



립 형상에 따른 평판형 태양열 집열기의 열전달 성능 향상에 관한 연구

Study on the Heat Transfer Enhancement in a Flat Plate Solar Collector with Various Ribs

손영석[†]
 Young-Seok Son[†]

(Received 18 December 2017, Revision received 05 March 2018, Accepted 05 March 2018)

Abstract: In this paper, heat transfer enhancement in a flat plate solar collector with various ribs were studied experimentally. Heat transfer enhancement devices such as ribs were inserted in a horizontal duct which simulated a flat plate solar collector. Heat transfer would be increased by the inserted ribs due to the secondary flow and the increased heat transfer area. Inserted heat transfer enhancement device models were square rib, chamfered rib, chamfered rib and groove, and chamfered rib and dimple. In the experiment, a constant heat flux was applied on the upper wall of the duct, and Reynolds number was in the range of 2300 to 20000 corresponding to turbulent flow regime. The heat transfer enhancement devices increased pressure drop as well as heat transfer. Heat transfer enhancement was the highest in chamfered rib and dimple model, however, pressure drop was the lowest in chamfered rib and groove model. Considering heat transfer enhancement simultaneously with low pressure drop, chamfered rib and dimple model was the best for wide range of Reynolds numbers.

Key Words : Heat Transfer Enhancement, Flat Plate Solar Collector, Pressure Drop, Performance Factor

1. 서 론

태양열은 무공해, 무한량, 무가격의 청정에너지 원으로서 기존의 화석에너지에 비해 지역적 편중이 적은 분산형 에너지원이다. 또한 지구온난화의 원인인 온실가스 배출을 저감할 수 있는 재생 가능 에너지원이며, 안정적인 열원을 확보할 수가 있고 석탄 및 천연가스등의 화석연료 고갈에 대한 대체 에너지로 주목을 받아왔다.¹⁾

태양열시스템의 구성은 태양으로부터 에너지를 모아서 열로 변환하는 집열부, 모아진 열을 저장했다가 필요시 사용하기 위한 축열부, 축열부에 저장된 태양열이나 직접 온수, 냉난방, 발전 등을 위해 효과적으로 공급하는 이용부, 태양열을 효과적으로 집열, 축열, 공급하기 위한 제어장치로 구성된다. 그 중에서도 에너지의 밀도가 낮고 생산이 간헐적인 태양에너지를 효율적으로 이용하기 위해서는 집열기의 역할이 매우 중요하다.

[†] 손영석(교신저자) : 동의대학교 기계공학과
 E-mail : ysson@deu.ac.kr, Tel : 051-890-1648

[†] Young-Seok Son(corresponding author) : Department of Mechanical Engineering, Dongeui University.
 E-mail : ysson@deu.ac.kr, Tel : 051-890-1648

평판형 태양열 집열기의 성능을 향상시키기 위한 방법으로 열전달 향상 장치의 삽입, 표면 거칠기의 변화 등 다양한 방법들이 알려져 있다. 그 중에서 열전달 강화 장치로서 립(rib)의 삽입은 작동유체의 유동을 방해하여 유동교란을 일으켜 열전달 성능을 잘 향상시킨다고 알려져 있다.²⁾

립의 경우에는 기존의 연구에서 많은 연구와 실험이 이루어졌다. Patil 등³⁾은 집열기 평판에 V 모양의 부러진 립의 형상을 도입해서 Reynolds 수 3000~17000 범위에서 겹의 상대적인 위치와 립의 상대적인 정렬 위치, 크기에 대해서 연구하여 최적의 형상을 찾아내었다. Promvong⁴⁾은 Reynolds 수 5000~25000에서 각도가 60°인 V 모양의 배플(baffle)을 삽입하여 채널 내부에서 열전달과 압력강하를 연구하였다. Singh 등⁵⁾은 Reynolds 수 3000~15000 범위에서 단면적이 원형인 V 모양의 립을 이용해서 열전달과 압력강하에 대해서 연구하였고, Sivashanmugam과 Suresh⁶⁾는 튜브에 끼인 탭을 삽입하고 끼인 탭의 피치를 변화하면서 열전달 특성과 압력강하에 대하여 연구하였다. Tonui와 Tripanagnostopoulos⁷⁾는 평판형 태양광발전·열복합 집열기의 형태에 핀을 추가하여 열전달 향상에 대하여 연구하였고, Lanjewar 등⁸⁾은 W립을 삽입하여 립이 이루는 각도를 변화시키고 Reynolds 수를 2300~14000의 범위에서 열전달과 마찰인자에 관하여 연구하였다. 국내 연구자들에 의해서도 립의 배열이 열전달에 미치는 효과에 대해 많은 연구가 수행되어 오고 있다.^{9,10)}

본 연구에서는 평판형 태양열 집열기에서 열전달 향상 장치인 다양한 립 형상에 따른 열전달 성능 향상에 관한 실험적 연구를 수행하여, 전체적으로 태양열시스템의 성능 향상을 도모하고자 한다. 본 연구의 결과는 실제 상용적으로 이용되고 있는 평판형 태양열 집열기의 열전달 성능 향상에 직접적으로 활용되어 전체적으로 태양열시스템의 성능 향상에 기여할 수 있는 요소기술이 될 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험에 사용된 실험장치 및 계측장비의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 직류전원공급기를 사용하여 히터에 일정한 열유속을 공급하고, 인버터를 사용하여 팬의 분당회전수를 조절함으로써 채널 내의 공기유속을 실험조건에 맞는 속도로 일정하게 유지시켰다. 열전대, 차압계, 열선유속계를 데이터획득장치(Agilent 34790A)에 연결하여 시험부의 온도, 압력, 유속 등의 데이터를 획득하고, GPIB 카드를 이용하여 데이터획득장치로부터 컴퓨터로 데이터를 전송하였다. 또한 LABVIEW 2010¹¹⁾ 소프트웨어를 이용하여 데이터획득장치를 원격 조정하였고 컴퓨터에 자료를 저장, 분석하였다.

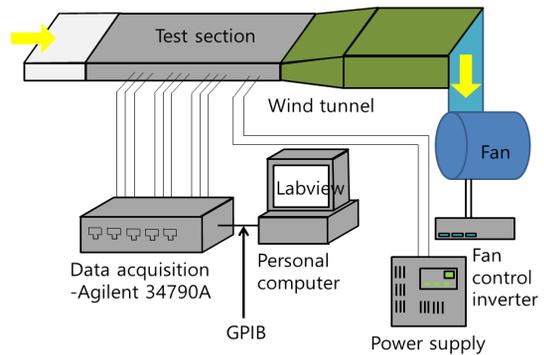


Fig. 1 Schematic representation of the experimental apparatus

실험장치의 개략도 및 시험부의 단면을 각각 Fig. 2 및 Fig. 3에 나타내었다. 평판형 태양열 집열기를 모사하기 위하여 시험부의 윗면에 박막형 히터를 설치하여 윗면으로부터 시험부로 일정한 열유속이 공급되도록 하였다. 주위공기는 출구측에 설치된 흡입식 팬의 작동으로 인해 덕트로 유입되고, 입구영역을 거쳐 완전발달된 유동이 되어 시험부를 통과하게 된다. 시험부 전후의 압력손실을 측정하기 위해 시험부 입·출구에 압력 탭계를 통과하여 실험장치 밖으로 유출된다. 시험부의 외부 벽면에 단열재를 덮었으며, 실험장치 외벽에 단열재를 한 번 더 덮어 열손실을 최소화하였다.

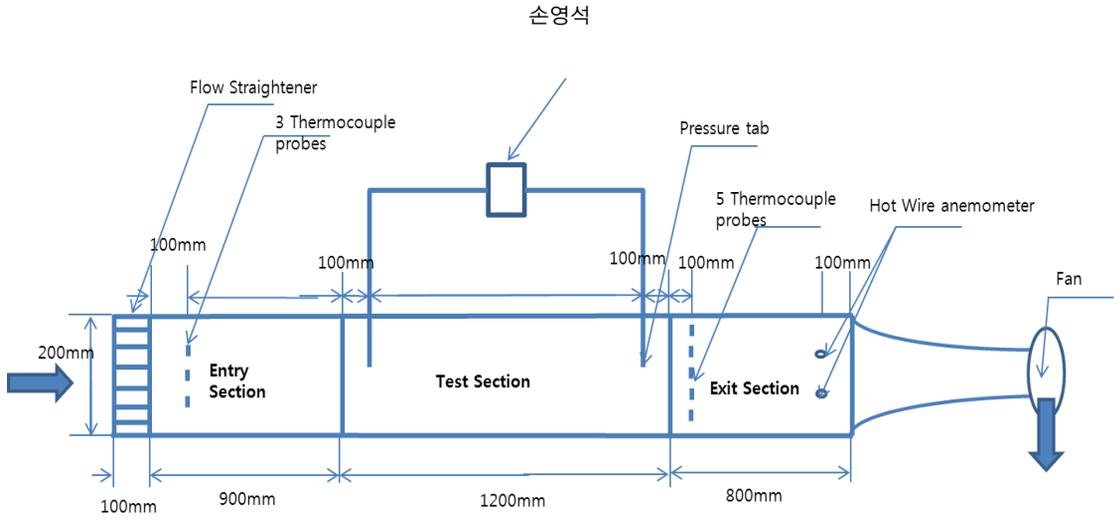


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

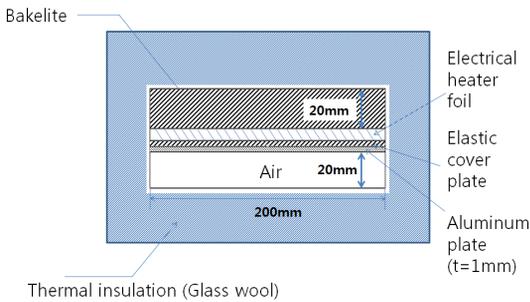
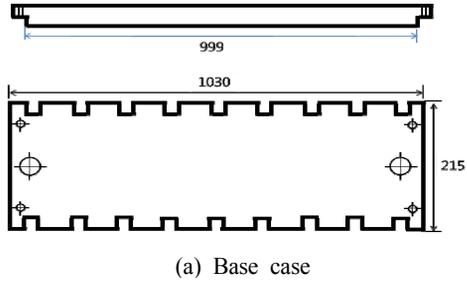


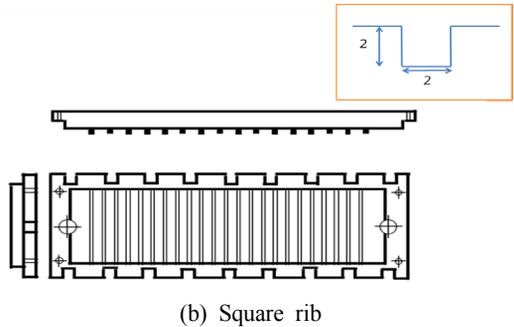
Fig. 3 Cross view of the test section

유동에 수직한 시험부 단면적은 200×20 mm(수력 직경 36.4 mm)로 폭과 높이의 비는 10이다. 시험부의 길이는 1000 mm, 덕트 전체 길이는 3000 mm이다. 시험부 앞쪽에는 1000 mm(수력 직경의 약 27.5배)인 덕트를 설치하여, 시험부로 들어오는 유동이 완전 발달된 유동이 되도록 하였다.

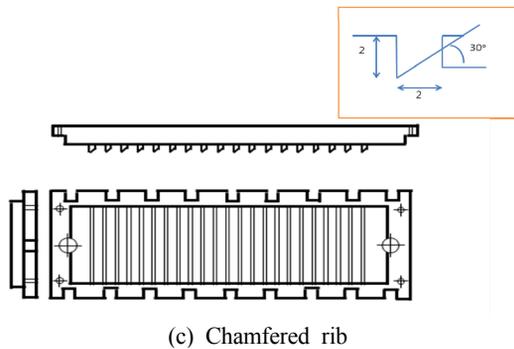
실험에 사용된 열전달 향상 장치의 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 총 4종의 립 형상을 제작하였으며, 다양한 형상에 따른 열전달 및 압력강하 특성을 비교하였다. 립이 부착된 판의 크기는 1030×215 mm이고, 재질은 알루미늄으로 제작하였으며 시험부의 상부 히터 아래에 설치하였다. 립이 부착된 판의 두께는 7 mm이며, 히터와 립 사이의 공간은 접촉저항을 최소화하기 위하여 thermal sheet를 이용하였다.



(a) Base case



(b) Square rib



(c) Chamfered rib

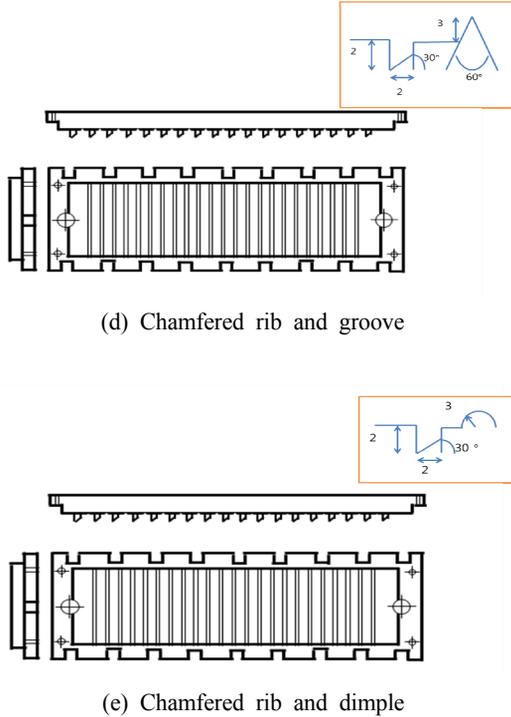


Fig. 4 Heat transfer enhancement devices

Table 1은 실험에 사용된 립의 개수와 피치를 표로 정리하였으며, Table 2는 각각의 형상에 대하여 피치와 립의 높이의 비(p/e), 립의 높이(e)와 폭(b), 립의 높이와 수력직경의 비(e/D_h), 덕트의 폭과 높이의 비(W/H), Reynolds 수의 범위 등 각종 변수들을 나타내었다.

2.2 실험방법

1000 mm×200 mm인 히터 벽면의 온도분포를 측정하기 위해 가열판 부분 각 열에 대각선으로 50 mm와 100 mm 간격으로 3개씩 삽입하여 총 12개의 열전대로 히터 벽면온도를 측정하였다. 실험을 수행하기 전에 히터에 일정한 전압을 공급하였을 때 상부 히터 벽면의 온도 균일성을 확인하기 위한 예비실험을 수행하였다. 벽면의 각 부분에서 측정된 최대 온도차는 2℃ 이내의 범위로 나타났다.

Fig. 2에서 보는 것과 같이 덕트 내를 통과하는 공기의 유속을 측정하기 위해 열선유속계를 출구

Table 1 Nominal geometries

Type	Pitch (mm)	Number of ribs (EA)
(a) Base case	-	-
(b) Square rib	20	48
(c) Chamfered rib	20	48
(d) Chamfered rib and groove	20	rib: 48, groove: 48
(e) Chamfered rib and dimple	20	rib: 48, dimple: 48

Table 2 Values of parameters

Parameters	Values
Relative roughness pitch(p/e)	10
Rib height(e)	2 mm
Rib width(b)	2 mm
Relative roughness height(e/D_h)	0.0550
Duct aspect ratio(W/H)	10
Reynolds number	2300-20000

부분에 설치하였다. 입구부와 출구부의 온도를 측정하기 위해서 입구부에는 열전대를 3개, 출구부에는 열전대를 5개 삽입하였다. 이 온도로부터 입구부와 출구부의 유체의 혼합평균온도를 결정하였다. 온도계측에 사용한 열전대는 K-형 열전대이다. 측정된 유체의 입·출구 온도차와 유량으로부터 유체에 가해진 열전달량을 계산하여, 이를 측정된 히터에 가해진 전력량과 다음과 같이 비교 검증하였다. 채널을 지나는 유체로의 열전달량은 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$\dot{Q} = \dot{m} C_{p,f} (\overline{T_{f,o}} - \overline{T_{f,i}}) \quad (1)$$

여기서, $\overline{T_{f,i}}$ 와 $\overline{T_{f,o}}$ 는 각각 유체의 입구와 출구의 평균온도이다. 열이 공급된 히터에 가해진 전체 투입 열량은 식 (2)로 구할 수 있다.

$$P = V^2/R \quad (2)$$

여기서, R 은 전열판 전체의 저항이고, V 는 측

정된 전압 값이다. 직류전원공급기에 의해서 히터에 가해진 열량은 이론적으로 식 (1)과 동일해야 한다. 식 (1)의 유체의 입출구 온도차를 이용하여 계산한 열전달량은 식 (2)로 구한 히터에 공급된 열전달량에 비해 최대 8.1% 낮게 나타났으며, 이로부터 단일재를 통하여 손실된 열량을 평균 8%로 판단하였다.

실험의 진행과정은 다음과 같다. 1) 모든 실험 장치의 전원을 연결하고, 2) 시험부의 히터에 실험조건에 맞는 전압을 공급하고, 3) 팬의 회전속도를 원하는 유속으로 맞추는 다음, 4) 온도가 정상상태에 도달하는 과정을 확인하기 위해 시간변화에 따른 온도변화를 관찰하여 정상상태에 도달하면, 5) 입구온도, 출구온도, 평판온도, 유속, 압력강하 등을 측정한다. 본 실험에서는 온도변화가 0.1°C/30초 이내일 때를 정상상태에 도달하는 기준으로 정하였다. 즉, 실험장치 가동 후 30초 간격으로 측정된 10회의 데이터를 비교하여 온도변화가 0.1°C 이내이면 정상상태에 도달한 것으로 판단하고, 마지막 10회의 측정 데이터를 계산에 사용하였다.

본 실험에서의 실험오차¹²⁾를 확인해 보면, 전력계의 오차는 1%, 열전대의 고정점오차는 1.1°C, 반복측정에 의한 랜덤오차는 최대 2°C, 데이터획득장치의 온도 변환오차는 0.05°C이다. 전력계의 오차, 열전대의 오차, 데이터획득장치의 오차를 고려하여 열전달계수의 실험오차를 구하면 벽면온도와 유체온도의 차이가 22°C일 경우 5.9%이고, 57°C일 경우 2.4%로 판단할 수 있다. 속도의 실험오차는 1 m/s일 때 3.0%이고 11 m/s일 때도 3.0%이며, 압력의 실험오차는 5.79 Pa일 때 13.3%이고 94.7 Pa일 때 0.9%이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험결과의 타당성

실험결과의 타당성을 검토하기 위해 본 연구에서는 열전달 항상 장치가 삽입되지 않은 매끈한 덕트에서의 실험결과를 기존 연구자들이 실험을 통해 얻은 상관식¹³⁾과 비교하였다.

Fig. 5는 본 연구의 매끈한 덕트에서의 실험결과 값을 Dittus-Boelter, Sieder-Tate, Gnielinski가 제시한 Nusselt 수 상관식을 이용하여 계산한 값과 비교하여 나타내었다. 형상 및 경계조건, 물성값 등에 의한 오차를 고려하면 실험결과는 타당하다고 판단된다.

Fig. 6은 매끈한 덕트에서 수행한 실험으로 측정된 압력강하로부터 구한 마찰인자 값을 Petukhov가 제시한 마찰인자 상관식, Moody선도에 나타낸 매끈한 표면조건에 대한 마찰인자 상관식과 비교하여 나타내었다. 실험결과 마찰인자가 상관식보다 높게 나오는 이유는 상관식은 매끈한 표면에 대한 마찰인자이나 본 실험의 표면은 매끈한 표면이 아니고 어느 정도 표면 거칠기가 존재하기 때문에 더 높게 나타난다. 그러므로 마찰인자에 대한 실험결과는 타당하다고 판단된다.

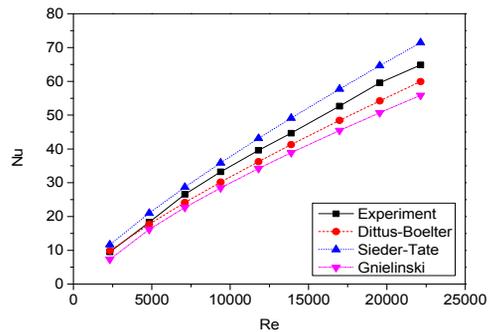


Fig. 5 Comparison of experimental Nusselt number with correlations

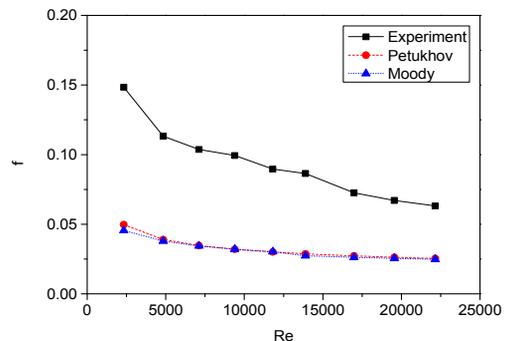


Fig. 6 Comparison of experimental friction factor with correlations

3.2 열전달

덕트 내에 열전달 향상 장치를 삽입하게 되면 열전달 면적이 늘어나고 작동유체의 유동을 교란시키므로 열전달 성능이 증가될 것이라고 충분히 예상이 가능하다. 각각 다른 형상의 립이 대류 열전달에 미치는 영향을 평가하기 위해서 평균 Nusselt 수를 계산하였다. 덕트 벽면에서의 평균 열전달계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{h} = q_w / (\overline{T_w} - \overline{T_f}) \quad (3)$$

여기서, q_w 는 벽면에 공급되는 단위면적당 열전달률이며, $\overline{T_w}$ 는 벽면 평균온도, $\overline{T_f}$ 는 입구 및 출구 유체의 평균온도를 나타낸다. 평균 열전달계수로부터 평균 Nusselt 수는 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{Nu}_{D_h} = \frac{\bar{h} D_h}{k_f} \quad (4)$$

여기서, D_h 는 수력직경이고, k_f 는 유체의 열전도율이다.

Fig. 7은 열전달 향상 장치가 삽입되지 않은 매끈한 덕트인 Base case와 비교하여 Square rib, Chamfered rib, Chamfered rib and groove, Chamfered rib and dimple 형상의 열전달 향상 장치가 삽입된 경우에 대해 Reynolds 수에 따른

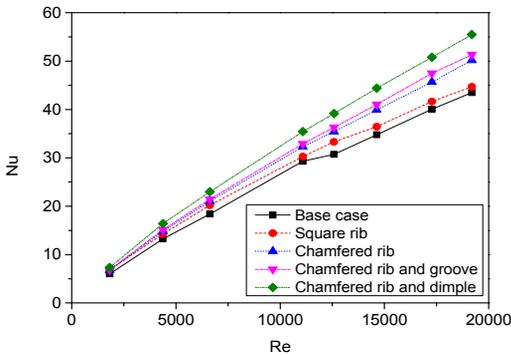


Fig. 7 Comparison of Nusselt numbers

Nusselt 수를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 Reynolds 수가 증가할수록 Nusselt 수는 증가하고, Base case와 비교하여 평균 열전달 향상 효과는 Chamfered rib and dimple 23%, Chamfered rib and groove 14%, Chamfered rib 12%, Square rib 6%로 나타났다. Chamfered rib and dimple 모델은 다른 모델에 비해 표면적이 넓고 유동교란 때문에 난류를 촉진시킬 뿐만 아니라 자유전단층 (free shear layer)을 립 가까이 재부착시키기 때문에 열전달이 가장 좋게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 8은 열전달 향상 장치가 삽입된 경우의 Nusselt 수(Nu)와 아무것도 삽입되지 않은 매끈한 덕트의 Nusselt 수(Nu_0)와의 비를 Reynolds 수에 따라 나타낸 것이다. 즉 열전달 향상 장치가 삽입됨으로써 열전달 성능이 얼마나 증가하는지를 나타내고 있다. 각 열전달 향상 장치들의 열전달 증가 정도는 Reynolds 수에 따라 다소 다르며, 앞서 언급한대로 Chamfered rib and dimple 모델이 가장 열전달 성능 향상 효과가 크게 나타났다.

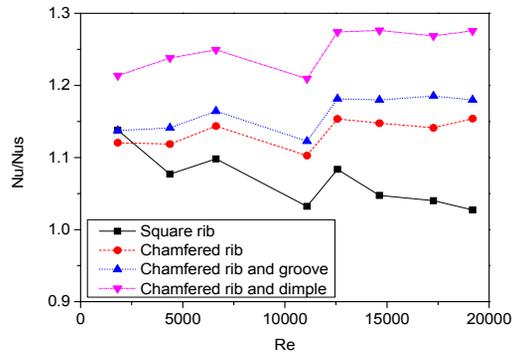


Fig. 8 Nusselt number ratios

3.3 압력강하

덕트 내에 열전달 향상 장치를 삽입할 경우 열전달은 증가시킬 수 있지만, 삽입된 립은 유동을 방해함으로써 압력강하가 커지게 된다. 압력강하가 증가하면 유동에 필요한 동력이 증가하게 되므로 열전달 증가에 따른 이득은 감소하게 된다. 그러므로 열전달 향상을 설계할 때 압력손실은 중요한 항목이 된다. 압력강하를 구하기 위해 마찰인자(f)를 다음 식과 같이 정의하였다.

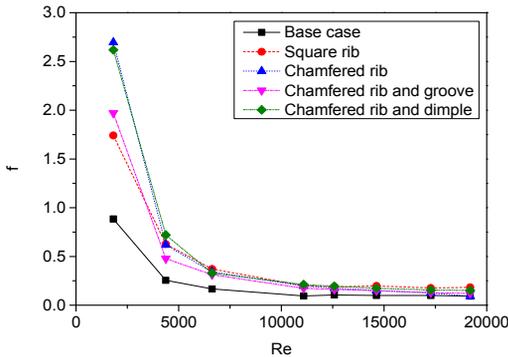


Fig. 9 Comparison of friction factors

$$f = \frac{\Delta P}{(L/D_h)\rho V_m^2/2} \quad (5)$$

Fig. 9는 열전달 향상 장치가 삽입되지 않은 때 끈한 덕트인 Base case와 비교하여 Square rib, Chamfered rib, Chamfered rib and groove, Chamfered rib and dimple 형상의 열전달 향상 장치가 삽입된 경우에 대해 Reynolds 수에 따른 마찰인자를 보여준다. Reynolds 수가 증가할수록 마찰인자는 감소하는 경향을 보였으며, 실험에서는 모든 형상에서 매끈한 덕트일 때보다 마찰인자가 높게 나왔다. 그림에서 보듯이 Chamfered rib and groove 모델이 마찰인자가 가장 낮게 나왔으나, Reynolds 수 5000 이상에서는 열전달 향상 장치의 형상에 관계없이 마찰인자는 비슷하게 나타났다.

3.4 성능계수

앞에서 보았듯이 열전달 향상장치를 삽입하면 열전달은 향상이 되지만 압력손실도 함께 증가하는 것을 보았다. 압력손실이 증가하면 유동에 필요한 동력이 증가하게 되므로 실질적으로 사용하기에는 부적절하다. Webb과 Gee¹⁴⁾는 일정한 송풍력에서 압력손실에 대한 열전달 비를 나타내는 성능계수(Performance factor; PF)를 다음과 같이 제시하였다.

$$PF = \frac{Nu/Nu_s}{(f/f_s)^{1/3}} \quad (6)$$

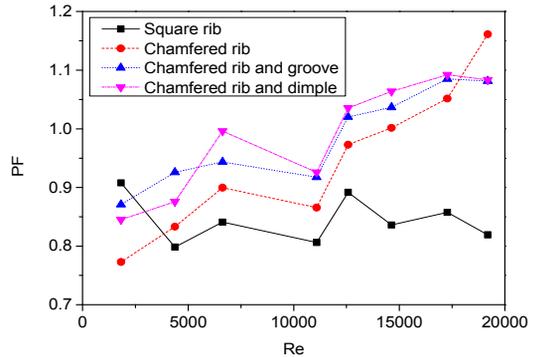


Fig. 10 Comparison of performance factors

열전달 성능이 향상하더라도 압력손실이 증가하면 그만큼 동력이 많이 소요되므로, 압력손실에 대한 열전달 비인 성능계수를 계산하여 이 값이 얼마나 증가하였는가를 확인하여야 한다.

Fig. 10은 각 열전달 향상 장치에 대한 성능계수를 Reynolds 수에 따라 나타낸 것이다. 성능계수는 전반적으로 Chamfered rib and dimple 모델이 가장 높게 나타났으며, 다음으로 Chamfered rib and groove, Chamfered rib, Square rib 순으로 나타났다. 그러므로 열전달 성능 향상과 압력손실 모두를 고려하였을 때, 본 실험에서 고려한 4가지 열전달 향상 장치 중에 Chamfered rib and dimple 모델이 가장 우수한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 평판형 태양열 집열기에 여러 가지 형상의 열전달 향상 장치를 삽입하여 Reynolds 수에 따라서 열전달 및 압력강하에 대한 특성을 실험을 통하여 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 덕트에 열전달 향상 장치를 삽입하면 열전달 면적의 증가와 2차 유동으로 인하여 열전달이 증가하며, 유체의 유속이 증가할수록 열전달이 향상되며 동시에 압력강하도 증가하였다.

2) 열전달 성능 향상과 압력손실 모두를 고려하였을 때, 본 실험에서 고려한 4가지 열전달 향상 장치 중에 Chamfered rib and dimple 모델이 가장

우수한 것으로 나타났다.

3) 열전달 향상 장치를 설계를 할 때 열전달이 가장 높거나 압력강하가 가장 낮은 모델을 선택하는 것이 아니라, 성능계수를 파악하여 이득과 손실을 고려하여 가장 효율적인 형상을 선택해야 한다.

후 기

이 논문은 2017학년도 동의대학교 연구년 지원에 의하여 연구되었음.

References

1. R. Manglik, A. Benjan and A. D. Kraus, 2003, Heat Transfer Handbook, John Wiley & Sons Inc.
2. V. S. Hans, R. P. Saini and J. S. Saini, 2009, "Performance of Artificially Roughened Solar Air Heaters - A Review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pp. 1854-1869.
3. A. K. Patil, J. S. Saini and K. Kumar, 2012, "Heat Transfer and Friction Characteristics of Solar Air Heater Duct Roughened by Broken V-Shape Ribs Combined with Staggered Rib Piece", Journal of Renewable and Sustainable Energy, Vol. 4, pp. 0131151-01311517.
4. P. Promvonge, 2010, "Heat Transfer and Pressure Drop in a Channel with Multiple 60° V-Baffles", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 37, pp. 835-840.
5. S. Singh, S. Chander and J. S. Saini, 2012, "Investigations on Thermo-Hydraulic Performance due to Flow-Attack-Angle in V-Down Rib with Gap in a Rectangular Duct of Solar Air Heater", Applied Energy, Vol. 97, pp. 907-912.
6. P. Sivashanmugam and S. Suresh, 2006, "Experimental Studies on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of Laminar Flow through a Circular Tube Fitted with Helical Screw-Tape Inserts", Applied Thermal Engineering, Vol. 26, pp. 1990-1997.
7. J. K. Tonui and Y. Tripanagnostopoulos, 2008, "Performance Improvement of PV/T Solar Collectors with Natural Air Flow Operation", Solar Energy, Vol. 82, pp. 1-12.
8. A. Lanjewar, J. L. Bhagoria and R. M. Sarviya, 2011, "Experimental Study of Augmented Heat Transfer and Friction in Solar Air Heater with Different Orientations of W-Rib Roughness", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 35, pp. 986-995.
9. M. S. Lee, G. J. Lee, S. M. Kim, S. C. min, J. M. Bae, J. S. Hwang, C. O. Park, D. C. Kim, J. H. Jung and S. W. Ahn, 2017, "Effect of Rib Arrangement on Heat Transfer in the Divergent Channel", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 21, No. 5, pp. 35-40.
10. M. S. Lee, B. S. Kim and S. W. Ahn, 2016, "Effect of Rib Angles on Heat Transfer in a Square Convergent Channel with Ribs on the Wall", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 69-74.
11. LABVIEW, 2010, LABVIEW 2010 Manual.
12. R. J. Moffat, 1988, "Describing the Uncertainties in Experimental Results", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 1, Issue 1, pp. 3-17.
13. F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman and A. S. Lavine, 2013, Principles of Heat and Mass Transfer, 7th ed., John Wiley & Sons, Inc.
14. R. L. Webb and D. L. Gee, 1980, "Forced Convection Heat Transfer in Helically Rib-Roughened Tubes", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 23, pp. 1127-1136.