

요철이 설치된 채널 내에서 레이놀즈수와 열용량비에 따른 복합열전달 특성

송정철[†] · 안준* · 이준식**

Conjugate Heat Transfer Characteristics in a Ribbed Channel: Effect of Reynolds Number and Heat Capacity Ratio

Jeong Chul Song, Joon Ahn and Joon Sik Lee

Key Words : Conjugate Heat Transfer(복합열전달), Heat Capacity Ratio(열용량비), Reynolds Number(레이놀즈 수), Ribbed Channel(요철이 설치된 채널)

Abstract

Numerical simulations are conducted to analyze conjugate heat transfer characteristics in a ribbed channel. In this simulation, the effects of Reynolds number and heat capacity of the solid channel wall on convective heat transfer are observed in the turbulent flow regime. In the case of the conducting wall against isothermal wall, the relative ratio of the thermal resistance between the solid wall and the flow field varies with Reynolds number. Thus the characteristics of the conjugate heat transfer are changed with the Reynolds number. Heat capacity ratio affects the temperature fluctuation inside solid wall. The temperature fluctuation inside the solid wall decreases with increasing the heat capacity of the solid wall so that the convective heat transfer increases. When the thermal conductivity ratio is smaller than 10, the effects of flow characteristics on heat transfer are changed.

기호설명

c_p : 비열(J/kg K)
 D_h : 수력직경(m)
 e : 요철의 높이(m)
 h : 열전달계수 (W/m^2K)
 H : 채널의 높이(2δ)
 k : 열전도도 (W/mK)
 Pr : Prandtl 수
 Nu : Nusselt 수 ($= hD_h/k_f$)
 Re : Reynolds 수 ($= U_b D_h/\nu$)
 u_i : 직교좌표계 속도성분 (m/s)
 T : 온도 (K)

x_i : 직교좌표계
 L : 요철간격(m)
 s : 요철면을 따라 설정된 좌표
 K_s : 열전도도비(k_s/k_f)
 C_s : 열용량비 ($\rho_f \cdot c_{p,f} / \rho_s \cdot c_{p,s}$)
 $\overline{(\quad)}$: Grid-filtered 변수
 ω : 대류 보정인자
 ν : 동점성계수 (m^2/s)
 ρ : 밀도 (kg/m^3)
 θ : 무차원 온도($= (T-T_b)/(T_w-T_b)$)
 δ_1 : 고체벽의 두께 (m)

하첨자

f : 유체
s : 고체
w : 바닥벽
b : 주유동 혼합 평균
0 : 매끈한 원형관 내 완전발달 유동

[†] 서울대학교 대학원
E-mail : sjc7595@snu.ac.kr
TEL : (02)880-7123 FAX : (02)887-2486

* 한국 에너지 기술 연구원

** 서울대학교 기계항공공학부

1. 서론

가스터빈의 입구 온도를 높이면 터빈효율이 증가한다. 그러나 재료의 내열 한계 때문에 온도를 높이기 위해서는 효율적인 냉각 방법이 필요하다. 이를 위해 가스터빈 블레이드 내부에 냉각을 위한 유로를 만들고 있으며 열전달을 촉진하여 냉각 성능을 높이기 위해 유로 벽면에 요철을 설치하고 있다.⁽¹⁾ 요철은 유동을 교란하여 열전달을 증진시키면서 전열면적을 넓히는 편의 역할도 수행하게 된다. 채널 벽면에서의 열전달에 대해서는 난류발생체로서의 요철의 역할에 주목하여 많은 결과가 발표되었지만 요철 자체의 열전달을 다룬 연구는 소수에 머물고 있다.⁽²⁾

요철이 설치된 채널은 매끈한 채널과 달리 국소적으로 열전달계수가 크게 변하여 고체 내에서 열전도가 발생하여 등온조건이나 등열유속조건과 다른 대류열전달 특성을 보일 수 있다. 또한 요철 자체를 통한 열전달량을 정확히 예측하기 위해서도 요철 내에서의 열전도에 대한 연구가 필요하다. 최근 Song 등⁽³⁾은 가상경계법⁽⁴⁾을 기반으로 유효 열전도도를 도입한 복합 열전달 해석 기법을 이용하여⁽⁵⁾ 요철이 설치된 채널 내 난류 유동 조건에서 고체 벽의 열저항이 복합열전달에 미치는 영향에 대해 발표하였다. 고체 내 열전도를 고려할 경우 대류 열전달은 유체와 고체 사이의 열전도도비에 주로 영향을 받게 되지만, 난류 유동 조건에서는 유동장의 열저항과 고체 벽의 열저항의 사이의 비와 난류 유동 특성으로 인한 시간에 대한 고체 내 온도 변화에 의해 대류 열전달 특성이 달라질 수 있다.

이에 본 연구에서는 요철이 설치된 전형적인 가스터빈 블레이드 내부유로의 조건 (Table 1)을 갖는 채널 (Fig. 1)에 대해서 고체 내 열전도를 고려한 복합 열전달 해석을 수행, 선행 연구 결과⁽³⁾와

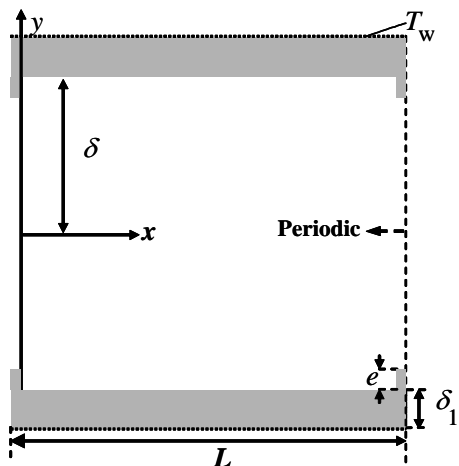


Fig. 1 Schematic diagram of the ribbed channel

비교 분석함으로써 유동 속도(Re)와 열용량비(C_s)가 복합 열전달에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 해석 결과를 통해 각각의 열전도도비에 대해 유동 속도와 열용량비에 의한 대류 열전달의 정량적, 정성적 변화를 비교 분석하였다. 마지막으로 유동 속도와 열용량비에 의한 총 열전달량의 변화에 대해 제시하였다.

2. 수치해석 기법

본 연구에서는 큰 에디 모사 기법(Large Eddy Simulation)을 도입, 다음과 같은 filter 를 취한 비압축성 Navier-Stokes 방정식과 에너지 방정식에 대한 수치해석을 수행하였다.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{1}{\text{Re Pr}} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

여기서 $\tau_{ij} (\equiv \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j)$ 와 $q_j (\equiv \overline{u_j \theta} - \bar{u}_j \bar{\theta})$ 는 각각 아격자 응력과 아격자 열유속으로 동적 아격자 모델^{(6),(7)}을 도입하여 구하였다.

복합 열전달 해석을 위해 운동량 방정식에 대해서는 Kim 등⁽⁴⁾이 제시한 바와 같이 고체 면에서 점착조건을 만족시키고 고체 내부에서 속도가 모두 0 이 되도록 고체 면과 고체 내부에 운동량과 질량을 부과하였다. 이 경우 고체 내부에서는 속도가 0 이 되어 식(3)의 에너지 방정식은 열전도 방정식이 된다. 에너지 방정식의 경우 고체 부분의 열물성을 반영하도록 다음과 같이 수정된 에너지 방정식을 사용하였다⁽⁵⁾.

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \omega \frac{\partial \bar{u}_j \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{C^* K^*}{\text{Re Pr}} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (4)$$

여기서 K^* 와 C^* 는 유체 영역과 고체 영역에서의

Table 1 Simulation conditions

H/e	L/e	δ_1/δ	Pr	Re	K_s	C_s	
10	10	0.62	0.71	7,000	566.26	1.0	
					100		
					10		0.00031
					1		

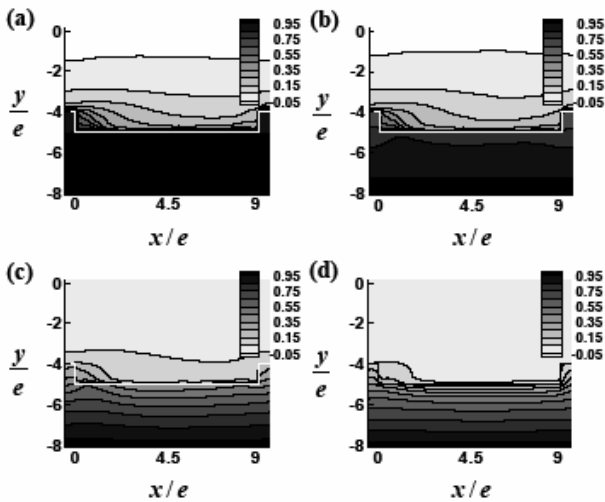


Fig. 2 Time averaged temperature contours at $Re = 15000$; (a) $K_s = 566.26$, (b) $K_s = 100$, (c) $K_s = 10$, (d) $K_s = 1$

열물성을 만족시키도록 도입한 계수로서, 유체 영역에서는 1 이며, 고체 내에서는 각각 K_s 와 C_s 가 된다. 경계면에서는 유효 열전도도(k_e)를 도입해 에너지 균형을 만족시키고 대류 보정인자(ω)를 도입하여 경계면에서의 전도를 독립적으로 고려하도록 함으로써, 하나의 계산 영역에서 전도-대류 복합열전달을 해석할 수 있도록 하였다⁽⁵⁾.

모든 공간 미분은 2 차 정확도를 가지는 중심 차분법에 의해 차분화하였다. 시간 적분 방법으로는 Crank-Nicolson 방법과 3 차 정확도의 Runge-Kutta 방법에 근거한 Semi implicit fractional step method 를 사용하였다. 계산영역의 경계조건은 주 유동 방향 (x)과 폭 방향 (z)은 주기 조건을, 수직 방향 (y)은 점착조건과 등온 조건을 부과하였다. 격자계는 엇갈림 격자계로 $128 \times 256 \times 48$ 의 비 정렬 격자를 사용하여 선행연구⁽³⁾와 동일한 해상도가 되도록 하였다. 선행 연구에서의 수치 해석 조건은 Table 1 과 같다. Table 1 에서 $K_s = 566.26$ 은 310-stainless steel 과 공기 간의 열전도도비이다.

3. 결과 및 토의

3.1 레이놀즈 수가 복합 열전달에 미치는 영향

채널 내 유동 속도가 변하면 유체 영역에서의 열 저항과 고체 내 열저항의 상대적 비율이 변하게 되어 복합 열전달 특성이 변할 수 있다. 따라서 선행 연구⁽³⁾와 동일한 조건에서 $Re = 7000$ 으로 수치 해석을 수행하여 Re 변화에 대한 복합열전달 변화를 관찰하였다.

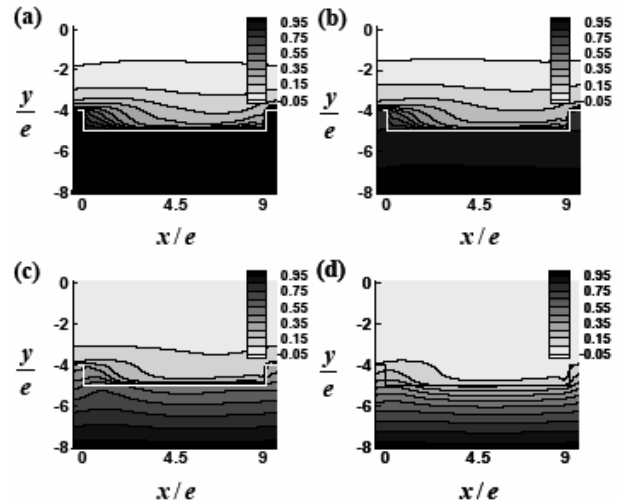


Fig. 3 Time averaged temperature contours at $Re = 7000$; (a) $K_s = 566.26$, (b) $K_s = 100$, (c) $K_s = 10$, (d) $K_s = 1$

선행연구결과⁽³⁾($Re = 15000$)에서 시간 평균한 온도장(Fig. 2)을 보면 열전도도비가 큰 경우($K_s \geq 100$) 대부분의 열저항이 고체 내에서 발생하여, 고체 내부는 균일한 온도분포를 갖고 대부분의 등온선은 고체 벽면 유체 영역에 집중적으로 분포하는 반면, 열전도도비가 작은 경우($K_s \leq 10$) 고체 내 열저항이 크게 되면서 전체적인 온도 변화는 고체 내부에서 발생한다. $Re = 7000$ 인 경우(Fig. 3) 전반적으로 이와 유사한 결과를 보이고 있으나 열전도도비가 작은 경우($K_s \leq 10$) $Re = 7000$ 일 때 요철 뒤쪽 재순환 영역에서의 온도가 $Re = 15000$ 인 경우에 비해 다소 큰 분포를 보인다.

Re 변화에 대한 국소적인 대류 열전달 변화를 Fig. 4-6 에 나타내었다. 여기서 Nu 는 고체 벽 바닥의 온도(T_w)와 주유동 혼합평균 온도(T_b)를 기준으로 정의되며, Nu_0 는 다음과 같이 정의되는 고체 내 열전도가 없는 매끈한 채널에서의 누셀수이다.

$$Nu_0 = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (5)$$

먼저 등온 경계조건에서 국소 열전달률(Nu/Nu_0) 분포(Fig. 4)를 보면, 국소적으로 다소 차이는 발생하나 전체적으로 Re 변화에 대해 매우 유사한 분포를 보여 열전달률이 Re 에 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 이와 달리 고체 내 열전도가 발생하는 경우에는 Re 변화에 대해 정량적인 변화를 관찰할 수 있다(Fig. 5 & 6). $Re = 7000$ 인 경우 유체 영역에서의 열저항에 대해 고체 내 열저항의 크기가 상대적으로 작아져 전체적으로 열전달률이 증가한다. 이러한 정량적인 증가는 $Re = 15000$ 인 경

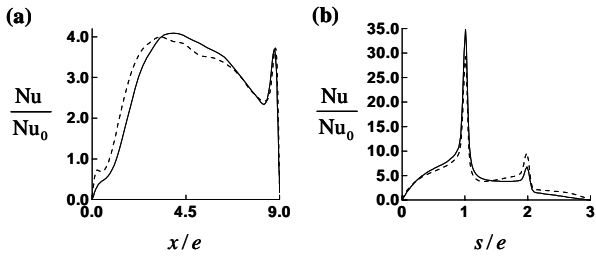


Fig. 4 Effect of Re on the local convective heat transfer distribution in the case of isothermal wall: (a) heat transfer along the channel wall between ribs, (b) heat transfer on the rib. — Re=7000, --- Re=15000

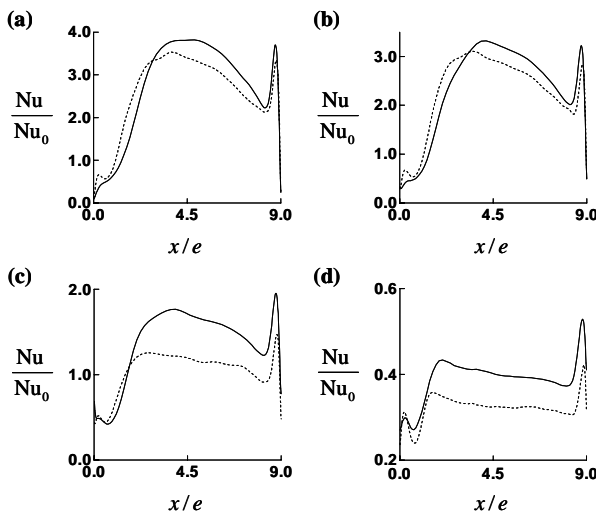


Fig. 5 Effect of Re on the local convective heat transfer along the channel wall between the ribs in the case of conducting wall; (a) $K_s = 566.26$, (b) $K_s = 100$, (c) $K_s = 10$, (d) $K_s = 1$; — Re=7000, --- Re=15000

우와 비교해 열전도도비가 작은 경우($K_s \leq 10$) 증가율이 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 국소적인 변화를 보면 열전도도비가 큰 경우 국소적인 열전달률 변화가 크게 나타나나 열전도도비가 작아짐에 따라 공간적으로 균일해지는 특징을 보인다. 특히 요철 면에서는 국소 열전달률이 열전도도비에 따라 상당히 다른 분포를 보이는데, 이러한 특징은 열전도도비가 감소함에 따라 차가운 유체의 충돌에 의한 영향이 감소하고 요철의 앞뒤로 존재하는 구석와류가 대류 열전달에 중요한 역할을 하기 때문이다⁽³⁾. 이러한 분포 경향은 전체적으로 $Re = 15000$ 인 경우⁽³⁾와 유사한 경향을 보여, 유동 속도 변화는 주로 대류 열전달률(Nu/Nu_0)의 정량적 변화에 영향을 주는 것을 알 수 있다.

Figure 7 에는 각 열전도도비에 대해서 Re 변화에 대한 총 열전달률(Q/Q_0) 변화를 나타내었다. 여기서 Q 와 Q_0 는 각각 다음과 같다.

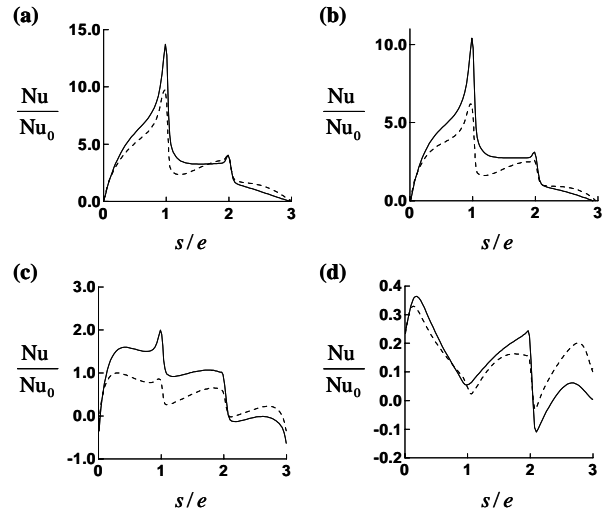


Fig. 6 Effect of Re on the local convective heat transfer on the rib in the case of conducting wall; (a) $K_s = 566.26$, (b) $K_s = 100$, (c) $K_s = 10$, (d) $K_s = 1$; — Re=7000, --- Re=15000

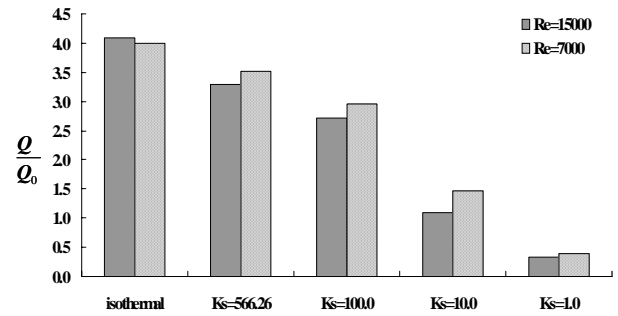


Fig. 7 Effect of Re on total heat transfer

$$Q = \int_{L+S} Nu dl \quad (8)$$

$$Q_0 = \int_L Nu_0 dl$$

총 열전달률 변화를 보면 등온 경계조건인 경우 각 Re 에 대해 총 열전달률이 거의 유사한 값을 가지나 고체 내 열전도를 고려할 경우 $Re = 7000$ 일 때 총 열전달률이 더 큰 것을 알 수 있다.

3.2 열용량비가 복합열전달에 미치는 영향

난류 유동의 경우 시간에 대한 유동 및 온도 변화가 크게 나타나고, 이러한 특징은 고체 내 온도 변화에도 영향을 준다. 고체 내부 온도의 시간에 대한 변화는 고체 내 평균 온도분포에 영향을 미쳐 대류 열전달률에 영향을 줄 수 있다. 이를 살펴보기 위해 선행 연구⁽³⁾와 동일한 조건(Table 1)으로 열용량비 $C_s=0.00031$ 에 대해 수치 해석을 수행하여 기존의 해석 결과⁽³⁾와 비교함으로써 고체 내 열용량 변화가 대류 열전달 변화에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 여기서 $C_s = 0.00031$ 는 310-

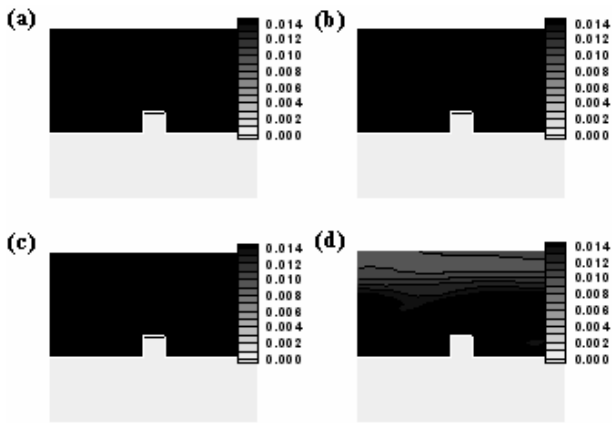


Fig. 8 Temperature fluctuation inside solid wall at $Re = 15000$ and $C_s = 0.00031$; (a) $K_s = 566.26$, (b) $K_s = 100$, (c) $K_s = 10$, (d) $K_s = 1$

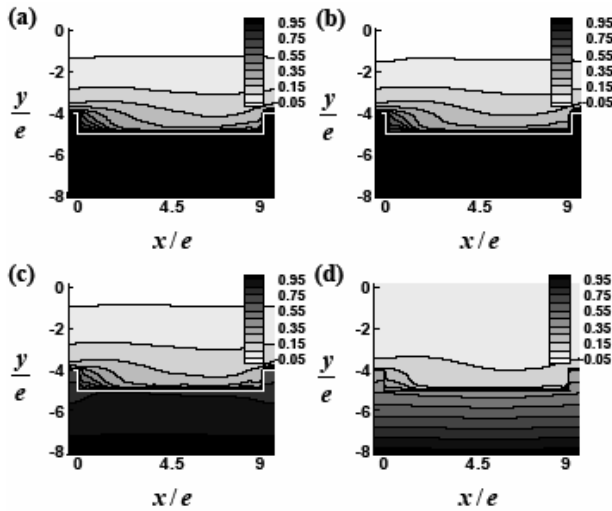


Fig. 9 Time averaged temperature contours at $Re = 15000$ and $C_s = 0.00031$; (a) $K_s = 566.26$, (b) $K_s = 100$, (c) $K_s = 10$, (d) $K_s = 1$

stainless steel 과 공기 간의 열용량비이다.

먼저 $C_s = 0.00031$ 인 경우 고체 내 온도 요동 (temperature fluctuation)을 Fig. 8 에 나타내었다. $C_s = 0.00031$ 인 경우 모든 열전도도비에 대해 고체 내 온도 요동이 유동 특성에 의한 영향을 거의 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서 이 경우 고체 벽이 보다 높은 온도를 유지할 수 있게 된다. Figure 9 에서 시간 평균한 온도장을 볼 수 있는데, $C_s = 1.0$ 인 경우⁽³⁾와 비교하여 전체적으로 고체 내 평균 온도분포가 증가한 것을 관찰할 수 있다. 각각의 열전도도비에 대해 살펴보면 열전도도비가 큰 경우($K_s \geq 100$) 고체 내 온도가 열용량비에 따라 큰 변화를 보이지 않고 있는 반면, 열전도도비가 작은 경우($K_s \leq 10$)에는 고체 내 온도가 크게 증가하여 유동 영역에서의 온도 분포에도 상당한 변화

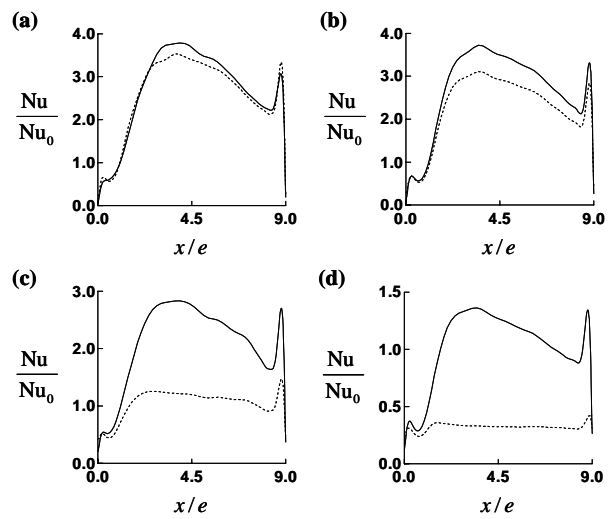


Fig. 10 Effect of Heat capacity ratio on the local convective heat transfer along the channel wall between the ribs at $Re = 15000$; (a) $K_s = 566.26$, (b) $K_s = 100$, (c) $K_s = 10$, (d) $K_s = 1$; — $C_s = 0.00031$, --- $C_s = 1.0$

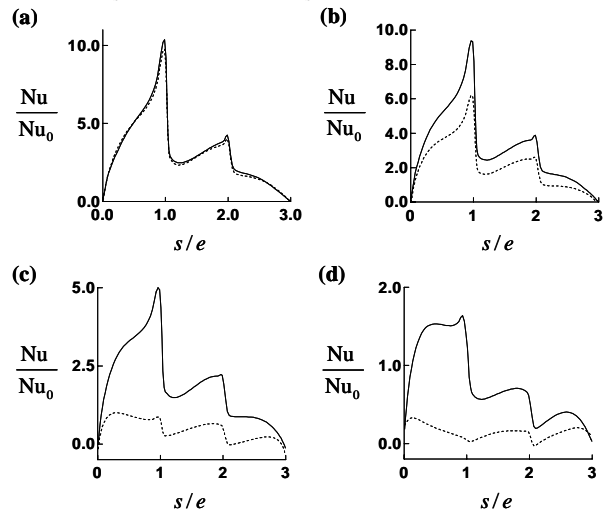


Fig. 11 Effect of Heat capacity ratio on the local convective heat transfer on the rib at $Re = 15000$; (a) $K_s = 566.26$, (b) $K_s = 100$, (c) $K_s = 10$, (d) $K_s = 1$; — $C_s = 0.00031$, --- $C_s = 1.0$

가 발생한다. 특히 유동의 재순환이 있는 영역에서의 온도 분포를 보면 $C_s = 1.0$ 인 경우⁽³⁾와 달리 요철 내 온도가 유체 영역보다 높게 증가한 것을 관찰할 수 있다.

고체의 열용량 변화가 대류 열전달에 미치는 영향은 Fig. 10-11 에서 비교하여 나타내었다. 정량적으로 고체 내 열용량이 증가하면서 전반적으로 열전달률이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 열전도도비가 작을수록 열전달률의 증가율이 커지는 것을 알 수 있다. 국소적인 분포 경향을 보면, 열전도도비가 큰 경우($K_s \geq 100$)에는 열용량비 변화에 의해

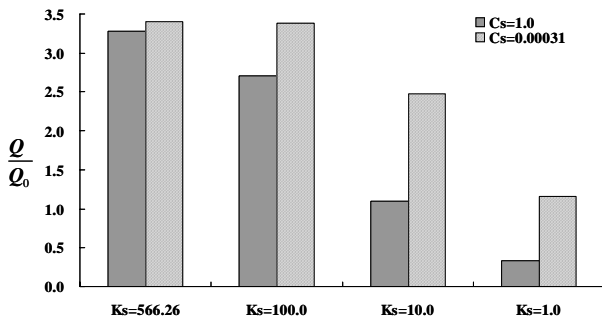


Fig. 12 Effect of heat capacity ratio on total heat transfer

국소적인 변화가 다소 크게 발생하나, 정성적으로 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 열전도도비가 작은 경우($K_s \leq 10$)에는 상당한 변화를 관찰할 수 있다. 요철과 요철 사이(Fig. 10)에서는 공간적으로 균일한 경향을 보인 기존의 결과($C_s = 1.0$)⁽³⁾와 달리 국소적인 변화가 크게 증가하여, 등은 경계 조건의 결과(Fig. 4(a))와 유사한 분포 경향을 갖는다. 요철 면에서의 대류 열전달 분포(Fig. 11)를 보면, 열전도도비가 작은 경우($K_s \leq 10$) 대류 열전달률의 국소적인 분포 경향이 $C_s = 1.0$ 인 기존 결과⁽³⁾와 비교하여 상당히 다른 경향을 갖는 것을 관찰할 수 있다. $C_s = 0.00031$ 의 경우, 요철의 상류쪽 모서리 근처에서 가장 큰 값을 보이면서 등은 경계조건의 결과(Fig. 4(b))와 유사한 경향을 갖게 된다. 특히 요철의 하류쪽 면($2 \leq s/e \leq 3$)에서 대류 열전달률은 $C_s = 1.0$ 인 경우와 달리 양의 값을 갖는 것을 관찰할 수 있어, 전체 열전달률이 더 크게 증가하게 됨을 알 수 있다.

열전도도비가 작은 경우($K_s \leq 10$) 발생하는 이러한 정성적인 변화는 고체 내부 온도 변화가 작아지기 때문으로 판단된다. $C_s = 1.0$ 인 경우 유동장에서의 차가운 유체 층들의 영향이 감소하고, 요철의 앞뒤로 발생하는 구석 와류가 요철 내부의 온도 변화에 크게 영향을 미쳐 대류 열전달에 중요한 역할을 하는 반면⁽³⁾, $C_s = 0.00031$ 의 경우에는 고체 내 온도가 증가와 함께 유체 영역에서의 공간적 온도변화 증가하여 차가운 유체 층들의 영향이 커지게 되고, 요철의 앞뒤 구석 와류가 요철 내부의 온도변화에 미치는 영향이 작아져, 대류 열전달에 중요한 역할을 하지 못하게 된다. 따라서 $C_s = 0.00031$ 의 경우에는 대류 열전달률이 정성적으로 등은 경계조건과 유사한 특징을 보이게 된다.

Figure 12에는 각 열전도도비에 대해서 열용량비 변화에 대한 총 열전달률 변화를 비교하여 나타내었다. 전체적으로 고체의 열용량이 큰 경우 총 열전달률이 증가하는 것을 알 수 있으며, 열전도도비가 작은 경우($K_s \leq 10$), 선행 연구 결과⁽³⁾와

비교하여 총 열전달률의 증가율이 더 크게 증가함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 레이놀즈 수와 고체와 유체 간의 열용량비가 복합열전달에 미치는 영향을 살펴보기 위한 수치 해석을 수행하여 선행 연구 결과와 비교함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) $7000 \leq Re \leq 15000$ 의 범위에서, 대류 열전달률(Nu/Nu_0)은 등은 벽면의 경우 레이놀즈 수 변화에 큰 영향을 받지 않는 것과 달리 고체 내 열전도가 있는 경우 대류 열전달률(Nu/Nu_0)이 레이놀즈 수가 작을 때 더 큰 값을 갖는다.
- (2) 고체의 열용량이 증가하면 고체 내 온도 요동이 감소하며, 이에 따라 평균 온도가 증가하여 대류 열전달률을 높인다. 이때 열용량에 대한 열전달률의 증가율은 열전도도비가 작은 조건($K_s \leq 10$)에서 더 크게 발생한다.
- (3) 열전도도비가 작은 경우($K_s \leq 10$) 고체의 열용량이 커지면, 차가운 유체 층들의 영향이 증가하고 요철 앞뒤로 발생하는 구석와류의 영향이 감소함에 따라 국소 대류 열전달률 분포가 등은 벽 조건의 결과와 유사해져 전체 열전달률이 더 크게 증가한다.

참고문헌

- (1) Lakshminarayana, B., 1996, *Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery*, Wiley, pp. 315-322
- (2) Srinivasan, V., Simon, T. W. and Goldstein R. J., 2001, "Synopsis," *Heat Transfer in Gas Turbine Systems*, R. J. Goldstein, ed., The New York Academy of Science, pp. 1-10
- (3) Song, J. C., Ahn, J. and Lee, J. S., 2007 "Thermal Resistance Effect of Solid Wall on Conjugate Heat Transfer in a Ribbed Channel," to be presented at 18th International symposium on Transport Phenomena, Daejeon, Korea
- (4) Kim, J., Kim, D. and Choi, H., 2001 "An Immersed Boundary Finite Volume Method for Simulations of Flow in complex Geometries," *Journal of Computational Physics*, Vol. 171, pp. 132-150
- (5) Song, J. C., Ahn, J. and Lee, J. S., 2006, "An immersed Boundary Method for Conjugate Heat Transfer Analysis," 17th International Symposium on Transport Phenomena, Toyama, Japan, TRB-24
- (6) Germano, M., Piomelli, P., Moin, P. and Cabot, W. H., 1991, "A Dynamic Sub-grid Scale Eddy Viscosity Model," *Physics of Fluids*, Vol. A3, pp. 1760-1765
- (7) Lilly, D. K., 1992, "A Proposed Modification of the Germano Sub-grid Scale Closure Model," *Physics of Fluids*, Vol. A4, pp. 633-635