

배플 플레이트 크기에 따른 관내의 유체유동 특성 및 열전달 특성에 관한 실험적 연구

배성우† · 문성배* · 오 철**

An experimental study on fluid characteristics and heat transfer characteristics along a horizontal circular tube by baffle cut rate

S-W Bae†, S-B Mun*, C Oh*

Abstract : The object of the experimental is comparing that changing Baffle cut rate, fluid velocity in the channel and changing flow temperatures, behaved experimental study to investigate fluid characteristics of interior, pressure drop characteristics and heat transfer characteristics by PIV system and heat transfer experimental.

In this experimental, baffle cut rate is 30%, 40%, 50%, velocity is 0.5m/s, 1.0m/s, 1.5m/s 2.0m/s and heat temperature is 50℃, 40℃, 30℃, cooling temperature 5℃. PIV system determine velocity characteristics, turbulent intensity, kinetic energy and pressure drop.

Key words : Baffle cut rate(배플 크기), Fluid characteristic(유동특성), Average velocity(평균유속), Kinetic Energy(운동에너지), Pressure drop characteristic(압력강하특성), Turbulent intensity(난류강도), Heat exchanger(열교환기), Heat transfer rate(열전달량).

기호설명

A_c : 흐름에 대한 단면적	$[m^2]$	h_0 : 원관 외부에서의 대류 열전달 계수	$[W/m^2 \cdot K]$
A_e : 원관의 단면적	$[m^2]$	k : 전도 열전달 계수	$[W/m \cdot K]$
BCR : Baffle Cut Rate	[%]	$K.I$: 운동에너지	[-]
D_h : 수력직경(= $4A_c/P$)	$[m]$	L : 원관 길이	$[m]$
D_c : 원관 직경	$[m]$	Nu : Nusselt 수(= $0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$)	[-]
h_i : 원관 내부에서의 대류 열전달 계수	$[W/m^2 \cdot K]$	P : 압력	$[Pa]$
		P_h : 접수길이	$[m]$

† 책임저자(한국기계연구원)
 * 한국해양대학교 항해시스템공학부
 ** 한국해양대학교 기관시스템공학부

Q : 열전달량	[W]
Re : Reynolds 수(= $U_m \cdot D_h/\nu$)	[-]
$T_{c.i}$: 냉각수 입구온도	[°C]
$T_{c.o}$: 냉각수 출구온도	[°C]
$T_{c.w}$: 초기 냉각수 온도	[°C]
$T_{h.i}$: 온수 입구온도	[°C]
$T_{h.o}$: 온수 출구온도	[°C]
$T_{h.i}$: 초기 온수 온도	[°C]
TI : 난류 강도	[-]
T_m : 평균 온도	[°C]
T_{wall} : 냉각면 온도	[°C]
ΔT_{lm} : 로그 평균 온도차	[°C]
U : 총괄 열전달 계수	[W/m ² · K]
U_m : 평균 유속	[m/s]

그리스 문자

ν : 온도에 따른 동점성계수	[m ² /s]
----------------------	---------------------

하첨자

c, h : 냉각 및 가열
i, o : 입구 및 출구
m : 평균
$wall$: 벽면

1. 서 론

채널 내의 유동은 오래전부터 많은 학자들에 의해 공학적인 목적으로 연구되었다. 배플판(baffle plate)이 존재하는 채널은 유체유동의 흐름을 막아 우회토록 함으로써 유체가 채널 내에 머무르는 시간을 길게 하여 두 물체간 열을 주고받는 것을 목적으로 하는 곳에서는 바람직한 현상이지만 직교류형 배플은 전열면적의 정체영역이 많고 압력강하가 크며, 정체구역에서 파울링(fouling)에 의한 부식이나 파공을 초래하기 쉽다.^[1] 열전달 효과를 향상시키기 위하여 다양한 기술이 적용되어지

고 있으나 기하학적인 형상이나 유동장 특성을 바꿔줌으로써 열 전달율을 향상시키려는 시도는 항력의 증가를 수반해 압력손실이 커지므로 전체적인 에너지 효과 상승에는 큰 영향을 주지 못한다. 이러한 이유로 열 전달율을 상승시키면서 압력손실을 저감할 수 있는 기술이 필요하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 원관내 배플컷율(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 유체유동 특성을 파악하기 위한 실험장치도를 나타내고 있다. 작동유체는 순수한 물을 사용하였으며, 수조에 입자(110 μ m인 구형의 Poly Vinyl Chloride)를 주입하여 작동 유체 속에 고루 분포 될 수 있도록 하였다. 작동 유체는 수평으로 설치된 원관 내부에 연속으로 흐르게 되며 원관은 내부의 유동장을 가시화하기에 적합한 투명아크릴을 사용하였다. 원관 내부의 배플은 실험 최대 유속, 고정 및 분해를 원활히 하기 위해 원관 외부에서 나사로 고정하였다.

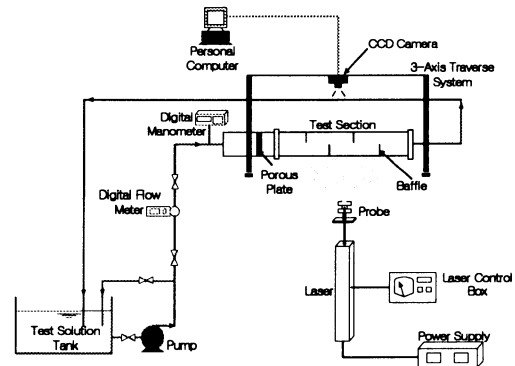


Fig. 2.1 Schematic diagram of experimental apparatus for flow characteristics

Fig. 2.2 는 시험부의 상세도 이고 Fig. 2.3은 실험에 사용된 배플의 크기를 나타낸 것이다.

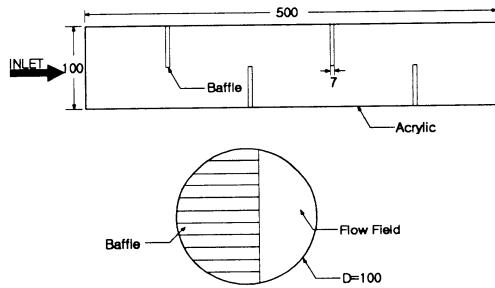
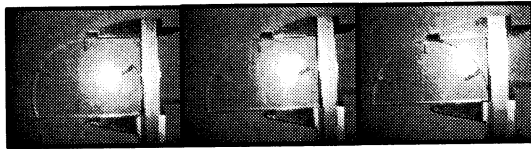


Fig. 2.2 Detail of test section



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

Fig. 2.3 Baffle appearance

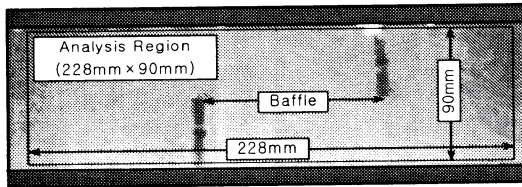


Fig. 2.4 PIV measurement configuration

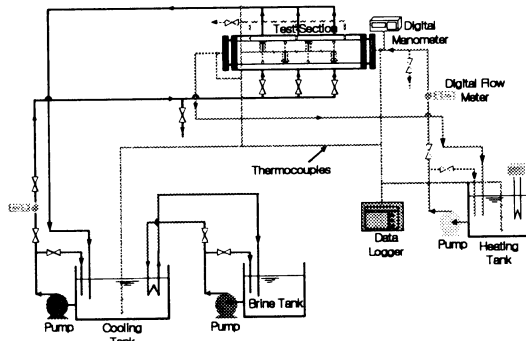


Fig. 2.5 Schematic diagram of experimental apparatus for heat transfer

시험부 내의 흐름은 좌측에서 우측으로 흐르며 원관의 직경은 100mm이다. 또한, 유동장 측정시 동일 위치에서 촬영하기 위해 이송장치를 설치하였고, 압력강하 특성을 측정하기 위하여 정밀 차압계를 사용하였다. 그리고 유동의 가시화를 위하여

PIV 계측장치를 사용하였으며, CCD 카메라에 의해 획득된 영상은 Grabber Board(PCI Board)를 통하여 디지털 신호화 되어 CPU 60MHz의 주처리 컴퓨터에 저장하였다. Fig. 2.4는 획득한 영상 중 실제 실험의 처리에 사용된 영역을 표시하고 있다

Fig. 2.5는 열전달 특성을 파악하기 위한 실험장치도이며, Fig. 2.6은 시험부의 상세도를 나타낸 것이다. PIV 계측에 관한 실험과 동일한 조건을 만들기 위해 동일 크기의 원관을 아크릴을 대신해서 동관(Copper)으로 제작하였으며, 배플 또한 같은 크기와 재질의 배플을 동관 내부에 PIV 계측 실험과 같은 방법으로 부착하여 실험을 행하였다. 또한 PIV 계측에 얻어진 유체 유동 특성 결과를 바탕으로 배플의 전 후부 및 Window부, 주 유로 등에 각각 열전대(C-A Type)를 부착하여 동관 내에서의 온도 변화를 계측하였다. 동관 내부에는 가열된 유체가 흐르도록 하였으며, 동관 외부에 가로500mm, 세로180mm, 높이200mm의 직육면체를 부착하여 냉각된 유체가 동관의 하부에서 상부로 흐르도록 상하부에 각각 3개의 입출구부에 밸브를 설치하여 동관 전체가 동일하게 냉각 될 수 있도록 밸브의 개폐를 조정하였다. 열전대에 의해 계측된 온도 변화는 온도기록계에 의해 기록 되었으며, 동시에 정밀 차압계에 의해 압력을 측정하였다.

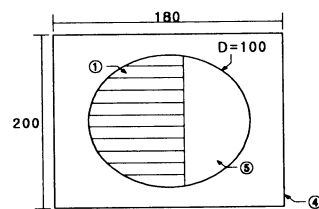
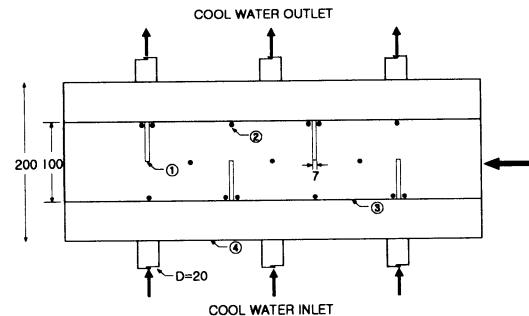


Fig. 2.6 Detail of test section

2.2 실험방법

유체유동 특성 파악을 위한 실험은 순환펌프로 물을 순환시켜 유체의 흐름이 안정되는 시점인 약 10분이 경과된 후에 PIV 측정 장비를 이용하여 유체 유동 특성을 계측하였으며, 동시에 정밀 차압계로 압력을 측정하였다. 우선 배플이 없는 원관의 유동 특성 및 압력을 계측하고, BCR%=50, BCR%=40, BCR%=30 순으로 실험을 행하였다.

열전달 특성을 파악하기 위한 실험은 고온유체의 온도를 조건에 맞게 일정하게 조절한 후 냉각 유체를 공급하는 시점을 실험시작으로 하여 관측 시간을 1분씩 10회, 3분씩 5회, 5분씩 3회, 10분씩 2회 총 1시간 동안 배플 형상에 따른 온도 변화를 관측하였다.

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 흘러보내 두 유체간의 온도 변화를 관찰하였다.

표2.1에 본 실험의 실험조건을 나타내었다.

Table. 2.1 An experimental condition

Condition	Range
BCR%	30, 40, 50
U_m	0.5, 1.0, 1.5, 2.0
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 다음 식에 의해 계산하였다.

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

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.

$$h_i = k \cdot Nu / D_h \quad (2.3)$$

한편 원관 외부에서의 대류 열전달 계수(h_o)는 식 (2.4)에 의해 구하였다.

$$h_o = k \cdot Nu / D_e \quad (2.4)$$

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.

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

여기에서 ΔT_m 은 로그 평균 온도차 이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 배플에 따른 영향

3.1.1 평균 속도 프로파일

Fig. 3.1은 평균유속 1.5m/s에서 배플판이 없는 경우와 각각의 배플판 BCR%에 따른 유동장에 대해 평균 속도 프로파일을 나타내고 있으며, 프로

파일은 계측영역의 가로축을 기준으로 6등분한 선 상에서 도식한 결과이다. Fig. 3.1에서 알 수 있듯이 (a)의 경우는 보통의 원관에서의 유체 유동을 잘 나타내고 있는 반면에 배플이 있는 원관에서는 BCR%가 커질수록 역류가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 유동특성이 열교환기에서의 전열

특성을 증가시키는 요인이 된다.

3.1.2 난류강도 (T.I)

Fig. 3.2는 Fig. 3.1과 동일한 조건에서의 난류강도의 결과를 나타내고 있다. Fig. 3.2에서 알 수 있듯이 배플판이 없는 경우 일정한 난류강도를 보

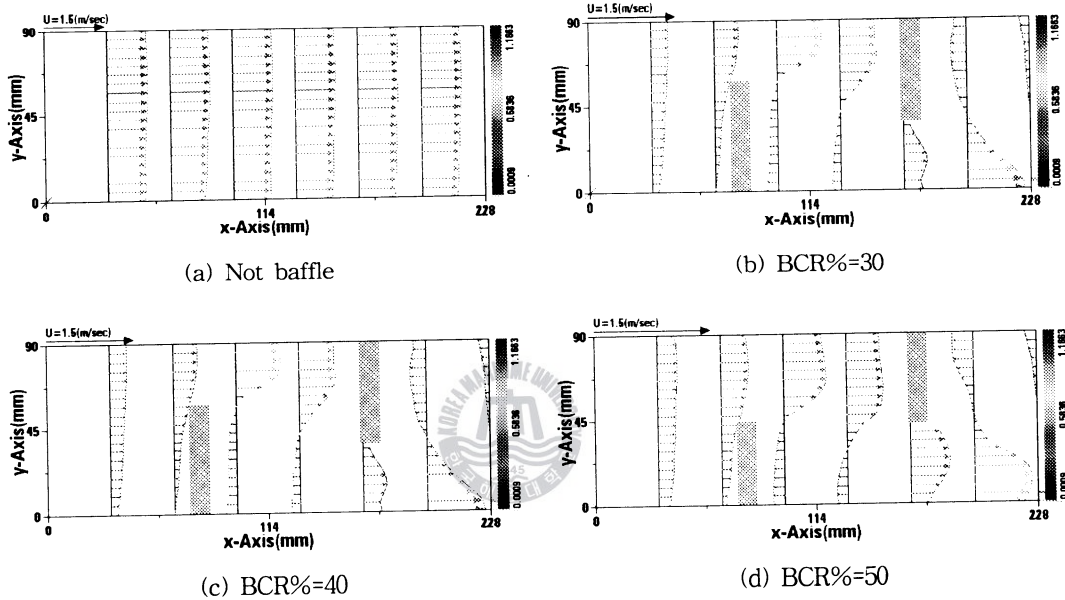


Fig. 3.1 Average Velocity characteristics at $U_m=1.5\text{m/s}$

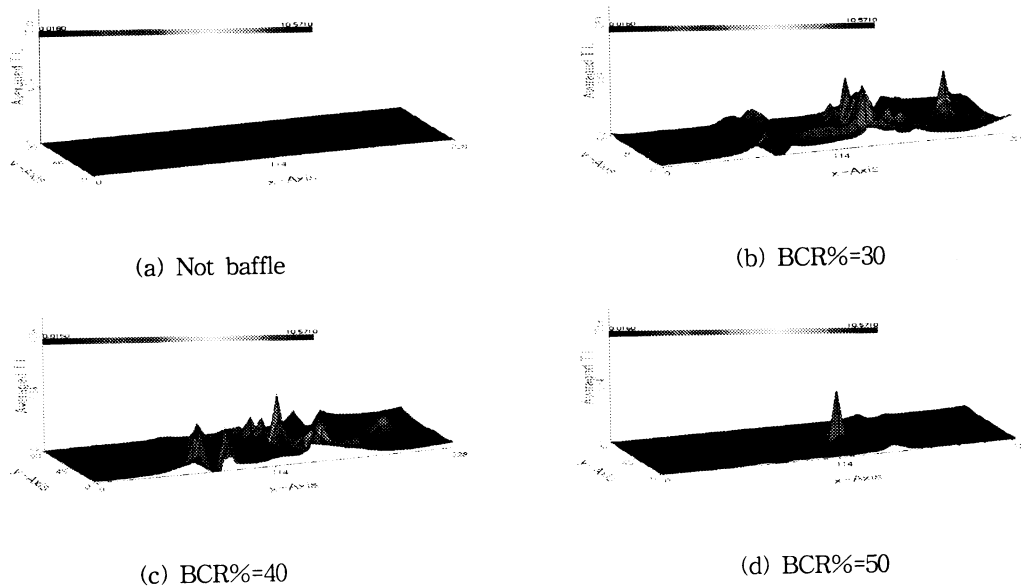


Fig. 3.2 Turbulent intensity characteristics at $U_m=1.5\text{m/s}$

이고 있는 반면에 BCR%가 작을수록 배플판 주변에서 유동이 크게 증가함에 따라 난류 강도도 크게 증가함을 알 수 있다.

난류 유동은 속도, 압력과 같은 물리적인 양들이 시간과 공간에 대해 진동하는 불규칙적인 유체 운동이며 일종의 에너지 교환과정으로 장시간 지속되는 와류 구조가 그 안에 존재한다. 난류강도는 속도 변동성분과 연관되어 유동장을 지배하는 중요한 유동특성으로 각 격자점에서 식(3.1)으로 구하여 나타내었다.

$$T.I = \frac{\sqrt{\frac{(u^2 + v^2)}{2}}}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (3.1)$$

단, u^2, v^2 : 순간에 있어서의 속도 변동성분
 u^2, v^2 : 시간평균 속도

3.1.3 운동에너지 (K.E)

Fig. 3.3은 평균유속 1.5m/s에서의 운동에너지를 나타내고 있다. 배플이 없는 경우 일정한 운동에너지를 갖는 반면, BCR%=30에서는 첫 번째 배플을 지나 두 번째 배플까지 가는 동안 큰 운동에너지를 갖는 것을 알 수 있고, BCR%=40에서는 주 흐름에 따라 운동에너지가 커지는 것을 볼 수 있다. 한편 BCR%=50에서는 두 번째 배플을 지나는 순간 운동에너지가 큰 것을 알 수 있다.

운동에너지는 식(3.2)에 의하여 구해지며 속도

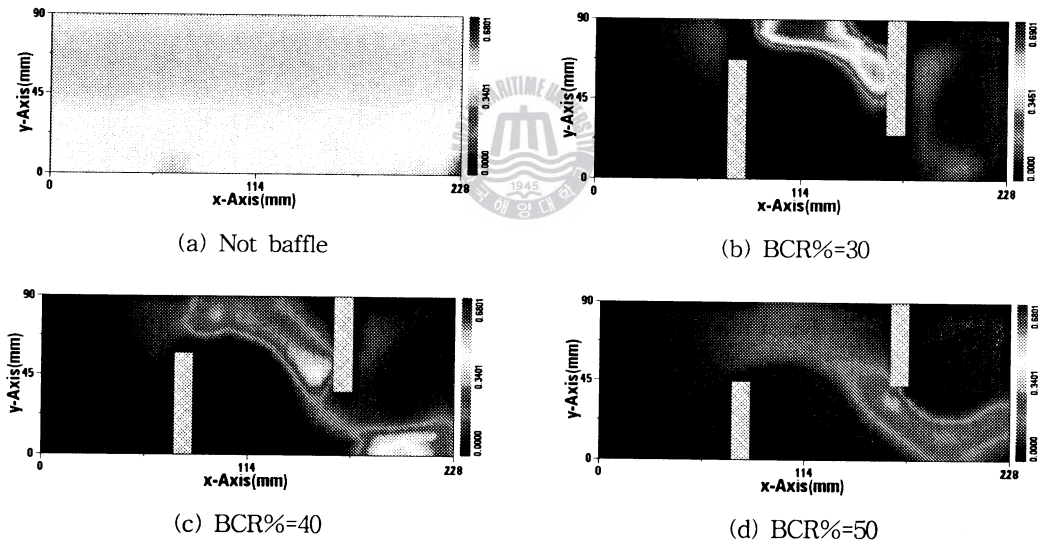


Fig. 3.3 Kinetic Energy characteristics at $U_m=1.5m/s$

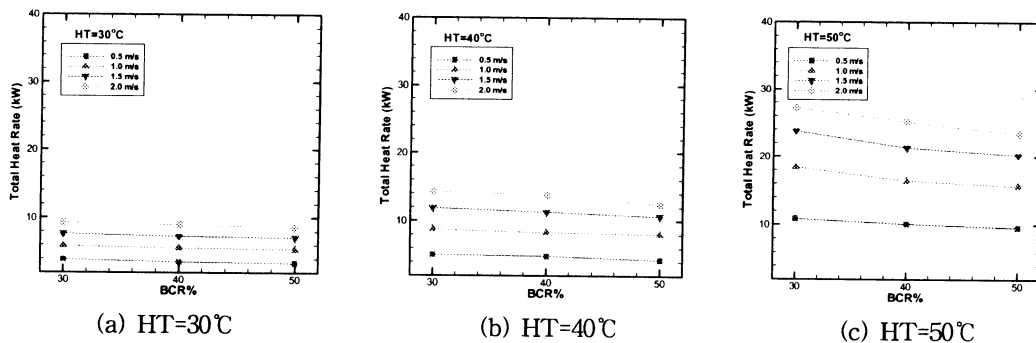


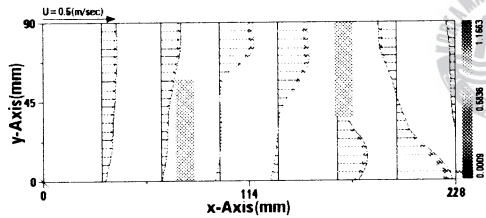
Fig. 3.4 Effect of BCR%

벡터 분포와는 다른 양상을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

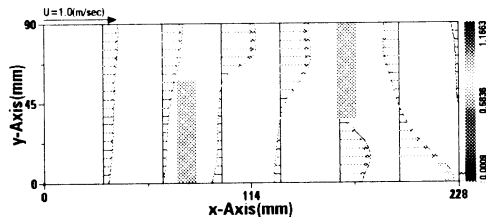
$$K.E = \frac{u^2 + v^2}{2} \quad (3.2)$$

3.1.4 열전달 특성

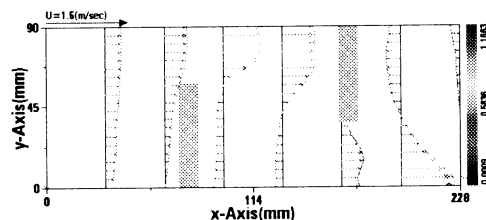
Fig. 3.4,는 각각의 유속에서 BCR%에 따른 총 열전달율(W)에 대한 그래프이다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 BCR%가 작을수록 열전달율이 커지는 것을 알 수 있으며, 같은 BCR%에서 유속이 증가함에 따라 그리고 온수 온도가 증가함에 따라 열전달율의 증가폭이 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 앞에서 실험한 것과 같이 BCR%가 커질수록 배플판 후면에서의 역류가 크게 발생함에 따라 전 열효과가 증가하지만 배플판 후면에서의 정체시간에 의한 열전달 효과가 다소 감소하는 것에 기



(a) $U_m=0.5\text{m/s}$



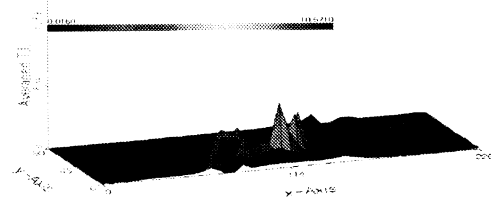
(b) $U_m=1.0\text{m/s}$



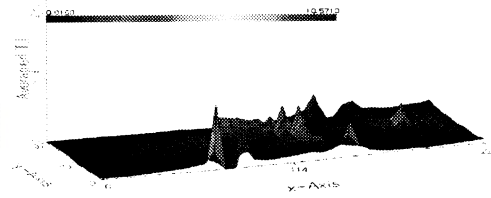
(c) $U_m=1.5\text{m/s}$

Fig. 3.4 Effect of average velocity at BCR%=40

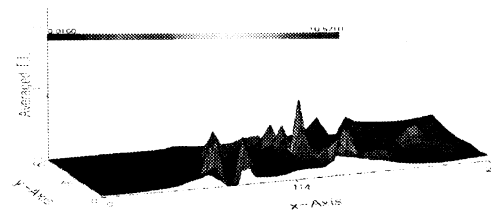
인한다고 볼 수 있다. 또한 BCR%가 작을수록 Window 영역을 지나는 순간 유속의 증가로 인해 배플판 주변에서의 유동이 크게 증가함에 따라 난류강도가 크게 증가하는 것에 따른 것이라 할 수 있으며, 배플과 배플사이, Window부에서 운동에너지가 크게 증가하기 때문이라고 생각한다.



(a) $U_m=0.5\text{m/s}$



(b) $U_m=1.0\text{m/s}$



(c) $U_m=1.5\text{m/s}$

Fig. 3.5 Effect of kinetic energy at BCR%=40

3.2 유속에 따른 영향

3.2.1 평균 속도 프로파일

Fig. 3.7는 BCR%=40일 때의 평균 유속의 변화에 따른 속도 프로파일이다. 평균 유속이 증가할수록 유동이 크게 증가하며, 배플판 후면에서의 역류가 크게 발생함을 알 수 있다.

따라서 평균유속이 증가할수록 열교환기 내에서의 전열효과가 증가함을 알 수 있다.

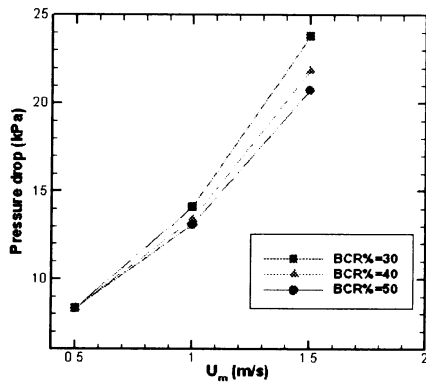


Fig. 3.6 Effect of BCR% and average velocity on steady state at flow characteristics

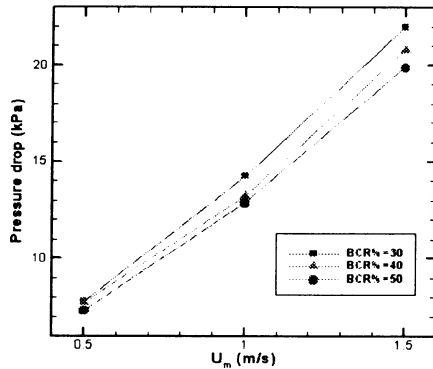


Fig. 3.7 Effect of BCR% and average velocity on steady state at heat transfer

3.2.2 난류강도

Fig. 3.8는 BCR%=40일 때 평균유속의 변화에 따른 난류 강도의 변화를 나타내었다. 평균 유속이 증가할수록 난류 강도가 크게 증가하며, 배플 주위에서 특히 크게 일어나는 것을 알 수 있다.

3.2.3 운동에너지 (K.E)

Fig. 3.9은 BCR%=40일 때 유속에 따른 운동에너지 변화를 나타내었다. 평균 유속이 증가할수록 운동에너지가 크게 증가하며, 운동에너지가 배플과 배플 사이, Window부에서 크게 분포되어 있음을 알 수 있다.

3.2.4 열전달 특성

Fig. 3.10, Fig. 3.11 및 Fig. 3.12는 각각의

BCR%에 대해 평균 유속 변화에 따른 원관 내에서의 총 열전달량(W)을 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 평균 유속이 증가할수록 총 열전달량이 큰 것을 알 수 있으며, 평균 유속이 증가할수록 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 증가할수록 배플판 주변이나 Window 부에서의 난류강도 및 운동에너지의 증가와도 관련이 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 보다 더 고효율형 열교환기 개발 및 설계 기술의 확립에 있어서 핵심이 되는 전열 효과의 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 유동특성, 운동에너지, 난류강도가 커지며 주로 배플판 사이나 Window 측에서 발생한다.
- (3) BCR%가 커질수록, 평균 유속이 감소할수록 압력 손실은 작아진다.
- (4) 실험적 방법에 의한 연구에서 열전달 효과 및 압력손실을 고려할 때 적절한 배플의 크기는 BCR%=40이다.

참고문헌

- [1] 김무환, "공조기용 Finned Tube 열교환기", 대한기계학회지, Vol. 35, No. 9, pp. 776~793, 1995.
- [2] 이운표 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 Exchanger 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 Square 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.



