

와이어 스크린 배플이 설치된 채널에서의 유체유동 저항 Fluid Flow Resistance in a Channel with Wire-screen Baffles

오세경 · 아리바시아 크리시나 부트라 · 안수환

S. K. Oh, B. K. Ary and S. W. Ahn

(접수일 : 2008년 11월 16일, 수정일 : 2008년 2월 16일, 채택확정 : 2008년 4월 2일)

Key Words : Pressure Drop(압력강하), Wire-screen Baffle(와이어 스크린 배플), Rectangular Channel(사각 채널), Friction Factor(마찰계수)

Abstract : An experimental investigation was conducted to examine the fluid flow resistance in the rectangular channel with two inclined wire screen baffles. Two different types of wire screens; dutch weave and plain weave, were used as baffle devices in this experiment. Three kinds of baffles with different mesh specifications were made up of dutch type and four different kinds of baffles were made up of plain weave type. The stainless steel wire screen baffles were mounted on the bottom wall with varied angle inclination. Reynolds numbers were varied from 23,000 to 57,000. Results show that the mesh number of baffles plays an important role on friction factor behaviour. It is found that the baffle with the most number of meshes (type SA) has the highest fluid flow resistance.

기호 설명

- A : 와이어 메쉬의 개구, m
- B : 와이어의 두께, m
- D_h : 시험부 채널의 수력직경, m
- f : 마찰계수
- H : 시험부 채널의 높이, m
- L : 시험부 채널의 길이, m
- \dot{m} : 질량 유량, kg/s
- DP : 압력강하, Pa
- Re : 레이놀즈수
- u : 공기의 속도, m/s
- W : 시험부 채널 폭, m
- x : 시험부 입구에서부터의 거리, m

그리스 문자

- α : 배플 경사각 $^\circ$
- ρ : 공기 밀도, kg/m^3

아래 첨자

- b : 체적평균, 바닥 표면
- ra : 채널 평균
- s : 측면
- ss : 매끈한 원형 관에 대한 실험식
- t : 상부 면
- w : 벽 면

1. 서 론

열교환기 성능을 효과적으로 향상시키는 방법 중 하나는 체적에 대한 전열면적의 비를 증가시키는 것이다¹⁾. 직조 금속 스크린(woven metal screen), 폼 소지(foam matrix), 그리고 미립자의 비결합 유동층(unconsolidated bed)이 체적에 대한 전열면적이 크기 때문에 우수한 열전달 특성을 제공한다^{2,3)}. 그러므로 금속 와이어 스크린은 냉동, 화학반응, 식품제조, 태양에너지 수집, 열 소산(heat dissipation), 연소 등⁴⁻⁶⁾의 응용분야에 광범위하게 사용된다. 금속직조 스크린은 섬유와 종이 필터에 비교해서 화학, 열, 그리고 기계적 영향에 적은 저항이 발생하기 때문에 광범위하게 사용된다. 시중에는 4종류의 직조금속 스크린이 사용되고 있다; 즉, 평직(plain square

안수환(책임저자) : 경상대학교 기계시스템공학과
E-mail : swahn@gaechuk.gsnu.ac.kr, Tel : 055-640-3125
오세경 : 경상대학교 기계시스템공학과
아리바시아 : 경상대학교 대학원 기계시스템공학과

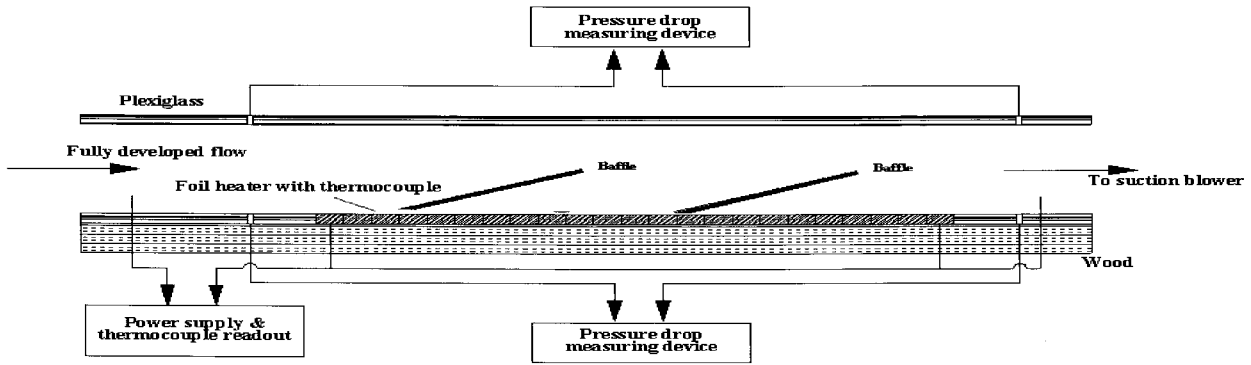


Fig. 1 Schematics of test apparatus

weave), 능직(twill weave), 포드리니어 직(fourdriner weave), 그리고 첩직(dutch weave).

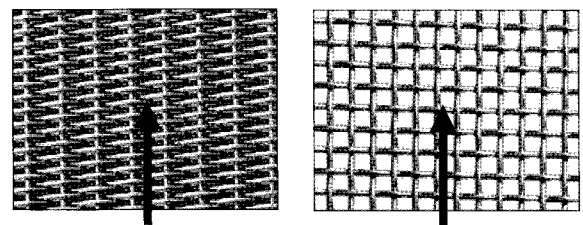
Ergun⁷⁾, Armour와 Cannon⁸⁾, 그리고 Sodre와 Parise⁹⁾가 와이어 스크린 구조를 통과하는 유체의 유동에 관해 실험적으로 조사하였다. Richard와 Robinson¹⁰⁾은 와이어 모양(shape)이 압력강하에 미치는 효과를 조사한 결과 마찰계수는 와이어의 구멍수와 단면 구조에 따라 변화하는 정도를 정량적으로 보고 하였다. Tian 등¹¹⁾은 강제 대류상태에서 금속제 직조 스크린의 압력강하와 열전달 성능 특성을 실험적으로 연구하였다. 그들은 스크린의 경사 방향과 셀(cell)구조의 효과를 측정된 결과, 압력강하는 셀 구조에 의해 크게 좌우되었음을 보였다. 그러나 위에서 언급한 연구들은 직조 금속 스크린이 다수층으로 설치된 채널 내의 수송현상(transport phenomena)에 대해 취급하였다. Dutta와 Dutta¹²⁾는 원형의 다공 금속 경사 배플이 설치된 채널에서 열전달 향상에 대해 처음보고 하였다. 그들은 채널 냉각 장치의 열전달 향상을 위한 연구로 배플의 크기, 위치, 그리고 경사각에 대해 조사하였다. 그 결과 경사 다공 배플이 수직 다공 배플 배열보다 우수한 열전달 성능을 보였다.

본 연구에서는 이전의 연구들과는 달리 두 개의 경사진 와이어 스크린 배플이 설치된 채널에서의 유동 저항 특성을 실험적으로 조사하였다. 배플은 가열된 바닥면 위에 설치하고 경사각은 3°, 5°, 그리고 7°로 하였다. 와이어 스크린 재질은 스테인레스 강(AISI 304)이었다. 와이어 스크린은 첩직(dutch weave)과 평직(plain weave)의 두 종류를 사용하였다.

2. 실험 장치

Fig. 1은 실험장치의 도식학적 그림이다. 유동 시

스템은 흡입 방식으로 작동되고 수평으로 위치하였다. 작동 유체인 공기는 유동직진기를 통해 흡입된 뒤 사각채널의 가열되지 않는 부분을 통과하여 배플이 설치된 시험 부를 거쳐 공조장치로 조절된 실험 내로 배출된다. 송풍기와 실험장치의 사각채널과의 연결은 진동을 최소화하기 위해 플렉시블(flexible) 튜브를 사용하였다. 요구하는 유량을 얻기 위해 제어 밸브를 설치하였다. 시험 부의 체적 평균 속도를 구하기 위해 피도 튜브를 시험 부의 아래쪽 원형 관 중심부의 속도를 측정하였다. 충분히 발달된 원형 관에서의 중심속도(U)에서 벽속수 법칙에 의해 최적 평균속도를 구하였다⁽¹³⁾. 시험 부 사각 채널의 체적 평균 속도(u_b)는 연속법칙으로부터 계산되었다. 레이놀즈 수는 시험 부 채널 평균 속도(u_b)와 수력직경으로부터 구하였다. 그리고 6개의 압력 탭(tap)을 압력강하를 측정하기 위해 설치하였으며, 설치 위치는 시험 부의 10cm 상부의 상부면, 측면, 그리고 바닥면의 3군데와 시험 부의 8 cm하부 지점에 3군데를 각각 설치하고 전자 마노미터를 이용하였다.



Flow

Flow

(a) Dutch weave

(b) Plain weave

Photo. 1 Stainless steel wire screen baffles

가열되지 않는 사각채널의 치수는 19.8 cm(W) x 4 cm(H) x 171.7 cm(L)이다. 충분한 입구길이를 설치하여 시험 부에서 완전히 발달된 영역의 유동이 되도록 하였다. 시험 부의 치수는 19.8 cm(W) x 4

cm(H) x 71 cm(L_o)이다. 채널의 좌우측 그리고 상부측은 5 mm 두께의 플렉시 글라스(Plexiglass) 판을 사용하였고 바닥은 5 cm송판(pine wood)을 사용하였다. 시험 부 전체에 균일한 열 유속을 얻기 위해 0.1 mm 두께의 스테인레스 판을 포일(foil)히터로 사용하였다. 포일 히터는 23개이고 각 히터의 치수는 19.8 cm x 3.0 cm x 0.01 cm이었다. 이들 포일 히터는 Photo. 1과 같이 시험 부 바닥에 유체 유동에 수직 방향으로 직렬 연결하였고 온도 조절은 10 kVA용량의 슬라이다스를 이용하 벽면 가열 온도 범위는 30°C에서 115°C이었고 공급 전원은 단상의 220V이었다. 실험 중 실내온도는 22°C에서 25°C이었다.

Table 1 Wire mesh specification

Dutchweave wire mesh	Type	Mesh		Wire diam, B (mm)		Opening A (micron)	
		Vert	Hor	Vert	Hor		
	SA	24	110	0.38	0.25	115 ~ 125	
	SB	14	80	0.5	0.3	220 ~ 240	
	SC	12	64	0.62	0.42	270 ~ 290	
Plain weave wire mesh	Type	Mesh		Wire diameter, B (mm)		Opening, A(mm)	
		SD	12	0.6			1.51
		SE	10	0.7			1.84
		SF	8	0.8			2.37
		SG	7	1.2			2.58

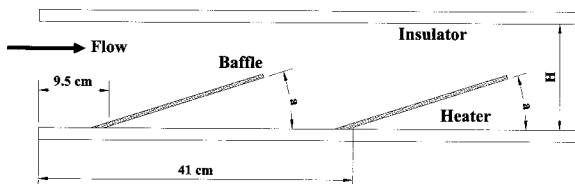


Fig. 2 Position of baffle in the test section

시험 부에서 자세한 배플 위치는 Fig. 2와 같다. 배플은 3°, 5°, 그리고 7°의 경사각으로 각각 가열 벽면 위에 설치하였다. 첫째 배플과 둘째 배플은 시험 부 시작 점으로부터 9.5 cm와 41 cm 아랫 쪽에 각각 위치하였다. 모든 배플 치수는 폭이 19.8 cm이고 길이가 23.2 cm이었다. 와이어 스크린은 Photo. 1과 같이 첩 직조(dutch weave)과 평 직조(plain weave)를 사용하였다. 평 직조에는 4종류, 첩 직조에는 3종류의 7종류를 측정하였다. 와이어 스크린의 사양

은 Table 1에 나타나 있다. 와이어 스크린의 용어는 Fig. 3에서 정의 된다. A와 B는 와이어 스크린의 개도(opening)와 직경을 각각 의미한다.

실험의 불확실성은 Kline과 McClintock⁽¹⁴⁾의 방법으로 평가 하였다. 실험에 측정 된 변수들은 벽면온도, 공기온도, 속도 그리고 압력강하이다. 레이놀즈수와 마찰 계수의 최대 불확실성은 ±2.5%와 ±9.5%이었다.

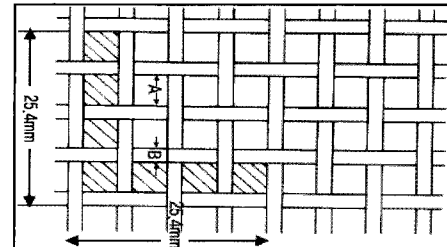


Fig. 3 Definition of wire screen

3. 자료 정리

채널 길이에 따른 압력강하와 공기 평균속도로부터 마찰계수는 다음과 같이 정의 된다.

$$f = \Delta p / [4(L_o/D_h)(\rho u_b^2/2)] \quad (1)$$

여기서 Δp 는 시험 부에서의 압력강하이므로 L_o 는 시험 부의 길이이다. 채널 평균 마찰계수 f_{ra} 는 상부벽의 마찰계수 f_t , 측면벽의 마찰계수 f_s , 그리고 바닥면 마찰계수 f_b 를 공식 (2)와 같이 평균하여 구하였다.

$$f_{ra} = [W(f_t + f_b) + 2Hf_s] / (2W + 2H) \quad (2)$$

시험 부의 채널평균 마찰계수 f_{ra} 는 Blasius⁽¹³⁾의 원관에 대한 마찰계수 f_{ss} 로 무차원화하여 공식(3)과 같이 나타내었다.

$$f_{ra}/f_{ss} = f_{ra}/(0.079Re^{-0.25}) \quad (3)$$

4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 레이놀즈 수가 23,000에서 57,000의 범위에서 배플 경사각이 3°인 경우 다양한 와이어 스크린 배플에 대한 채널 평균 마찰 계수를 나타낸다. 마찰 계수는 레이놀즈 수가 증가 할수록 감소하였다. 이러한 현상은 이전의 유사연구^(15,16)와 동일하게 나타났다. Ko와 Anand⁽¹⁵⁾는 엇물림식 배열로 수직인 다공 배플을 취급하였고 사용 배플 재료는 알루미늄 폼

(aluminium foam)이었다. 그리고 Hsieh 등¹⁶⁾은 알루미늄 폼 열 싱크(aluminium foam heat sink)에 대해 연구하였다. 이렇게 마찰계수가 감소하는 것은 유속이 증가 할수록 벽면 전단응력보다 유체의 운동 에너지증가가 커기 때문이라 사료된다. 대체로 첩 직조(dutch weave)에서의 마찰계수가 평 직조 (plain weave)보다 컸다. 이는 첩 직조의 경우 메쉬 (mesh)의 개구(opening) 정도가 작아서 유동저항이 커지 때문이라 사료된다.

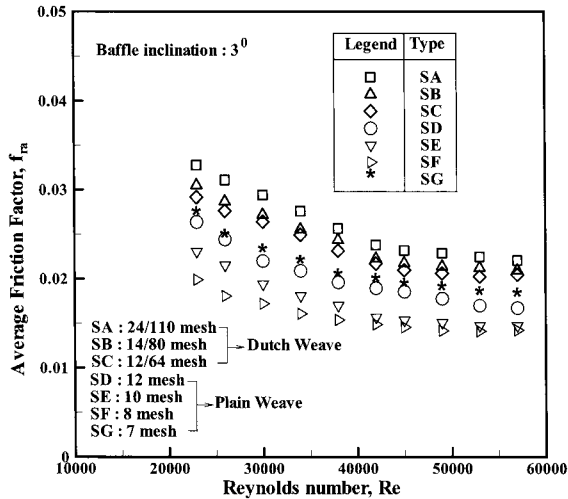


Fig. 4 Average friction factor for $a = 3^\circ$

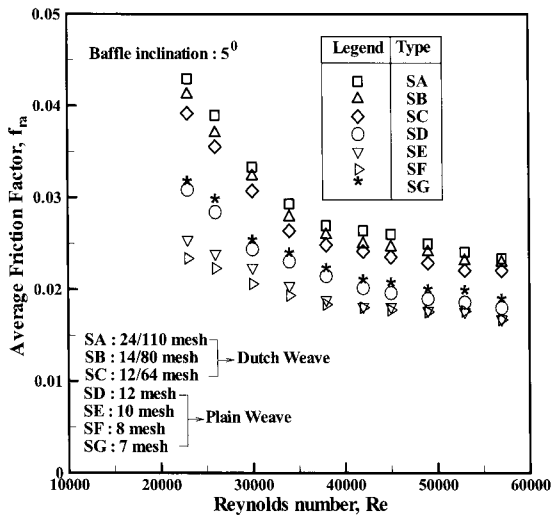


Fig. 5 Average friction factor for $a = 5^\circ$

또한 Figs. 4-6은 배플 경사각들의 변화에 대한 마찰계수들을 나타낸다. 채널평균 마찰계수는 메쉬 수가 증가 할수록 증가 하였다. 첩직(dutch weave)인 SA형 배플에서 유동저항이 가장 컸다. 이는 유체와 와이어 간의 유체접촉 면적은 메쉬가 증가할수록 증가하기 때문에 유동저항이 커지는 데 기인한다고 사

료된다. 평 직조(plain weave)에서 흥미로운 관찰은 메쉬 수가 7인 SG형 배플이 메쉬 수가 12인 SD형 과 8인 SF형 배플보다 유체유동 저항이 컸다. 이는 첩 직조(dutch weave)배플과는 반대 현상을 보인다. 이것은 SG형의 경우 와이어 와이어의 직경이 커서 압력 저항이 증가한 것으로 사료된다.

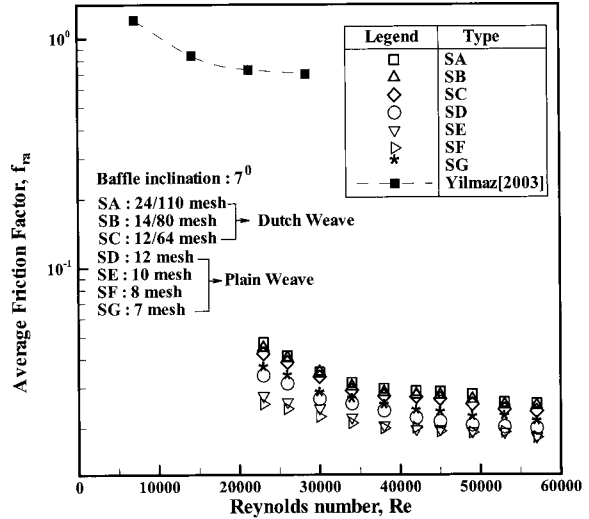


Fig. 6 Average friction factor for $a = 7^\circ$

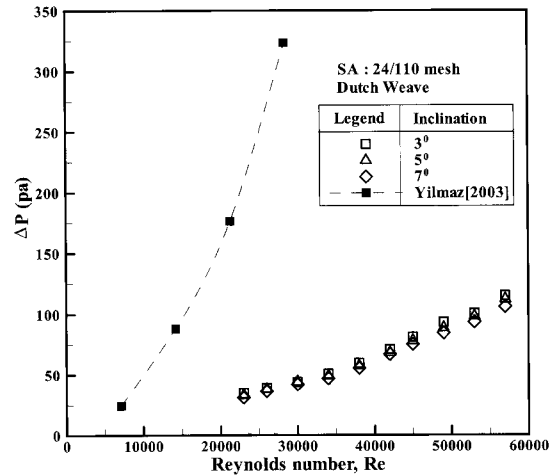


Fig. 7 Pressure drop for type SA

비교를 위해 Fig. 6에 사각 채널에서 구멍이 없는 배플인 경우에서 마찰계수의 영향에 대한 Yilmaz¹⁷⁾를 포함 하였다. Yilmaz의 연구는 배플을 본 연구와 같은 직사각 채널을 사용하였고 배플을 상부 벽면에 1개 설치한 경우에 대해 취급하였다. Yilmaz의 연구에서도 레이놀즈 수가 클수록 마찰계수가 컸고 Yilmaz의 결과는 본 연구의 결과보다 훨씬 큰 값을 보였다. 이는 Yilmaz의 연구는 구멍이 없는 배플 (solid baffle) 구조를 사용하였고 배플 경사각이 본

연구의 경우(7°)보다 훨씬 큰 30°이기 때문에 채널 내 배플이 유동 방향에 수직에 가깝게 위치하여 유동흐름의 방해로 크게 하기 때문이라 사료된다.

Fig. 7은 첩 직조(dutch weave)인 SA형 배플에서 경사 각도에 따른 압력강하를 보여준다. 압력강하는 배플 경사각이 증가 할수록 증가 하였다. 이는 와이어 스크린의 개구(opening)이 작은 첩 직조 배플에서는 배플 경사각이 클수록 채널 내 주 유동(main stream)에 대한 저항이 증가하기 때문이라 사료된다.

비교를 위하여 Yilmaz의 연구를 포함하였다. Yilmaz의 결과는 본 연구보다 훨씬 큰 압력 강하를 보였다. 이는 Fig. 6에서의 마찰계수에 대한 경향과 같이 설명할 수 있다. 레이놀즈 수가 증가할수록 모든 압력강하의 값이 크게 증가하였다. 이는 채널 내에서는 베르누이의 법칙에 따라 유속의 제곱과 압력이 서로 비례하기 때문이라 사료된다.

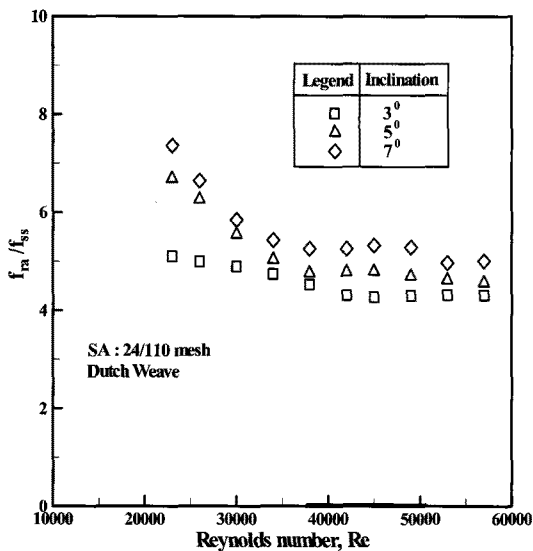


Fig. 8 Friction factor ratio for type SA

Fig. 8은 첩 직조(dutch weave)인 SA형에서 매끈한 원 관에 대한 값으로 무차원화 한 마찰계수 f_{ra}/f_{ss} 를 나타낸다. 높은 레이놀즈 수에서는 무차원 마찰계수의 값들은 레이놀즈 수에 따라 거의 일정하였으나 낮은 레이놀즈 수에서는 높은 경사각인 경우 레이놀즈 수에 따라 크게 감소 하였다. 이는 상대적으로 개구면적이 작은 첩 직조(dutch weave)에서는 배플 경사각이 높을 경우 배플과 채널 상부 벽과의 간격이 좁아져서 유동 저항이 크게 증가하기 때문이라 사료된다. 그리고 배플 경사각이 가장 작은 3°의 경우에는 모든 레이놀즈 수 범위에서 무차원 마찰계수 f_{ra}/f_{ss} 가 거의 일정하였다.

본 연구는 특수한 환경에서 만 주로 사용되는 와이어 스크린을 일반적인 시중의 열교환기 배플로 적용 가능성을 시험한 기초 연구이다. 연구 결과 마찰계수가 매우 적었기 때문에 높은 유동저항에 견딜 수 있는 구조로 고부하열원이 있는 벽면위에 단단히 고정시키고 스크린을 잘 선택할 경우 기존의 금속판 배플보다 우수한 성능을 얻을 것이라 판단된다.

5. 결 론

직 사각 채널에서 첩 직조(dutch weave)과 평 직조(plain weave)으로 제작된 스테인레스 제 와이어 스크린의 배플에 관한 유체 유동 저항에 관한 실험적 연구를 수행 하였다. 배플 스크린은 평 직조에는 4종류, 첩 직조에는 3종류의 7종류를 취급하였다. 배플은 채널 바닥 위에 설치하였다. 주요 실험의 파라미터는 배플 경사각이었다. 주요한 결론은 아래와 같다.

1. 채널 평균 마찰계수는 레이놀즈 수와 메쉬(mesh) 수에 따라 크게 좌우 되었다.
2. 평직(plain weave)와이어 스크린에서는 SG형 배플이 가장 마찰계수가 컸다. 이는 SG형 와이어 스크린이 와이어 직경이 가장 크기 때문이라 사료된다.
3. 첩 직조(dutch weave)에서는 높은 레이놀즈 수에서는 무 차원 마찰계수 f_{ra}/f_{ss} 의 값들은 레이놀즈 수에 따라 거의 일정하였으나 낮은 레이놀즈 수에서는 높은 경사각인 경우 레이놀즈 수에 따라 크게 감소하였다. 이는 상대적으로 개구면적이 작은 첩 직조에서는 배플 경사각이 높을 경우 배플과 채널 상부 벽과의 간격이 좁아져서 유동 저항이 크게 증가하기 때문이라 사료된다. 그리고 배플 경사각이 가장 작은 3°의 경우에는 모든 레이놀즈 수 범위에서 무차원 마찰계수 f_{ra}/f_{ss} 가 거의 일정하였다.

후 기

이 논문은 지방대학 혁신역량강화사업(NURI)에 의해 지원 되었음.

참고 문헌

1. Kays W. M and London A. L., 1994, Compact Heat Exchangers, McGraw-Hill.
2. Wu T. et al., 2005, "Measurement and Correlation

- of Hydraulic Resistance of Flow through Woven Metal Screens", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 3008~3017.
3. Kim T., 2003, "Fluid-flow and Heat-transfer in a Lattice-frame Material", Ph. D. thesis, Department of Engineering, University of Cambridge.
 4. Bin-Nun U. and Mantidakos. D., 2004, "Low Cost and High Performance Screen Laminate Regenerator Matrix", *Cryogenics*, Vol. 44, pp. 439~446.
 5. Kolb A., Winter, E. R. F., Viskanta R., 1999 "Experimental Studies on a Solar Collector with Metal Matrix Absorber", *Solar Energy*, Vol. 65, pp. 91~98.
 6. Tharur N. S., Saini J. S. and Solanki S. C., 2003, "Heat Transfer and Friction Factor Correlations for Packed Bed Solar Air Heater for a Low Porosity System", *Solar Energy*, Vol. 74, pp. 319~329.
 7. Ergun S., 1952, "Fluid Flow through Packed Columns", *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 48, pp. 89~94.
 8. Armour J. C. and Cannon, J. N., 1968, "Fluid Flow through Woven Screens", *AIChE J.*, Vol. 14, pp. 415~421.
 9. Sodre J. R., Parise J. A. R., 1997, "Friction Factor Determination for Flow through Finite Wire-mesh Woven-screen Matrices", *ASME J. Fluid Eng.*, Vol. 119, pp. 847~851.
 10. Richards P. J. and Robinson M., 1999, "Wind Loads on Porous Structure", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 83, pp. 455~465.
 11. Tian J. et al., 2004, "The Effects of Topology upon Fluid-flow and Heat Transfer within Cellular Copper Structures", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 3171~3186.
 12. Dutta P. and Dutta S., 1998, "Effect of Baffle Size, Perforation and Orientation on Internal Heat Transfer Enhancement", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 41, No. 19, pp. 3005~3013.
 13. Kays W. M., Crawford M. E. and Weigand B., 2005, *Convective Heat and Mass Transfer*, 4th ed., McGraw-Hill, New York.
 14. Kline S. J. and McClintock F. A., 1953, "Describing Uncertainty in Single Sample Experiments", *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
 15. Ko K. H. and Anand N. K., 2003, "Use of Porous Baffles to Enhance Heat Transfer in a Rectangular Channel", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 4191~4199.
 16. Hsieh W. H. et al., 2004, "Experimental Investigation of Heat Transfer Characteristics of Aluminium Foam Heat Sinks", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 5149~5157.
 17. Yilmaz M., 2003, "The Effect of Inlet Flow Baffles on Heat Transfer", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, No. 8, pp. 1169~1178.