

## 입구 유동 가진에 의한 사각 발열체 주위의 유동제어 및 열전달촉진 (II) 온도장 수치해석

리 광 훈<sup>†</sup>, 김 서 영\*, 성 형 진\*\*

서울시립대학교 기계정보공학과, \*KIST 열유동제어연구센터, \*\*한국과학기술원 기계공학과

### Flow Control and Heat Transfer Enhancement from a Heated Block by an Inflow Pulsation (II) Thermal Field Computation

Gwang Hoon Rhee<sup>†</sup>, Seo Young Kim\*, Hyung Jin Sung\*\*

Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea  
\*Thermal/Flow Control Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea  
\*\*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Taejon 305-701, Korea

(Received May 7, 2002; Revision received June 11, 2002)

**ABSTRACT:** The characteristics of a pulsating flow field and the associated thermal transport from a heated block representing heat dissipating electronic component in a channel have been numerically investigated. At the channel inlet a pulsating sinusoidal flow is imposed at a uniform temperature. The surfaces of the block are taken at a constant higher temperature. The channel walls are assumed to be adiabatic. Results on the time-dependent temperature field are obtained and averaged over a cycle of pulsation. The effect of the important governing parameters, such as the Strouhal number on the flow and the heat transfer is investigated in detail. The results indicate that the recirculating flow behind the block are substantially affected by the pulsation frequency. These, in turn, have a strong influence on the thermal transport from the heated element to the pulsating flow. The frequency at which the enhancement is maximum is determined.

**Key words:** Flow mixing(유동혼합), Forced convection(강제대류), Inflow pulsating(입구 유동 가진), Heat transfer enhancement(열전달촉진)

#### 기호설명

$h$  : 사각 발열체 높이 [m]

$H$  : 덕트 높이 [m]

$Nu$  : Nusselt 수,  $(\partial T / \partial Y)|_{at wall}$

$Pr$  : Prandtl 수,  $\nu/\alpha$

$Re$  : Reynolds 수,  $U_{\infty}H/\nu$

$St$  : Strouhal 수,  $\omega H/U_{\infty}$

$T$  : 무차원 온도

$U$  : 주유동방향 무차원 속도

$V$  : 벽면 수직방향 무차원 속도

$X$  : 주유동방향 무차원 위치

$Y$  : 벽면 수직방향 무차원 위치

#### 그리스 문자

† Corresponding author

Tel.: +82-2-2210-2181; fax: +82-2-2248-5110

E-mail address: ghrhee@uos.ac.kr

$\alpha$  : 열확산계수

$\nu$  : 동점성계수

$\omega$  : 각주파수

### 상첨자

' : 난류 유동

- : 시간 평균

### 하첨자

$o$  : 시간 평균값

$c$  : 대류속도

## 1. 서 론

고성능 반도체 소자에 대한 요구로 인하여 최근 유동변조(flow modulation)를 통한 효과적인 열제거를 위한 기법들이 연구되어지고 있다.<sup>(1-5)</sup> 이 기법들은 자연적으로 생겨나거나, 인위적인 강제교란에 의해 생겨나는 유동의 불안정성과 관련되어진다. 이 기법들의 물리적 배경은 전단층에서 발생하는 수동력학적 불안정성(hydro-dynamic instability)이 채널(channel) 내부의 가로 유동혼합(lateral flow mixing)을 증가시키고 대류 열전달을 증가시킨다는 것이다. Kim et al.<sup>(1)</sup>은 입구 유동이 주기적으로 가진되는 채널에 위치한 두 개의 고온 물체에서 발생하는 열전달현상을 해석하였다. 그들은 주파수 변화에 따른 열전달현상의 변화를 연구하여 특정 주파수에서 열전달이 촉진되는 것을 발견하였다. 또한 한 주기 동안 유동장과 온도장이 변화하는 현상을 도시하여 열전달촉진의 물리적 특성을 파악하였다.

CPU에 국부적으로 고온이 발생한다면 그 부분으로 인하여 전체 시스템은 정지하게 된다. 그런데, 재순환 영역에서는 고온의 유체가 정체되기 때문에 국소 고온이 발생한다.<sup>(6)</sup> 본 연구에서 다루고자 하는 유동은 이러한 재순환 영역이 발생하므로 이 부분에 대한 집중적인 해석이 필요하다. 요약하면 비정상, 2차원 타원형 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 방정식과 에너지 방정식을 이용하여 수치해석을 행하였다. 수치결과들은 가진 무차원 주파수(St)의 변화에 따라 도시되었다. 무차원 주파수에 따른 가진 유동장의 특성과 그에 따른 열전달 특성을 연구하였으며 열전달촉진에

대한 유동 가진 효과규명에 그 초점을 두고 있다.

## 2. 지배방정식과 수치기법

비압축성 비정상 유동에 대한 지배방정식은 Rhee et al.<sup>(7)</sup>에서와 같고 이러한 유동에서의 강제대류 온도장에 대한 지배방정식은

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial U_j T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{1}{\text{RePr}} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

이다. 위 식에서 Re은 레이놀즈수( $\text{Re} \equiv U_{o_m} H / \nu$ )를 나타내며, Pr은 프란틀수( $\text{Pr} \equiv \nu / \alpha$ )를 나타낸다. 여기에서  $U_{o_m}$ ,  $H$ ,  $\nu$ ,  $\alpha$ 은 각각 입구에서의 평균 속도, 입구에서의 높이, 점성계수, 열확산계수를 나타낸다.

유동장에 대한 경계조건은 Rhee et al.<sup>(7)</sup>에서와 같으며 온도장의 입구 경계조건은

$$T(t) = 0 \quad (2)$$

와 같이 일정한 온도로써 주어지고, 사각 발열체면을 제외한 벽면에서는 열전달이 발생하지 않는 단열(adiabatic) 조건이

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (3)$$

와 같이 주어진다. 이때  $n$ 은 벽면 수직방향이다. 사각 발열체 내부와 표면에서는

$$T(t) = 1 \quad (4)$$

과 같이 일정한 온도조건으로 주어진다.

출구에서의 온도장에 대한 경계조건은 대류 경계조건(convective boundary condition)으로 주어졌다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U_c \frac{\partial T}{\partial X} = 0 \quad (5)$$

여기에서  $X$ ,  $U_c$ 는 주 유동방향의 좌표와 대류속도를 의미한다. 본 연구는 Rhee et al.<sup>(7)</sup>에서 해석

한 유동장에 대해 수동 스칼라(Passive scalar)로서 온도장을 해석하였다. 또한 사용한 수치적 기법은 Rhee et al.<sup>(7)</sup>과 동일하다.

### 3. 입구 가진에 의한 열전달촉진

강체대류 열전달의 경우 온도장은 유동장의 영향을 강하게 받는다. 경계층 등의 단순한 유동에서는 온도장을 별도로 해석하지 않고도 레이놀즈 상사 법칙에 의하여 온도장의 특성을 예측할 수 있다. 그러나 Rhee and Sung<sup>(6)</sup>에서와 같이 압력 구배의 변화가 심한 재순환 영역 등에서는 레이놀즈 상사가 성립되지 않기 때문에 벽면 마찰계수와 벽면 열전달량이 비례한다고 가정하는 것은 타당성이 없다. 그러므로 입구 가진에 의한 열전달촉진 현상의 규명을 위해서는 유동장 해석과는 별도로 온도장의 해석이 필수적이다.

### 3.1 Nusselt 수의 변화

벽면에서의 열전달량을 나타내는 Nusselt 수의 변화가 무차원 주파수의 변화에 따라 Fig. 1에 도시되어 있다. Rhee et al.<sup>(7)</sup>은 입구에서 유동 가진을 가할 때, 물체의 높이에 관계없이 상사성이 적용되는 영역이 존재하며, 상사 영역에서의 유동해석을 위하여  $h/H=0.25$ 인 경우에 대하여 주로 분석하였다. 하류 벽면의 Nu 수를 나타내는 Fig. 1(c)를 보면  $h/H=0.5$ 인 경우에는 Rhee et al.<sup>(7)</sup>이 언급한 바와 같이 와병합(Vortex merging) 현상이 발생하여  $St=0.3$  이상에서는 상사성이 없어지고 유동변화로 인하여 Nu 수의 분포가 두 개의 극대값을 가지는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 1(b)에서와 같이 상사성이 적용되는  $St=0.3$  이하에서는 Rhee et al.<sup>(7)</sup>의 유동장과 유사하게 거의 변화가 발견되지 않고, 와병합이 발생하여

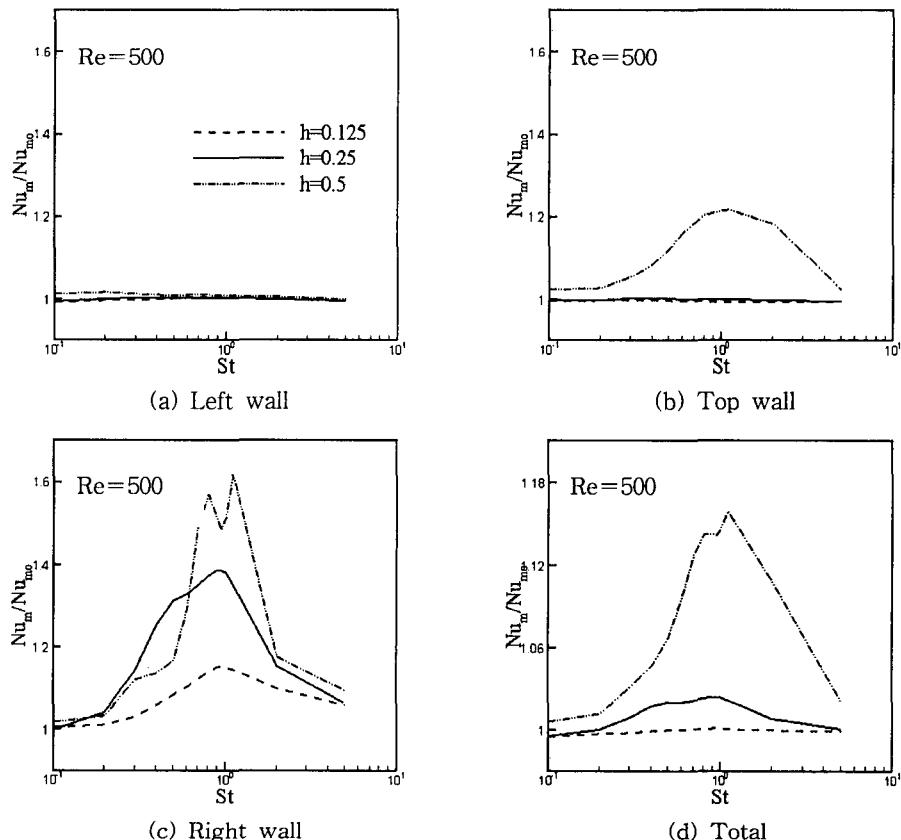


Fig. 1 Effect of Strouhal number on heat transfer enhancement factor at (a) left wall; (b) top wall; (c) right wall; (d) all walls.

상사성이 사라지는 영역에서는 윗 표면에서의 열전달이 측정되는 것을 알 수 있다. 그리고 발열체의 높이가  $h/H=0.125$ 이고 저주파인 경우에는 Rhee et al.<sup>(7)</sup>의 유동장 해석에서 재부착 길이가 길어지는 영역이며, 이 영역도 상사성이 적용되지 않는 영역이다. 그러나, 주파수가 증가함에 따라 상사성이 적용되는 영역에서는  $h/H=0.25$ 와 유사한 Nu 수의 분포를 가짐을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 Rhee et al.<sup>(7)</sup>의 유동장 해석을 바탕으로 상사성이 적용되는 대표적인 경우인  $h/H=0.25$ 의 경우에 대하여, 유동장이 가장 조직화되는  $St=0.4$ 와 열전달이 가장 측정되는  $St=1.0$ 을 중심으로 분석하고자 한다.  $h/H=0.25$ 의 경우를 살펴보면 조직화된 유동구조가 사각 발열체의 하류 표면에 가장 많은 영향을 주는 무차원 주파수인  $St=1.0$ 에서 가장 열전달촉진 효과가 강하게 나타나고 있다. 또한 유동구조가 가장 조직화되는 무차원 주파수인  $St=0.4$ 에서도 극대값을 보여주고 있다.  $h/H=0.25$ 의 경우를 포함한 상사 영역에서는 Fig. 1의 (a)와 (b)에서와 같이 발열체의 상류 표면과 윗 표면에서는 열전달촉진 효

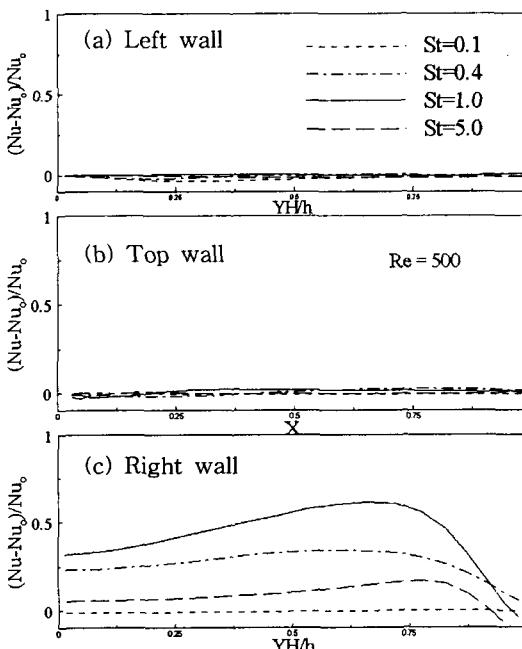


Fig. 2 Spatial distributions of heat transfer enhancement factor at (a) left wall; (b) top wall; (c) right wall.

과가 거의 나타나지 않고 있다. 그러나 Fig. 1(c)에서는 열전달촉진 효과가 강하게 나타나고 있다. 사각 발열체 표면 전체에서의 평균 Nusselt 수의 분포를 나타낸 Fig. 1(d)에서와 같이 사각 발열체 하류 벽면에서의 열전달촉진이 전체 열전달촉진에 중요한 영향을 주고 있다. 이러한 현상은 국부적인 고온이 문제가 될 수 있는 반도체 칩과 같은 경우에서는 Fig. 1(c)에 나타난 발열체 하류에서의 열전달분포가 중요하다는 것을 보여준다.

Fig. 2에서의 벽면 열전달량 분포는 Rhee et al.<sup>(7)</sup>에서의 벽면 마찰계수와 전체적으로 유사한 양상으로 나타나고 있다. 물체의 상류 표면과 윗 표면에서는 입구 가진이 없는 경우와 유사하게 나타나는데 이는 Rhee et al.<sup>(7)</sup>에서의 벽면 마찰계수 분포와 유사하다. Rhee et al.<sup>(7)</sup>의 Fig. 5에서와 같이 사각 발열체의 상류 표면과 윗 표면에서는 시간의 변화에 따라 유동구조가 변화하지 않지만 사각 발열체의 하류 벽면 근방에서는 유동구조가 심한 변동을 일으키고 있다. 열전달촉진 효과는 이러한 유동구조의 조직화에서 기인됨을 알 수 있다. 하류 영역에서는 유동장에서 재부착 길이가 가장 단축되는  $St=0.4$ 에서도 벽면 열전달이 다소 측정되고, Rhee et al.<sup>(7)</sup>에서 벽면 근방의 유동변화가 심한  $St=1.0$ 에서 가장 많은 열전달촉진이 이루어지고 있음을 알 수 있다.  $St=1.0$  이상에서는 주파수가 증가함에 따라 열전달촉진 효과는 점차 감소하고 있다. 무차원 주파수가 무한대로 증가하게 되면, 벽면 열전달 현상이 입구 가진이 없는 경우로 근접해 감을 알 수 있다.

Fig. 3에서는 한 주기 동안 물체의 전체 표면에서의 Nu 수의 평균값이 변화하는 모습을 위치

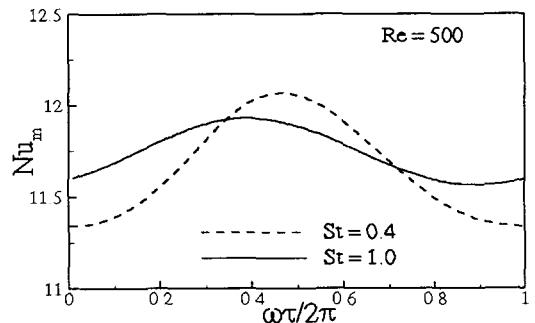


Fig. 3 Time-dependent variations of  $Nu_m$  at  $Re=500$  and  $h/H=0.25$ .

의 변화에 따라 보여주고 있다. Rhee et al.<sup>(7)</sup>에서 언급한 유동구조가 가장 조직화되는 St=0.4에서 Nu 수의 변화가 가장 크게 나타난다. 그러나 주파수가 점차 증가함에 따라 그 변화폭은 줄어든다. 그러나 Nu 수의 평균값은 St=1.0일 경우에 가장 증가하게 된다. Fig. 3에서의 Nu 수는 입구 가진과 동일 위상이 아닌 일정한 위상 차를 가지면서 변화하고 있다. 이러한 현상은 특정 주파수 범위 내에서만 입구 가진이 유동장에 강한 영향을 주는 유동공조현상을 일으키고, 이에 따라 온도장의 한 주기 내에서의 변화도 증가하게 된다.

### 3.2 입구 가진에 의한 위상 평균 온도장 변화

Fig. 4와 Fig. 5에서는 위상 평균 온도장이 한 주기 동안의 변화하는 것을 보여주고 있다. Fig. 4는 St=0.4의 경우이며, Fig. 5는 St=1.0인 경우이다. 위상 평균 온도장은 Fig. 4의 St=0.4인 경우의 평균 온도장의 변화는 Fig. 5의 St=1.0인 경우에 비하여 크게 나타나고 있다. 그러나 벽면 열전달량을 나타내는 Nu 수에 직접적으로

영향을 미치는 박리점 부근에서는 St=1.0인 경우에 유동구조가 더 크게 나타나고 있다. 특히 Fig. 3에서 벽면 열전달계수가 최저점 부근인  $\omega\tau = \pi/3$ 에서는 물체의 하류 표면 부근에서의 등온도선이 Fig. 4에 비하여 밀집되어 있고, 이는 온도구배가 크다는 것을 의미하며 벽면 열전달량이 증가한다는 것을 나타낸다. 이러한 현상은 온도장의 주기적인 성분이 유동장의 주기적인 성분과 결합하여 강한 열전달촉진 현상에 의해 기인된 것이다.

### 3.3 입구 가진에 의한 $\overline{V'T'}$ 의 변화

속도성분과 온도를 시간 평균값과 위상에 따른 변화량으로 분리하면,

$$\begin{aligned} U_i(t) &= \overline{U_i} + U'_i(t) \\ T(t) &= \overline{T} + T'(t) \end{aligned} \quad (6)$$

와 같이 표현할 수 있다. 이때 식(1)은 다음과 같이 표현된다.

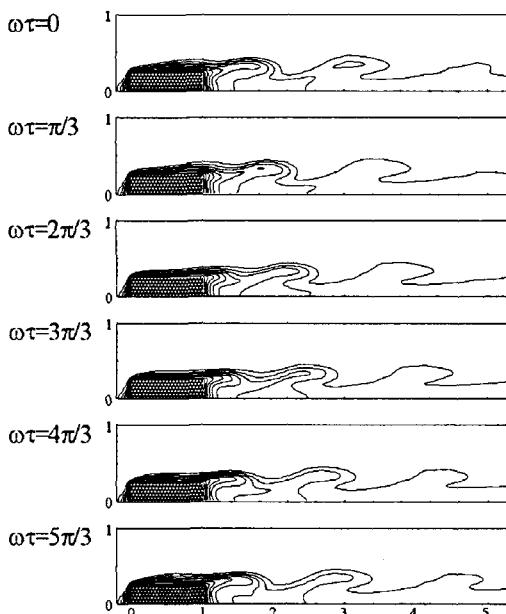


Fig. 4 Time-dependent distributions of temperature at  $Re=500$ ,  $h/H=0.25$  and  $St=0.4$ .

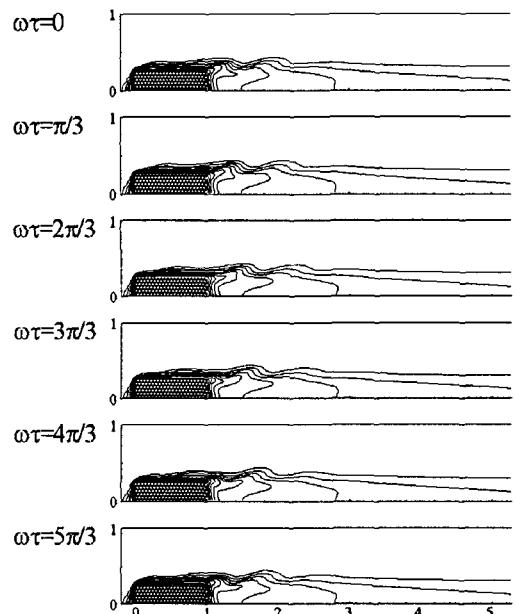


Fig. 5 Time-dependent distributions of temperature at  $Re=500$ ,  $h/H=0.25$  and  $St=1.0$ .

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\bar{T}+T')}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{ (\bar{U}_j + U'_j)(\bar{T}+T') \} \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{1}{RePr} \frac{\partial(\bar{T}+T')}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

한 주기 동안의 평균을 취하면,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{ \bar{U}_j \bar{T} + \bar{U}'_j T' \} \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{1}{RePr} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

여기에서, 시간 평균값들의 곱들의 평균값은 시간 평균값들의 곱, 즉  $\overline{\bar{U}_j \bar{T}} = \bar{U}_j \bar{T}$ 으로 표현할 수 있다. 식(8)을 다시 정리하면,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{ \bar{U}_j \bar{T} \} \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{1}{RePr} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \bar{U}'_j T' \right] \end{aligned} \quad (9)$$

이다. 이때,  $-\bar{U}'_j T'$ 은 난류 강제대류에서의 레이놀즈 열유속과 같이 시간 평균 온도장 방정식에서 열유속의 추가적인 확산항으로 작용하게 된다. 이 추가적인 확산항은 온도구배에 의한 열유속이 아닌 유동혼합(Flow mixing)에 의한 열유속이라고 할 수 있다.

Fig. 6에서는 주유동 방향에 수직인 속도성분의 주기적 성분과 온도의 주기적 성분의 상관량인  $-\bar{V}'T'$ 의 분포를 무차원 주파수의 변화에 따라 도시하고 있다.  $-\bar{V}'T'$ 는 사각 발열체의 윗 표면에서의 벽면 수직방향의 열전달량의 주기적인 성분을 나타낸다. 무차원 주파수에 관계없이 사각 발열체의 윗 표면에서는  $-\bar{V}'T'$ 의 변화가 없다는 것을 보여준다. 박리점 이후의 전단 영역에서는 뚜렷한 분포를 나타내고 있는데 양의 값을 가지는 부분에서는 재순환 영역에서 자유 전단 영역으로 열전달이 활발히 발생하고 있다고 할 수 있다. St=0.4인 경우에는  $-\bar{V}'T'$ 의 변화가 비교적 넓은 영역에서 발견되고 있으나 그 값이 음의 값을 나타내고 있고, 양의 값을 보이는 영역은 사각 발열체의 하류 벽면에서 거리가 멀

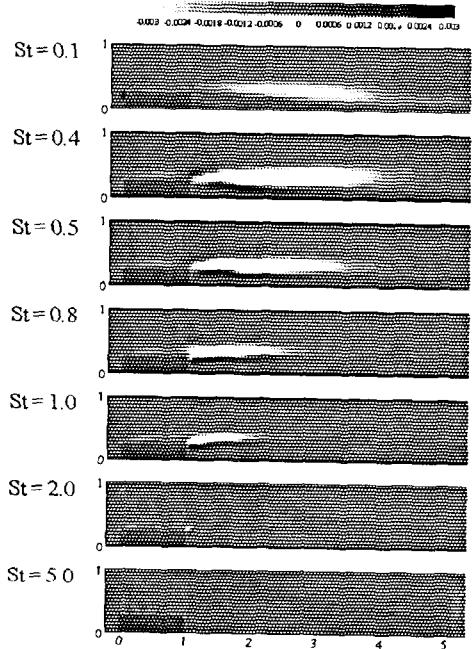


Fig. 6 Distributions of  $-\bar{V}'T'$  at  $Re=500$  and  $h/H=0.25$ .

어져 있다. St 수가 증가함에 따라,  $-\bar{V}'T'$ 의 변화가 활발한 영역의 크기는 줄어들고 St=2.0 이상에서는  $-\bar{V}'T'$ 의 변화가 거의 관찰이 되지 않고 있다. St=1.0인 경우에는  $-\bar{V}'T'$ 의 변화 영역이 St=0.4인 경우에 비하여 상대적으로 협소하다. 그러나 하류 벽면 근방에서 양의 값이 뚜렷이 관찰되고 있다. 이 영역은 열전달의 주기적 성분이 강한 부분이며 주기적 성분으로 인하여 평균 유동장의 열전달촉진에 영향을 준다고 사료된다.

주유동 방향과 수직을 이루는 속도성분의 주기적인 성분과 온도성분의 주기적인 성분의 상관량인  $-V'T'(t)$ 의 한 주기 동안의 변화를 Fig. 7과 Fig. 8에서 보여주고 있다. 주유동 방향에 수직방향의 열전달량의 주기적인 성분을 나타내는  $-V'T'(t)$ 는 박리점에서부터 생성되어 점차 하류로 전파되고 있다. Fig. 7에서는 유동이 가장 조직화되는 무차원 주파수 St=0.4에서  $-V'T'(t)$ 의 변화를 나타나고 있다. Rhee et al.<sup>(7)</sup>에서는 St=0.4인 경우의 유동구조가 가장 조직화된다고 언급하였다. 열유속의 경우에도 이러한 유동장의

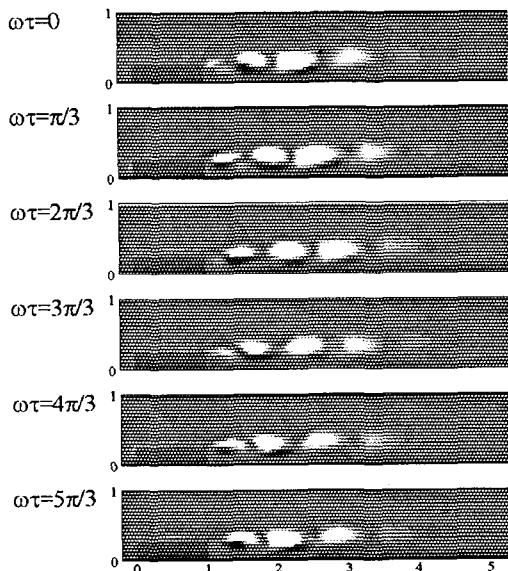


Fig. 7 Time-dependent distributions of  $-V' T'$  ( $t$ ) at  $Re=500$ ,  $h/H=0.25$  and  $St=0.4$ .

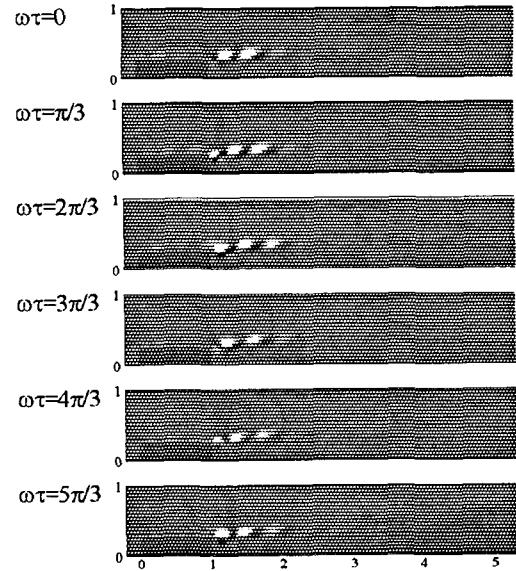


Fig. 8 Time-dependent distributions of  $-V' T'$  ( $t$ ) at  $Re=500$ ,  $h/H=0.25$  and  $St=1.0$ .

영향을 그대로 받아서 큰 구조의 열유속 현상이 규칙적으로 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 8에서는 Rhee et al.<sup>(7)</sup>의 유선함수 변화에서 활발한 유동구조를 보이고 있는  $St=1.0$ 에서의  $-V' T'(t)$ 의 변화를 나타내고 있다. Rhee et al.<sup>(7)</sup>에 의하면  $St=1.0$ 인 경우에는 하류 벽면 근방에서의 유동이 다른 주파수에 비하여 활발한 움직임을 보이고 있는데, 이러한 유동현상은 Fig. 8의  $-V' T'(t)$ 의 변화에도 영향을 주고 있다. 박리점 부근에서 양의 값을 보이는 영역이 시간의 경과에 따라 연속적으로 변화하고 있다. 이러한 현상은 시간 평균을 취한 값인 Fig. 6에서도 전단층 상하에 각각 음의 영역과 양의 영역을 지닌 열유속 구조의 주기적 성분을 관찰할 수 있다. 그러나, 이 주기적 성분은 Fig. 8과 같은  $St=1.0$ 에서 온도장에 가장 큰 영향을 주고, 무차원 주파수가 증가함에 따라 점차 소멸되는 것을 Fig. 6에서와 같이 관찰할 수 있다.

### 3.4 입구 가진에 의한 $\overline{U' T'}$ 의 변화

Fig. 9에서는 주유동 방향 속도 성분의 주기적 성분과 온도의 주기적 성분의 상관량인  $\overline{U' T'}$ 의 분포를 무차원 주파수에 따라 보여주고 있다.

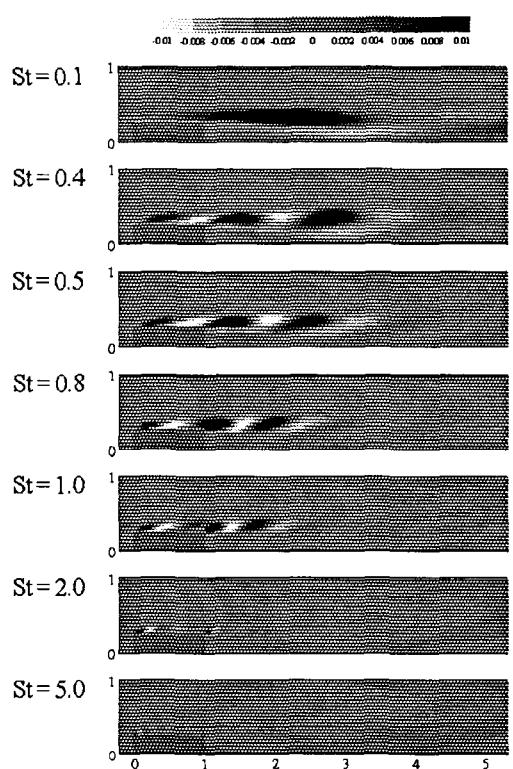


Fig. 9 Distributions of  $\overline{U' T'}$  at  $Re=500$  and  $h/H=0.25$ .

–  $\overline{U' T}$ 는 유동공조에 의해 발생하는 주유동 방향으로의 추가적인 열전달량이라 할 수 있다. 이 값은 주 유동 방향의 추가적인 열전달량이기 때문에 사각 발열체에서 하류로 전달되는 열전달에 영향을 미친다고 할 수 있다. Fig. 9에서는 양의 값과 음의 값이 반복적으로 발생하고 있고, –  $\overline{V' T}$ 에서와 같이 전단층에서 값의 변화를 뚜렷이 보여주고 있다. 윗 벽면에서의 열전달량의 변화는 거의 나타나지 않고 있다. 이러한 사실은 Fig. 1과 Fig. 2에서의 결과와도 일치한다. 그리고 양의 영역과 음의 영역이 반복되어 나타나기 때문에 윗 벽면 전체의 평균량은 큰 변화를 나타내지 않는다. 저주파 영역에서는 박리점 이전에서부터 발견되는 양의 영역이 박리 전단층에 걸쳐 분포하고 있다. 그러나,  $St=1.0$ 에서의 박리점 부근을 살펴보면 이러한 양의 영역을 나타내는 열유속의 구조가 분리되어 하류 벽면에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은  $St=1.0$ 에서 가장 강하게 나타나고, 고주파 영역에서는 이러한 영역이 점차 소멸되는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 입구에서의 유동 가진이 사각 발열체 주위의 열전달 현상에 미치는 영향을 가진 주파수에 따라 수치해석하였다. 벽면에서의 열전달량을 나타내는 Nu 수를 무차원 주파수의 변화에 따라 분석하였다. 발열체에서의 열전달이 가장 촉진되는 주파수는 유동장에서 재부착 길이가 가장 축소되는 주파수가 아닌 하류 벽면에 영향을 많이 주는 주파수가 최적임을 발견하였다. 평균 온도장과 열유속의 주기적 성분의 전이 과정을 시간의 경과에 따라 변화하는 동적 변화 과정과 무차원 주파수의 변화에 따른 열유속의 변화를 수치적 유동 가시화를 통하여 해석하였다. 동일한 에너지로 입구에서 유동 가진을 가더라도, 최적의 주파수가 존재하여 열전달을 강하게 촉진시킬 수 있으며 이 주파수가 유동장에서의 주파수와 상이하다는 점과 이러한 현상의 물리적 과정을 수치적 유동 가시화를 이용하여 분석하였다.

#### 후 기

이 논문은 2001년도 서울시립대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

1. Kim, S. Y., Kang, B. H. and Jaluria, Y., 1998, Thermal Interaction between Isolated Heated Electronic Components in Pulsating Channel Flow, Numerical Heat Transfer Part A, Vol. 34, Iss. 1, pp 1-21.
2. Ghaddar, N. K., Magen, M., Mikic, B. B. and Patera, A. T., 1986, Numerical Investigation of Incompressible Flow in Grooved Channels, Part 1. Stability and Self-sustained Oscillations, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 163, pp. 99-127.
3. Greiner, M., 1991, An Experimental Investigation of Resonant Heat Transfer Enhancement in Grooved Channel, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 34, pp. 1383-1391.
4. Amon, C. H. and Mikic, B. B., 1991, Spectral Element Simulations of Unsteady Forced Convective Heat Transfer: Application to Heat Exchanger Geometries, Numerical Heat Transfer, Vol. 19, pp. 1-19.
5. Azar, K., 1992, Enhanced Cooling of Electric Components by Flow Oscillation, Journal of Thermophysics Heat Transfer, Vol. 6, pp. 700-706.
6. Rhee, G. H. and Sung, H. J., 2000, Enhancement of Heat Transfer in Turbulent Separated and Reattaching Flow by Local Forcing, Numerical Heat Transfer Part A, Vol. 37, No. 7, pp. 733-753.
7. Rhee, G. H., Kim, S. Y. and Sung, H. J., 2002, Flow Control and Heat Transfer Enhancement from a Heated Block by an Inflow Pulsation (I) Flow Field Computation, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 7, pp. 592-598.