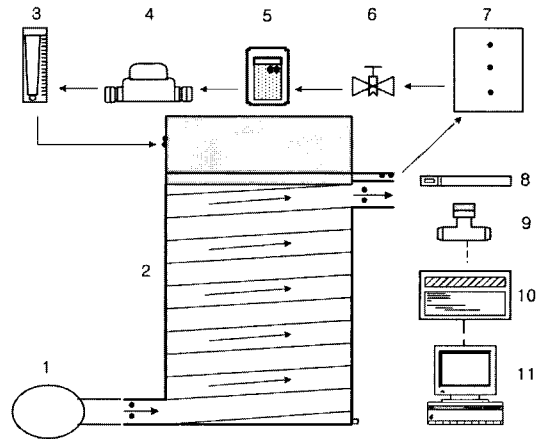
식 (6)에서  $C_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i})$  항은 최대 가능 열전달율이며,  $C_c (T_{c,i} - T_{c,o})$ 항은 실제 열전달율로 정의되어진다. 유용도(effectiveness)와 NTU에 의한 열교환기 성능 평가는 일반적으로 행하여지며 널리 알려진 방법이다. 따라서 본 연구에서는 ε-NTU 방법에 의한 나선 튜니원형 bayonet 관을 이용한 배열회수 열교환기의 성능을 알아보았다.

### 3. 실험장치 및 방법

Fig. 4에서 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 나타내었다. 실험 장치는 bayonet 관을 이용한 배열회수 열교환기를 중심으로 구성되며, 세부적으로 열원부, 계측부, 제어부, 시험부로 구성되었다.

열원부로는 99~280°C의 배기가스를 배출하는 2900 cc급(ssang-yong motors, 2.874 cc, OM602 Diesel)의 디젤엔진이 사용되었고, 계측부는 다점의 온도와 냉각수 유량 및 배기가스의 풍량과 차압을 측정하기 위한 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 이루어졌으며, 시험부는 bayonet 관을 이용한 배열회수 열교환기로 구성되어졌다.



- 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

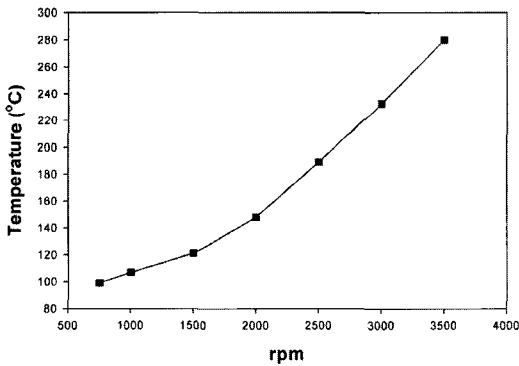
**Fig. 4 Schematic diagram of the experimental apparatus.**

배기가스의 온도는 엔진의 rpm 조절에 의해 99~280°C까지 변화시키면서 배열회수 열교환기에 공급하였다. bayonet 관을 이용한 배열회수 열교환기의 열회수 성능을 알기 위해 T형 열전대를 배열회수 열교환기의 배가스 입구와 출구 부분에 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 차압 측정을 위해 열교환기의 배기가스 입출구측 배관 표면의 2 mm 크기의 정압공에서 측정하였다. 열전대와 차압계는 직접 데이터로거와 연결되어 PC에 모든 측정값을 받아 프로그램 상에서 처리하도록 하였다.

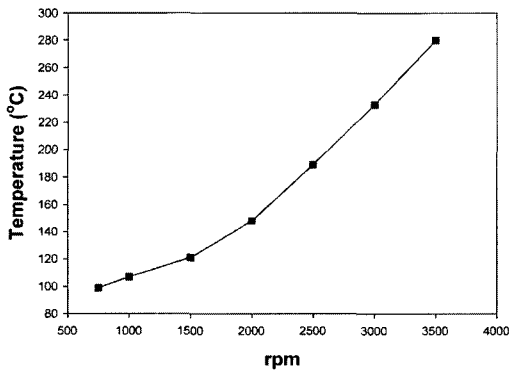
**Table 2 Accuracy and test condition**

Physical parameter	Accuracy	Test condition	Note
Inlet temperature	±0.3℃	25℃ ~ 48℃	T type
Outlet temperature	±0.3℃	29℃ ~ 75℃	T type
Water flow rate	2%	273 kg/h	Dwyer .Int
Differential pressure	±0.1mm Hg/m <sup>3</sup>	20mmHg/m <sup>3</sup> ~ 260 mmHg/m <sup>3</sup>	

본 실험에서 사용된 T-type 열전대는 항온조에서 표준 온도계로 보정하였고, 온도측정의 편차는 보정 값에 대해 ± 0.2℃ 정도를 나타냈다. 계측기 및 실험조건에 관해 Table 2에 나타내었다.



**Fig. 5 Variation of exhaust gas flow rate according to engine rpm**

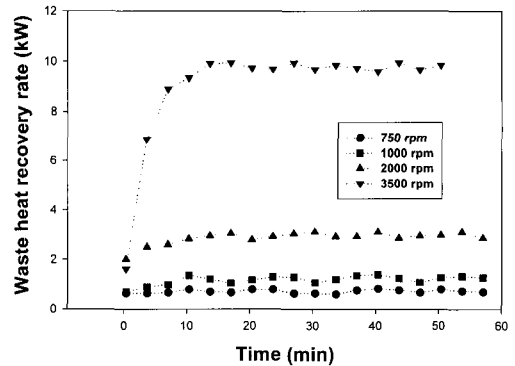


**Fig. 6 Variation of exhaust gas temperature according to engine rpm.**

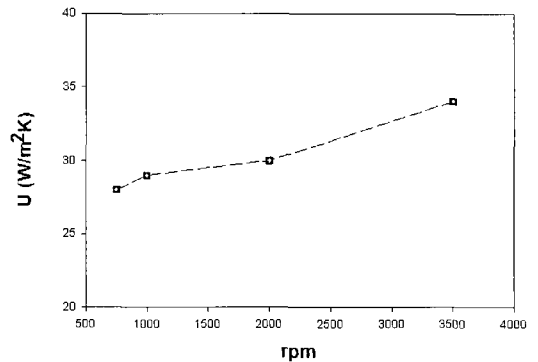
#### 4. 실험결과 및 고찰

배열회수 열교환기는 배기가스의 열에너지를 배기가스가 내부를 통과하는 동안 전열관을 통해 냉각수로 회수하는데 목적이 있다. 본 실험에서는 나선 톱니형 bayonet 관 열교환기의 열회수 성능을 평가하기 위해 냉각수의 유량을 일정하게 유지시킨 뒤 배기가스의 온도와 풍량을 변화시켰을 경우의 열전달 특성과 배열 회수 성능을 실험하였다.

실험에 사용된 엔진의 rpm 변화에 따른 배기가스의 온도와 열교환기를 통과하는 배기가스량을 측정하여 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. rpm의 증가에 따라 배기가스 온도와 배기량 모두 거의 선형적으로 비례하여 증가하였다.



**Fig. 7 Variation of waste heat recovery rate with engine rpm.**



**Fig. 8 Variation of heat transfer coefficient with engine rpm.**

Fig. 7은 엔진의 rpm을 변화시켜서 배기가스의 온도와 풍량을 바꾸었을 때, 냉각수가 회수하는 열량을 나타내었다. 750 rpm이고 99°C의 배기가스가 풍량 40.6 m<sup>3</sup>/h로 배기가스 열교환기를 통과할 때 열교환기는 0.73 kW의 열량을 회수하였고, 1000 rpm이고 107°C의 배기가스가 79.5 m<sup>3</sup>/h로 열교환기를 통과할 때에는 1.77 kW를 회수하였다. 또한 2000 rpm, 147°C에 141.3 m<sup>3</sup>/h의 배기가스에서는 2.87 kW의 열을 회수하였고, 3500 rpm, 280°C에 212 m<sup>3</sup>/h의 배기가스에서는 9.21 kW의 열량을 회수할 수 있었다.

Fig. 8은 실험을 통해 배열회수 열교환기를 통한 총괄 열전달 계수는 3500 rpm일때 최대 34 W/m<sup>2</sup>K 값을 가졌다. Fig. 9은 ε-NTU의 관계를 나타내었다. 실험에 사용된 배열회수 열교환기의 유용도는 0.75~0.9가 나왔고, NTU는 1.57~2.33 정도가 나왔다. 이 수치들은 열교환기 최적 조건에 잘 일치한다. 실험 결과를 ε-NTU 상관관계로 나타내면  $\epsilon = 1.05(1 - e^{-0.8245NTU})$ 이다.

Fig. 9에서는 배열회수 열교환기의 압력강하에 대해 보여준다. 배기가스 측의 압력강하가 260 mmHg/m<sup>3</sup>이하로 작게 나타나, 이로 인한 엔진출력이나 배기가스의 배기에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

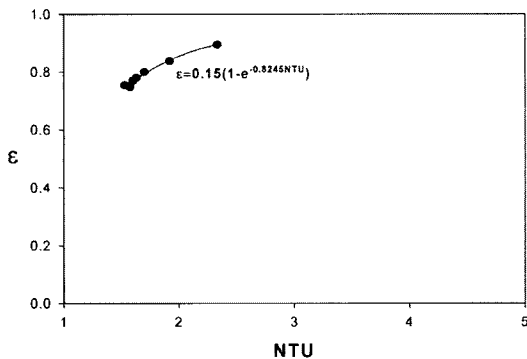


Fig. 9 Effectiveness to NTU.

### 5. 결 론

본 연구에서는 나선 톱니원형 bayonet 관을

이용한 배열회수 열교환기를 제작하여 열전달 특성 및 열교환기 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

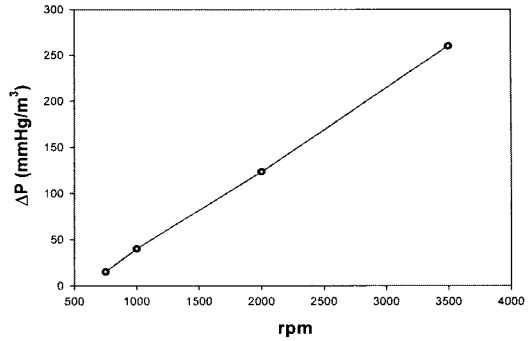


Fig. 10 Variation of pressure drop with engine rpm.

- (1) 냉각수 유량을 273 kg/h로 유지하면서 엔진의 rpm을 750~3500까지 조절하여 배기가스의 온도는 99~280°C로 변화시키고, 배기량은 40.6~212 m<sup>3</sup>/h로 변화시켰을 때에 최대 열회수량은 3500 rpm에서 9.21 kW였고, 열교환기를 통과한 냉각수는 65°C에서 96°C까지 증가시킬 수 있었다.
- (2) 열교환기 성능 해석을 위해 ε-NTU법을 사용하여 조사한 결과 유용도는 0.7~0.9가 나왔고, NTU는 1.57~2.33으로 나타나 배기가스의 양이 많아질수록 전열면적이 증가되어야함을 알 수 있었고, 실험 결과에 대한 방향성을 알아보고, ε-NTU 상관식은  $\epsilon = 1.05(1 - e^{-0.8245NTU})$ 였다.
- (3) 총괄열전달계수는 34 W/m<sup>2</sup>·K로 나타났고, 배열회수 열교환기에서 배기가스 측의 압력손실은 15~260 mmHg/m<sup>3</sup>으로 나타나 압력손실로 인한 엔진 출력의 문제는 없는 것을 확인했다.

### 후 기

본 연구는 친환경 첨단에너지기체 연구센터의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

**참고문헌**

- [1] G. F. Hewitt, G. L. Shires, T.R. Bott, Process Heat Transfer, U.S.A., pp. 491-498, 1994.
- [2] Hinchley, P., Waste Heat Boilers: Problems and Solutions, Chem. Eng. Prog, 1977.
- [3] Talbi, M; Agnew, B, Energy Recovery From Diesel Engine Exhaust Gases For Performance Enhancement and Air Conditioning, Applied Thermal Engineering, Vol. 22, No. 6, pp. 693-702, 2002.
- [4] Shields, C. D., Dryout in Horizontal Hairpin Waste Heat Boiler Tubes, AIChE Symp. Ser., 69(131), pp. 55, 1973.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Hoo-Kyu Oh, Simulation for High Efficient Heat Pump System Using Seawater Heat Source and Exhaust Energy, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 59-66, 2003.
- [8] YUNUS A. CENGEL, Heat Transfer, McGraw-Hill, pp. 570-609, 1998.
- [9] Webb, R. L., Principles of Enhanced Heat Transfer, Wiley, New York, pp. 35-40, 1994.
- [10] T. O'Doherty, A. J. Jolly and C. J. Bates, Analysis of a bayonet tube heat exchanger, Applied Thermal Engineering, Vol.21, Issue 1, pp. 1-18, 2001.
- [11] Harpal Minhas and G. S. H. Lock, Forced convection in an air-filled bayonet tube during the laminar-turbulent transition, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 40, Issue 8, pp. 1885-1894, 1997.
- [12] N. Kayansayan, Thermal design method of bayonet-tube evaporators and condensers, International Journal of Refrigeration, Vol. 19, Issue 3, Pages 197-207, 1996

**저자 소개**



**임용빈 (林湧彬)**

1975년 11월생, 1998년 부경대학교 졸업, 냉동공학 전공 (학사), 2002년 동대학원 냉동공조공학과 졸업(석사), 현 동대학원 박사과정



**양태진 (楊太振)**

1977년 11월생, 2004년 부경대학교 냉동공조에너지시스템공학과(학사), 현 부경대학교 대학원 냉동공조공학과 석사과정.



**김종수 (金鍾秀)**

1955년 3월생, 1977년 부산수산대학교 식품공학과 졸업(학사), 1982년 동대학원 냉동공학과 졸업(석사), 1988년 일본 와세다 대학교 기계공학과 졸업(박사), 현 부경대학교 기계공학부교수.