

요철이 설치된 회전하는 채널 내부의 유동 및 열전달의 큰에디모사

안준[†] · 최해천* · 이준식**

Large Eddy Simulation of Flow and Heat Transfer in a Rotating Ribbed Channel

Joon Ahn, Haecheon Choi and Joon Sik Lee

Key Words : Ribbed channel (요철이 설치된 채널), Large eddy simulation (LES, 큰에디모사), Heat transfer (열전달), Rotation (회전)

Abstract

A gas turbine blade has an internal cooling passage equipped with ribs, which can be modeled as a ribbed channel. We have studied a flow inside a ribbed channel using large eddy simulation (LES) with a dynamic subgrid-scale model. The simulation results are compared with the experimental ones. The turbulence intensity and local heat transfer near the rib have not been well captured by the conventional Reynolds averaged Navier-Stokes simulation (RANS). However, these variables obtained by the present LES agree well with those from experiments. From the instantaneous velocity and temperature fields, we explain the mechanisms responsible for the local peaks in the heat transfer distribution along the channel wall. We have also investigated the effect of rotation on the flow and heat transfer in the ribbed channel.

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

[†] 서울대학교 대학원

* 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

Flow conditions		Geometric parameters	
Re	30,000	AR(=W/H)	8 (experiment)
Ro	0, 0.1	∞ (LES)	
		p/e	10
		e/H	0.1

1. 서론

가스터빈의 입구 온도를 높임으로써 터빈효율을 높일 수 있다. 그러나 재료의 내열 한계때문에 온도를 높이기 위해서는 효율적인 냉각 방법이 필요하다. 이를 위해 가스터빈 블레이드 내부에 냉각을 위한 유로를 만들고 있으며 열전달을 촉진하여 냉각성능을 높이기 위해 유로 벽면에 요철을 설치하고 있다.⁽¹⁾ 가스터빈의 열전달 설계에 전산유체역학기법을 도입하면 개발에 필요한 막대한 비용과 시간을 절감할 수 있다. 실제 가스터빈의 운전조건을 실험적으로 구현하기 힘들고 가스터빈의 설계가 고도의 신뢰성을 요구한다는 점을 고려할 때 열전달을 정확히 예측할 수 있는 전산유체역학(Computational fluid dynamics: CFD)기법의 개발이 절실하다.

Acharya등⁽²⁾은 요철이 설치된 채널 내의 유동 및 열전달을 Reynolds평균 Navier-Stokes해석(RANS)으로 예측하고 실험과 비교하였다. 수치해석 결과, 시간에 대해 평균한 속도장은 비교적 잘 예측되었지만 난류강도나 열전달은 실험결과와 많은 차이를 보였다. 그들은 그 이유로 RANS가 큰 스케일의 유동현상을 반영하지 못하는 점과 경계층 내부를 해석하지 않고 벽함수(wall function)로 처리를 한 점을 들고 있다. 이러한 문제점들은 벽 근처에 충분히 많은 격자를 주고 큰에디모사(Large eddy simalon: LES)를 하면 발생하지 않는다. 본 연구의 첫번째 목표는 LES를 수행하여 RANS로 정확히 예측되지 않았던 유동 및 열전달 특성을 예측해 보는 것이다.

채널에 요철을 설치할 경우 요철과 요철 사이에 열전달의 극대값과 극소값들이 생긴다. 이러한 극대값과 극소값들은 RANS에 의한 해석에서 정확히 예측되지 않았을 뿐 아니라 형성되는 메커니즘도 정확히 밝혀지지 않고 있다. LES에서 얻어진 결과를 바탕으로 극소열전달분포를 설명해 보는 것이 본 연구의 두번째 목표이다.

지난 수 십년에 걸쳐 요철이 설치된 채널 내의 유동 및 열전달은 실험적, 수치적으로 활발히 연구되어 왔고 많은 자료들이 축적되었다. 그러나 열전달에 비해 공기역학 분야의 자료는 많이 부족하고 열전달의 경우에도 요철 사이의 벽면에 대한 자료는 많지만 요철 자체의 열전달 자료는 많지

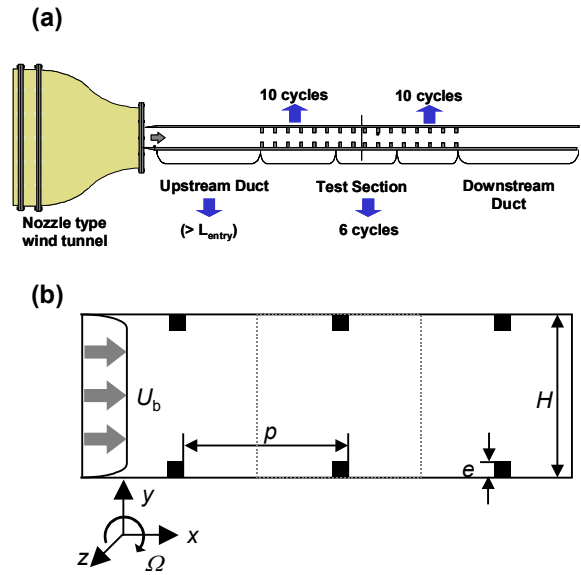


Fig. 1 Experimental setup and computation domain: (a) schematic of experimental setup; (b) computation domain

않다. 특히 난류 모형에 필요한 난류 응력이나 난류 열전달에 대한 자료는 매우 부족하다.⁽³⁾ 또한 회전하는 덕트에서의 자료도 정지된 덕트에 비해 부족하다. 세번째 목표로 본 연구에서는 LES를 통해 이러한 자료들을 제공하고자 한다.

본 연구에서는 요철이 설치된 채널의 기하학적 인 형상과 유동조건을 가스터빈 블레이드의 내부 관에서 볼 수 있는 전형적인 값(Table 1)으로 정하고 LES를 수행하였다. 먼저, 시간에 대해 평균한 유동장과 온도장, 열전달을 실험결과와 비교하여 LES가 요철이 설치된 채널의 유동 및 열전달 특성을 정확히 예측하는 지를 확인하였다. 그리고, 순간 유동장과 온도장을 관찰하여 요철사이 벽면에서 열전달의 극대값을 형성하는 메커니즘을 설명하였다. 마지막으로 덕트의 회전이 내부의 열전달에 미치는 영향에 대해 토의하였다.

2. 실험장치 및 수치해석 기법

2.1 실험장치

실험장치는 Fig. 1(a)와 같이 요철이 설치된 채널에 완전발달된 유동을 형성하여 유동장 및 열전달을 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 10 주기 이상의 요철이 설치되

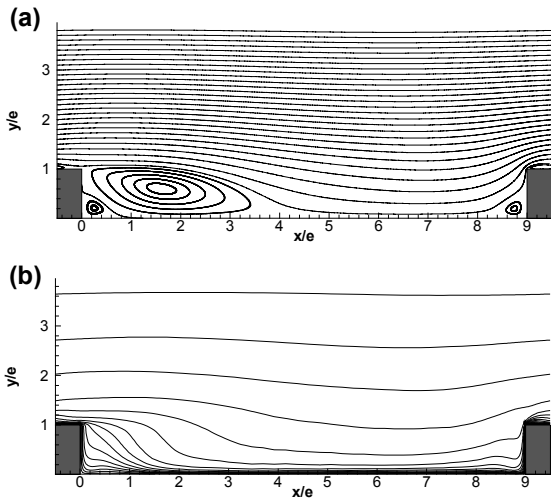


Fig. 2 Time-averaged flow and thermal fields: (a) streamlines; (b) isothermal lines

어 완전발달된 자료를 얻었다. 하류덕트에 10 주기의 요철을 더 설치하여 출구의 영향이 반영되지 않도록 하였다.

유동방향 속도와 난류강도는 I 형 열선유속계로 측정하였다. 온도분포는 벽면을 금박막필름으로 가열한 상태에서 T 형 열전대로 측정하였다. 수치 해석 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^(4,5))을 도입한 LES 기법으로 수치해석을 수행하였다. 부력과 온도에 따른 물성치 변화는 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 method 를 사용하였다. 주유동방향 (x)과 폭방

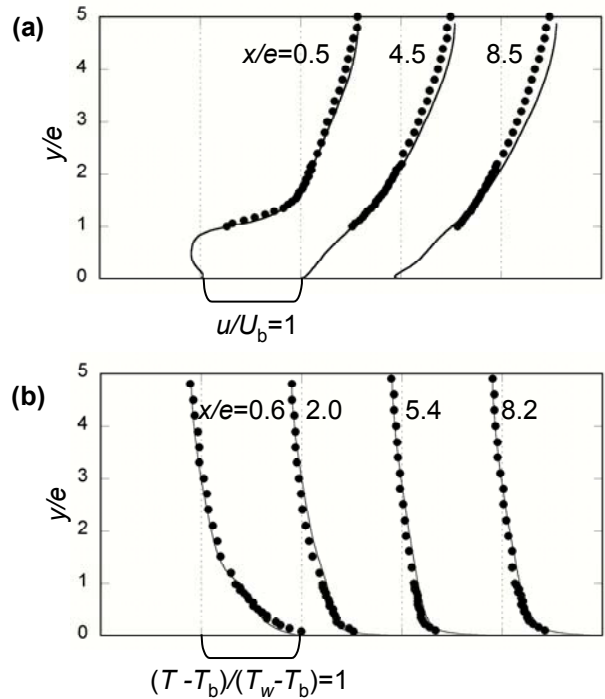


Fig. 3 Profiles of time-averaged streamwise velocity and temperature: (a) streamwise velocity; (b) temperature. — LES; ● experiment

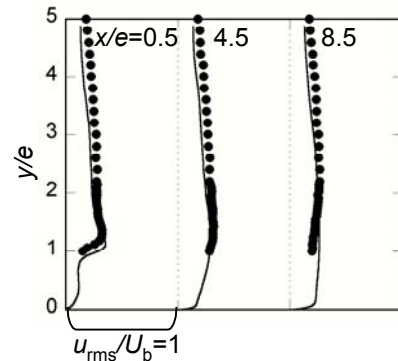


Fig. 4 Profiles of time-averaged turbulence intensity: — LES; ● experiment

향 (z)으로 주기조건을 부과하였고 채널벽면에서 접촉조건과 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 2.5배로 설정하여 2점상관(two-point correlation)이 0으로 수렴하도록 하였다. 계산영역에 128×128×48 격자를 사용하였다. 격자계의 해상도는 각각 Δx_{min} ≈ 0.0282e, Δy_{min} ≈ 0.0150e, Δz ≈ 0.163e 이다. 요철면을 따라 접촉조건과 등온

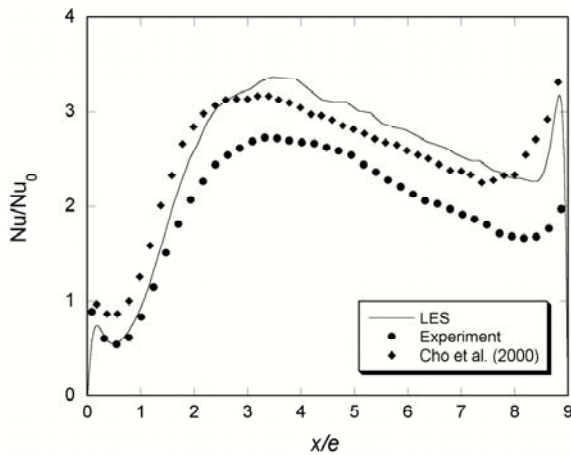


Fig. 5 Time-averaged heat transfer between the ribs

조건은 가상경계법⁽⁶⁾을 이용하여 부과하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 시간평균결과

시간평균된 유선을 보면 4가지의 와류를 관찰할 수 있다 (Fig. 2(a)). 요철 뒤로 재순환 와류가 있고 재순환 와류와 요철 사이에 구석와류 (corner vortex)가 있다. 요철의 상류쪽 구석에도 구석와류가 존재하고 마지막으로 요철의 상류쪽 모서리에서 유동이 박리되어 요철의 윗면에 와류가 형성되어 있다. 시간평균된 온도장 (Fig. 2(b))을 유선과 비교해보면 재순환 영역에서 등온선 간격이 넓은 것을 관찰할 수 있다. 이는 재순환 영역에서 다른 영역에 비해 열전달이 활발하지 않다는 것을 의미한다. 요철의 상류쪽과 하류쪽 구석에서 등온선이 강한 곡률로 휘어진 것을 관찰할 수 있는데 구석와류의 영향으로 판단된다.

실험과 비교했을 때, LES 가 시간평균된 온도장과 유동장을 정확하게 예측하는 것을 볼 수 있다 (Fig. 3). 요철 바로 뒤쪽 ($x/e = 0.5$)의 속도분포를 보면, RANS 에서는 실험값에서 벗어났던⁽²⁾ 요철높이 부근까지 LES 로 정확하게 재현되는 것을 확인할 수 있다. 온도를 주유동혼합평균과 벽면온도를 이용하여 무차원화하면(식 (2)), 벽면에서의 온도구배가 열전달율을 의미한다.

$$\Theta = \frac{T - T_b}{T_w - T_b} \quad (2)$$

$x/e = 0.6$ 위치는 시간평균된 유선(Fig. 2(a))에서 와류의 상향류가 존재하는 곳으로 벽면에서의 온도

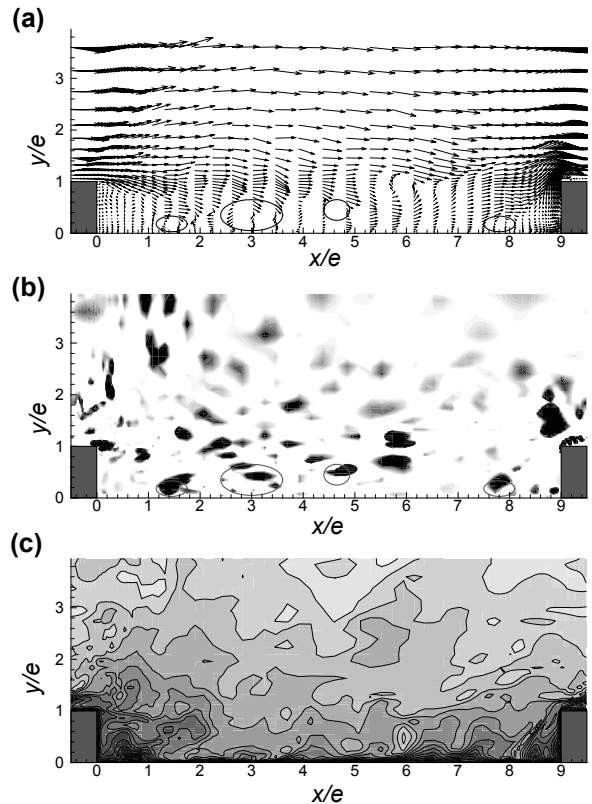


Fig. 6 Instantaneous flow and thermal structures in an xy plane: (a) velocity vectors; (b) contours of the second invariant of the velocity gradient tensor ($=Q$); (c) contours of temperature

구배가 다른 곳에 비해 특히 완만한 것을 관찰할 수 있다.

시간평균한 속도나 온도장에 비해 난류강도분포에서 RANS 와 실험이 큰 차이를 보인 바 있다.⁽²⁾ LES 로 계산한 결과 난류강도가 정확히 예측되었고 (Fig. 4), RANS 에서 예측하지 못했던 $x/e = 0.5$ 에서 요철 높이 부근에 형성된 난류강도의 극대점이 잘 예측되는 것을 관찰할 수 있다.

요철사이 벽면에서의 열전달분포 (Fig. 5)의 경우 LES 로 예측한 결과가 요철 뒤쪽에서는 실험과 잘 일치하지만 하류로 진행하면서 실험값보다 높게 나타났다. 그러나 나프탈렌 승화법을 채택한 선행연구⁽⁷⁾와 비교하면 하류쪽에서도 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 지금까지 RANS 로 잘 예측되지 않았던 요철 앞의 높은 열전달계수가 LES 로 잘 재현되는 것을 확인할 수 있다.

3.2 순간유동장 및 온도장

Panigrahi 와 Acharya⁽⁸⁾는 8 분면 해석을 통해 재순환영역 내부의 벽근처에서 유동방향이 변하는 것을 보고하였다. 이를 근거로 순간유동장에서는 요철에 의해 생성된 와류가 재순환영역 내부까지

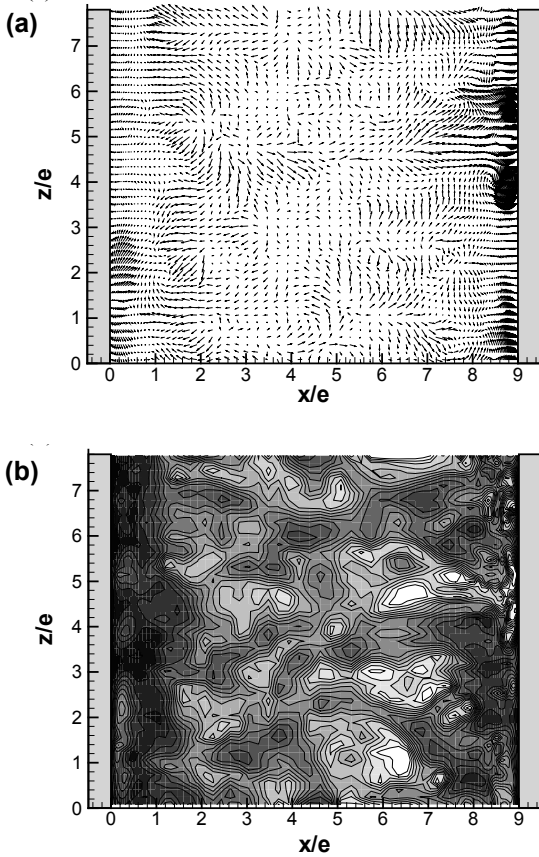


Fig. 7 Instantaneous flow and thermal structures in an xz plane at $y/e=0.6$; (a) velocity vectors; (b) contours of temperature

영향을 준다고 예측하였다. LES 를 통해 구한 xy 평면에서의 순간속도 벡터를 보면(Fig. 6(a)), 시간 평균한 재부착점 ($x/e \approx 4.5$)보다 앞에서부터 와류 구조가 존재하는 것을 볼 수 있다. 속도구배텐서의 2 차 불변량 (second invariant)으로 와류를 확인해 보면(Fig. 6(b)) 동그라미로 표시한 바와 같이 벽면 부근까지 많은 와류가 존재하는 것을 볼 수 있다. 같은 순간의 온도장을 보면 와류의 하향류에 해당하는 부분으로 차가운 유체(밝은 색의 등온면)가 유입되는 것을 관찰할 수 있다. 유입되는 방향을 보면 시간평균한 열전달계수의 극대값이 재부착점보다 요철 높이정도 상류쪽에 형성되는⁽⁷⁾ 이유를 알 수 있다.

벽면 근처 xz 평면에서 속도벡터와 온도장을 보면 유동이 매우 3 차원적임을 알 수 있다 (Fig. 7). 속도벡터를 보면 요철 앞면($x/e = 9$)에서 강한 3 차원적인 움직임이 있는 것을 관찰할 수 있다. 온도장을 보면 와류에 의해 유입된 차가운 유체에 의해 $x/e = 2 \sim 8$ 의 구간에 밝은 색의 등온면으로 보이는 구조들이 만들어 지는 것을 알 수 있다. 이러한 구조들은 요철을 만나면서 폭방향으로 긴 형

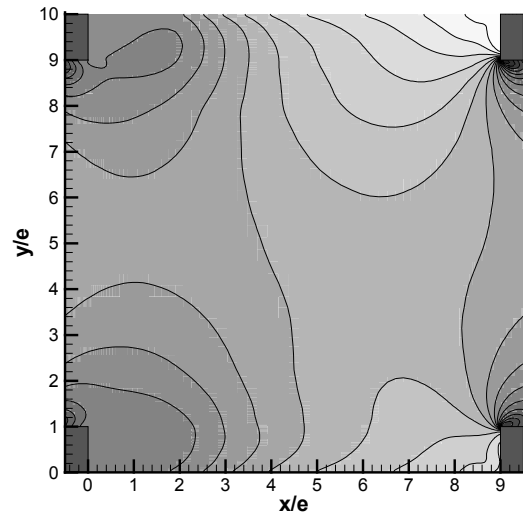


Fig. 8 Time-averaged pressure field inside the rotating ribbed duct

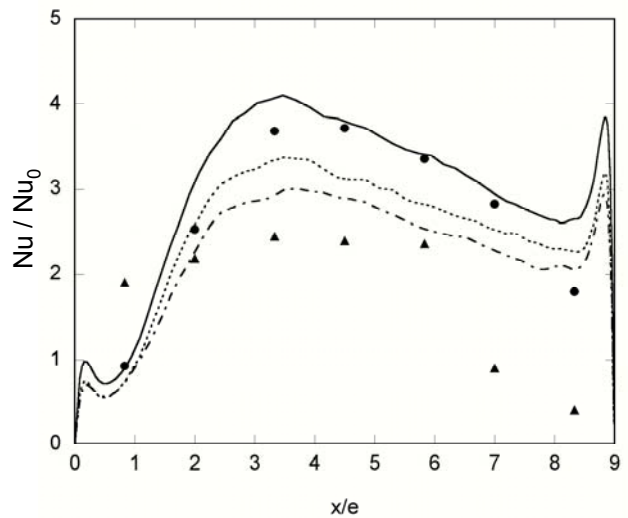


Fig. 9 Rotation effect on the heat transfer along the wall between the ribs: —, trailing wall, ---, leading wall, , stationary (LES); ●, trailing wall, ▲, leading wall (Experiment by Kim⁽⁹⁾)

태로 바뀐다. 요철 앞 $z/e = 5$ 부근에 주목하면 속도벡터는 정체점 유동의 형태를 보이고 그 위치에 온도장에 폭방향으로 긴 저온의 열적인 구조를 관찰할 수 있다. 이 구조는 요철 앞에서 와류에 의해 유입된 차가운 유체가 요철면에 충돌하면서 형성된 것으로 판단된다.

3.3 회전의 영향

회전의 영향은 Navier-Stokes 방정식에 Coriolis 력 항을 추가하여 모사하였다. Fig. 1(b)에 보인 바와 같이 xy 평면에 대해 시계방향으로 회전하도록

Coriolis 력을 부과하였으므로 바닥면($y/e = 0$) 선단면이 된다. 회전할 경우 채널 윗면의 압력이 높아져 시간평균한 압력장에서(Fig. 8) 윗면 쪽에 밝은 색으로 표시된 등압면이 더 넓게 형성되어 있는 것을 관찰할 수 있다.

회전에 의해 윗면의 압력이 높아지면서 벽근처의 난류 운동이 활발해지고 열전달이 증진된다(Fig. 9). 요철사이의 열전달분포로부터 LES 가 그러한 경향을 잘 예측하고 있음을 볼 수 있고, Kim⁽⁹⁾의 실험도 같은 경향을 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 요철이 설치된 채널 내부의 유동 및 열전달을 LES 를 통해 연구하고 실험과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) LES 에 의해 RANS 로 잘 예측되지 않았던 요철 주위의 난류강도나 요철 사이의 국소적인 열전달분포가 정확히 예측되었다.

(2) 주유동이 요철에 의해 형성된 와류를 따라 벽면으로 유입되면서 요철 사이 벽면에서의 열전달이 증진되므로 열전달의 극대값이 재부착점보다 상류에 위치한다.

(3) 와류에 의해 유입된 저온의 유체가 요철과 충돌하면서 요철 앞에서 열전달을 증진시킨다.

(4) $k-\epsilon$ 모형으로 고려할 수 없었던 회전의 영향은 LES 에서 잘 반영할 수 있고 회전을 할 경우 채널의 선미면에서 열전달이 증가하고 선단면에서

열전달이 감소한다.

참고문헌

- (1) Lakshminarayana, B., 1996, *Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery*, Wiley, pp. 315-322
- (2) 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
- (3) Srinivasan, V., Simon T. W. and Goldstein, R. J., 2001, "Synopsis," *Heat Transfer in Gas Turbine Systems*, New York Academy of Science, pp. 1-10
- (4) 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
- (5) Lilly, D. K., 1992, "A Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale Closure Model," *Physics of Fluids*, Vol. A4, pp. 633-635
- (6) 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
- (7) Cho, H. H., Wu, S. J. and Kwon, H. J., 2000, "Local Heat/Mass Transfer Measurements in a Rectangular Duct with Discrete Ribs," *J. Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 579-586
- (8) Panigrahi, P. K. and Acharya, S., 1999, "Mechanisms of Turbulence Transport in a Turbine Blade Coolant Passage with a Rib Turbulator," *J. Turbomachinery*, Vol. 121, pp. 152-159
- (9) Kim, Y.-Y., 2003, "Effect of Rib Arrangements and Rotation on Heat Transfer in a Rotating Two-Pass Duct," *M. S. Thesis*, Yonsei University