

## 난류 채널 내 냉·열판 부착에 의한 마찰저항 감소

윤현식<sup>†\*</sup>, 전호환<sup>\*</sup>

부산대학교 첨단조선공학연구센터<sup>\*</sup>

### Drag Reduction in Turbulent Channel Flow with Periodically Arrayed Heating and Cooling Strips

Hyun Sik Yoon<sup>†\*</sup> and Ho Hwan Chun<sup>\*</sup>

Advanced Ship Engineering Research Center, Pusan National University<sup>\*</sup>

#### Abstract

A new technique giving significant drag reduction in turbulent shear flows has been proposed by using the buoyancy effect to generate periodic spanwise motion. Such spanwise motion can be obtained by arranging heating and cooling strips periodically aligned in the spanwise direction of a vertical channel, where the streamwise mean flow is perpendicular to the gravity vector. The strip size has been changed in order to obtain the optimum size corresponding to the maximum drag reduction. The bulk Reynolds number,  $Re_m = U_m \delta / \nu$  is fixed at 2270 while Grashof numbers is changed between  $10^6$  to  $10^7$ . As Grashof number increases, considerable drag reduction can be obtained. At the highest Grashof number, an optimum strip size of about 250 wall units gives drag reduction of about 35%. The greater the Grashof number, the smaller the strip size attains the maximum drag reduction.

※Keywords: Drag reduction(저항감소), Heating and cooling strips(냉·열판), Flow control(유동 제어), DNS(직접수치모사)

#### 1. 서론

난류유동제어는 유체역학에서 가장 주목 받는 분야들 중에 하나이다. 연소기내의 혼합 및 열

교환기내의 열전달의 향상, 또는 가스터빈 날개의 열전달 및 유동 소음의 감소는 적절한 난류제어를 통해서 얻을 수가 있다. 특히, 난류제어를 통한 파이프 라인, 항공기 및 선박 등에서의 마찰저항 감소는 엄청난 경제적 이익성을 보장하기에 지난 40년 동안 끊임없는 연구의 대상이 되어왔다.

최근, Kim (2003)과 Karniadakis and Choi (2003)들은 난류 경계층의 물리적 이해를 기초로 개발된

접수일: 2005년 7월 24일, 승인일: 2005년 10월 28일

†주저자, E-mail: lesmodel@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-3685



두개의 변수들을 고려하였다. 부력의 세기와 관련해서 세계의 다른 Grashof numbers ( $Gr$ ),  $10^6$ ,  $4 \times 10^6$  과  $10^7$  를 고려하였다. 각 Grashof numbers 에 관해서, 최대 마찰저항 감소를 가져오는 최적의 냉·열판들의 크기를 찾기 위해서 여섯개의 다른 크기의 냉·열판들을 시험하였다.

## 2. 지배방정식 및 수치해석방법

본 계산에서 부력항 내의 유체의 밀도에 대해서는 Boussinesq approximation 을 적용하였고, 나머지 유체의 물성치들은 일정하다고 가정하였다. 따라서, 일정 물성치의 비압축성 유동에 대한 지배방정식으로 아래의 3차원 비정상 연속 방정식, 운동량보존 방정식 및 에너지 방정식이 본 계산에서 사용되었다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + g_i \delta_{i3} \beta (T - T_{ref}), \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \quad (3)$$

위의 운동량 방정식 (식. (2)) 내의  $g$ ,  $\delta_{ij}$ ,  $\beta$  는 중력가속도, Kronecker delta, 열확산계수 (thermal expansion coefficient)를 각각 나타낸다. 식. (2)의  $T_{ref}$  는 평균체적(bulk) 온도로 매 시간스텝 마다 계산되어진다. 에너지 방정식 (식. (3))내의  $\alpha$  는 열확산계수이다.

무차원화를 위한 특성 길이, 속도 및 온도로 반높이  $\delta$ , 평균 속도  $U_m$  와 고온판 ( $T_H$ )과 저온판 ( $T_C$ )의 온도 차인  $\Delta T$  가 사용되었다. 지배방정식의 무차원화 결과 두개의 무차원 변수들, bulk Reynolds number,  $Re_m = U_m \delta / \nu$  과 Grashof number,  $Gr = g \beta \Delta T (2\delta)^3 / \nu^2$  이 얻어진다. 본 계산에서는  $Re_m = 2270$  과 세계의 다른  $Gr = 10^6$ ,

$4 \times 10^6$  과  $10^7$  이 사용된다.

수치해석방법으로는, 공간차분은 2차 중심 차분법을 기반으로 한 유한체적법을, 시간차분에 대해서 two-step time-split scheme 을 적용하였다. 이 시간차분법은 Kim and Moin (1985), Zang et al. (1994)과 윤현식 등 (2004)의 선행 연구들을 기반으로 하였다. 점성항에 대해서는 Crank-Nicolson 방법, 비선형항에 대해서 2차 Adams-Bashforth 방법을 사용하였다.

수직 채널 내에 중력 벡터에 수직인 주유동 방향을 따라 냉·열판들이 주기적으로 설치된 본 연구의 계산 영역은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 보는 바와 같이  $L_{ST}$  는 하나의 열판의 크기이며, 각 Grashof number 에 여섯개의 다른 크기의 냉·열판들을 고려하였다. 따라서, 총 18개의 냉·열판들에 관해 연구가 수행되어졌다.  $x$ ,  $y$  와  $z$  는 주유동방향, 벽면수직방향과 횡방향 좌표를 각각 나타내고, 각 방향에 대응하는 속도는  $u$ ,  $v$  와  $w$  이다. 계산 영역은 주유동방향, 벽면수직방향과 횡방향으로  $4\pi\delta \times 2\delta \times \pi\delta$  이며 사용된 격자계는  $146 \times 65 \times 66$  이다. 완전히 발달된 난류 채널 유동은 유동방향과 폭방향에 대해서 균질 (homogeneous)하기때문에, 이 방향들에 주기 조건을 부여 하였고, 각 벽면들에는 점착조건이 적용되었다. 또한 모든 계산은 주유동방향으로 질량을 일정하게 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 마찰저항

여기서, 냉·열판들의 크기가 x-z 평면 평균 벽면전단율,  $(\partial u / \partial y)$  의 시간에 따른 변화에 미치는 영향을 가장 명확히 확인할 수 있는  $Gr = 10^7$  의 경우만 Fig. 2 에 나타내었다. 냉열판의 크기가  $2\pi$  보다 작은 경우에는 평균 벽면전단율이 평판채널의 벽면전단율보다 작아지고, 최대 감소는  $L_{ST} = 2\pi/3$  에서 일어난다.  $L_{ST} = 2\pi$  에서는, 평균 벽면전단율이 평판채널의 벽면전단율보다 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 3 은 세계의 다른 Grashof 수들에 대해, 냉

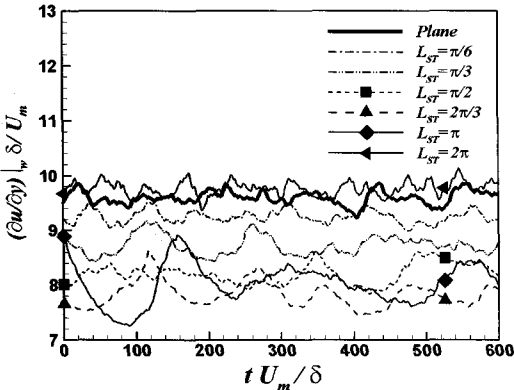


Fig. 2 The time histories of plane-averaged wall shear rates for different strip sizes at  $Gr = 10^7$ .

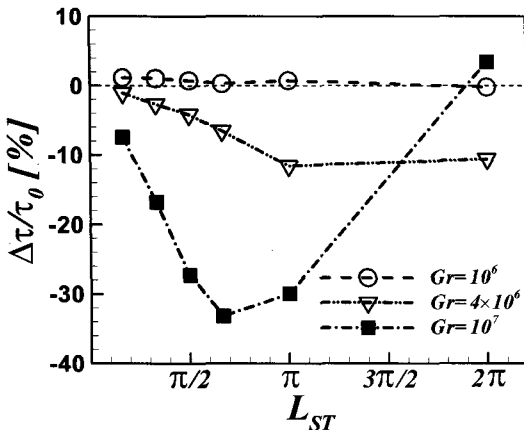


Fig. 3 Drag reduction rate as a function of strip size  $L_{ST}$  for the three different Grashof numbers.

열판의 크기 변화에 따른 마찰저항 감소율,  $\Delta\tau/\tau_0$  을 보여준다. 여기서,  $\Delta\tau = \tau - \tau_0$  이며,  $\tau$  와  $\tau_0$  는 각각 냉· 열판과 평판 채널 위에서의 전단응력을 나타낸다. 마찰저항율,  $\Delta\tau/\tau_0$  의 음과 양의 값은 평판 채널에 대한 저항 감소 및 증가를 각각 나타낸다. 냉· 열판에  $Gr = 10^6$  이 적용되었을 때 냉· 열판의 크기가  $L_{ST} = 2\pi$  에서 마찰저항은 평판 채널의 저항과 거의 같은 경우를 제외하고, 모든 냉· 열판 크기들에 대해 마찰저항은 평판채널의 저항보다 약간 증가하는 것을 볼 수가 있다. 즉, 본 연

구에서 고려된 가장 작은 Grashof 수  $Gr = 10^6$  에서는 마찰저항을 감소시킬 정도의 충분한 세기의 횡방향운동을 이끌어 내지 못한다고 판단된다.

$Gr = 4 \times 10^6$  과  $10^7$  의 경우에는, 최대마찰저항값을 가져오는 최적 냉· 열판 크기들이 있는 것을 Fig. 3 에서 확인할 수가 있다.  $Gr = 4 \times 10^6$  의 경우는 냉· 열판의 크기가  $\pi < L_{ST} < 2\pi$  에서 최적 냉· 열판 크기가 존재하며,  $L_{ST} = \pi$  에서 11%의 마찰저항 감소가 일어난다.  $Gr = 10^7$  일 때 최대 마찰저항 감소를 가져오는 최적 냉· 열판의 크기가  $Gr = 4 \times 10^6$  의 것보다 작아진다. 즉, 최적 냉열판의 크기는  $L_{ST} = 2\pi/3$  이며, 여기서 평판채널의 저항보다 대략 35% 감소한다. 냉· 열판 크기를  $2\pi$  로 증가시키면, 평판채널에서의 저항보다 약간 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3.2 평균 값 (Mean Quantity)

Fig. 4 는 주 유동방향 평균속도들의 y-방향으로의 분포를 나타내고 있다. 여기서, 냉· 열판 크기가 벽 근처에서 평균 속도의 기울기에 미치는 영향을 정확히 확인하기 위해서 Fig. 4 내에서 확대하여 보여주고 있다. 냉· 열판 크기가  $L_{ST} = 2\pi/3$  까지 증가 할수록 벽 근처에서의 기울기는 작아진다.  $L_{ST} = 2\pi$  에서는, 평균속도의 기울기가 평판채널의 기울기보다 약간 커지는 것을 볼 수가 있다.

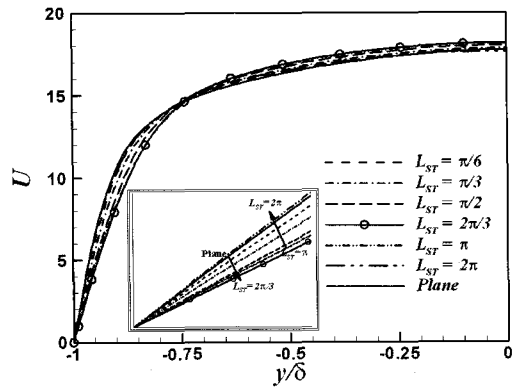


Fig. 4 Mean streamwise velocity profiles in global units at  $Gr = 10^7$ .

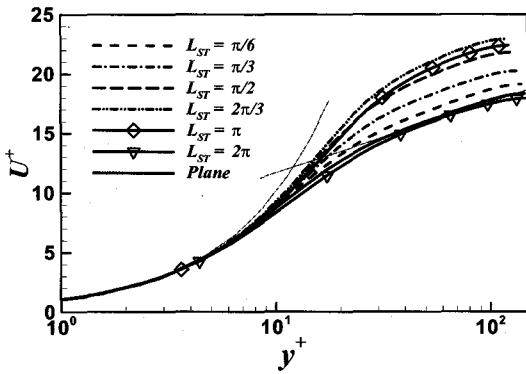


Fig. 5 Mean streamwise velocity profiles in wall units at  $Gr=10^7$ .

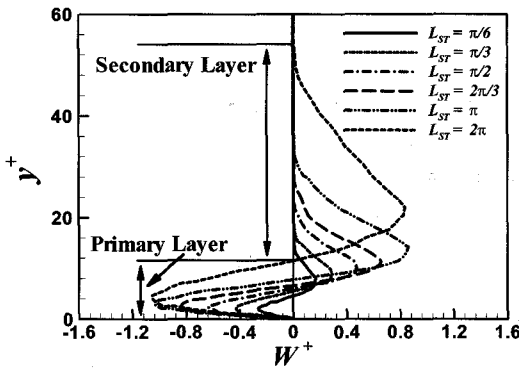


Fig. 6 Spatial averaged mean spanwise velocity profiles in wall units for the different strip sizes at  $Gr=10^7$ .

반면, 본문에서 유량을 고정시키면서 계산을 했기 때문에 채널의 중앙 영역에서는 평균속도의 분포가 벽면근처에서의 분포와 반대 경향을 보인다.

Fig. 5는 벽 좌표계에서의 벽 응력으로 무차원화된 평균속도분포를 나타내고 있다.  $L_{ST} \leq \pi$  경우는, 평균속도가 로그법칙선 보다 위로 이동하고  $L_{ST} = 2\pi/3$ 의 속도값이 가장 많이 이동한 것을 볼 수가 있다. 이것은 점성 아층(viscous sublayer) 두께의 증가에 기인하며 마찰 저항 감소에 직접적인 원인이 된다. 마찰저항이 증가하는  $L_{ST} = 2\pi$ 의 경우는 점성 아층 두께의 감소에 의해서 평균속도가 로그법칙선 아래에 위치한 것을 볼 수 있다.

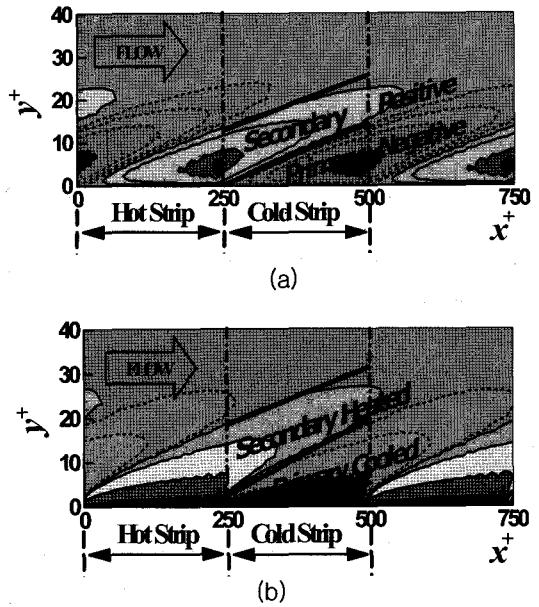


Fig. 7 (a) Mean spanwise velocity and (b) temperature contours for  $L_{ST}=2\pi/3$  at  $Gr=10^7$ .

냉판위에서의 속도들을 사용해 조건부 평균된 횡방향 속도( $W$ )들의 분포를 Fig. 6에서 보여주고 있다. 냉판에 의해 차가워진 유체의 유동에 기인하여 벽근처에서 1차 음의 최대값이 형성되고, 벽에서 멀어지면서 2차 양의 최대값이 상류의 열판에 의해 뜨거워진 유체의 유동에 의해 생성된다. 따라서, 음과 양의 횡방향 속도들로 이루어진 1차 및 2차의 경계층들이 Fig. 7(a)와 (b)의 평균횡방향 속도와 온도 등고선들에 의해서 명확히 보여진다. 본 연구에서는 벽에서 정착조건을 사용하기에  $W=0$ 인 것에 의한 벽면 매우 근처의 평균 횡방향 속도의 분포를 제외하고, 이 속도의 분포는 Choi (2002)에 의해서 거론된 second Stokes problem의 속도의 분포와 매우 유사하다.  $L_{ST}$ 가 증가할수록, 평균 횡방향 속도의 1차 및 2차 최대값들의 위치는 벽에서 멀어지고, 대응하는 1차 및 2차 경계층의 두께들도 두꺼워진다. 마찰저항 감소를 가져오는 냉·열판의 크기들 ( $L_{ST} \leq \pi$ )의 경우, 1차 경계층의 두께는 벽단위로 8보다 작으며 이는 점성 아층 내에 존재함을 의미한다.

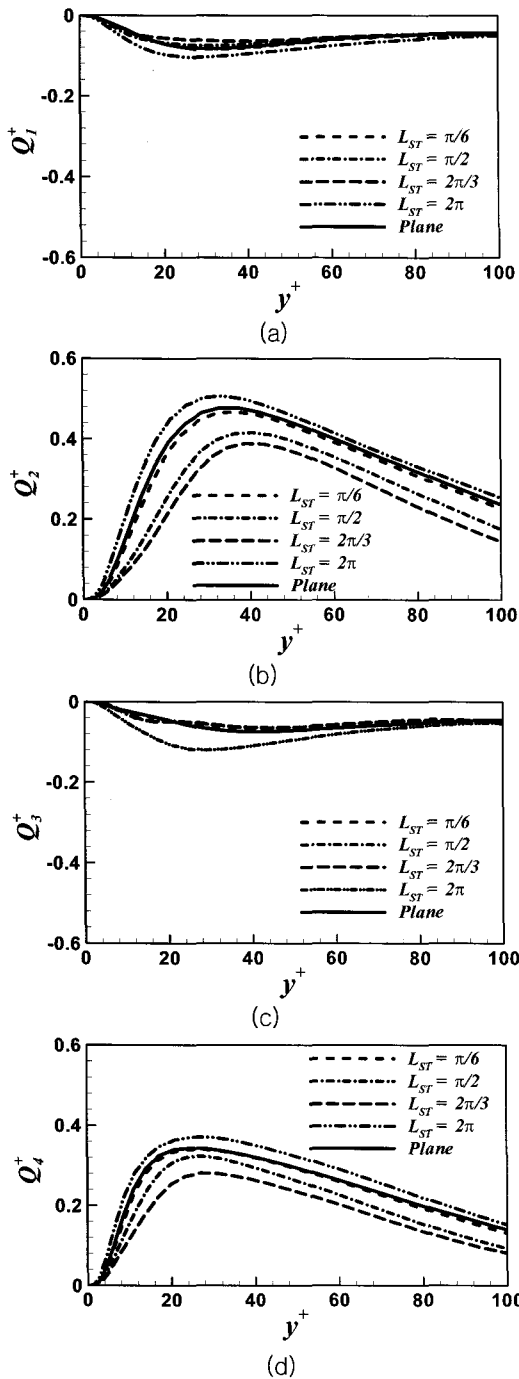


Fig. 8 Reynolds shear stress  $-\overline{u'v'}$  from each quadrant normalized by the inner wall values for  $Gr=10^7$ ; (a)  $Q_1$ , (b)  $Q_2$ , (c)  $Q_3$  and (d)  $Q_4$ .

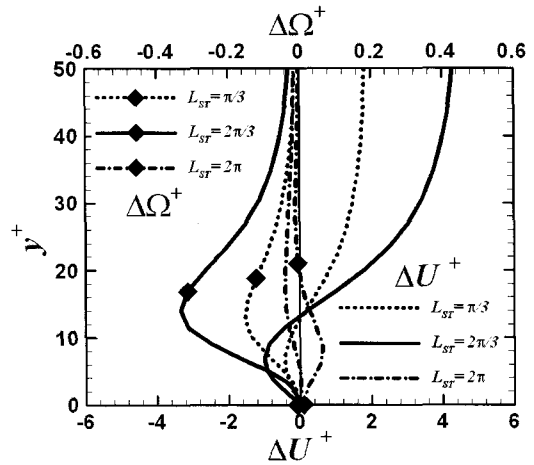


Fig. 9 Differences of spanwise vorticity,  $\Delta\Omega_z^+$  and corresponding streamwise velocity,  $\Delta U^+$  between heating and cooling strips for different strip sizes and plane channel.

### 3.3 난류 값 (Turbulent Quantity)

레이놀즈 전단응력( $-\overline{u'v'}$ )의 Quadrant analysis 는 변동속도  $u'$  과  $v'$  의 음과 양의 성분들의 조합을 통해 전체 난류에너지 생성에 기여하는 정보를 제공한다. Quadrant analysis 는 다음의 네가지 성분들,  $Q_1=(u' > 0, v' > 0)$ ,  $Q_2=(u' < 0, v' > 0)$ ,  $Q_3=(u' < 0, v' < 0)$  와  $Q_4=(u' > 0, v' < 0)$  를 통하여 이루어진다. 여기서,  $Q_2$  와  $Q_4$  는 ejection 과 sweep events 로서 양의 생성에 기여하고,  $Q_1$  과  $Q_3$  는 음의 생성에 기여한다.

Fig. 8 는  $-\overline{u'v'}$  의 각 events 를 보여준다. 마찰저항 감소를 가져오는 냉·열판의 크기들 ( $L_{ST} \leq \pi$ )의 경우, 냉·열판의 온도차에 의해서 생성된 부력이 일으키는 횡방향의 유동에 의해 buffer layer 내에서 ejection 과 sweep events 의 값들은 평판채널의 값들과 비교해 상당히 감소된 것을 볼 수가 있다. 반면,  $Q_1$  과  $Q_3$  는 상대적으로 채널 내 전 영역에서 큰 변화가 없다.

횡방향 벽 운동 (Choi 2002)과 본 연구의 냉·열판의 온도차에 의해서 생성된 부력이 벽면 근방에서 난류 유동장에 미치는 영향의 유사성을 확인하기 위해서, Fig. 9 에 평판채널과 냉·열판들의

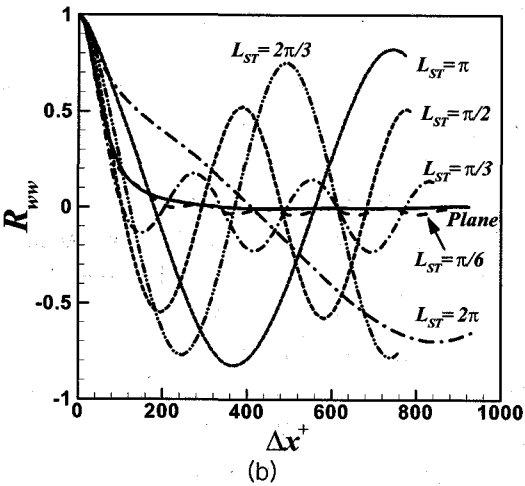
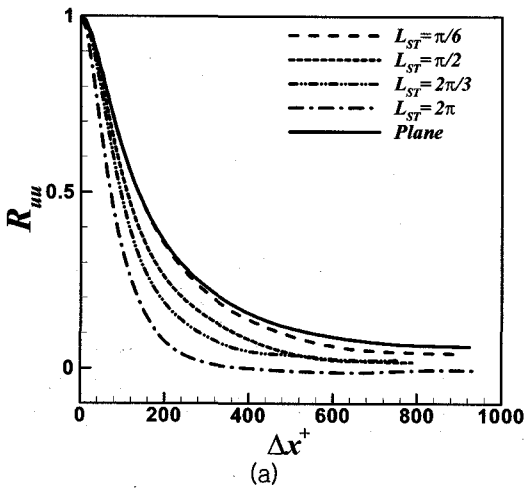


Fig. 10 Streamwise two point correlations at  $y^+ \approx 10$  for  $Gr=10^7$ ; (a)  $R_{uu}(\Delta x^+)$  and (b)  $R_{ww}(\Delta x^+)$ .

평균 횡방향 와도의 차이 ( $\Delta\Omega_z^+$ )와 대응하는 평균 주유동방향 속도의 차이 ( $\Delta U^+$ )를 나타내었다.

마찰저항 감소를 가져오는 냉·열판의 크기들 ( $L_{ST} = \pi/3, 2\pi/3$ )의 경우,  $\Delta\Omega_z^+$ 는  $y^+ \approx 15$ 에서 음의 최대값에 도달한 후 감소한다. 대응하는  $\Delta U^+$ 는 벽에서부터 음을 값으로 증가하기 시작해서  $\Delta\Omega_z^+$ 의 기울기가 최대가 되는  $y^+ \approx 8$ 에서 최대 값을 가진다. 이후,  $\Delta U^+$ 는 감소하면서  $\Delta\Omega_z^+$ 가 음의 최대값을 가지는  $y^+ \approx 15$ 에서 '0'이 된다.

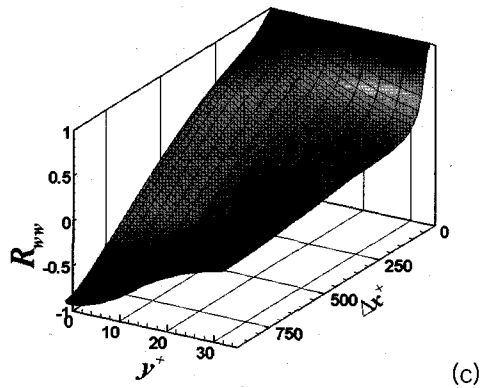
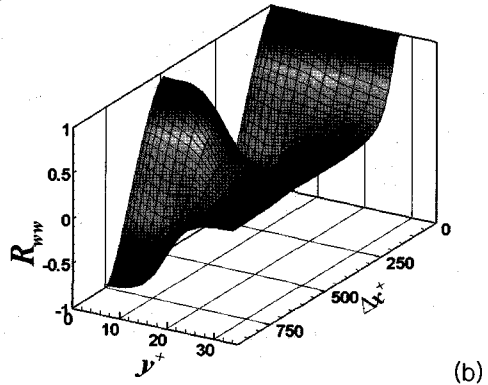
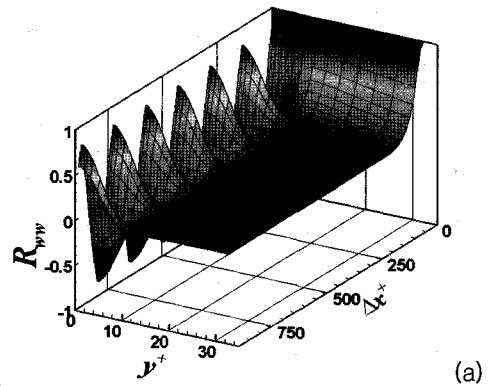


Fig. 11 Isometric views of streamwise two point correlations of spanwise velocity for  $Gr=10^7$ ; (a)  $L_{ST} = \pi/6$ , (b)  $L_{ST} = 2\pi/3$  and (c)  $L_{ST} = 2\pi$ .

즉, 마찰저항 감소를 가져오는 냉·열판들의 경우, 부력이 유발하는 횡방향 운동에 의해서 증가된 음의 횡방향 와도는 벽면 근처에서는 주유동 방향 속도를 감소시키고,  $y^+ > 15$ 의 영역에서는 이 속도

를 증가시킨다. 이는, Choi (2002)가 횡방향으로 진동하는 벽운동에서 관찰한 결과와 매우 유사하다. 마찰저항 증가를 가져오는 냉·열판의 크기 ( $L_{ST} = 2\pi$ )의 경우,  $\Delta\Omega_z^+$ 와 대응하는  $\Delta U^+$ 의 분포는 마찰저항 감소 냉·열판들과 반대되는 경향을 보여준다.

주유동방향 속도와 횡방향 속도의 주유동방향으로의 두점 상관관계 (two point correlations),  $R_{uu}(\Delta x^+)$ 와  $R_{ww}(\Delta x^+)$ 를 Fig. 10 (a)와 (b)에서 각각 보여주고 있다. 냉·열판의 크기가 커질수록  $R_{uu}(\Delta x^+)$ 의 증축의 길이 척도 (longitudinal length scale)가 짧아진다. 이것으로부터, 증축으로 와의 구조와 streaks가 채널의 그것들보다 작아질 것을 예상할 수 있다. 부력이 유발한 횡방향 운동에 의해서  $y^+ \approx 10$ 에서도  $R_{ww}(\Delta x^+)$ 은 주기적인 진동하는 분포의 강한 상관관계를 가지고 있다.  $R_{ww}(\Delta x^+)$ 는 냉·열판의 크기가 증가할수록 벽에서부터 멀리까지 상관관계를 유지하고 있는 것을 Fig. 11의  $R_{ww}(\Delta x^+)$ 의 isometric views에서 확인할 수가 있다.

### 3.4 유동 구조 (Flow Structure)

Fig. 12는 벽면 바로 위  $y^+ \approx 1$ 에서 평판채널과 다른 크기의 냉·열판들이 설치된 채널에서의 순간 속도를  $x$ - $z$  면에서 보여주고 있다. 저온 및 고온판들 위에서 횡방향 속도는 양과 음의 값을 각각 가지고, 이 값들은 Figs. 12(b-d)에서 보이는 것처럼 횡방향으로 유동을 진동하게 한다.  $L_{ST} = \pi/6$ 에서는 냉·열판의 크기가 상대적으로 작기에 부력에 의해 유발된 횡방향 속도가 주유동을 강하게 교란시키지는 못한다. 하지만, 최대 마찰저항 감소를 가져오는 최적 냉·열판의 크기 ( $L_{ST} = 2\pi/3$ )에서는 유동이 매우 안정화된 상태를 유지하면서 횡방향으로 진동하는 것을 Fig. 12(c)에서 명확히 볼 수가 있다. 최대 냉·열판의 크기 ( $L_{ST} = 2\pi$ )에서는, 횡방향으로의 기울어진 강한 난류유동이 활성화되는 것을 확인할 수가 있다.

평판채널과 다른 크기의 냉·열판들이 설치된 채널의  $y$ - $z$  면에서의 순간 속도 및 온도 등고선을 Fig. 13에 나타내었다.

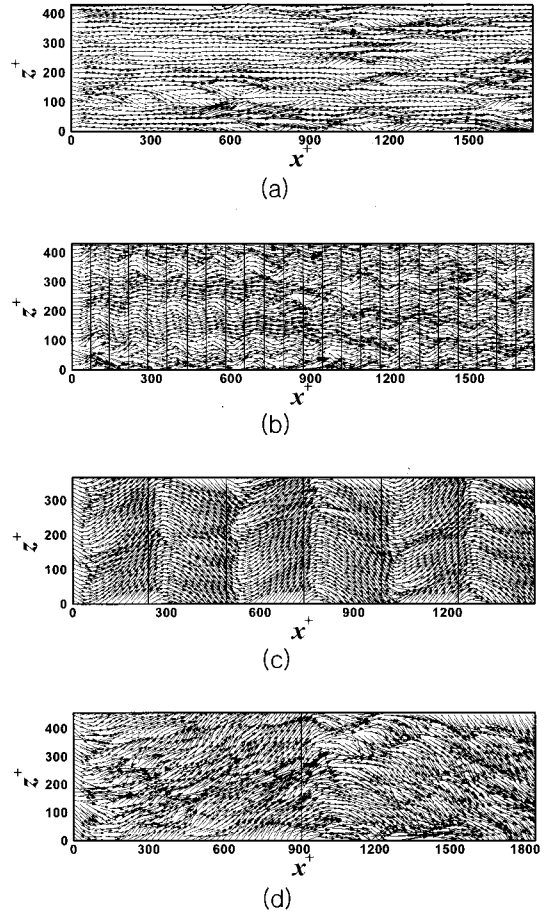


Fig. 12 Instantaneous velocity vectors in  $x$ - $z$  plane at  $y^+ \approx 1$ ; (a) plane channel, (b)  $L_{ST} = \pi/6$ , (c)  $L_{ST} = 2\pi/3$  and (d)  $L_{ST} = 2\pi$ .

냉·열판들이 설치된 채널의 경우, 평판채널과 확연히 구별되는 점성 아층내에서 횡방향의 운동에 의한 얇은 경계층을 관찰할 수가 있다.  $L_{ST} = \pi/6$ 에서, 준 주유동방향 와들(quasi-streamwise vortices)과 관련한 수직방향 유체의 운동(sweep events)은 벽근처의 얇은 경계층을 교란하고 부분적으로 벽면에 충돌하는 것을 Fig. 13(b)에서 볼 수가 있다. 그러나,  $L_{ST} = 2\pi/3$ 에서는 횡방향운동에 의한 이러한 얇은 경계층은 마찰 저항에 가장 큰 영향을 주는 수직방향 유체의 운동, sweep 과 eject motion을 크게 감소시킨다.



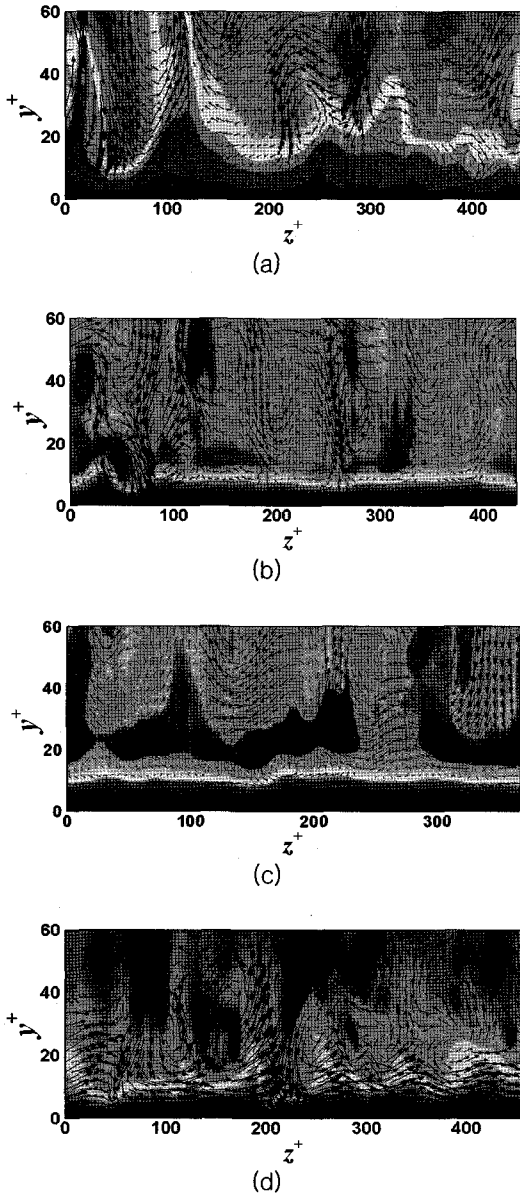


Fig. 13 Instantaneous velocity vectors and temperature contours in  $y$ - $z$  plane at the center of hot strip; (a) plane channel, (b)  $L_{ST} = \pi/6$ , (c)  $L_{ST} = 2\pi/3$  and (d)  $L_{ST} = 2\pi$ .

가장 큰 냉·열판의 크기  $L_{ST} = 2\pi$  에서는, 부력에 의해 생성된 벽 근처의 강한 횡방향 유동이  $y$ - $z$  면에서의 더욱 활발한 횡단 난류 유동을 형성한다.

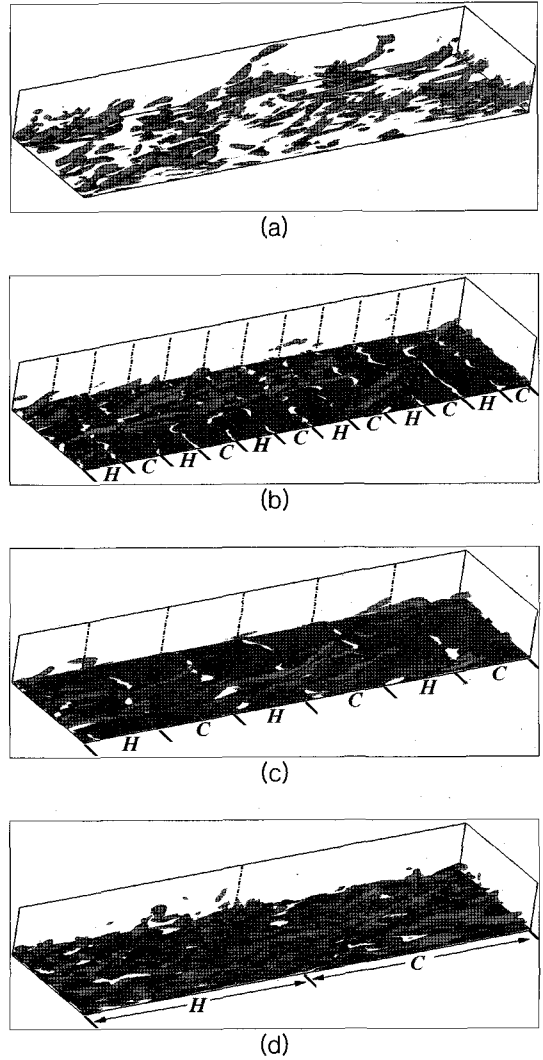


Fig. 14 Iso-surface of instantaneous streamwise vorticity at (a) plane channel, (b)  $L_{ST} = \pi/6$ , (c)  $L_{ST} = 2\pi/3$  and (d)  $L_{ST} = 2\pi$ .

이로인해, quadrant analysis 에서 확인한 것처럼 sweep 과 eject motion 이 강해져서 벽면 마찰저항을 평판의 마찰저항보다 더욱 증가시킨다. 다시말해, 큰 횡방향 속도는 벽 제트가 주위의 유체를 벽 근처로 끌어들이는 것과 같은 역할을 함으로서 추가적인 강한 주유동방향의 와도들을 생성하고 결과적으로 마찰저항 증가를 가져온다.

냉·열판들에 의한 난류의 응집 구조(coherent structure)의 변화를 보여주기 위해서 평판채널과 다른 크기의 냉·열판 채널들에서의 순간 주유동 방향 와도의 등면(iso-surfaces)을 Fig. 14에 나타내었다. 마찰저항 감소를 가져오는 냉·열판의 크기들 ( $L_{ST} = \pi/3, 2\pi/3$ )의 경우, 고온과 저온판들 위에서 얇은 경계층에 해당하는 순간 주유동 방향 와도의 등면을 확실히 볼 수가 있다.  $L_{ST} = 2\pi/3$ 에서는, 와들이 평판채널과  $L_{ST} = 2\pi$ 와 비교해서 매우 희박하게 분포되어있다. 또한  $L_{ST} = 2\pi/3$ 에서는, 초기에 상류 판에서 생성된 와는 다음의 하류 판에서 소멸된다. 이러한 빠른 소멸은 본 논문에서는 보여주지 않지만 시간에 따른 와들의 구조를 해석했을 때 확인할 수가 있었다. 가장 큰 냉·열판의 크기  $L_{ST} = 2\pi$ 에서는, 두점 상관관계에서 보여준 바와 같이 종축의 길이 척도(longitudinal length scale)가 짧은 매우 강한 와들이 벽근처에서 매우 조밀하게 분포하고 있는 것을 Fig. 14(d)에서 볼 수가 있다.

#### 4. 결론

냉·열판 장치가 난류전단유동에서의 마찰저항을 상당히 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 주기적으로 배열된 냉·열판들의 온도차에 의해 발생한 부력은 고온과 저온 판들 위에 양과 음의 횡방향 속도들을 각각 유도한다. 이 유도된 반대 방향의 횡방향 운동들은 정성 아층에서 1차 및 완층 영역에서 2차 횡방향 경계층으로 이루어진 두개의 경계층들을 형성한다. 또한, 이 횡방향 운동들은 벽근처에서 난류의 공간 및 시간적인 응집구조의 발달을 교란하여 상당한 마찰저항 감소를 가져온다.

Bulk Reynolds number, 2270과 세계의 다른 Grashof numbers ( $Gr$ ),  $10^6, 4 \times 10^6$ 과  $10^7$ 에 대해서 여섯개의 다른 크기의 냉·열판들이 직접수치해석(DNS) 통해 시험되어졌다. 가장 낮은  $Gr$ 에서는 평판채널과 비교해서 많은 차이점을 보이지 않았다. 하지만  $Gr = 10^7$ 에서는 대략 35%의 최대 마찰저항 감소를 가져오는 최적의 냉·열판의 크기가 벽단위로 '250'에 해당하는  $L_{ST} = 2\pi/3$ 임을 확인

할 수가 있었다. 최적의 냉·열판의 크기는  $Gr$ 가 증가할수록 작아진다.

마찰저항을 가져오는 메커니즘이 본 연구의 냉·열판들과 횡방향으로 진동하는 벽(Choi, 2000)이 유사함을 횡방향 와도와 주유동 방향 속도의 상관관계를 통해서 알 수가 있었다. Two point correlations과 유동구조의 가시화를 통해서 벽근처에서 난류의 응집구조로써 주유동방향 와들의 주유동방향의 길이 척도가 짧아짐을 확인 하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

#### 참 고 문 헌

- 구본국, 윤현식, 전호환, 2004, "리블릿 표면을 이용한 난류 유동해석 및 마찰 저항감소," 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 4 호, pp. 59-67.
- 김덕수, 김형태, 김우전, 2003, "미소기포 주입에 의한 마찰저항 감소에 대한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 40 권, 제 3 호, pp. 1-8.
- 김형태, 김덕수, 김우전, 2003, "폴리머 수용액 주입에 의한 난류마찰저항 감소에 대한 실험 연구," 대한조선학회 논문집, 제 40 권, 제 3 호, pp. 9-15.
- 윤현식, 구본국, Osama A. El-Samni, 박종천, 전호환, 2004, "마찰저항감소를 위한 난류유동의 DNS/LES 해석기술의 개발," 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 1 호, pp. 47-54.
- 장진호, 김효철, 1999, "선저에 부착된 공기 공동에 의한 선박의 저항감소에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 36 권, 제 2 호, pp. 1-8.
- Baron, A. and Quadrio, M., 1996, "Turbulent Drag Reduction by Spanwise Wall Oscillation," Applied Scientific Research, Vol. 55, pp. 311-326.
- Bradshaw, P. and Pontikos, N., 1985, "Measurements in the turbulent boundary layer

- on an 'infinite' swept wing," J. of Fluid Mechanics, Vol. 159, pp. 105-130.
- Choi, J.I., Xu, C.X. and Sung, H.J., 2002, "Drag reduction by spanwise wall oscillation in wall-bounded turbulent flows," AIAA Journal, Vol. 40. No. 5, pp. 842-850.
  - Choi, K.S., DeBisschop, J.R. and Clayton, B.R., 1998, "Turbulent Boundary-layer control by means of spanwise-wall oscillation," AIAA Journal, Vol. 36. No. 7, pp. 1157-1163.
  - Choi, K.S., 2002, "Near-wall structure of turbulent boundary layer with spanwise-wall oscillation," Phys. Fluids, Vol. 14, No. 7, pp. 2530-2542.
  - Dhanak, M.R. and Si, C., 1999, "On reduction of turbulent wall friction through spanwise wall oscillations," J. of Fluid Mechanics, Vol. 383, pp. 175-195.
  - Jung, W.J., Mangiavacchi, N. and Akhavan, R., 1992, "Suppression of turbulence in wall-bounded flows by high-frequency spanwise oscillations", Phys. Fluids A, Vol. 4, No. 8, pp. 1605-1607.
  - Karniadakis, G.E. and Choi, K.S., 2003, "Mechanisms on transverse motions in turbulent wall flows," Annual Review of Fluid Mechanics. Vol. 35, pp. 45-62.
  - Kim, J. and Moin, P., 1985, "Application of a Fractional Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations," Journal of Computational Physics, Vol. 59, pp. 308- 323.
  - Kim, J., 2003, "Control of turbulent boundary layers", Phys. Fluids, Vol. 15, No. 5, pp. 1093-1105.
  - Laadhari, F., Skandaji, L. and Morel, R., 1994, "Turbulence reduction in a boundary layer by a local spanwise oscillating surface," Phys. Fluids Vol. 6, No. 10, pp. 3218-3220.
  - Lee, D.H. and Choi, H.C. 2001, "Magnetohydrodynamic turbulent flow in a channel at low magnetic Reynolds number," J. of Fluid Mechanics, Vol. 439, pp. 369-394.
  - Moin, P., Shih, T., Driver, D. and Mansour, N., 1990, "Direct numerical simulation of three dimensional turbulent boundary layer," Phys. Fluids A, Vol. 2, No. 10, pp. 1846-1853.
  - Park, J. and Choi, H., 1999, "Effects of uniform blowing or suction from a spanwise slot on a turbulent boundary layer," Phys. Fluids, Vol. 11, pp. 3095-3105.
  - Quadrio, M. and Sibilla, S., 2000, "Numerical Simulation of Turbulent Flow in a Pipe Oscillating Around Its Axis," J. of Fluid Mechanics, Vol. 424, pp. 217- 241.
  - Zang, Y., Street, R.L. and Koseff, J.R., 1994, "A Non-Staggered Grid, Fractional Step Method for Time-Dependent Incompressible Navier-Stokes Equations in Curvilinear Coordinates," Journal of Computational Physics Vol. 114, pp.18-33.



&lt; 윤 현 식 &gt;



&lt; 전 호 환 &gt;