

Prandtl 수에 따른 오프셋 스트립핀에서의 열 및 유동 분석

주 윤 식, 김 민 수, 이 관 수[†]

한양대학교 기계공학과

Thermo-Flow Analysis of Offset-strip fins according to Prandtl Number

Youn-Sik Joo, Min-Soo Kim, Kwan-Soo Lee[†]

Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

ABSTRACT: This paper numerically investigates thermo-flow characteristics of offset strip fins to obtain a correlation between heat transfer and pressure drop. The flow was divided into three regimes, i.e. laminar, transition and turbulent. The predicted j and f values from the SST $k-\omega$ turbulence model agreed with previous correlations with the error less than 20% in transition and turbulent regimes. Heat transfer and pressure drop were predicted by varying Prandtl number from 0.5 to 40. The Prandtl number showed little effects on pressure drop but had great effect on the heat transfer characteristics. An overall correlation to predict j was suggested by incorporating the effect of Pr and a new j correlation was suggested for each Pr.

Key words: Offset-strip fins(오프셋 스트립 핀), Correlation(상관식), j factor(j 인자), f factor(f 인자)

기 호 설 명	
C_p	: 정압 비열 [J/kg·K]
G_k	: 난류 운동에너지 생성항
k	: 열전도 계수 [W/m·K]
k	: 난류 운동에너지 [m^2/s^2]
D_h	: 수력 지름 [m]
Re_b^*	: 임계 Reynolds 수

ν : 동점성 계수 [m^2/s]

하첨자

Pr : Prandtl 수

1. 서론

한정된 공간에 열교환기를 설치하기 위하여 열교환기는 소형화되고 있으며 더 많은 열전달량을 얻기 위하여 전열 촉진 기구를 사용하게 된다. 특히 오프셋 스트립 핀은 기하학적 형상에 의해 열전달 면적을 늘릴 뿐만 아니라 각 열마다 열경계층을 새로 생성하여 열전달량을 증가시키기 때문에 plate-fin 열교환기에서 널리 사용되고 있다.

그리스 문자

ε : 난류운동 에너지 소산율 [m^2/s^3]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-2220-0426; fax: +82-2-2295-9021

E-mail address: klseehy@hanyang.ac.kr

웁셋 스트립 핀에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다. Kays & London⁽¹⁾ 이 실험을 통해 상관식을 제안하였고, Manson⁽²⁾은 이외의 다른 형상에 대한 실험을 수행하였다. Weiting⁽³⁾은 22개의 형상에 대해 먹승법을 이용한 상관식을 제안하였다. 또한 Joshi & Webb⁽⁴⁾은 층류와 난류에서의 상관식을 각각 제안하였으나, 천이 영역에서는 이를 고려하기 어렵다. Mochizuki⁽⁵⁾는 Weiting⁽³⁾의 상관식을 수정하여 더 정확한 상관식을 도출하였다. Tinaut et al.⁽⁶⁾은 물과 PAO를 이용하여 웁셋 스트립 핀이 설치된 열교환기에서 실험을 수행하였다. Manglik & Bergles⁽⁷⁾는 위의 실험들의 데이터를 이용하여 층류와 난류에 모두 적용 가능한 상관식을 제안하였다. 위와 같이 웁셋 스트립 핀에 대한 연구는 많이 진행되어 왔다. 그러나 기존 연구 대부분이 유체가 공기에 한정되어 있으며, 또한 해석 형상도 많지 않아 그 유용도가 떨어진다.

따라서 본 연구에서는 수치 해석을 통해 압력 강하 및 열전달 특성을 파악하고 이를 기존 상관식의 값들과 비교하였다. 또한 유체를 기존의 공기뿐만 아니라, 물, 디젤(diesel) 등 다른 유체에 적용하여 그 적용 가능성을 검토하고, 이를 이용해 유용도 높은 상관식을 제안하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

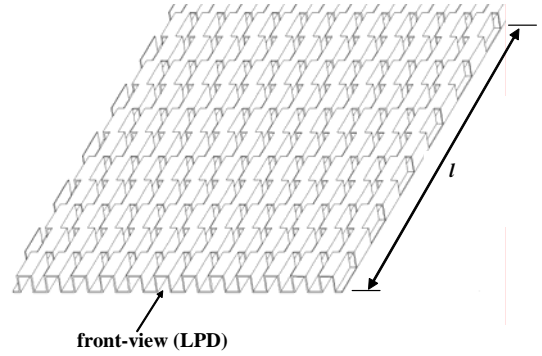
2.1 해석 대상

본 연구에서의 해석 대상 웁셋핀은 Fig. 1(a)와 같으며, Fig. 1의 (b)는 정면에서의 형상이다. 웁셋 스트립 핀의 형상은 Fig. 1(a)와 (b)에 나타난 핀 간 거리(fin spacing, s), 핀 높이(fin height, h), 핀 두께(fin thickness, t) 및 핀 길이(fin length, l)로 나타내며, 핀의 무차원 설계 인자는 $\alpha = s/h$, $\delta = t/l$, $\gamma = t/s$ 로 정의하였다.

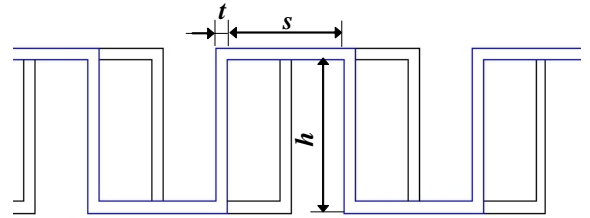
2.2 지배 방정식

본 연구에서 해석모델 내의 유동 특성을 수치적으로 조사하기 위하여 도입한 가정은 다음과 같다.

- (1) 유체의 흐름은 3차원 정상상태, 비압축성 난류 유동이다.



(a) Overall geometry of offset strip fin



(b) front-view

Fig. 1 Schematic diagram of the offset strip fin.

- (2) 작동 유체는 단상이며 물성치는 일정하다.
- (3) 자연대류와 복사 열전달은 그 영향이 미미하기 때문에 무시한다.

해석하고자 하는 핀 내 유동은 유속에 따라 층류, 천이 및 난류 유동이다. 천이와 난류 유동에서는 비정상상태로 해석해야 하나, 이는 과도한 계산 시간을 요구하며 본 논문의 목적이 웁셋 스트립 핀의 성능 해석을 통한 상관식 결정에 있으므로 정상상태로 해석하였다. 난류 및 천이 영역에서의 유동해석시 SST $k-\omega$ 모델을 사용하였으며 지배방정식은 다음과 같이 연속방정식, 운동량 방정식, 난류운동량 에너지 방정식, 비소산율 방정식 및 에너지 방정식이다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \mu_t \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \beta^* k \omega \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i \omega) = \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\alpha}{\nu_t} G_k - \rho \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$\rho C_p \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j T) = k_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} + (\tau_{ij})_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

2.3 수치 해석 방법

수치 해석 시 압력과 속도를 결합하여 유동장을 풀기 위해 SIMPLE 알고리즘을 선택하였으며, 각 지배 방정식의 대류항(convective term)과 에너지 방정식은 그 정확도를 높이기 위해 2계 상류도식(2nd order upwind difference scheme)을 이용하여 이산화하였다. 반복 계산 시 종속 변수들의 수렴 정도는 종속 변수의 상대 오차의 최대값이 연속 방정식, 운동량 방정식, 난류 방정식 및 에너지 방정식의 경우 10^{-6} 이하일 때 수렴된 것으로 판정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 난류모델 검증

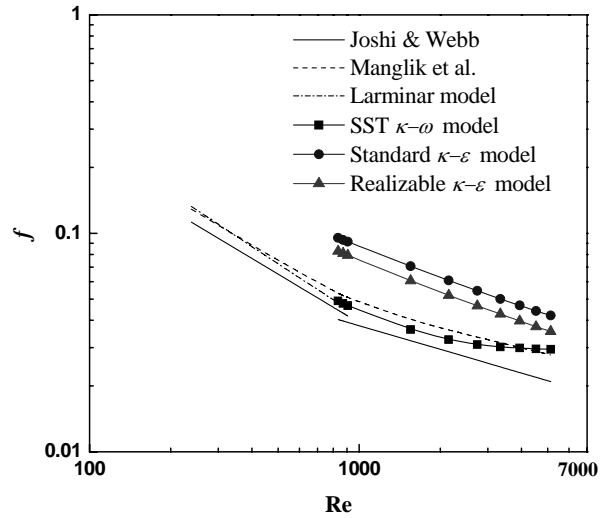
본 논문의 연구 결과를 기존 읍셋 스트립 핀 연구의 j 및 f 인자와 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 핀의 형상은 D_h 가 1.435 mm, α , β , γ 가 각각 0.5, 0.033, 0.083이며, 작동유체는 공기 ($Pr = 0.72$)를 사용하였다. 기존 논문의 경우 수력 지름의 정의가 조금씩 다르므로, 본 연구에서는 Joshi & Webb⁽⁴⁾의 수력 지름을 사용하였으며, Fig. 2의 결과는 다음의 수력 지름을 기준으로 각 상관식을 보정하여 나타내었다.

$$D_h = \frac{2(s-t)h}{(s+h)+ht/l} \quad (6)$$

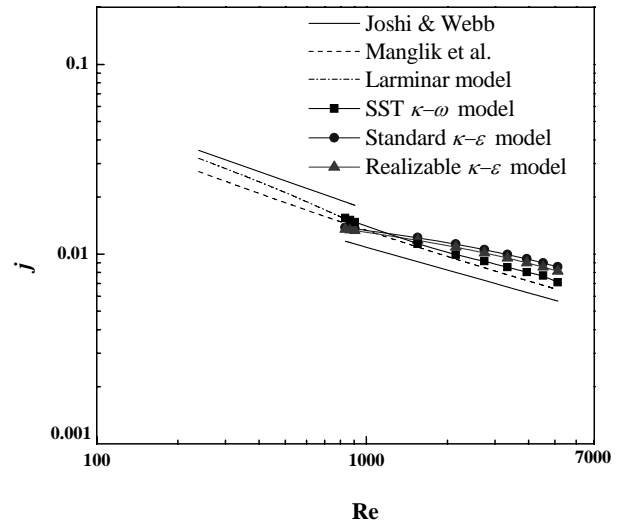
본 연구에서는 천이 및 난류영역에서 standard $k-\epsilon$ turbulence model, realizable $k-\epsilon$ turbulence model, SST $k-\omega$ turbulence model을 이용하여 계산하였으며, 임계 Re 수는 다음의 Joshi & Webb⁽⁴⁾의 식을 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$Re_b^* = 257(1/s)^{1.23}(t/l)^{0.58} \quad (7)$$

$$Re_b^* = \frac{Re_{D_h}^* b}{D_h} \quad (8)$$



(a) f -factor



(b) j -factor

Fig. 2 f & j factor for $D_h=1.435$, $\alpha=0.5$, $\delta=0.033$, $\gamma=0.083$ using air($Pr=0.72$).

$$b = t + \frac{1.328l}{(Re_t)^{0.5}} \quad (9)$$

Fig. 2를 보면 f 인자의 값은 층류영역에서는 두 상관식과 잘 일치하며, 난류영역에서는 SST 모델만이 Manglik & Bergles⁽⁷⁾의 상관식과 잘 일치하였다. 그러나 본 연구에서 사용한 다른 두 난류 모델은 압력 강하값을 과대해석하였다. j 인자의 값도 f 값과 비슷하게 층류영역에서는 기존 상관식과 잘 일치 하고, 난류 영역에서는 Manglik & Bergles⁽⁷⁾의 상관식과 잘 일치하였다.

Table 1 Geometric parameters of 18 offset-strip fins.

No.	D_h (mm)	α	δ	γ
1	1.435	0.500	0.033	0.083
2	1.316	0.180	0.036	0.111
3	2.185	0.250	0.031	0.067
4	1.200	0.127	0.040	0.125
5	1.131	0.556	0.036	0.100
6	1.652	0.467	0.047	0.107
7	1.540	0.133	0.036	0.100
8	1.954	0.405	0.028	0.067
9	2.554	0.465	0.023	0.050
10	3.145	0.167	0.042	0.050
11	1.139	1.000	0.202	0.042
12	2.144	0.714	0.012	0.075
13	1.437	0.500	0.031	0.083
14	1.534	0.583	0.047	0.061
15	0.636	0.700	0.061	0.200
16	1.434	0.500	0.034	0.083
17	1.534	0.583	0.047	0.107
18	0.922	1.000	0.060	0.136

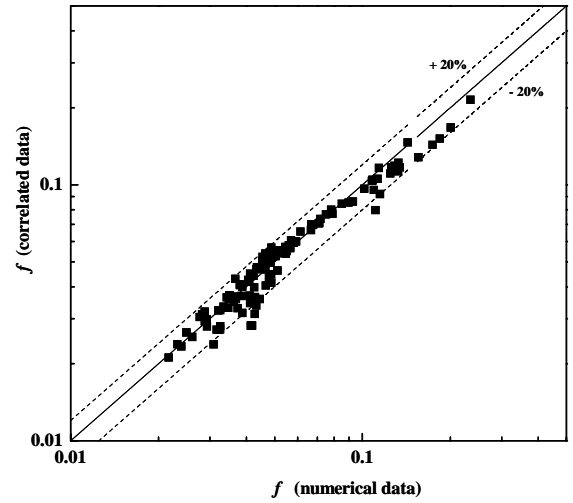
Joshi & Webb⁽⁴⁾의 상관식이 층류와 난류 영역에서의 불연속이 심하기 때문에 층류에서는 잘 일치하는 반면 난류에서는 오차가 큰 것을 볼 수 있다. SST 모델의 j 값은 Manglik & Bergles⁽⁷⁾의 상관식과 거의 차이 없으며 층류와 난류에서 불연속이 크지 않고 전체적인 경향은 잘 일치하였다. 위의 해석결과에서 j 와 f 값 모두 상관식과 잘 일치하며, 난류 모델의 경우는 SST $k-\omega$ turbulence model이 가장 근사한 값을 예측하였다. 따라서 다른 형상의 경우에는 다른 난류 모델에 대한 해석없이 SST $k-\omega$ turbulence model에 대해서만 해석하였다.

3.2 공기에서의 열전달 및 압력 강하 상관식

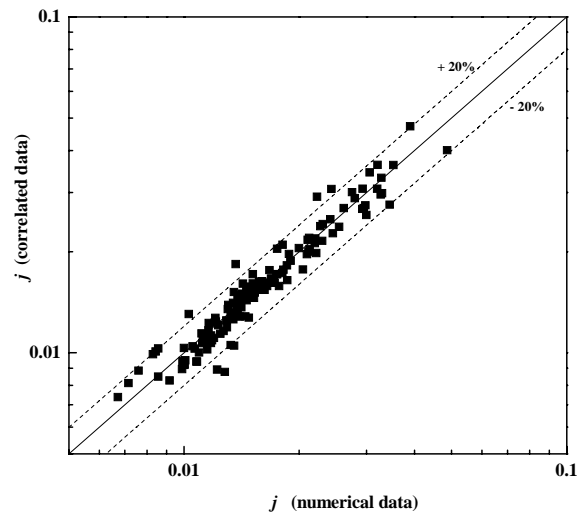
본 논문에서는 Joshi & Webb⁽⁴⁾과 Manglik & Bergles⁽⁷⁾의 α , δ , γ 와 서로 유사한 형상을 이용하여 Table 1과 같은 형상에서의 해석을 수행하였다. f 와 j 는 Re , α , δ , γ 의 함수이며, 최소자승법을 이용하여 구한 상관식은 다음과 같다.

$$f = 6.59174Re^{-0.669} \alpha^{-0.201} \delta^{0.18} \gamma^{-0.0359} \quad (10)$$

$$j = 0.70958Re^{-0.538} \alpha^{-0.153} \delta^{0.173} \gamma^{-0.0985} \quad (11)$$



(a) f -factor



(b) j -factor

Fig. 3 Comparison of numerical data with correlated data.

상관식과 수치결과는 Fig. 3과 같이 20% 범위 내에서 잘 일치하며 이는 본 상관식이 열전달 및 압력 강하 특성을 잘 예측함을 나타낸다.

3.3 Pr수에 따른 열전달 및 압력 강하 상관식

오프셋 스트립 핀 상관식에 대한 연구는 많이 이루어져 오고 있으나 대부분 작동유체가 공기이기 때문에 다른 유체, 특히 Prandtl 수가 큰 유체의 경우에 적용하기 어렵다. 따라서 본 논문은 공기, 물, 디젤에 대해 해석을 수행하였다. 앞서 구한 식(10), (11)을 적용할 수 있는지 여부

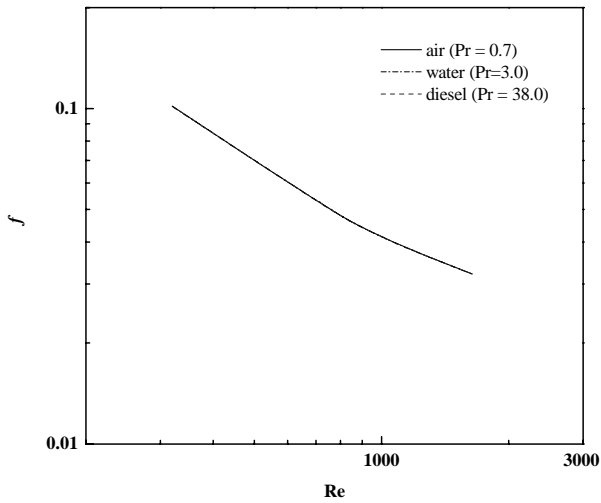


Fig. 4 f factor as function of Prandtl number.

를 조사한 결과는 Fig. 4, 5에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 f 인자의 경우 Pr에 따른 값의 변화는 없다. 반면 j 인자의 경우 Pr에 따른 값의 변화가 심하였다. 특히 Pr수가 높은 디젤의 경우 다른 두 유체와의 유사성이 없으며 j 값에서도 큰 차이를 보였다. 따라서 Pr수에 따른 압력강하 상관식은 식(10)을 이용하였고 열전달의 상관식은 Pr수를 도입하여 통합 열전달 상관식을 구하였다.

$$j_{Pr} = 0.448745Re^{-0.476}Pr^{-0.00686} \times \alpha^{-0.144}\delta^{0.203}\gamma^{-0.156} \quad (12)$$

식(12) 결과와의 비교는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 보듯이 Pr수를 이용한 통합 열전달 관계식과 수치결과는 많은 차이가 있다. Pr수가 높아질수록 상관식과 수치 결과는 많은 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 특히 Pr수가 높은 디젤의 경우 그 차이가 매우 심하다. 따라서 Pr수를 이용한 통합 열전달 상관식보다는 Pr수에 따라 상관식을 다음과 같이 각각 정의하는 것이 타당하다.

$$j_{diesel} = 0.15417Re^{-0.327}\alpha^{-0.0773}\delta^{0.191}\gamma^{-0.17} \quad (13)$$

$$j_{water} = 0.54325Re^{-0.513}\alpha^{-0.178}\delta^{0.256}\gamma^{-0.234} \quad (14)$$

새로운 상관식 (13), (14)을 이용하여 Manglik & Bergles⁽⁷⁾의 결과와 비교를 하였으며 결과는 각

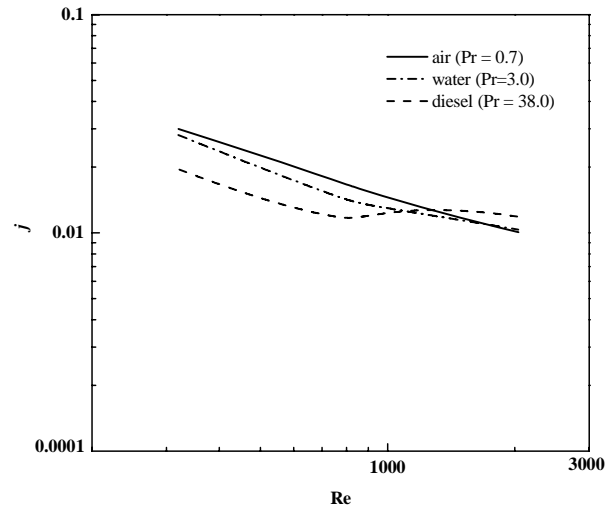


Fig. 5 j factor as function of Prandtl number.

Pr수에 따른 j 의 상관식과 매우 잘 일치 하였다.

4. 결론

본 연구에서는 읍셋 스트립 핀에 대한 상관식을 얻기 위해 수치 해석을 수행하였다. 난류 모델의 경우 standard $k-\epsilon$ turbulence model, realizable $k-\epsilon$ turbulence model, SST $k-\omega$ turbulence model을 이용하여 비교하였으며, SST 모델만이 f 와 j 인자를 잘 모사하였다.

수치 결과를 참고 문헌들과 그 값을 비교하였고 공기에 대한 더 간단한 j, f 상관식을 제안하

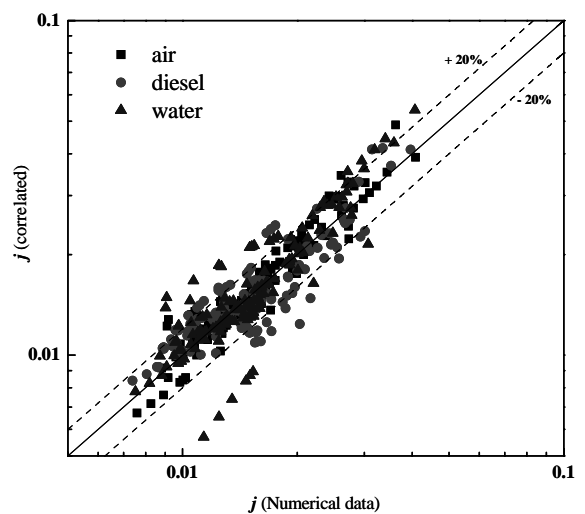


Fig. 6 Comparison of numerical data with j_{Pr} correlation.

였고 이는 열전달 및 압력 강하 특성을 잘 예측하였다. 또한 공기 이외의 유체에 적용시키기 위해 공기이외에 물, 디젤에 대한 해석을 병행하였다. Pr 수에 따른 압력 강하는 큰 차이 없으나 j 값은 Pr 수에 따라 그 차이가 컸다. Pr 수에 따른 변화를 하나의 식으로 예측하기 위하여 통합 상관식을 제안하였으나 이는 모든 Pr 수에 따른 영향을 대표할 수 없었으며 따라서 Pr 수에 따라 j 에 대한 상관식을 각각 제안하였다.

참고 문헌

1. Kays, W. M., London A. L. , 1984, Compact Heat Exchangers, McGraw-Hill, New York.
2. Manson, S. V. 1950, Correlations of heat transfer data and of friction data for interrupt plain fins staggered in successive rows, NACA Tech., Washington.
3. Weiting, A. R. 1975, "Empirical correlation for heat transfer and flow friction characteristics of rectangular offset-strip plate-fin heat exchangers" J. Heat Transfer, Vol. 97, pp. 488-490.
4. Joshi, H. M., Webb, R. L. 1987, "Heat transfer and friction in the offset strip fin heat exchangers", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 30, pp. 69-84.
5. Mochizuki, S., Yagi, Y. 1987, "Transport phenomena in stacks of interrupt parallel-plate surface", Exp. Heat Transfer, Vol. 1, pp. 127-140.
6. Tinaut, F. V., Melgar, A., Ali, A. 1992, "Correlations for Heat Transfer and Flow Friction Characteristics of Compact Plate-Type Heat exchangers", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, pp. 1659-1665.
7. Manglik, R. M., Bergles, A. E. 1995, "Heat transfer and pressure drop correlations for the rectangular offset strip fin compact heat exchanger", Exp. Thermal Fluid Sci., Vol. 10, pp. 171-180.
8. Herold, K.E., Hu, S. (1995) Prandtl Number Effect on Offset Fin Heat-Exchanger Performance - Experimental Results. Int J Heat Mass Tran 38: 1053-1061.
9. Zhang, L.W., Tafti, D.K., Najjar, F.M., Balachandar, S. (1997) Computations of flow and heat transfer in parallel-plate fin heat exchangers on the CM-5: Effects of flow unsteadiness and three-dimensionality. Int J Heat Mass Tran 40: 1325-1341.
10. Menter, F.R. (1994) 2-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. AIAA J 32: 1598-1605.