

사각 또는 반원 형상의 요철이 설치된 채널 내부의 유동 및 열전달의 큰에디모사

안준[†] · 최해천* · 이준식**

Large Eddy Simulation of Flow and Heat Transfer in a Channel Roughened by Square or Semicircle Ribs

Joon Ahn, Haecheon Choi and Joon Sik Lee

Key Words : Ribbed channel (요철이 설치된 채널), Large eddy simulation (LES, 큰에디모사), Heat transfer (열전달), Rib cross-section geometry (요철 단면 형상)

Abstract

The internal cooling passage of a gas turbine blade can be modeled as a ribbed channel. Most studies have considered square ribs. However, the ribs can be rounded due to improper manufacturing or wear during the operation. Hence, we have studied two different rib geometries in this study, i.e. square and semicircle ribs. We have performed large eddy simulations (LES) and experiments to validate the results from the simulations. LES predicts the detailed flow and thermal features, which have not been captured by simulations using turbulence models. By investigating the instantaneous flow and thermal fields, we propose the mechanisms for the local heat transfer distribution between ribs. For both the geometries, heat transfer is enhanced by the entrainment of the cold fluid by the vortical motions and impingement of the entrained cold fluid on the ribs.

기호설명			
D_h	: 수력직경	s	: 고체면을 따라 설정된 좌표
e	: 요철의 높이	T	: 온도
f	: 마찰계수	u, v, w	: 주유동방향, 수직방향, 폭방향 속도
h	: 열전달계수	W	: 채널의 폭
H	: 채널의 높이	x, y, z	: 주유동방향, 수직방향, 폭방향 좌표
k	: 난류운동에너지		
Nu	: Nusselt 수 ($=h D_h / k$)		그리스문자
p	: 요철사이의 거리	η	: 성능계수 ($=(Nu/Nu_0)/(f/f_0)^{1/3}$)
Re	: Reynolds 수 ($=U_b D_h / \nu$)	Θ	: 무차원 온도 ($=(T-T_b)/(T_w-T_b)$)
		ξ	: 요철면을 따라 설정된 좌표

[†] 서울대학교 마이크로 열시스템 연구센터

* 서울대학교

** 서울대학교

E-mail : jslee123@snu.ac.kr

TEL : (02)880-7117 FAX : (02)883-0179

하첨자

b	: 주유동 혼합 평균
w	: 벽면
0	: 매끈한 원형관 내의 완전발달 유동

Table 1. Flow and geometric parameters

	LES	Experiment	Cho et al. ⁽³⁾	Liou & Hwang ⁽⁴⁾
Re	30,000	30,000	30,000	13,000
p/e	10	10	10	10
AR	∞	8	2	4
e/H	0.1	0.1	0.1	0.13

1. 서론

가스터빈의 입구 온도를 높이면 터빈효율을 높일 수 있다. 그러나 재료의 내열 한계때문에 온도를 높이기 위해서는 효율적인 냉각 방법이 필요하다. 이를 위해 가스터빈 블레이드 내부에 냉각을 위한 유로를 만들고, 열전달을 촉진하여 냉각성을 높이기 위해 유로 벽면에 요철을 설치하고 있다.⁽¹⁾ 가스터빈 블레이드의 냉각유로를 설계하기 위해서는 유로의 열전달 및 압력강하 특성이 필요하며 이들은 기하학적 형상과 유동조건에 따라 정해진다.

채널에 요철을 설치할 경우 요철 사이의 간격이나 요철의 높이가 냉각유로의 성능에 큰 영향을 준다. 일반적으로 요철이 커질수록 열전달이 커지지만 압력강하도 커진다. 이를 고려한 최적의 차폐비($=e/H$)는 0.1정도로 알려져 있다.⁽²⁾ 요철을 주기적으로 설치할 경우 다음 요철이 요철 뒤에 생기는 유동이 박리된 영역 뒤쪽에 위치해야 한다. 가스터빈 내부관에 해당하는 Reynolds수에서는 요철 사이의 거리($=p$)가 요철 높이($=e$)의 10배정도에서 가장 열전달 성능이 좋은 것으로 알려져 있다.⁽²⁾ 이러한 기하학적 변수에 대해서는 이미 많은 자료가 축적되어 최적값이 잘 알려져 있으므로 본 연구에서는 요철의 단면형상의 영향에 주목했다.

지금까지 대부분의 연구는 요철의 단면형상이 정사각형인 경우를 다루어왔다. 그러나 실제 가스터빈에서 운전 중에 마모되거나 구조과정에서 문제가 발생하여 요철의 모서리가 둥글게 될 수 있다. 따라서 모서리가 날카롭지 않은 경우에도 열전달 성능이 유지되는 지를 확인할 필요가 있다. 한편 둥근 형태의 단면형상은 열전달이나 압력강하 특성을 향상시킬 것을 기대하여 시도된 경우도 있다.^(3,4)

Cho 등⁽³⁾은 반원형상의 요철이 일반적인 정사각형 요철보다 더 좋은 성능을 보인다고 발표하였다. 이에 앞서 Liou와 Hwang⁽⁴⁾은 반원형상이 정사각형보다 열전달이 낮은 결과를 보인바 있다. Cho 등⁽³⁾은 요철사이 벽면에서 열전달을 측정하던 반면에 Taslim과 Korotky⁽⁵⁾는 요철 자체의 열전달을 측정하여 모서리가 둥근 경우 열전달이 감소하는 결과를 제시하였다. 이 세편의 논문들을 보면 요철

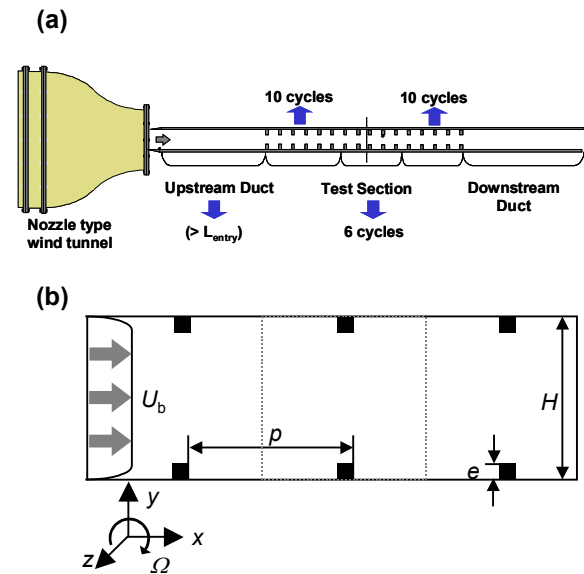


Fig. 1 Experimental setup and computation domain: (a) schematic of experimental setup; (b) computational domain

과 벽면의 열전달 및 압력강하가 종합적으로 고려되어야만 정확한 결론을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

가스터빈은 항공기의 엔진으로 주로 이용되어 설계에 있어 고도의 신뢰성을 요하므로 최근 큰 에디모사(Large eddy simulation: LES)를 도입한 연구들이 발표되고 있다.⁽⁶⁾ 안준⁽⁶⁾ 등은 요철이 설치된 채널 내부의 유동을 LES를 이용하면 난류모델을 이용한 계산에서 정확하게 예측되지 않았던 열전달 및 유동 특성들이 정확하게 재현되는 것을 보인 바 있다.

본 연구에서는 유동 및 기하형상을 Table 1과 같이 고정하고 정사각형과 반원형의 2가지 요철 단면형상에 대하여 LES를 수행하였다. 먼저 시간에 대해 평균한 유동장과 온도장을 실험결과와 비교하여 수치해석 결과를 검증하고 난류모델에 중요한 자료이면서 열전달에도 깊이 관련된 난류운동 에너지를 제시하였다. 그리고, 요철사이 벽면에서의 열전달을 실험결과와 비교하고 순간유동장을 관찰하여 정사각형 요철에서 열전달을 높이는 메커니즘이 반원형 요철에 대해서도 발생하는 것을 확인하였다. 마지막으로 요철 자체의 열전달 결과를 제시하고 요철과 벽면을 포함한 열전달 및 압력강하를 고려한 두 형상의 성능계수를 비교하였다.

2. 실험장치 및 수치해석 기법

2.1 실험장치

실험장치는 Fig. 1(a)와 같이 요철이 설치된 채널에 완전발달된 유동을 형성하여 유동장 및 열전달

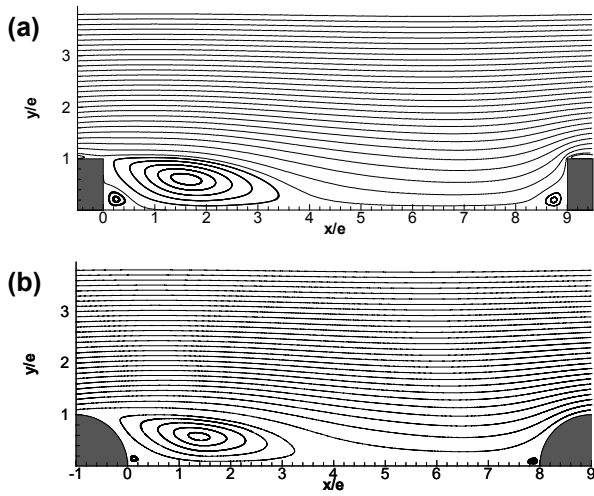


Fig. 2 Time-averaged streamlines: (a) square rib; (b) semicircle rib

을 측정할 수 있도록 구성하였다. 이를 위해서 먼저 풍동을 이용하여 주유동을 형성하고, 풍동 출구에 덕트를 연결하였다. 덕트는 상류덕트, 요철이 설치된 덕트, 하류덕트로 구성하였다. 상류덕트는 요철이 설치된 덕트에 완전발달된 채널 유동이 들어오게 하기 위하여 설치되었다. 실험자료는 요철이 설치된 덕트의 중심부에서 획득하였다. 자료 획득 지점 앞으로 10주기 이상의 요철이 설치되어 완전발달된 자료를 얻었다. 하류덕트에 10주기의 요철을 더 설치하여 출구의 영향이 반영되지 않도록 하였다.

주유동방향 속도와 난류강도는 I 형 열선유속계로 측정하였다. 수치해석 코드를 검증하기 위해서는 국소적인 열전달 분포가 중요하므로 본 연구에서는 열전달분포를 감온성액정을 이용하여 높은 해상도로 측정하였다. 채널유동에서 열전달계수는 다음과 같이 정의된다.

$$q = h(T_w - T_b) \quad (1)$$

열전달계수(=h)를 구하기 위해서는 열유속(=q), 벽면온도(=T_w), 주유동혼합평균온도(=T_b)를 알아야 한다. 열유속은 금박막필름을 이용하여 일정하게 주었고, 주유동혼합평균온도(=T_b)는 입구온도와 열유속으로부터 구하였다. 벽면온도(=T_w)는 넓은 변색범위의 감온성액정판을 벽면에 부착하여 정상상태에서 색상을 온도로 환산하는 방법으로 구하였다.

2.2 수치해석기법

본 연구에서는 비압축성 Navier-Stokes 방정식과 에너지방정식을 동적인 아격자 모델(dynamic sub-grid scale model^(7,8))을 도입한 LES기법으로 수치해석을 수행하였다. 부력과 온도에 따른 물성치 변

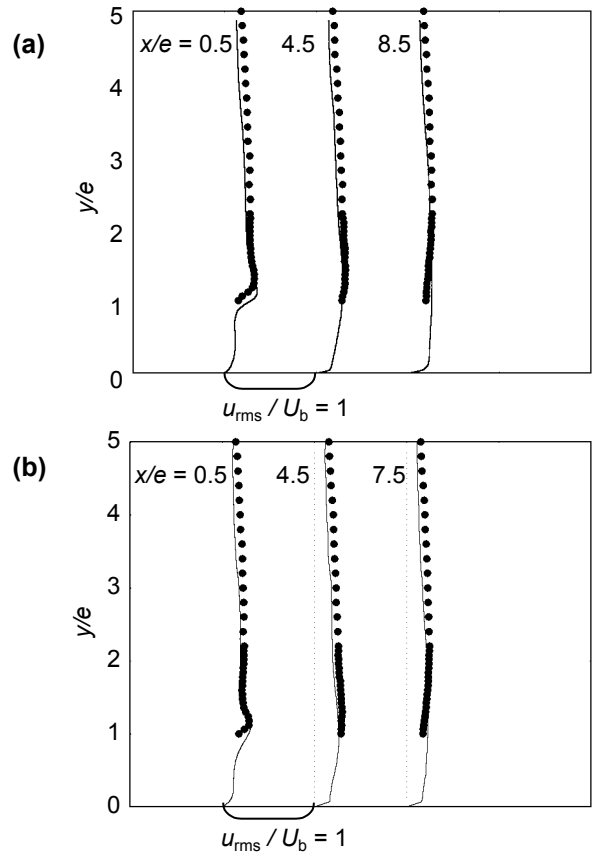


Fig. 3 Time-averaged streamwise velocity fluctuations: (a) square rib; (b) semicircle rib. —, LES; ●, experiment

화는 고려하지 않았다. 모든 공간 미분은 이차 정확도를 가지는 중심 차분법에 의하여 차분화하였으며, 엇갈림 격자계를 사용하였다. 시간 적분 방법으로는 Crank-Nicolson 방법과 3차 정확도의 Runge-Kutta 방법에 근거한 semi implicit fractional step method를 사용하였다. 주유동방향(x)과 폭방향(z)으로 주기조건을 부과하였고 채널벽면에서 점착조건과 등온조건을 부과하였다. 주유동방향의 계산영역크기를 결정하기 위해 세 주기와 한 주기에 해당하는 두 가지의 계산영역에서의 계산결과를 비교하였다. 두 계산영역에서 나온 결과가 같음을 확인하였고 실제 계산에서는 한 주기를 유동방향 계산 영역으로 설정하였다. 폭방향의 계산영역은 요철높이의 2.5π배로 설정하여 2점상관(two-point correlation)이 0으로 수렴하도록 하였다. 계산영역에 정사각형 요철의 경우 128×128×48, 반원형 요철의 경우 128×160×48 격자를 사용하였다. 격자계의 해상도는 각 방향으로 Δx_{min} ≈ 0.0282e, Δy_{min} ≈ 0.0150e, Δz ≈ 0.163e 이다. 요철면을 따라 점착조건과 등온조건은 가상경계법⁽⁹⁾을 이용하여 부과하였다.

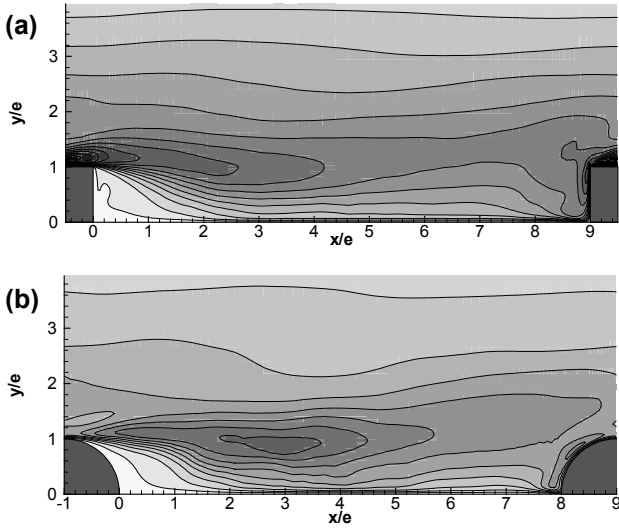


Fig. 4 Contours of turbulent kinetic energy: (a) square rib; (b) semicircle rib

3. 결과 및 토의

3.1 시간평균결과

시간평균한 유선을 보면(Fig. 2) 두 형상 모두 요철 뒤에 재순환영역이 존재하고 요철 앞뒤로 구석와류가 있는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 반원형상의 요철의 경우에 구석와류가 약해져 있다. 정사각형 요철의 경우 요철 위에 박리기포가 있는 것을 볼 수 있다.

시간평균한 난류강도 결과를 실험과 비교해 보면(Fig. 3) 두 형상 모두 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 특히 $x/e = 0.5$ 위치에서 난류모델을 이용한 해석에서 잘 예측되지 않았던⁽¹⁰⁾ 요철 높이 부근에 형성된 난류강도의 극대점이 잘 예측되는 것을 관찰할 수 있다.

식 (2)와 같이 정의되는 난류운동에너지는 열전달과 밀접하게 관련되어 있다.⁽¹¹⁾

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (2)$$

두 형상 모두 요철높이정도에 Fig. 4에 짙은 색으로 표시된 난류운동에너지가 높은 때가 형성되어 있다. 열전달이 활발하지 않은 것으로 알려진 요철 바로 뒤에서는 난류운동에너지가 낮은 것을 볼 수 있다. 정사각형요철의 경우 요철 바로 위에서 난류운동에너지가 최대가 되고 반원형요철에서는 최대값이 $x/e = 3$ 부근에서 관찰된다. 두 형상 모두 요철의 전향면 앞에서도 난류운동에너지가 높게 형성되어 있다.

3.2 요철사이 벽면에서의 국소열전달

요철사이 벽면의 열전달분포는 잘 알려져 있는

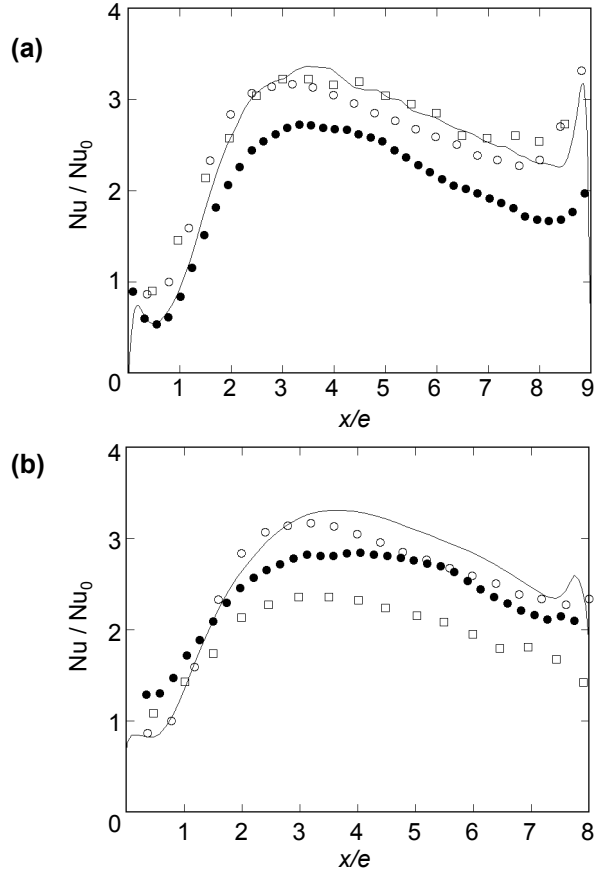


Fig. 5 Time-averaged heat transfer between ribs. (a) square rib; (b) semicircle rib: —, LES; ●, experiment; ○, Cho et al. ⁽³⁾; □, Liou & Hwang ⁽⁴⁾

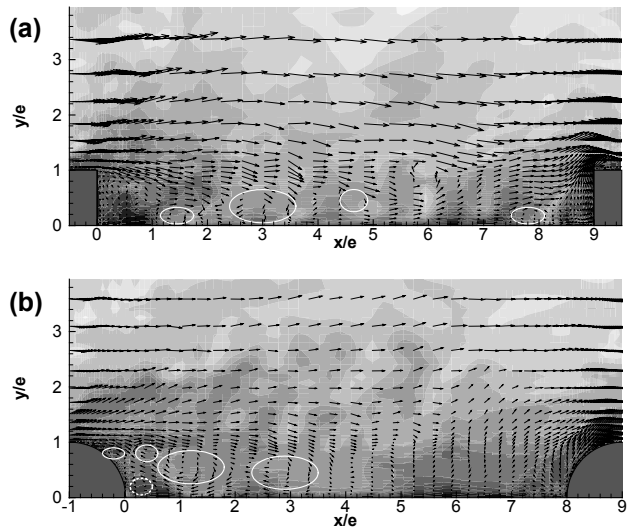


Fig. 6 Instantaneous velocity vectors with temperature contours in an xy plane: (a) square rib; (b) semicircle rib

Dittus-Boelter식으로 정규화한 Nusselt수의 비로 표

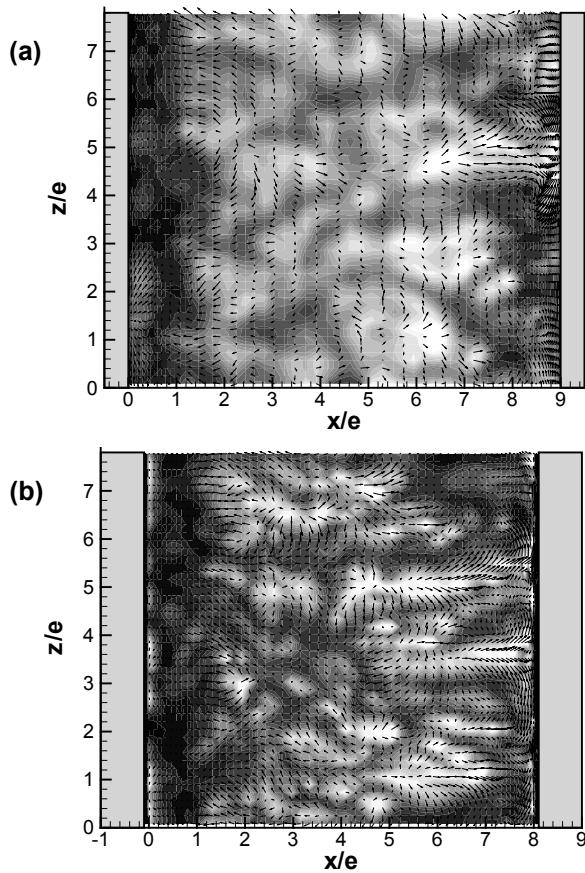


Fig. 7 Instantaneous velocity vectors with temperature contours in an xz plane at $y/e = 0.06$: (a) square rib; (b) semicircle rib

시하였다(Fig. 5). 두 형상 모두 Fig. 2와 같이 시간 평균한 유동장에 3개의 와류가 존재하므로 요철 사이 벽면의 열전달도 유사한 분포를 보인다. 요철의 앞 뒤로 날카로운 열전달계수의 극대점이 존재하고 $x/e = 3.5$ 부근에 넓게 열전달계수가 높은 영역이 형성되어 있다. 그러나 반원형상의 경우 요철 앞 뒤의 극대점이 정사각형요철만큼 날카롭지 않은 것을 관찰할 수 있다. 전체적으로 반원형 요철이 보다 균일한 열전달 분포를 보이고 있고 특히 요철 바로 뒤에서 정사각형 요철에 비해 높은 열전달을 보인다. 반원형 요철의 경우 Liou and Hwang⁽⁴⁾의 결과가 다른 결과에 비해 열전달이 낮게 나오는 것을 볼 수 있는데 Table 1에 정리한 변수들을 보면 반원형 요철의 성능이 보다 Reynolds수에 민감한 것으로 보인다.

안준⁽⁶⁾ 등은 순간유동장을 관찰하여 요철에 의해 발생한 와류들이 주유동을 벽면쪽으로 유입하고 유입된 차가운 유체가 요철면에 충돌하면서 열전달을 높이는 것을 보였다. LES에서 얻은 순간유동장을 관찰하여 이러한 메커니즘이 반원형요철의 경우에도 작용하는 것을 확인할 수 있었다. xy 평면

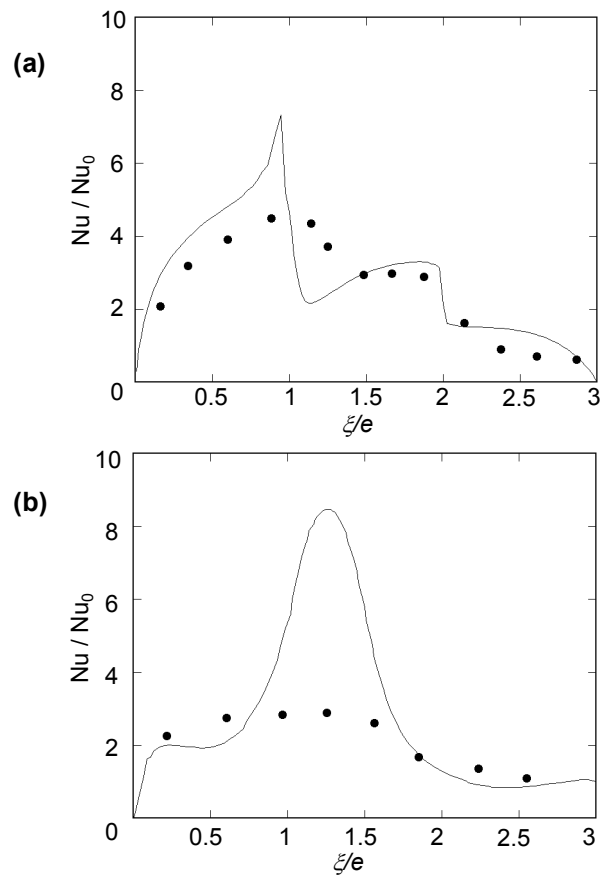


Fig. 8 Time-averaged heat transfer on the rib surface: (a) square rib; (b) semicircle rib. —, LES; ●, experiment by Liou & Hwang^[4]

에서의 순간속도벡터와 온도장(Fig. 6)을 보면 두 형상 모두 흰색 원으로 표시한 와류의 하향류와 평행류쪽으로 밝은 색으로 표시한 온도가 낮은 유체가 유입되는 것을 볼 수 있다. 벽면 근처 xz 평면에서(Fig. 7) 두 형상 모두 요철 앞에 정체점 유동의 형태를 보이는 곳에 폭방향으로 긴 온도가 낮은 구조가 존재한다. 그러나 두 형상의 속도벡터를 비교해보면 반원형상의 경우 충돌하는 움직임이 약해진 것을 관찰할 수 있다.

3.3 요철의 열전달

요철 사이의 벽면과 비교해도 무시할 수 없을 만큼의 열전달이 요철을 통해 일어나지만⁽⁵⁾ 지금까지 수행된 대부분의 연구들은 요철 사이의 열전달만을 다루어 왔다. 본 연구에서 정사각형 요철의 경우 24%의 열이 요철을 통해서 전달된다. 열전달성능이 높은 요철을 고안하기 위해서는 면적에 대해 평균한 열전달 뿐 아니라 요철면에서의 국소적인 열전달분포에 대한 이해가 필요하다. 이는 Fig. 8에 제시하였다. 좌표계 ξ 는 요철면을 따라 정의하였다.

Table 2. Rib performance

	Square	Semicircle
\overline{Nu}/Nu_0	2.49	2.56
Q/Q_0	3.29	3.28
f/f_0	11.4	9.97
$(Q/Q_0)/(f/f_0)^{1/3}$	1.46	1.52

정사각형 요철의 경우 (Fig. 8(a)), 요철의 모서리 위치($\xi/e = 1, 2$)에서 열전달이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 모서리에서 유동이 박리되기 때문인 것으로 보인다 (Fig. 2(a)). LES결과는 Liou와 Hwang⁽⁴⁾의 실험과 대체로 일치한다.

반원형 요철의 경우 요철면에 수직인 온도구배를 계산하여 열전달을 구하였다 (Fig. 8(b)). 요철의 높이가 곧 반원의 반지름이 되므로 ξ/e 는 라디안 단위의 각도가 된다. 요철에서 열전달은 요철 전향면 구석에서부터 70° 회전한 지점까지 증가하다가 감소한다. 유선을 보았을 때 (Fig. 2(b)), 반원형 요철의 경우 박리점은 후향면에 존재하므로 정사각형 요철과 달리 열전달계수의 극대점이 박리점과 일치하지 않는다. LES결과가 정량적으로 Liou와 Hwang⁽⁴⁾의 결과와 잘 일치하지는 않지만 두 결과 모두 열전달계수의 최대값은 전향면 쪽에 형성되어 있다.

많은 선행 연구들은 요철이 설치된 채널의 성능계수를 요철사이 벽면에서의 열전달만을 고려하여 계산하였다. 그러나 요철 자체의 열전달을 포함해야 성능을 보다 정확히 비교할 수 있다. 요철을 포함한 요철이 설치된 채널과 요철이 없는 매끈한 관의 열전달의 비율을 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\int Nu ds}{Nu_0 p} \quad (3)$$

압력강하를 포함한 결과를 Table 2에 정리하였다. 이때 \overline{Nu} 는 요철사이 벽면에서 평균한 Nusselt수를 의미한다. LES결과로부터 요철 자체를 포함한 전체 열전달량과 압력강하를 고려한 성능계수 ($= (Q/Q_0)/(f/f_0)^{1/3}$)를 구해보면 반원형 요철이 정사각형 요철보다 5%정도 높은 성능을 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 정사각형과 반원형 요철이 설치된 채널 내부의 유동 및 열전달을 LES를 통해 연구

하고 실험과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 정사각형요철에서 열전달을 증진시키는 메커니즘이 반원형요철의 경우에도 유효하다.
- (2) 반원형요철의 경우 정사각형 요철에 비해 구석와류가 약해지고 요철 앞에서의 폭방향 움직임이 약해진다.
- (4) 반원형요철은 정사각형 요철에 비해 열전달과 압력강하가 모두 감소하지만 이를 모두 고려한 성능계수는 5%정도 높게 예측되었다.

참고문헌

- (1) Lakshminarayana, B., 1996, *Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery*, Wiley, pp. 315-322
- (2) Han, J. C., 1984, "Heat Transfer and Friction in Channels with Two Opposite Rib Roughened Walls," *J. Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 744-781
- (3) Cho, H. H., Wu, S. J. and Kim, W. S., 1998, "A Study on Heat Transfer Characteristics in a Rib-Roughened Rectangular Duct," *Proc. 11th Int. Symp. on Transport Phenomena*, pp. 364-369
- (4) Liou, T.-M. and Hwang, J.-J., 1993, "Effect of Ridge Shapes on Turbulent Heat Transfer and Friction in a Rectangular Channel," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36(4), pp. 931-940
- (5) Taslim, M. E. and Korotky, G. J., 1998, "Low-Aspect-Ratio Rib Heat Transfer Coefficient Measurements in a Square Channel," *ASME J. Turbomachinery*, Vol. 120, pp. 831-838
- (6) 안준, 최해천, 이준식, 2003, "요철이 설치된 회전하는 채널 내부의 유동 및 열전달의 큰에디모사," 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp. 193-198
- (7) Germano, M., Piomelli, P., Moin, P. and Cabot, W. H., 1991, "A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model," *Physics of Fluids*, Vol. A 3, pp.1760-1765
- (8) Lilly, D. K., 1992, "A Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale Closure Model," *Physics of Fluids*, Vol. A4, pp. 633-635
- (9) Kim, J., Kim D. and Choi, H., 2001, "An Immersed-Boundary Finite-Volume Method for Simulations of Flow in Complex Geometries," *J. Computational Physics*, Vol. 171, pp. 132-150
- (10) Acharya, S., Dutta, S., Myrum, T. and Baker, R. S., 1993, "Periodically Developed Flow and Heat Transfer in a Ribbed Duct," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.36, pp. 2069-2082
- (11) Liou, T.-M., Yang, C.-P. and Lee, H.-L., 1997, "LDV Measurements of Spatially Periodic Flow Over a Detached Solid-Rib Array," *ASME J. Fluids Eng.*, Vol. 119, pp. 383-389