



## 채널 내 주기적으로 배열된 요철 형상이 난류 유동장/온도장에 미치는 영향 연구

Analysis of the Turbulent Heat/Fluid Flow in a Ribbed Channel for Various Rib Shapes

최도형\*<sup>1</sup>, 유동렬\*<sup>2</sup>, 한유신\*<sup>3</sup>

D. H. Choi , D. N. Ryu , Y. S. Han

The heat transfer characteristics of a turbulent flow in a ribbed two-dimensional channel have been investigated numerically. The fully elliptic governing equations, coupled with a four-equation turbulence model,  $k-\omega-\overline{v}^2-\epsilon_t$ , are solved by a finite volume method of SIMPLE type. Calculations have been carried out for three rib cross-sections : square, triangular, and semicircular, with various rib pitches and Reynolds numbers. The procedure appears to be satisfactory as the results for the square rib compare favorably with available experimental data and earlier calculation. The optimal rib pitch that yields the maximum heat transfer has been identified. It is also found that the square rib is most effective in enhancing the heat transfer. The semicircular rib, on the other hand, incurs the least amount of pressure drop but the improvement in heat transfer is substantially lower.

**Key words** : 난류(turbulence), 요철(rib), 열전달(heat transfer), 요철형상(rib shapes)

### 1. 서 론

관내 열전달 촉진방법으로 요철(rib)을 사용하는데, 이는 열경계층의 성장을 막아주고, 박리 및 재부착을 형성시켜 난류운동에너지를 증대시키면 열이 잘 전달되는 원리를 이용한 것이다.

Liou, et al.[1]은 한쪽벽에 분포시킨 사각요철에 대해 높이, 간격 그리고  $Re_{De}$  수에 따른 열전달 특성을 실험하여 열전달량과 마찰손실량에 관한 실험식을 제시하였다. Liou, et al.[2]은 양쪽벽에 대칭으로 요철이 존재할 때, 사각, 삼각, 반원요철에 대한 열전달 특성을 실험하여 터빈 블레이드에 사용할 실험식을 만들었다. 여기서 그는 사각 요철이 가장 열전달이 잘 됨을 보였

다. Manceau, et al.[3]은 Liou, et al.[2]의 실험을 수치해석하였는데, 사각요철 뒷면에 열점이 존재하고 이로 인해 사각요철 뒷면에서 유체가 오히려 뜨거울 수 있다는 계산결과를 보였다. Tsia, et al.[4]는 요철이 벽면에 붙을 경우와 떨어질 경우에 대한 실험을 하였으며 이 두 경우의 혼합에서 열전달이 가장 잘 됨을 보였다. 그는 또한 압력에 대한 열전달 효율에 관한 실험식을 제시하였다.

본 연구에서는 일반좌표계를 이용해 여러 요철형상을 다룰 수 있는 코드를 개발하여 사각, 삼각, 반원요철에 대해 요철 간격,  $Re_{De}$  수 등 계 변수에 따른 열전달특성을 고찰하였다.

\*<sup>1</sup> 정회원, KAIST 기계공학과

\*<sup>2,3</sup> 학생회원, KAIST 기계공학과

2. 해석 방법

2.1 지배 방정식

난류속도 및 온도장 해석을 위해 연속방정식, N-S 방정식, 그리고 온도 방정식과  $k-\omega-\overline{f^2}-\epsilon_t$  난류모형을 사용하였다.

$$\text{Continuity : } \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j] = 0 \quad (1)$$

Equations for Velocity fields :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j \phi - (\mu + \frac{\mu_t}{\sigma}) \frac{\partial \phi}{\partial x_j}] = S_p \phi + S_u \quad (2)$$

$\phi$	$\sigma$	$S_p$	$S_u$
$u_i$ ( $i = 1,2$ )	1.0	0	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i}]$
$k$	2.0	$-\beta^* \omega$	$P_k$
$\omega$	2.0	$-\beta \omega$	$\alpha \frac{\omega}{k} P_k$

$$P_k = \mu_t (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$Re_\tau = \frac{k}{\omega \nu}$$

$$\alpha = \frac{13}{25} \frac{1/9 + Re_\tau / R_\omega}{1 + Re_\tau / R_\omega} \frac{1}{\alpha^*}, \quad R_\omega = 2.95$$

$$\alpha^* = \frac{3/125 + Re_\tau / R_k}{1 + Re_\tau / R_k}, \quad R_k = 6.0$$

$$\beta = \frac{9}{125}$$

$$\beta^* = \frac{9}{100} \frac{4/15 + (Re_\tau / R_\beta)^4}{1 + Re_\tau / R_\beta}, \quad R_\beta = 8.0$$

$$\mu_t = \alpha^* \frac{k}{\omega}, \quad \epsilon = 0.09 k \omega$$

Equations for temperature field :

$$\frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j \phi - (\frac{\mu}{pr} + \frac{\alpha_t}{\sigma}) \frac{\partial \phi}{\partial x_j}] = S_p \phi + S_u \quad (3)$$

$$P_{\overline{f^2}} = \alpha_t \frac{\partial T}{\partial x_j} \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

$\phi$	$\sigma$	$S_p$	$S_u$
$T$	1.0	0	0
$\overline{f^2}$	1.6	$-2 \frac{\epsilon_t}{\overline{f^2}}$	$2 P_{\overline{f^2}}$
$\epsilon_t$	1.6	$-C_{D1} f_{D1} \frac{\epsilon_t}{\overline{f^2}}$ $-C_{D2} f_{D2} \frac{\epsilon}{k}$	$C_{P1} f_{P1} \frac{\epsilon_t}{\overline{f^2}} P_{\overline{f^2}}$ $+ C_{P2} f_{P2} \frac{\epsilon_t}{k} P_k$

$$C_{D1} = 2.0, \quad C_{D2} = 0.9$$

$$f_{P1} = f_{D1} = \{1 - \exp(-y^*)\}^2$$

$$y^* = u_\tau y / \nu = (\nu \epsilon)^{1/4} y / \nu$$

$$f_{D2} = (\frac{1}{C_{D2}}) (C_{e2} f_2 - 1) \{1 - \exp(\frac{-y^*}{A_{D2}})\}^2$$

$$C_{e2} = 1.9, \quad A_{D2} = 5.5$$

$$f_2 = 1 - 0.3 \exp\{- (R_t / 6.5)^2\}, \quad R_t = k^2 / (\nu \epsilon)$$

$$C_{P1} = 1.85, \quad C_{P2} = 0.65, \quad f_{P2} = 1.0$$

$$\alpha_t = C_\lambda \{ \frac{k^2}{\epsilon} (2R) + 3k^{1/2} (\frac{\nu^3}{\epsilon})^{1/4} \frac{(2R)^{1/2}}{pr} f_d \}$$

$$\times \{1 - \exp(-\frac{y^*}{14})\} \{1 - \exp(-\frac{pr^{1/2} y^*}{14})\}$$

$$C_\lambda = 0.1, \quad R = \tau_i / \tau_u = (\frac{\overline{f^2}}{2\epsilon_t}) / (\frac{k}{\epsilon})$$

2.2 경계 조건

작동유체는 공기이고 속도에 대하여 주유동방향으로는 주기조건을, 그리고 위, 아래 벽에는 점착조건을 주었다.  $k$  (난류 운동에너지)는 벽에서 0이며,  $\omega$  ( $k$ 의 소산율)는 벽에서 첫번째 계산격자의 값을  $6\nu / (9/125 \Delta y^2)$  으로 고정시켰다. 온도에 관한 경계조건으로 아래벽에서 일정 열유속조건을 주었고,  $\overline{f^2}$  (온도미소변화)와  $\epsilon_t$  ( $\overline{f^2}/2$  의 소산율)는 벽에서 각각 0과  $\frac{\mu}{pr} (\frac{\partial \sqrt{\overline{f^2}}}{\partial n})^2$  을 주었다. 격자계는  $100 \times 80$  개의 격자를 사용하였다.

### 3. 검증 계산

먼저 code의 검증을 위해 Liou, et al.[1]이 계산한 사각요철을 계산하여 Fig. 1에 도시하였다. 유동장은 QUICK 도식으로 대류항을 차분하였다. 온도방정식에서의 난류모형은 Abe, et al.[6]의 논문에서 인용한 것이며 아래에 약간의 전도벽을 주어 계산한 결과 난류 프란틀수를 상수로 한 계산에 비해 잘 맞음을 알 수 있다.

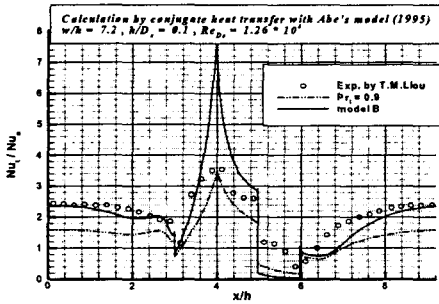
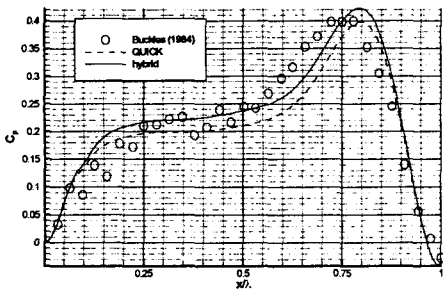
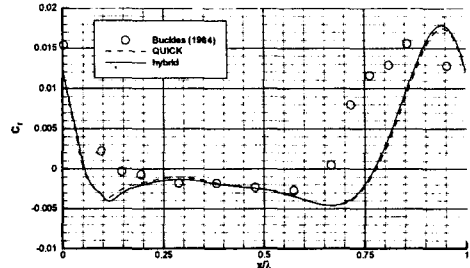


Fig. 1  $Nu$  distribution along the channel with square ribs

삼각과 반원요철의 계산에 사용한 일반좌표계의 검증을 위해 Bukles, et al.[7]의 wavy wall에 대한 실험과 비교를 하였다. 실험과 잘 맞는 것을 알 수 있다. 대류항 차분법에 대해 hybrid 도식과 QUICK 도식이 큰 차이가 없으나 이 문제에 대해선 hybrid 도식이 QUICK보다 잘 맞는다. 본 연구에서 사각요철의 경우는 QUICK을, 삼각과 반원요철의 경우는 계산결과에 큰 차이가 없고, 고  $Re_{De}$ 수에 대한 수렴의 용이에 따라 hybrid 도식을 사용하였다.



(a) Wall pressure coefficient



(b) Wall shear stress

Fig. 2 Pressure and shear-stress distribution along the wavy wall channel

### 4. 결과 및 고찰

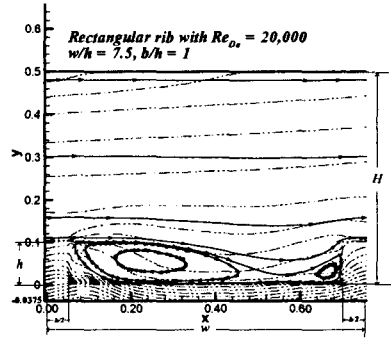


Fig. 3 Flow pattern in the rectangular rib channel

Fig. 3의 사각요철형상에 대해서  $w/h$ ,  $b/h$ ,  $Re_{De}$ 에 따른 열전달을 계산하였다. 박리 및 재부착을 볼 수 있고, 아래벽에서 열이 잘 전도됨을 볼 수 있다.

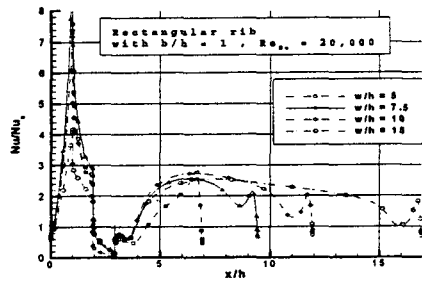


Fig. 4  $Nu/Nu_s$  distribution for various  $w/h$

요철간격( $w$ )과 높이( $h$ )의 간격을 보기 위해 여러  $w/h$ 에 대한 계산을 수행하여 그 결과를 Fig. 4이 비교하였다. 여기서  $Nu_s(=0.023Re_{De}^{0.8} pr^{0.4})$

는 요철이 없는 원판에서의 열전달계수이다.  $w/h=5$ 인 경우는 요철과 요철 사이에서 유동이 갓힘에 따라 난류운동에너지량이 작고, 열이 유동을 통해 하류로 전달되지 못해 열전달이 가장 안 된다(Fig. 5). 재부착이 존재하면 재부착 전에 열전달이 커지고 재부착 순간에는 유속이 작아 국부적으로 열전달이 잘 안 된다. 요철의 앞면에서 강한 열전달 상승이 있고, 요철 윗면에서는 뜨거운 요철이 차가운 유체와 직접 닿아 열전달이 가장 활발하다. 요철의 뒷면에서는 열전달이 잘 안 되는데 이는 바닥면에서 전달된 열이 요철 뒷면을 타고 유체와 함께 올라와 유체 자체가 뜨거워서이다. Manceau, et al.[3]에 의하면 conjugate 열전달 계산의 경우 요철 뒷면에서 오히려 유체가 더 뜨거워 음의 열전달계수가 나온다고 하는데, 이는 바닥면에 전도벽을 주지 않고 요철만 conjugate 열전달로 계산한 경우에 해당한다. 이 경우 요철 뒤쪽 바닥에서 실제보다 많은 열유속을 경계조건으로 주게 되므로 유체가 더 뜨거울 수가 있다.

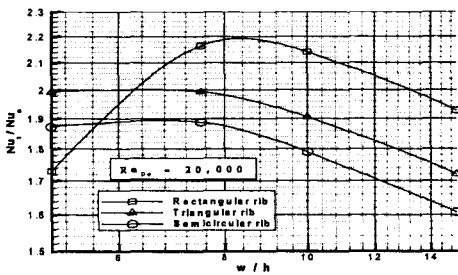


Fig. 5  $Nu_i/Nu_s$  vs.  $w/h$  for various rib shapes

고체에서 유체로 열전달되는 아래벽면을 따라 열전달 계수를 평균( $Nu_i$ )내면 Fig. 5와 같다. 사각요철의 경우 요철과 요철사이에 공동이 생기는  $w/h=5$ 인 경우 열전달이 가장 안되고 재부착이 생기고 동시에 난류운동에너지가 가장 큰  $w/h=8$  정도에서 열전달계수가 가장 크다. 재부착의 길이는 너무 길어서 요철에 붙어도 너무 짧아서 요철과 멀리 떨어져도 열전달을 감소시킨다.

재부착에 따른 난류운동에너지 증가가 열전달을 향상시키기도 하지만 요철 접촉면이 넓으면 열전달이 또 잘 된다. 따라서 요철의 위면이 넓어지면 고체 부분의 열전도가 잘 되어 요철이 더 뜨거워져 열전달이 잘 된다.

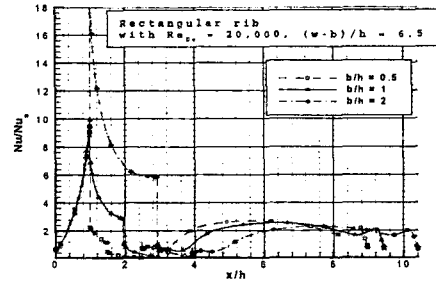


Fig. 6  $Nu/Nu_s$  distribution for various  $b/h$

Fig. 6을 보면 접촉면이 넓은 요철 위면에서 열전달이 급격히 커진다. 이때 요철이 넓어짐에 따라 후류의 재부착점은 짧아져 이 부분은 오히려 열전달상승이 적어진다. 전체적으로 요철 접촉면에 따른 열전달상승이 재부착길이의 감소에 따른 열전달감소를 크게 앞선다. 그러나 접촉면이 넓은 게 좋다고 무한정 요철을 넓게 할 수는 없을 것이다. 요철 위면의 경계층발달은 열전달을 감소시키는 원인이며 요철의 열전도도에 따라 요철 위면의 열전달이 더 이상 증가하지 않는 요철길이가 존재할 것으로 생각된다.

요철사이의 열전달 향상과 관련해 재부착은 요철과 가깝게 형성되면 열전달이 잘 된다. 그런데 요철이 넓으면 재부착이 짧아져 요철사이 열전달은 잘 안 된다. 따라서 요철면을 넓게 하며 요철사이 열전달을 극대화하는 요철 사이 간격은 요철이 넓어짐에 따라 작아질 것으로 추정된다. 현재  $b/h=1$ 인 경우는  $w/h = 7 \sim 8$  정도에서 최대 열전달 효과가 있음이 밝혀져 있다.

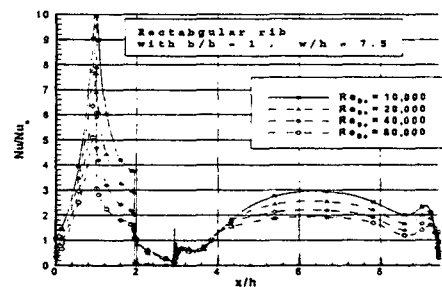


Fig. 7  $Nu/Nu_s$  distribution for various  $Re_{De}$

Fig. 7은  $Re_{De}$ 에 따른 열전달계수를 그린 것인데  $Re_{De}$ 가 커짐에 따라  $Nu_i$ 의 증가보다  $Nu_s$ 의 증가가 더 커  $Nu_i/Nu_s$ 가 작아진다. 즉, 요철이



없는 관에 대한 열전달향상효과가 작아진다.

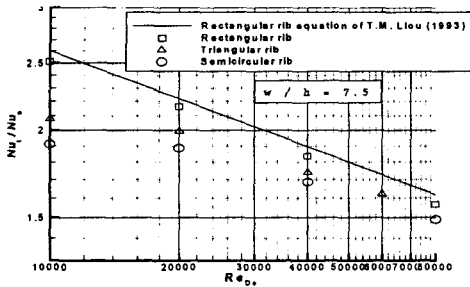


Fig. 8  $Nu_v/Nu_s$  vs.  $Re_{De}$  for various rib shapes

$Re_{De}$ 에 따른 평균 열전달 계수를 Fig. 8에 도시하였다. Liou, et al.[1]의 (15)식과 비교하여 대체로 잘 일치함을 볼 수 있다.

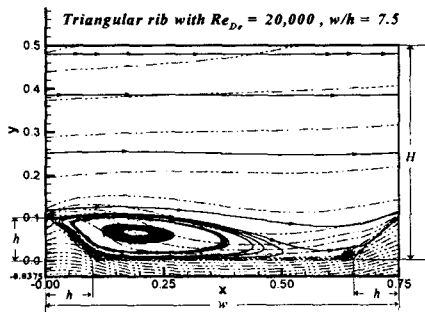


Fig. 9 Flow pattern in the triangular rib channel

삼각요철에 대한 형상 및 유선과 온도장을 Fig. 9에 보였으며 앞의 경우에서와 같이  $w/h$ ,  $Re_{De}$ 에 따른 열전달현상을 고찰하였다.

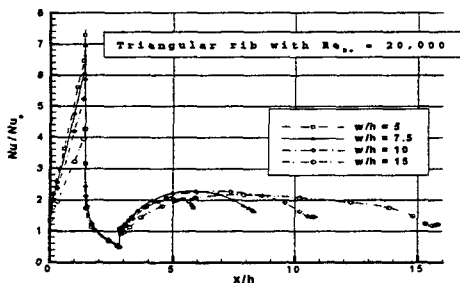


Fig. 10  $Nu/Nu_s$  distribution for various  $w/h$

Fig. 10의  $w/h$ 에 따른 열전달 경향을 보면 사각요철과 비슷하게 재부착 전에 열전달이 향상

된다. 전반적으로 사각요철에 비해 재부착길이 길어져 삼각요철에 가깝게 형성되어 열전달향상이 현저히 작아진다. 삼각요철의 꼭대기에서 열전달이 가장 잘 일어난다. Fig. 5에서  $w/h=5$ 일 때 평균열전달계수가  $w/h=7.5$ 일 때보다 별로 작지 않다. 또한 사각요철에 비해서도 현저히 크다. 사각요철의 경우  $w/h=5$ 일 때 요철사이에서 공동이 생겨 요철의 앞면과 뒷면의 열전달이 공동으로만 전달되어 요철의 효과가 급격히 떨어진 데 비해 삼각요철의 경우는 재부착이 삼각요철의 앞면 중앙부에 생겨 요철 앞면의 열이 재순환부만 아닌 유동으로도 전달되기 때문이다.

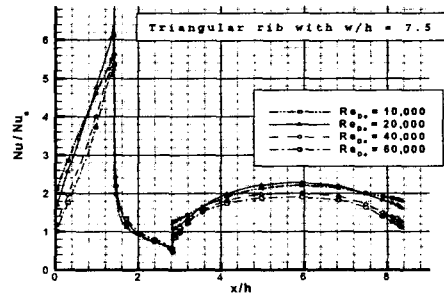


Fig. 11  $Nu/Nu_s$  distribution for various  $Re_{De}$

Fig. 11에서는  $Re_{De}$ 에 따른 열전달특성을 볼 수 있다. 전반적으로  $Re_{De}$ 가 커지면 요철이 없는 원관에 대한 열전달향상정도가 떨어진다. 이는 사각요철과 같은 경향이다. 그러나  $Re_{De}$ 가 10,000일 때 20,000일 때보다 열전달향상정도가 사각요철과는 달리 작아진다. 이는  $Re_{De}$ 가 10,000일 때 20,000일 때보다 재부착이 길어져 삼각요철 앞면 아래쪽에 발생하여 열전달이 잘 안 되어서다.

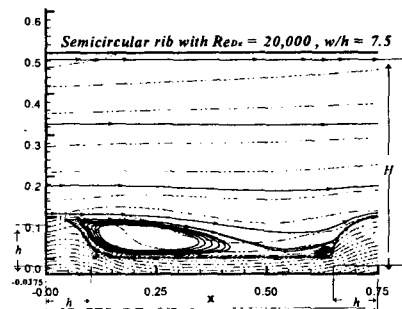


Fig. 12 Flow pattern in the semicircular rib channel

Fig. 12은 반원형상의 요철에 대한 유선분포 및 등온선이며  $w/h$ ,  $Re_{De}$ 에 따른 열전달을 계산하였다.

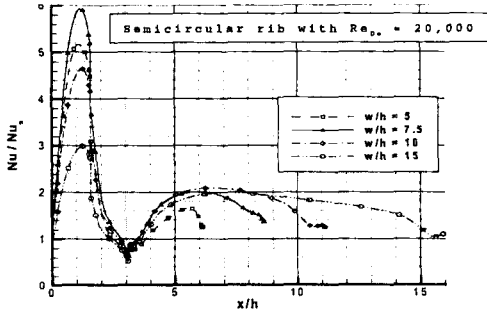


Fig. 13  $Nu/Nu_s$  distribution for various  $w/h$

Fig. 13은  $w/h$ 에 따른 반원요철의 열전달 특성을 그린 것인데, 열전달이 삼각요철보다 작고 사각요철보다는 훨씬 작다. Fig. 5를 보면  $w/h=5$ 일 때는 삼각요철보다는 작고 사각요철보다는 큰 평균열전달계수가 나온다.

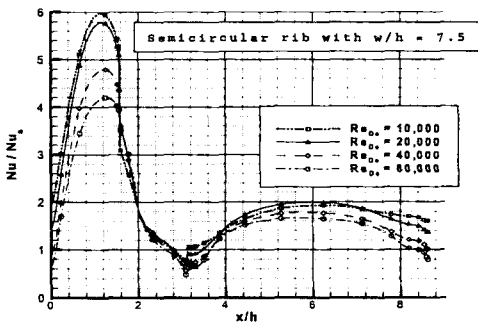


Fig. 14  $Nu/Nu_s$  distribution for various  $Re_{De}$

반원요철에서도  $Re_{De}$ 에 따라 요철이 없는 원관에 대한 열전달향상정도가 작아진다(Fig. 14).

### 5. 결론

1. 관내에 요철이 존재해 유동장과 온도장이 복잡해지면 상호 상사성이 깨져 난류 프란틀수를 상수로 가정하기 어렵기에, Abe, et al.[6]의  $\overline{f}^2 - \epsilon_t$  온도장 모델을 사용해 실험과 일치하는 열전달 특성을 구현할 수 있었다.

2. 관내에 요철이 존재할 때 열전달 특성은 요철후방 재부착길이에 매우 민감하다. 정사각요철인 경우  $w/h = 7 \sim 8$  정도에서 열전달이 최대가 됨을 확인하였다.

3. 삼각요철과 반원요철의 경우,  $w/h \geq 7$  이 되면 사각요철에 비해 열전달이 저하되며, 특히 반원요철은 열전달이 현저히 감소한다. 삼각과 반원요철에서  $w/h$ 가 충분히 작을 때, 사각요철처럼 요철과 요철사이에 완벽한 공동을 만들지 않아 이 경우 오히려 사각요철보다 열전달이 잘 됨을 볼 수 있었다.

4.  $w/h=7.5$ 일 때, 요철이 없는 관에 대한 열전달향상정도( $Nu/Nu_s$ )는  $Re_{De}$ 에 따라 감소한다. 이는  $Re_{De}$ 가 커짐에 따라 재부착 길이가 감소하기 때문이다. 다만 삼각요철은  $Re_{De}$ 가 10,000일 때가 20,000일 때보다 열전달향상정도가 작는데, 이는 삼각요철의 재부착길이가 사각요철보다 길어  $w/h=7.5$ 인 경우에  $Re_{De}=10,000$ 을 가지는 유동의 재부착이 후속요철까지 이르기 때문이다.

### 참고문헌

- [1] Liou, T.M. et al., Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 2(1993), pp. 507-517
- [2] Liou, T.M., et al., Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 4(1993), pp. 931-940
- [3] Manceau, R., et al., Int. J. Heat and fluid Flow, Vol. 21(2000), pp. 320-328
- [4] Tsia, J.P., Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 42(1999), pp. 2071- 2083
- [5] Wilcox, D.C., *Turbulence modeling for CFD*, 2nd ed.(1998)
- [6] Abe, K. et al., Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 38, No. 8(1995), pp. 1467-1481
- [7] Bukles, et al., J. Fluid Mech., Vol. 140(1984), pp. 27-44