

오프셋 스트립 힌의 막음비에 따른 열 및 유동 분석

김 민 수, 유 승 환, 이 관 수[†]

한양대학교 기계공학과

Thermo-Flow Analysis of Offset-Strip Fins according to Blockage Ratio

Min-Soo Kim, Seung-Hwan Yu, Kwan-Soo Lee[†]

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

ABSTRACT: A numerical study of thermo-flow characteristics is presented to determine correlations of pressure drop and heat transfer for offset-strip fins. As a blockage ratio increased, previous correlations underestimate f values in laminar and turbulent regimes, and overestimate j values in laminar regime. Therefore, new correlations, which are applicable to fins with blockage ratios more than 15%, are presented.

Key words: Offset-strip fin(오프셋 스트립 힌), Blockage ratio(막음비), 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 [m²/s²]
 D_h : 수력 지름 [m]
 Re_b^* : 임계 Reynolds 수

그 리 스 문 자

ϵ : 난류운동 에너지 소산율 [m²/s³]
 ν : 동점성 계수 [m²/s]

상 첨 자

* : 임계

하 첨 자

in : 입구
 out : 출구

1. 서 론

한정된 공간에 열교환기를 설치하기 위하여 열교환기는 소형화되고 있으며 더 많은 열전달량을 얻기 위하여 전열 촉진 기구를 사용하게 된다. 특히 오프셋 스트립 힌은 plate-fin 열교환기에서 널리 사용되고 있으며 기하학적 형상에 의해 열전달 면적을 늘릴 뿐만 아니라 각 열마다 열경계층을 새로 생성하여 열전달량을 증가시킨다. 그러나 오프셋 스트립 힌의 설치는 열교환기 내 압력강하를 증가시키게 되므로 오프셋 스트립 힌의 열전달 및 압력 강하를 연구하는 것은 매우 중요하다.

오프셋 스트립 힌은 기존의 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔다. Kays & London⁽¹⁾이 실험을 통해 상관식을 제안하였고, Manson⁽²⁾은 이외의

[†] Corresponding author

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

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

형상에 대한 실험을 수행하였다. Wieting⁽³⁾은 22개의 형상에 대해 먹승법을 이용한 상관식을 제안하였다. Joshi & Webb⁽⁴⁾은 층류와 난류에서의 상관식을 제안하였으나, 이 상관식을 천이 영역에 적용하기 어렵다. Mochizuki & Yagi⁽⁵⁾는 Wieting⁽³⁾의 상관식을 수정하여 더 정확한 상관식을 도출하였고, Manglik & Bergles⁽⁶⁾는 위의 실험들의 데이터를 이용하여 층류와 난류에 모두 적용 가능한 상관식을 제안하였다. 그러나 위의 실험 및 상관식은 작동 유체가 공기에 한정되어 있으므로 Prandtl 수가 더 큰 다른 작동 유체에 적용하기는 힘들다. Tinaut et al.⁽⁷⁾은 물과 엔진 오일을 이용하여 읍셋 스트립 힌이 설치된 열교환기에서 실험을 수행하였고, Hu & Herold⁽⁸⁾는 물과 PAO(polyalphaolefin)에서 압력강하 및 열전달 특성을 알아보았다. 그러나 이들의 연구는 적은 수의 읍셋 스트립 힌에만 적용하여서 형상 변화에 따른 상관식 및 실험값 적용은 어렵다. 위와 같이 읍셋 스트립 힌에 대한 연구는 많이 진행되어 왔으나 기존 연구 대부분이 유체가 공기에 한정되어 있고, 해석 형상도 많지 않아 그 유용도가 떨어진다.

따라서 본 연구에서는 읍셋 스트립 힌에서의 압력 강하 및 열전달 특성을 파악하였다. 형상 변화에 따른 압력 강하 및 열전달 특성을 파악하여, 힌 형상 변화에 적용 가능한 일반화된 읍셋 스트립 힌의 열전달 및 압력 강하 상관식을 제안하고자 한다.

2. 해석 대상 및 수치 해석 방법

2.1 읍셋 스트립 힌 형상

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

2.2 지배 방정식

본 연구에서 해석모델 내의 유동 특성을 수치

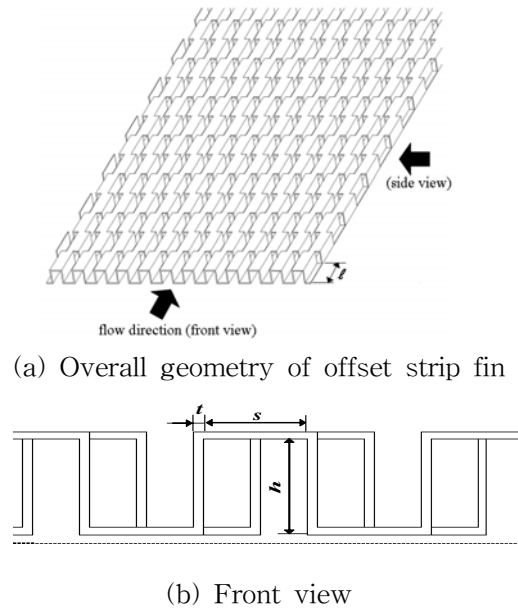


Fig. 1 Schematic diagram of the offset strip fin.

적으로 조사하기 위하여 도입한 가정은 다음과 같다.

- (1) 유체의 흐름은 3차원 정상상태, 비압축성 유동이다.
- (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 읍셋 스트립 핀의 성능 해석을 통한 상관식 결정에 있으므로 정상상태로 해석하였다. 난류 및 천이 영역에서의 유동해석시 SST $k-\omega$ 모델⁽⁹⁾을 사용하였으며 지배방정식은 다음과 같이 연속방정식, 운동량 방정식, 난류운동량 에너지 방정식, 비소산율 방정식 및 에너지 방정식이다.

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

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

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

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

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

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. 완전 발달된 유동을 가정하기 위하여 입구와 출구에 해석 영역을 추가하였으며, 격자 의존성 검사를 실시하여 해의 정확성, 수렴성 및 계산 시간을 고려하여 격자수를 선택하였고 계산의 정확도를 높이기 위해 경계면 부근의 격자를 조밀하게 하였다.

3. 결과 및 고찰

수치해석을 통해 읍셋 스트립 흰에서의 j 및 f 인자를 구하였다. 또한 읍셋 스트립 흰 형상을 변화시키면서 유동 및 열특성을 분석하고 이를 이용하여 새로운 상관식을 도출하였다.

3.1 난류 모델 검증

본 논문의 연구 결과를 기존 읍셋 스트립 흰 연구의 j 및 f 인자와 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 흰의 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.

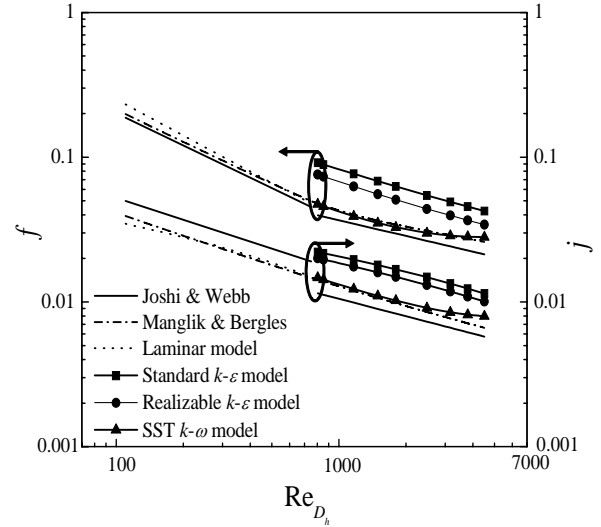


Fig. 2 f and j values according to turbulence models.

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

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

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

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

Fig. 2를 보면 본 연구의 수치 결과는 Joshi & Webb⁽⁴⁾보다 Manglik & Bergles⁽⁶⁾의 상관식에 더 잘 일치하였다. f 값은 층류영역에서는 두 상관식과 잘 일치하며, 난류영역에서는 SST $k-\omega$ 모델만이 Manglik & Bergles의 상관식과 최대 약 8%오차로 잘 일치하였다. 다른 두 난류 모델은 압력 강하를 과대 예측하였다. j 값도 난류 영역의 SST 모델만이 Manglik & Bergles의 상관식과 최대 14%로 잘 일치하며, 다른 난류 모델은 과대 예측하였다. 따라서 다른 형상의 경우에는 다른 난류 모델에 대한 해석 없이 SST $k-\omega$ turbulence model만을 이용하여 해석하였다.

Table 1 Geometric parameters of 19 offset strip fins

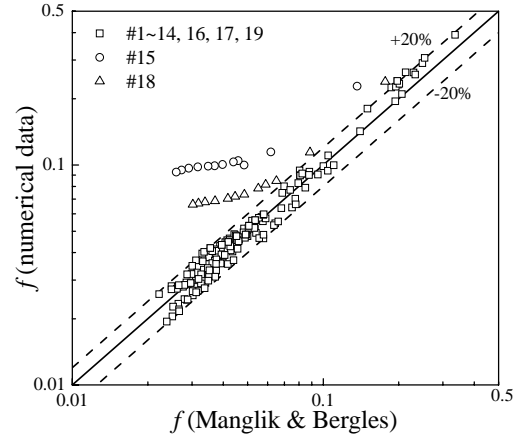
| No. | D_h | α | δ | γ | $\beta(\%)$ |
|-----|-------|----------|----------|----------|-------------|
| 1 | 1.435 | 0.500 | 0.033 | 0.083 | 11.3 |
| 2 | 1.316 | 0.180 | 0.036 | 0.111 | 11.8 |
| 3 | 2.185 | 0.250 | 0.031 | 0.067 | 7.8 |
| 4 | 1.200 | 0.127 | 0.040 | 0.125 | 12.5 |
| 5 | 1.131 | 0.556 | 0.036 | 0.100 | 13.9 |
| 6 | 1.652 | 0.467 | 0.047 | 0.107 | 13.9 |
| 7 | 1.540 | 0.133 | 0.036 | 0.100 | 10.3 |
| 8 | 1.954 | 0.405 | 0.028 | 0.067 | 8.8 |
| 9 | 2.554 | 0.465 | 0.023 | 0.050 | 6.9 |
| 10 | 3.145 | 0.167 | 0.042 | 0.050 | 5.6 |
| 11 | 1.139 | 1.000 | 0.202 | 0.042 | 7.9 |
| 12 | 2.144 | 0.714 | 0.012 | 0.075 | 11.7 |
| 13 | 1.437 | 0.500 | 0.031 | 0.083 | 11.3 |
| 14 | 1.534 | 0.583 | 0.047 | 0.061 | 14.9 |
| 15 | 0.636 | 0.700 | 0.061 | 0.200 | 26.9 |
| 16 | 1.434 | 0.500 | 0.034 | 0.083 | 11.3 |
| 17 | 1.534 | 0.583 | 0.047 | 0.107 | 15.0 |
| 18 | 0.922 | 1.000 | 0.060 | 0.136 | 22.5 |
| 19 | 0.623 | 1.000 | 0.024 | 0.045 | 8.4 |

3.2 공기에서의 압력 강하 및 열전달 상관식

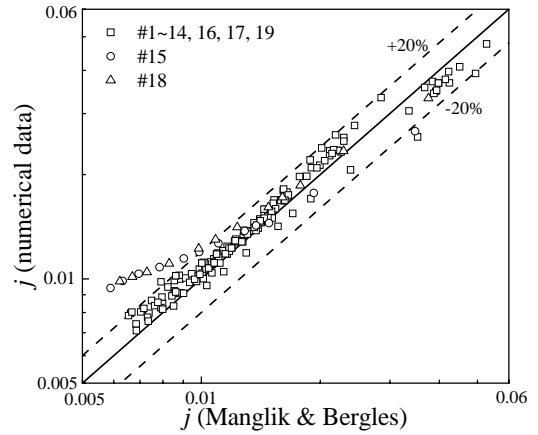
오프셋 스트립 핀에서의 압력 강하 및 열전달 상관식을 얻기 위하여 Table 1과 같이 19가지 형상에 대하여 해석을 수행하였으며, Re수는 0 ~ 5000, 작동 유체는 공기를 사용하였다. 이를 Manglik & Bergles의 상관식과 비교하였으며 그 결과는 Fig. 3과 같다. 대부분의 형상에서 f 와 j 값은 Manglik & Bergles 상관식과 $\pm 20\%$ 이내로 잘 일치하나 #15와 18의 경우 모든 Re수 범위에서 f 는 50%, j 는 25% 이상 크게 차이를 보인다. 특히 #18보다 γ 및 $\alpha\gamma$ 가 큰 #15가 압력 강하가 훨씬 더 크게 나왔다. 결국 γ 및 $\alpha\gamma$ 가 큰 경우, 즉 다음과 같이 정의한 막음비(blockage ratio, β)가 큰 경우에는 압력 강하와 열전달 계수가 커서 기존 상관식을 사용할 수 없다.

$$\beta = \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha\gamma + \gamma + \alpha\gamma^2}\right) \times 100(\%) \quad (9)$$

본 연구에서는 막음비가 15%이상인 #15와 18을 제외하고 상관식을 도출하였으며 이는 다음과 같다.



(a) f values



(b) j values

Fig. 3 Comparison of f and j values between present numerical data and the correlation of Manglik & Bergles.

$$f = \exp(6.91) \alpha^{-0.12} \delta^{0.4} \gamma^{-0.0404} \text{Re}_{D_h}^{(0.109 \ln \text{Re}_{D_h} - 2.04)} \quad (10)$$

$$j = 0.48 \alpha^{-0.131} \delta^{0.266} \gamma^{-0.195} \text{Re}_{D_h}^{(0.0057 \ln \text{Re}_{D_h} - 0.509)} \quad (11)$$

위의 식은 Re수 0 ~ 5000에서 층류, 천이 및 난류 영역에서 모두 적용 가능하다. 그러나 작동 유체는 공기에만, 막음비는 15%이하에서만 적용할 수 있는 한계가 있다.

3.3 막음비에 따른 영향

오프셋 스트립 핀의 다양한 형상 변화, 특히 막

Table 2 Geometric parameters of additional 21 offset strip fins

| No. | D_h | α | δ | γ | β (%) |
|-----|-------|----------|----------|----------|-------------|
| 20 | 1.311 | 0.2 | 0.02 | 0.2 | 19.9 |
| 21 | 0.879 | 0.8 | 0.02 | 0.2 | 28.2 |
| 22 | 1.29 | 0.2 | 0.04 | 0.2 | 19.9 |
| 23 | 0.87 | 0.8 | 0.04 | 0.2 | 28.2 |
| 24 | 0.765 | 0.2 | 0.02 | 0.3 | 27.4 |
| 25 | 0.513 | 0.8 | 0.02 | 0.3 | 38.0 |
| 26 | 0.753 | 0.2 | 0.04 | 0.3 | 27.4 |
| 27 | 0.507 | 0.8 | 0.04 | 0.3 | 38.0 |
| 28 | 0.976 | 0.2 | 0.03 | 0.25 | 23.8 |
| 29 | 0.656 | 0.8 | 0.03 | 0.25 | 33.3 |
| 30 | 0.789 | 0.5 | 0.02 | 0.25 | 28.9 |
| 31 | 0.779 | 0.5 | 0.04 | 0.25 | 28.9 |
| 32 | 1.053 | 0.5 | 0.02 | 0.2 | 24.2 |
| 33 | 0.784 | 0.5 | 0.03 | 0.25 | 28.9 |
| 34 | 0.61 | 0.5 | 0.03 | 0.3 | 33.1 |
| 35 | 1.2 | 0.1 | 0.4 | 0.4 | 31.3 |
| 36 | 2.974 | 0.1 | 0.205 | 0.205 | 18.7 |
| 37 | 1.131 | 1.05 | 0.01 | 0.205 | 31.7 |
| 38 | 4.74 | 1.05 | 0.4 | 0.205 | 31.7 |
| 39 | 1.375 | 1.05 | 0.205 | 0.205 | 31.7 |
| 40 | 2.421 | 2 | 0.205 | 0.205 | 41.1 |

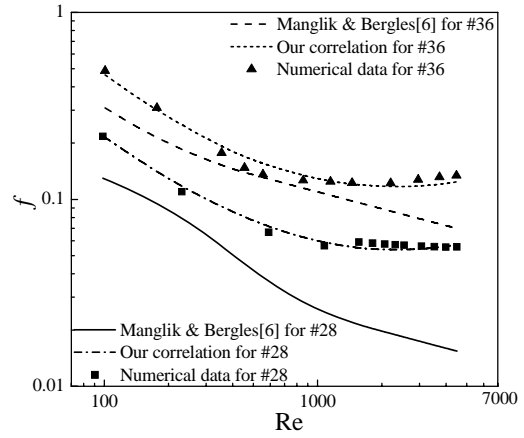
음비 변화를 고려한 상관식을 제안하기 위하여 Table 1의 형상 이외에 중심합성계획법(CCD)을 이용하여 추가적으로 15가지 형상을 선정하였으며, 이를 더 보완하기 위해 6가지를 추가하여 Table 2와 같이 총 21가지 형상에 대해 해석을 실시하였다. 실제 막음비 35% 이상은 너무 큰 압력 강하로 인하여 사용이 힘들고, 5% 이하의 윽셋 스트립 흰으로서 유용성이 없기 때문에 본 연구에서는 사용 가능 막음비를 15% ~ 35%로 제한하였다.

막음비가 커지면 Manglik & Bergles 상관식과 본 연구의 상관식 (10)과 (11)은 공기에서의 f 와 j 를 과소 예측한다. 따라서 본 연구에서는 막음비에 따라 공기에 대한 상관식을 다음과 같이 제시하였다.

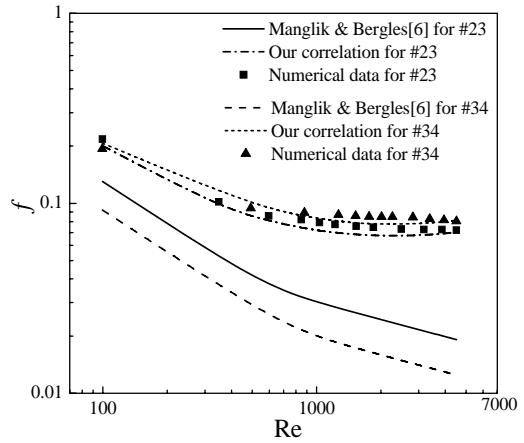
15% < β ≤ 25%:

$$f = \exp(9.42) \alpha^{0.239} \delta^{0.597} \gamma^{1.05} \text{Re}_{D_h}^{(0.14 \ln \text{Re}_{D_h} - 2.17)} \quad (12)$$

$$j = 2.974 \alpha^{0.0327} \delta^{0.331} \gamma^{0.093} \text{Re}_{D_h}^{(0.0447 \ln \text{Re}_{D_h} - 0.925)} \quad (13)$$



(a) 15% < β ≤ 25%



(b) 25% < β ≤ 35%

Fig. 4 Comparison of f values between the present correlation and the correlation of Maglik & Bergles for 15% < β ≤ 35%.

25% < β ≤ 35%:

$$f = \exp(6.48) \alpha^{0.0803} \delta^{0.646} \gamma^{0.628} \text{Re}_{D_h}^{(0.0995 \ln \text{Re}_{D_h} - 1.54)} \quad (14)$$

$$j = 0.845 \alpha^{-0.0112} \delta^{0.282} \gamma^{-0.0215} \text{Re}_{D_h}^{(0.0363 \ln \text{Re}_{D_h} - 0.748)} \quad (15)$$

Fig. 4는 각 막음비에 따라 f 값을 Manglik & Bergles 상관식과 본 연구의 상관식 (12)과 (14)를 비교한 것이다. 기존 Manglik & Bergles 상관식은 f 값을 과소 예측하며 막음비가 커질수록 오차가 매우 크다. 특히 흰 설계시 f 값의 과소 예측은 과대 예측보다 더 큰 문제를 야기한다. 따라서 막음비가 클 경우에는 본 연구의 상관식

을 사용하는 것이 타당하다. 막음비에 따른 j 값은 기존 상관식의 경우 층류 영역에서 j 변화를 과대 예측하였다. 따라서 옹셋 스트립 흰의 압력강하 및 열전달량에 막음비가 큰 영향을 주기 때문에 옹셋 스트립 흰 설계시 기존 형상 인자뿐만 아니라 막음비도 중요하게 고려하여야 한다.

4. 결 론

본 논문은 수치해석을 통해 옹셋 스트립 흰에서의 j 및 f 인자 변화를 알아보았다. 옹셋 스트립 흰의 형상을 변화시키면서 유동 및 열특성을 분석하고 이를 이용하여 새로운 상관식을 도출하였다.

막음비 15%이하의 옹셋 스트립 흰에서만 기존 Manglik & Bergles의 상관식을 사용할 수 있으며, 막음비가 커질수록 기존 상관식은 f 인자는 과소 예측, j 인자는 천이 및 난류 영역에서 과대 예측을 하였다. 이에 따라 막음비를 새로이 정의하고, 막음비가 15 ~ 35%인 옹셋 스트립 흰에 적용 가능한 새로운 j 및 f 상관식을 제안하였다.

따라서 막음비 0 ~ 35%까지, 층류, 천이 및 난류 영역에 모두 적용할 수 있는 일반화된 j 및 f 상관식을 제안하였다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0072371).

참 고 문 헌

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. 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.

7. 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.

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. Menter, F.R. (1994) 2-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. AIAA J 32: 1598-1605.