

배플 플레이트를 갖는 열교환기의 열전달 및 압력강하에 관한 연구

배성우⁺ · 최순호⁺⁺ · 윤석훈⁺⁺ · 오 철⁺⁺

A study on heat transfer characteristics and pressure drop of heat transfer by baffle cut rate

Sung-Woo Bae⁺ · Soon-Ho Choi⁺ · Seok-Hoon Yoon⁺⁺ · Cheol Oh⁺⁺

Abstract : The object of this experiment is comparing heat transfer performance and pressure drop characteristics by baffle cut rate, fluid velocity and heating temperature. Experiments were carried out in cross flow heat exchanger with water as a working fluid. In this experiment, baffle cut rate is 30%, 40%, 50%, velocity is 0.5m/s, 1.0m/s, 1.5m/s, and heating temperature is 30°C, 40°C, 50°C. An experimental device to measure the heat transfer coefficient was constructed. The experimental result were obtained for the fully developed turbulent flow of water in tube on the condition of uniform heat flux.

Keywords : Average velocity(평균유속), Baffle cut rate(배플크기), Heat exchanger(열교환기), Heat transfer rate(열전달량), Pressure drop(압력강하),

기호설명

A_c : 흐름에 대한 단면적 [m^2]	Re : Reynolds 수($= U_m \cdot D_h / \nu$) [-]
A_e : 원관의 단면적 [m^2]	$T_{c \cdot i}$: 냉각수 입구온도[°C]
BCR : Baffle Cut Rate [%]	$T_{c \cdot o}$: 냉각수 출구온도[°C]
D_h : 수력 직경($= 4A_c / P$) [m]	$T_{c \cdot w}$: 초기 냉각수 온도[°C]
D_e : 원관 직경 [m]	$T_{h \cdot i}$: 온수 입구온도[°C]
h_i : 원관 내부에서의 대류 열전달 계수 [$W/m^2 \cdot K$]	$T_{h \cdot o}$: 온수 출구온도[°C]
h_o : 원관 외부에서의 대류 열전달 계수 [$W/m^2 \cdot K$]	$T_{h \cdot w}$: 초기 온수 온도[°C]
k : 온도에 따른 전도 열전달 계수 [$W/m \cdot K$]	ΔT_{lm} : 로그 평균 온도차[°C]
L : 원관 길이 [m]	U : 총괄 열전달 계수[$W/m^2 \cdot K$]
Nu : Nusselt 수($= 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$) [-]	U_m : 평균 유속[m/s]
P : 압력 [Pa]	
P_h : 접수 길이 [m]	
Q : 열전달량 [W]	

그리스 문자

ν : 온도에 따른 동점성계수 [m^2/s]

하첨자

c, h : 냉각 및 가열

+ 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과
++ 한국해양대학교 기관시스템공학부

i, o : 입구 및 출구

1. 서론

최근 에너지 소비의 증가추세로 인하여 산업 전반에 걸쳐 에너지 절약형, 즉 고성능 열교환기 개발이 절실히 요구되고 있다. 이런 고성능 열교환기에서 열전달 성능의 향상은 특히 중요하다. 열전달 성능을 향상시키기 위하여 과거에는 열전달 면적 및 유체유동 특성을 개선하기 위하여 표면을 가공한 원관들이 사용되어 왔으나, 사용선박 및 목적에 따라서 보다 고효율형의 열교환기인 셸-튜브 타입 열교환기의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

특히 고성능 열교환기 내부에 장착되는 전열관의 열효율 향상은 매우 중요한 과제라 할 수 있다. Tinker는 압력강하와 열교환기의 성능에 대한 연구에 있어 열교환기 내부의 유동을 처음으로 교차유동, 배플-셸 누수, 배플-튜브 누수, 측면 유동 등의 부분적인 유동으로 나누는 방법을 사용하였다. 그러나 이때에는 컴퓨터가 발달하지 못한 관계로 이상적인 관군을 제시하되 틸새유동과 측면유동과의 상호작용까지는 해석하지 않은 준-해석적 방법이 제시되었다. 지금까지의 연구로서는 전열관의 전열면적을 넓히고 난류 유동을 촉진시키기 위하여 관 내부에 특수 모양의 핀을 부착하거나, 직각 홈, 나선 홈 등의 형상을 관 내부 표면에 형상화함으로써 열전달을 증가시키고 있다. 이러한 내부 핀을 이용한 난류 촉진장치에 의하여 열전달의 효율이 상당히 개선되고 있으나, 상대적으로 관류 유동 저항이 증가함으로써 펌핑 소요 동력이 증가하게 된다. 또한 강제대류시 열전달 효과를 향상시키기 위한 연구로 Patankar는 이중 동심 원관에 직선형 핀을 설치하여 열전달 계수와 마찰계수에 대하여 수치해석을 하였다. 인공 조도에 의한 열전달 촉진 및 압력손실에 대한 연구에서는 Webb이 작동유체의 유동방향과 직각으로 내부 홈을 가공한 전열관을 사용하였고, Manbach는 이중 동심 원관 내에서의 압력강하와 열전달 특성을 규명하였다.

열교환기는 그 사용목적에 따라 많은 종류와 형태를 가지며 대부분 설치공간, 전열면적, 열교환량 등의 제한 조건을 가지므로 그 제한 조건내에서 열전달 효과를 향상시키기 위하여 다양한 기술이 적용되어지고 있다. 그러나 기하학적인 형상이나 유동장 특성을 바꿔줌으로써 열전달율을 향상시키려는 시도는 항력의 증가를 수반해 압력손실이 커지므로 전체적인 에너지 효과 상승에는 큰 영향을 주지 못한다. 이러한 이유로 열전달율을 상승시키면서 압력손실을 저감할 수 있는 기술이 필요하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 원관내 배플컷을(Baffle cut

rate)을 변화시켜, 내부의 유동 특성 및 압력강하 특성을 토대로 최적의 배플컷율(%)을 구하기 위한 기초 자료를 수집하고자 하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 2.1은 실험장치의 계통도이다. 실험장치부는 크게 시험부, 냉각온도 및 가열온도를 맞춰주기 위한 브라인 순환부와 히터부, 작동 유체를 일정한 온도와 속도로 유지하기 위한 유체 순환부, 열교환이 진행되는 동안 원관 내부의 온도 변화 및 유체의 온도 변화를 측정하기 위한 온도 계측부로 구성되어 있다. 작동 유체는 냉온수 모두 순수한 물을 사용하였다. 시험부 원관은 동관(Copper, $\varnothing 100\text{mm}$, $L=500\text{mm}$)으로 제작하였으며, 배플은 7mm의 투명 아크릴로 제작하여 동관 외부에서 나사로 고정한 후 배플의 전후부 및 Windowqn, 주 유로 등에 각각 열전대를 부착하여 동관 내에서의 온도 변화를 관찰하였다.

Fig. 2.2는 배플의 크기를 나타낸 것이고, Fig. 2.3은 Test section의 상세도이다. 동관 내부에는 가열된 유체가 흐르도록 하였으며, 동관 외부에 아크릴로 제작된 직육면체($500\text{mm} \times 180\text{mm} \times 200\text{mm}$)를 부착하여 냉각된 유체가 동관의 하부에서 상부로 흐르도록 상하부에 각각 3개의 입출구를 설치하였고, 동일한 양의 냉각 유체를 흐르게 하기 위해 3개의 입구부에 밸브를 설치하여 여러번의 시행착오를 거쳐 동관 전체가 동일하게 냉각될 수 있도록 밸브의 개폐를 조정하였다.

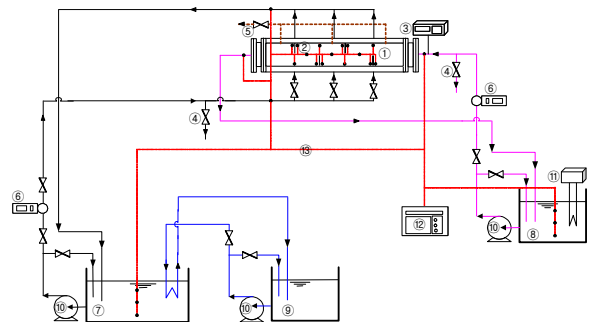


Fig. 2.1 Schematic diagram of experimental apparatus



(a) BCR%30 (b) BCR%=40 (c) BCR%=50

Fig. 2.2 Baffle appearance

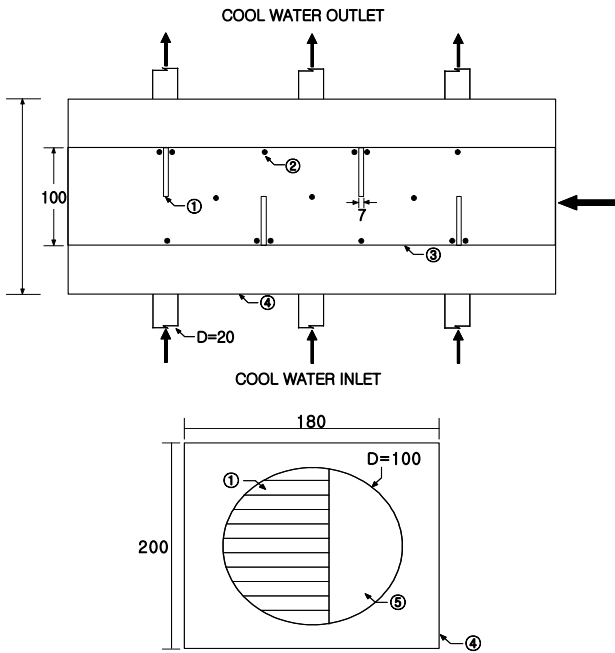


Fig. 2.3 Detail of test section

2.2 실험방법

실험은 고온유체의 온도를 조건에 맞게 일정하게 조절한 후 냉각유체를 공급하는 시점을 실험시작으로 하여 관측 시간을 1분씩 10회, 3분씩 5회, 5분씩 3회, 10분씩 2회 총 1시간 동안 배플 형상에 따른 온도 변화를 관측하였다. 고온유체의 온도는 30℃, 40℃, 50℃로 히터를 사용하여 일정온도로 유지시켜 실험 조건에 따라 유속을 달리하여 공급하였다. 냉각유체의 온도는 5℃로 냉각수조 안에 Ø13mm의 동관을 벤딩하여 삽입 후 -10℃의 브라인이 흐르게 하여 간접 냉각을 하도록 하였다.

먼저 히터로 고온 유체를 가열하여 일정 온도에 도달하였을 때 고온유체를 순환펌프를 작동하여 원관내 고온유체가 흐르도록 하였다. 원관내 온도가 일정하게 될 때까지 히터로 가열하면서 물을 순환시켰으며, 일정 온도가 되었을 때 히터 작동을 중단하였다. 이와 함께 간접 냉각된 저온 유체가 일정 온도가 되었을 때 0.5m/s의 일정 유속으로 흘려보내 두 유체간의 온도 변화를 관찰하였다.

표2.1에 본 실험의 실험조건을 나타내었다.

Table. 2.1 Experimental condition

Condition	Range
BCR%	30, 40, 50
U_m	0.5, 1.0, 1.5
T_h	30, 40, 50
T_w	5

2.3 실험자료 정리

본 실험에서 평균 유속 및 BCR%에 따른 열전달 특성을 고찰하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

1. 실험부와 그 주변 사이의 열전달은 무시한다.
2. 위치 에너지, 운동에너지 변화는 무시한다.
3. 상변화를 일으키지 않고 일정 비열이라 가정한다.
4. 원관에서의 전도에 의한 열전달은 무시한다.
5. 관벽의 열저항과 불결효과들은 무시한다.
6. 물성값은 일정하다.
7. 관에서는 완전 발달된 유동이다.

위 가정에 따라 열전달량(W)를 산출하기 위하여 동관내에서의 대류열전달 계수(h_i)와 원관 외부에서의 대류 열전달 계수(h_o)를 계산하여 총괄 열전달 계수(U)에 의해 열전달량(W)를 구하였다.

먼저 Reynolds수는 다음식에 의해 계산하였다.

$$Re = \frac{U_m D_h}{\nu} \quad (2.1)$$

여기에서 U_m 은 평균 유속, ν 는 유체의 동점성 계수,

$D_h (= \frac{4A_c}{P_h})$ 는 수력직경이며, A_c 는 원관의 단면적, P_h 는 접수길이 이다.

본 실험에서의 유동은 $Re \geq 10,000$ 이므로 난류 유동이므로 Dittus-boelter식에 의해 Nu수를 구하였다.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (2.2)$$

원관내 대류 열전달 계수(h_i)는 식 (2.2)의 값을 식 (2.3)에 대입하여 구하였다.

$$h_i = \frac{k}{D_h} Nu \quad (2.3)$$

여기에서 k 는 각 온도에서 유체의 열전도 계수이고, D_h 는 수력직경이다. 한편 원관 외부에서의 대류 열전달 계수(h_o)는 식 (2.4)에 의해 구하였다.

$$h_o = \frac{k}{D_e} Nu \quad (2.4)$$

여기에서 D_e 는 원관 직경을 나타낸다.

식 (2.3)과 식 (2.4)에 의해 구해진 대류 열전달 계수 값에 의해 식 (2.5)로 부터의 총괄열전달 계수는

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_i}\right) + \left(\frac{1}{h_o}\right)} \quad (2.5)$$

그리고 총 전열량(W)는 식 (2.6)에 의해 구하였다.

$$Q = UA_c \Delta T_m \quad (2.6)$$

여기에서 ΔT_m 은 로그 평균 온도차 이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Baffle에 따른 영향

Fig. 3.1, Fig. 3.2 및 Fig. 3.3은 각각의 유속에서 BCR%에 따른 총 열전달율(W)에 대한 그래프이다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 BCR%가 작을수록 열전달율이 커지는 것을 알 수 있으며, 같은 BCR%에서 유속이 증가함에 따라 그리고 온수 온도가 증가함에 따라 열전달율의 증가폭이 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 앞에서 실험한 것과 같이 BCR%가 커질수록 배플판 후면에서의 역류가 크게 발생함에 따라 전열효과가 증가하지만 배플판 후면에서의 정체시간에 의한 열전달 효과가 다소 감소하는 것에 기인한다고 볼 수 있다. 또한 BCR%가 작을수록 Window 영역을 지나는 순간 유속의 증가로 인해 배플판 주변에서의 유동이 크게 증가함에 따라 난류강도가 크게 증가하는 것에 따른 것이라 할 수 있으며, 배플과 배플사이, Window부에서 운동에너지가 크게 증가하기 때문이라고 생각한다.

3.2 유속에 따른 영향

Fig. 3.4, Fig. 3.5 및 Fig. 3.6은 각각의 BCR%에 대해 평균 유속 변화에 따른 원관 내에서의 총 열전달량(W)을 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 평균 유속이 증가 할수록 총 열전달량이 큰 것을 알 수 있으며, 평균 유속이 증가 할수록 각 BCR%간의 총 열전달량 증가폭이 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 배플판 후면에서의 역류가 크게 발생하여 전열효과의 증가로 인하여 총 열전달량이 커지는 것을 알 수 있다. 또 이것은 평균 유속이 증가 할수록 배플판 주변이나 Window 부에서의 난류강도 및 운동에너지의 증가와도 관련이 있음을 알 수 있다.

3.3 압력강하 특성

Fig. 3.7은 BCR%에 따른 압력강하 특성을 나타내고 있다. 그래프에서 보면 알 수 있는 바와 같이 BCR%가 증가 할수록, 유속이 빠를수록 압력강하가 크게 일어나는 것을 알 수 있다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 BCR%가 클수록 상대적으로 넓은 면적을 통과하기 때문이며, 배플판 후면에서의 역류가 크게 증가하기 때문

이다. 또한 평균 유속이 증가할수록 압력강하가 급격하게 증가함을 알 수 있다. 이것은 평균 유속이 증가 할수록 난류강도 및 운동에너지가 배플판 사이나 Window쪽으로 이동함에 따른 마찰저항의 증가 때문인 것으로 생각된다. 한편, 평균 유속이 0.5m/s일 경우에 BCR%에 따른 영향이 거의 없는 것은 평균 유속이 너무 작아서 압력강하 특성에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다.

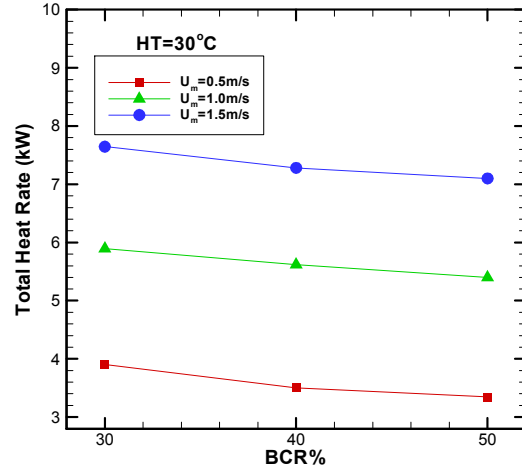


Fig. 3.1 Effect of BCR%

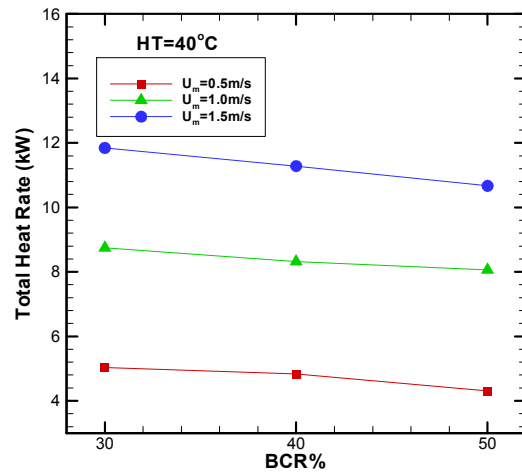


Fig. 3.2 Effect of BCR%

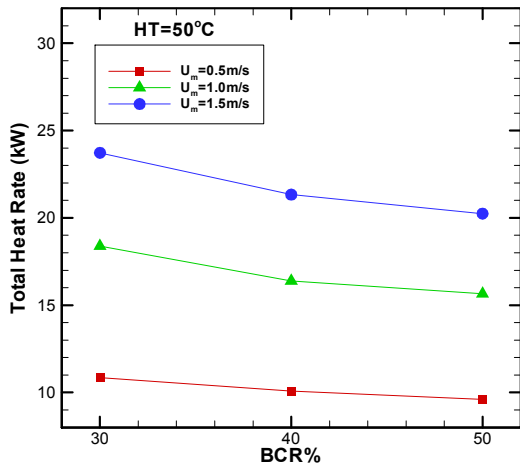


Fig. 3.3 Effect of BCR%

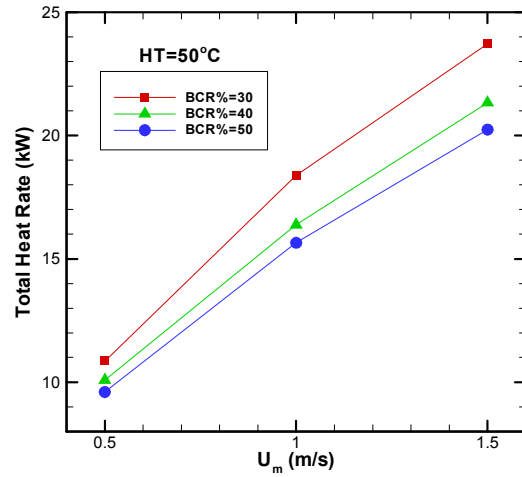


Fig. 3.6 Effect of average velocity

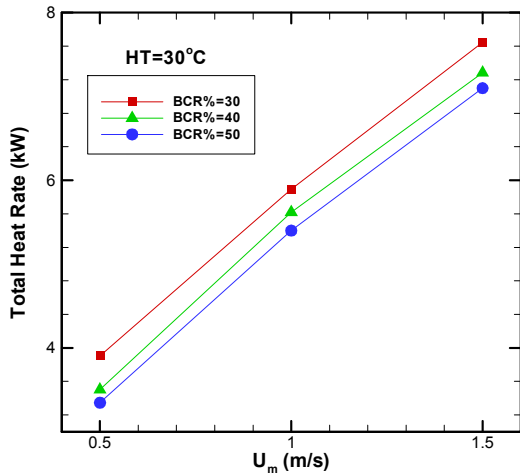


Fig. 3.4 Effect of average velocity

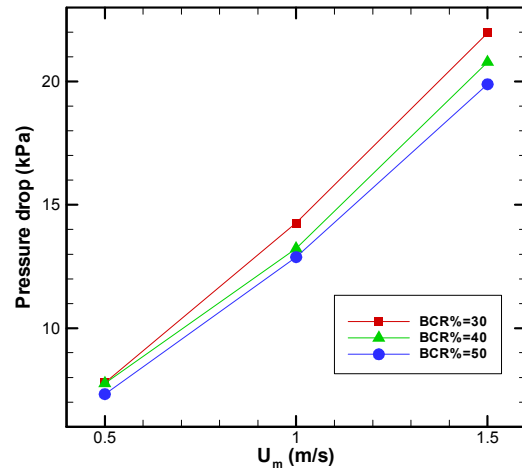


Fig. 3.7 Effect of BCR% and average velocity on steady state

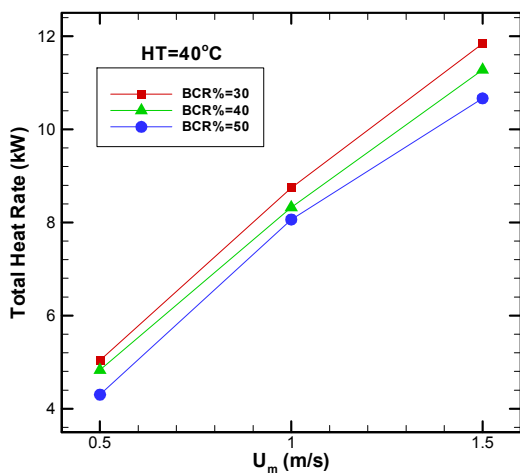


Fig. 3.5 Effect of average velocity

4. 결론

본 연구에서는 보다 더 고효율형 열교환기 개발 및 설계 기술의 확립에 있어서 핵심이 되는 전열효과의 증대와 압력강하 특성에 대한 기초 자료를 확보하기 위한 지속적인 연구과정의 일환으로서 원관내 Baffle cut rate 변화에 따른 유체 유동 특성과 압력강하 특성 그리고 열전달 특성에 대해 본 실험의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 배플판이 있는 경우가 배플판이 없는 경우에 대하여 관내 유동 특성이 뛰어나다.
- (2) BCR%가 감소할수록, 평균 유속이 증가할수록 유동 특성, 운동에너지, 난류강도가 커지며 주로 배플판 사이

나 Window 측에서 발생한다.

(3) BCR%가 커질수록, 평균 유속이 감소할수록 압력 손실은 작아진다.

(4) 실험적 방법에 의한 연구에서 열전달 효과 및 압력 손실을 고려할 때 적절한 배플의 크기는 BCR%=40이다.

참고문헌

- (1) 김무환, “공조기용 Finned Tube 열교환기”, 대한기계학회지, Vol.35, No.9, pp.776 ~ 793, 1995.
- (2) 이윤표 외 1인, “열교환기 Fouling 저감 대책”, 대한기계학회지, Vol.35, No.9, pp.836 ~ 847, 1995.
- (3) Fujie, K., Itoh, N., Innami, T., Kimura, H., Nakayama, N. and Yanugidi, T., "Heat Transfer Pipe", U. S. Patent 4,044,797, assigned to Hitachi Ltd., 1977.
- (4) Tinker, T., "Shell-side characteristics of shell-and-tube heat exchangers : a simplified rating system for commercial heat exchangers", Trans. ASME, pp. 36 ~ 52, 1958.
- (5) Woodruff, D.W. and Westwater, J.W., "Stream Condensation of Various Gold Surfaces", Journal of Heat Transfer, Vol. 103, pp, 688 ~ 692, 1981.
- (6) Pantankar, S.V., Ivanovic, M. and Sparrow, E.M., "Analysis of Turbulent Flow and Heat Transfer in Internally Finned Tubes and Annuli", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 101, pp. 29 ~ 37, 1979.
- (7) Webb, R.L., Eckert, E.R.G., "Application of Rough Surfaces to Heat Exchangeer Design", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 15, pp. 1647 ~ 1658, 1972.
- (8) Manbach, K., "Rough Annulus Pressure Drop Interpretation of Experiments and Recalculation for Spuare Ribs", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 21, pp. 1143 ~ 1156, 1978.
- (9) 배성우 외 4인, “배플 플레이트 크기에 따른 관내의 유동 특성에 관한 연구”, 한국박용기관학회 추계학술대회 논문집, pp.51 ~ 57, 2004.
- (10) 정태용 외 4인 공역, “Fundamentals of Heat and mass Transfer”, 교보문고, 서울, 2003.
- (11) 최인규 외 3인 공역, “열전달”, Part6, 보성문화사, 서울, 1989.