

리블렛 표면을 이용한 난류 유동해석 및 마찰 저항감소

구본국*, 윤현식**, 전호환*

부산대학교 첨단조선공학연구센터*

Turbulent Flow Analysis and Drag Reduction by Riblet Surfaces

Bon Guk Koo*, Hyun Sik Yoon** and Ho Hwan Chun*

Advanced Ship Engineering Research Center, Pusan National University*

Abstract

Direct numerical simulations of turbulent flows over riblet-mounted surfaces are performed to educe the mechanism of drag reduction by riblets. Numerical simulations are performed for flow fields with $Re_\tau = 180$. For riblet ridge angle $\alpha = 60^\circ$, two different riblet spacings of $s^+ = 20$ and 40 are used in this study. The computed drag on the riblet surfaces is in good agreement with existing computational and experimental data. The mean velocity profiles show upward and downward shifts in the log-law for drag-decreasing and drag-increasing cases, respectively. Turbulence statistics above the riblets are computed and compared with those above a flat plate. The purpose of this study is in two categories: first, to understand the drag reduction mechanism on riblet surface, second, to verify our own code by comparison of the present results with those from previous studies.

*Keywords: Drag reduction(저항감소), Riblet(리블렛), Flow control(유동 제어), DNS(직접수치모사), FVM(유한체적법)

1. 서론

선박의 저항을 감소시키는 것은 조선산업에 있어서 여러 가지 큰 변화와 함께 조선산업의 큰 발

전을 가져올 수 있다. 즉 선속의 향상, 연료절감효과 및 엔진 마력의 감소 등 경제적인 선박을 건조할 수 있다는 것이다. VLCC의 경우 총 저항의 85-90%가 마찰저항이고, 속도가 비교적 빠른 컨테이너선의 경우 60-70%가 마찰저항이므로 이를 줄이기 위한 연구가 점점 증가되고 있는 추세이다 (김덕수 등 2003, 김형태 등 2003, 장진호/김효철 1999, 안일준 등 2001, Choi 1989, Lee/Choi

접수일: 2004년 5월 3일, 승인일: 2004년 6월 9일

†주저자, E-mail: lesmodel@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-3673

2001, Park/ Choi 1999).

본 논문에서는, 마찰저항 감소를 위한 연구의 일환으로서 리블렛 표면을 이용하여 유동제어 및 저항 감소에 대한 연구를 수행하였다. 리블렛이 난류 유동에서 마찰저항을 감소 또는 증가시키는 메커니즘을 이해함으로써 선박이나 다른 공학영역에 적용시키는데 본 연구의 목적이 있다.

주유동(streamwise)방향으로 작은 홈들(grooves)을 가진 것을 리블렛(riblet)이라 하며, 이는 수동적인 마찰 저항감소 연구에서 많이 다루어지고 있다. 특히 리블렛은 난류 경계층 내부의 작은 에디(eddy)구조를 변화시켜 난류 표면마찰저항을 감소시키기에 가장 적합한 방법들 중 하나라고 생각되어진다. 리블렛을 이용한 저항감소 연구는 NASA Langley Research Center에서 Walsh(1982, 1983)에 의하여 체계적인 기초 연구가 이루어졌다. 그는 다양한 종류의 리블렛형상에 대하여 정밀하게 항력을 측정할 결과, 리블렛의 크기가 $s^+ < 30$ 과 $h^+ < 30$ 의 조건하에서 저항이 감소한다는 것을 알아냈다. 특히 $h^+ = s^+ = 12$ 의 대칭적인 V형태를 가지는 리블렛의 두가지 형상에 대해서 가장 큰 8%의 저항감소를 얻었다.

대표적인 수치계산으로, Choi et al.(1993)은 DNS 방법을 이용하여 $s^+ = 20$ 과 $s^+ = 40$ 의 삼각형 리블렛판에 대한 순간적인 난류구조를 계산하여 저항감소 원리를 연구하였다. 벽단위로 $s^+ = 40$ 인 리블렛의 경우에는, 지름이 벽단위로 약 30 에 해당하는 주유동방향 와(vortex)가 자유로이 리블렛 빨리속으로 들어갈 수 있으므로 보다 넓은 리블렛 면적이 이들 와가 유발시키는 sweep motion 에 드러나게 되어 유체저항이 증가 한다고 보았다. 위의 연구외에 많은 연구자들이 리블렛형상을 이용하여 수치적인 연구(Goldstein et al. 1995, Chu/ Karniadakis 1993, Bechert/Bartenwerfer 1989)와 실험적 연구(Vukoslavcevic et al. 1991, Choi 1989, Suzuki & Kasagi 1994, 강성희 1997)를 해왔다.

리블렛 형상에는 여러가지 종류가 있으나 본 연구에서는 여러 참고문헌에서 많이 다루어진 V형 리블렛을 채택하였고, 형상에 대해서는 다음 절에서 자세히 설명되어진다.

본 논문에서는, x_1, x_2, x_3 은 각각 주유동방향(x), 벽수직방향(y), 그리고 횡방향(z)을 나타내고 있다. x, y, z 방향에서의 속도 표기 u_1, u_2, u_3 는 u, v, w 와 서로 통용되고 있다. 아래첨자 w 는 벽에서의 값을 의미하고, 뿔첨자 $+$ 는 벽 변수에 의해 무차원화된 무차원 값을 나타내고 예를 들면 $y^+ = yu_\tau/\nu$, 여기서 $u_\tau = (\tau_w/\rho)^{1/2}$ 는 벽전단 속도이다.

2. Riblet 형상 및 계산영역

본 연구에서 고려된 계산 영역, 리블렛 형상을 Fig. 1 에서 볼 수가 있다. 계산영역은 Table. 1 에 나타나 있는 것처럼 유동방향과 폭 방향으로 $\pi\delta$ 와 $0.289\pi\delta$ (L_x, L_z)가 사용되었다. 여기서 δ 는 채널의 반높이(half channel)이다. 완전히 발달된 난류 채널 유동은 유동방향과 폭 방향에 대해서 균질(homogeneous)하기때문에, 이 방향들에 주기 조건을 부여 하였다.

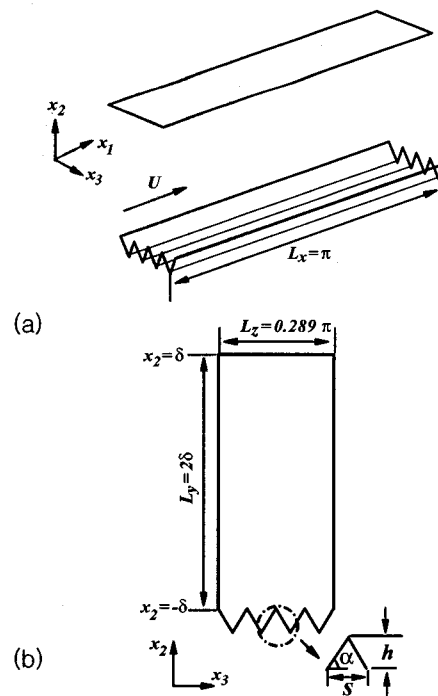


Fig. 1 (a) Three-dimensional view of computational domain; (b) cross-sectional view of riblet configuration.

Table 1 Computation domain size, grid system and the configuration parameters of two different riblets

	$L_x/\delta \times L_y/\delta \times L_z/\delta$	$N_x \times N_y \times N_z$	α	s^+	h^+
Case A	$\pi \times 2 \times 0.289\pi$	$20 \times 144 \times 154$	60	40	34.7
Case B	$\pi \times 2 \times 0.289\pi$	$20 \times 144 \times 306$	60	20	17.3

3. 지배방정식 및 수치해석방법

일정 물성치의 비압축성 유동에 대한 지배방정식으로 아래의 무차원화된 운동량 보존 방정식과 연속 방정식이 사용되었다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re_\tau} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

무차원화를 위한 특성 길이 및 속도로 반높이 δ 와 전단속도 u_τ 가 각각 사용되었다.

Table 1 에서 보는 바와 같이, 본 연구에서는 두 가지 경우에 대해서 각각 계산을 수행하였고 레이놀즈수는 두 경우 동일하게 $Re_\tau = 180$ 이며, $20 \times 144 \times 154$ (45 만개)와 $20 \times 144 \times 306$ (90 만개)의 두 격자계를 사용하였다. 각각의 격자계에 해당하는 리블렛의 개수는 4 개와 8 개이다.

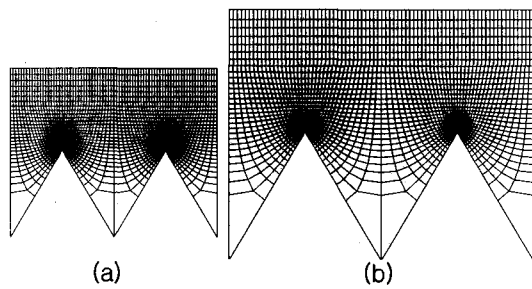


Fig. 2 Computational mesh near riblets. A non-uniform mesh of 144 points with hyperbolic tangents distribution is used in the wall normal direction, and thirty nine grid points are used on each riblet surface for $\alpha = 60^\circ$; (a) $s^+ = 20$, (b) $s^+ = 40$.

주유동 방향으로 20 개의 격자를 사용하였고 격자 간격 $\Delta x_1^+ \approx 30$ 으로 일정하다. Choi et al.(1993) 은 주유동 방향으로 16 개와 32 개를 사용해 얻은 최대 난류강도들과 레이놀즈 전단응력들이 2%내의 차이를 보였다. 따라서, 본 연구에서 사용한 주유동 방향으로 20 개의 격자는 기존연구들과 비교시 적절한 격자수 범위에 있다고 판단된다. 하지만, 엄밀히 말해서 DNS 에서는 가장 작은 스케일인 Komogorov 길이 스케일 η , 보다 격자의 크기가 작아야 한다. 그러나 실제로는 Komogorov 의 1-10 배 정도 크기에서 소산 스펙트럼이 최대값을 갖고 그보다 작은 스케일에서는 소산이 파동수에 따라 급격하게 감소하는 경향을 보이기에 $\nabla x = O(\eta)$ 정도에서는 격자의 크기에 따라 계산 결과가 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서, 대부분의 DNS 에서 대략 $\nabla x = \eta \sim 10\eta$ 정도의 크기를 갖는 격자를 사용한다. 그러므로, 향후 더욱 정확한 결과를 얻기 위해서 최소한 현재보다 3 배 이상의 격자가 필요하다고 판단된다. 벽에 수직인 방향으로는 hyperbolic tangent 분포를 이용한 일정하지 않은 격자 간격으로 리블렛 팁과 밸리에서 첫번째 격자점까지의 간격은 각각 $\Delta x_2^+ \approx 0.03$ 과 9 이다. 리블렛 근처에서 높은 전단율을 해상하기 위해서 각 리블렛 표면에 최소한 32 개의 격자점이 필요하다 (Choi et al. 1993). 이를 위해 본 연구에서는 각 리블렛 표면에 39 개의 격자점이 분포되어 있다.

Fig. 2 는 두가지 다른 크기의 리블렛들 근처에서 격자의 분포를 보여준다.

시간차분에 대해서 time-splitting, 공간차분은 2 차 중앙 차분법을 적용하였다. 점성항에 대해서 Crank-Nicolson 방법, 비선형항에 대해서 2 차 Adams-Bathforth 방법을 사용하였다.

본 계산에서는 계산 속도의 가속화 및 많은 수의 격자를 사용하기 위해서 병렬처리를 수행하였다 (윤현식 등 2004).

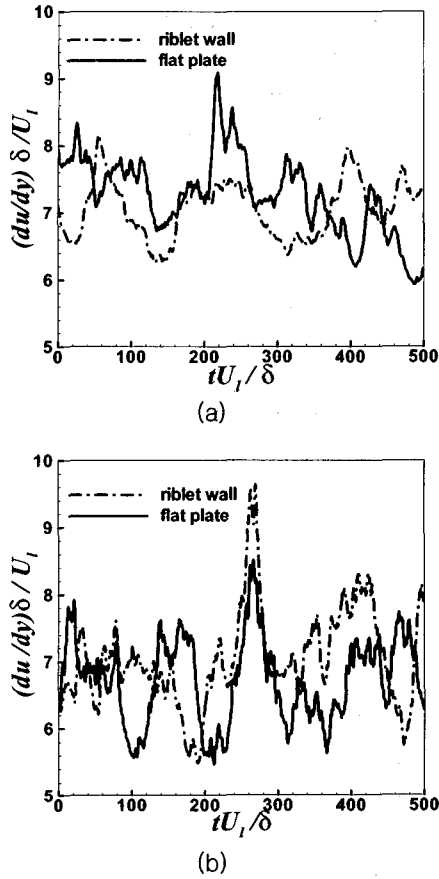


Fig. 3 Time history of wall-shear rates at both flat and riblet walls for; (a) $s^+ = 20, \alpha = 60^\circ$, (b) $s^+ = 40, \alpha = 60^\circ$.

4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 case A와 case B의 평균 전단율의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다. Fig. 3에서 characteristic velocity scale로 사용된 U_l 은 laminar centerline velocity 이다. 본 연구의 결과인 Fig. 3 (a) 와 (b)는 기존 연구들에서 밝혀진 바와 같이 마찰저항의 감소와 증가는 리블렛의 형상 (s^+, h^+)에 좌우되는 것을 보여준다. 마찰저항 감소 형상인 (a)의 경우는 평판의 마찰저항보다 대략 6%감소했고, 마찰저항 증가 형상인 (b)는 평판의 마찰저항보다 거의 12% 증가했다. 위의 결과는 Choi et al. (1993) 및 Stalio/Nobile(2003)의 결

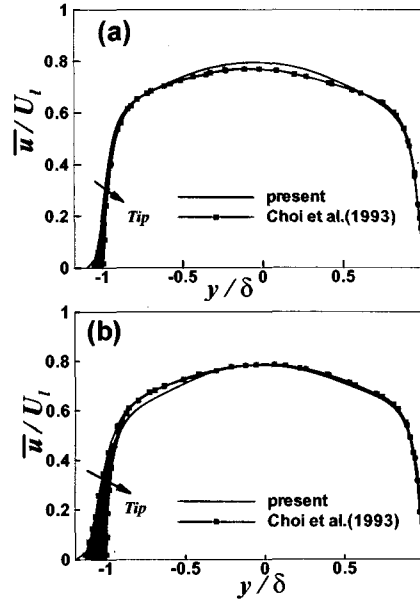


Fig. 4 Mean velocity profiles. One-dimensional view with different spanwise locations; (a) $s^+ = 20, \alpha = 60^\circ$, (b) $s^+ = 40, \alpha = 60^\circ$.

과들과 매우 근사하다.

Fig. 4 는 리블렛의 팁과 밸리 사이의 여러 다른 위치(z)에서 주 유동방향 평균속도들의 y-방향으로의 분포를 나타내고 있다. Fig. 4(a)의 $s^+ = 20$ 경우에는, 각 평균속도들은 $y/\delta \approx -0.9$ 이하에서 서로 다른 분포를 보여주지만 이 이상에서 동일한 분포를 보인다. 반면 $s^+ = 40$ 일때는 $y/\delta \approx -0.8$ 이상에서는 각 평균속도들은 동일한 분포를 보여주는 것을 Fig. 4(b)에서 확인할 수가 있다. 리블렛과 평판 근처에 의 본 계산의 결과는 Choi et al. (1993)의 결과와 매우 잘 일치하지만, 채널의 중앙 근처에서는 상대적으로 약간 다른 것을 관찰할 수가 있다. 이것은 Choi et al. (1993)이 사용한 격자의 해상도와 본 계산의 격자의 해상도의 차이에 기인한다고 판단되어진다. 즉, 본 연구에서는 리블렛과 평판 근처에 격자의 간격을 Choi et al. (1993)이 사용한 격자의 간격보다 더욱 조밀한 반면 채널의 중앙에서 격자 간격을 Choi et al. (1993)등보다 다소 넓기 때문이다.

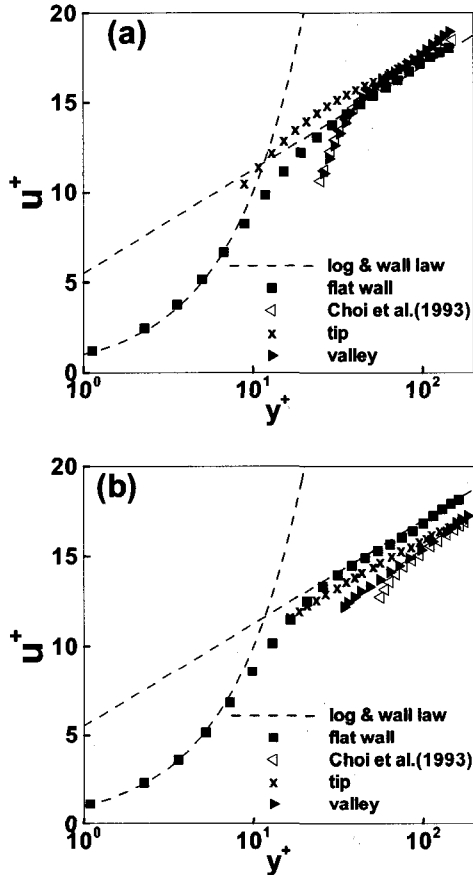


Fig. 5 Variation of mean-velocity profiles normalized by the wall-shear rates $\alpha=60^\circ$; (a) $s^+=20$, (b) $s^+=40$.

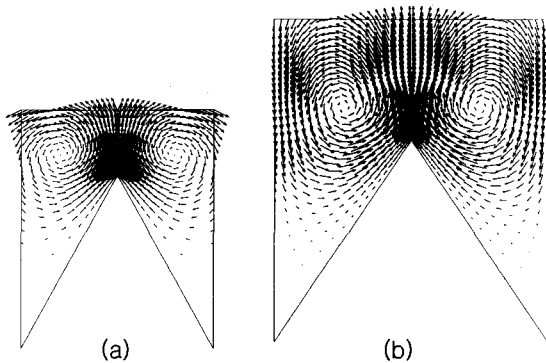


Fig. 6 Mean secondary velocity vectors(v, w) in the transverse plane for $\alpha=60^\circ$; (a) $s^+=20$, (b) $s^+=40$.

Fig. 5는 벽좌표계에서의 벽 전단율로 무차원화된 평균속도분포를 나타내고 있다. Fig. 5의 본 연구의 결과는 Choi et al.(1993)의 결과와 잘 비교되어진다. $s^+=20$ 경우인 Fig. 5(a)에서 평균속도가 로그법칙선 보다 위로 이동되어 있는 것을 알 수 있다. 이것은 점성 아층(viscous sublayer) 두께의 증가에 기인한다. 이것은 Fig. 3(a)의 마찰 저항 감소에 직접적인 원인이 된다. $s^+=40$ 경우는 점성 아층 두께의 감소에 의해서 평균속도가 로그법칙선 아래에 위치한 것을 Fig. 5(b)에서 볼 수 있다.

Fig. 6은 리블렛 주위에서 평균 2차(mean secondary)속도 벡터를 나타내고 있다. 리블렛 밸리 윗부분의 큰 주유동방향 속도들(Fig. 4)에 의해 운동량은 아래쪽 리블렛 밸리로 대류되고 그리고 운동량은 리블렛 표면을 따라서 리블렛 밸리에서 팁으로 이동된다. 와(vortex)의 중심의 위치는, $s^+ \approx 20$ 경우에는 리블렛 팁에서 옆으로 벽단위 6, 위로 2정도 떨어져 있다. $s^+ \approx 40$ 의 경우에는 리블렛 팁에서 옆으로 10, 위로 벽단위 6정도 떨어진 위치에 있다. 평균 2차 유동의 최대 유속 크기는 $s^+=20$ 의 경우는 mean centerline velocity의 0.36%, $s^+=40$ 의 경우는 mean centerline velocity의 0.95%이다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 리블렛 밸리 근처에서 상대적으로 낮은 격자의 해상도 때문에 모든 작은 스케일의 속도를 구현하였다고 말할 수는 없다. 하지만, Fig. 6에서 보이는 평균 와 아래에서 (즉, 리블렛 밸리 근처에서) 반대 방향으로 회전하는 작은 평균 와의 존재는 본 연구뿐만 아니라 선행 연구들에서도 볼 수가 없다. 위의 평균 2차속도 벡터에 관한 본 연구의 결과는 Choi et al.(1993)의 및 Stalio/Nobile(2003)의 결과들과 잘 일치한다.

Fig. 7과 8은 $s^+=20$ 과 $s^+=40$ 에서의 리블렛의 팁과 밸리 사이의 여러 다른 위치(z)에서 각 방향 속도들의 난류강도를 각각 보여주고 있다. Fig. 7과 8은 Fig. 4의 주 유동방향 평균속도들의 y-방향으로의 분포와 비교할 수 있다. 각 난류강도들의 최대값들은 리블렛 팁을 따라 수직방향에 있다. $s^+=20$ 경우에 여러 다른 위치(z)에서 각 난류강도들은 리블렛의 영향으로 리블렛에 아주 가까운

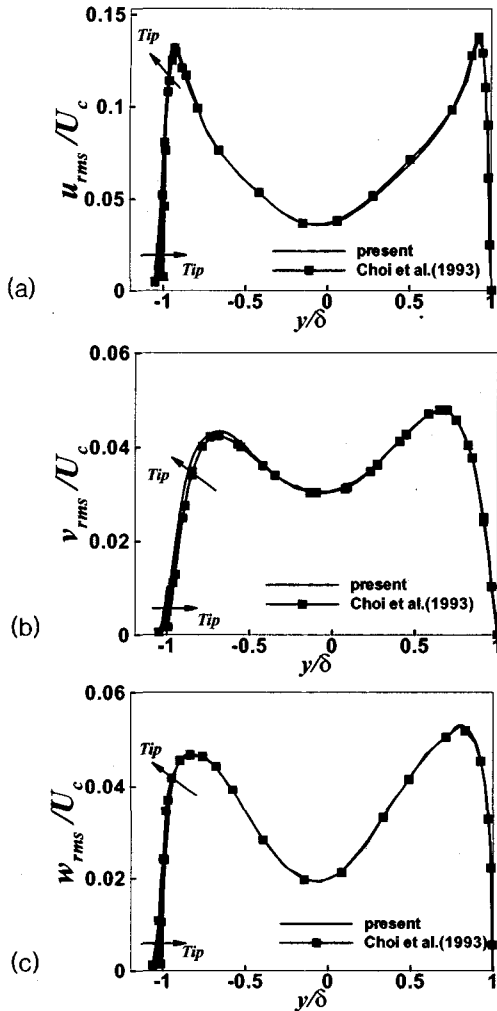


Fig. 7 RMS normalized by the mean centerline velocity U_c in global coordinates for $s^+ = 20$, $\alpha = 60^\circ$; (a) streamwise, (b) normal, (c) spanwise velocity fluctuation.

위치에서만 서로 다른 값들을 가진다. 이 위치에서 멀어지면 각 방향의 난류 강도 값들은 모두 동일한 것을 Fig. 7에서 볼 수가 있다.

하지만, $s^+ = 40$ 의 경우 리블렛의 영향으로 여러 다른 위치(z)에서 각 난류 강도들은 $s^+ = 20$ 경우와 비교해서 리블렛에서 멀리 떨어진 지점까지 서로 다른 값들을 가지는 것을 Fig. 8에서 확인할 수가 있다. Fig. 7과 8에서 볼 수 있듯이 각 난류강도의

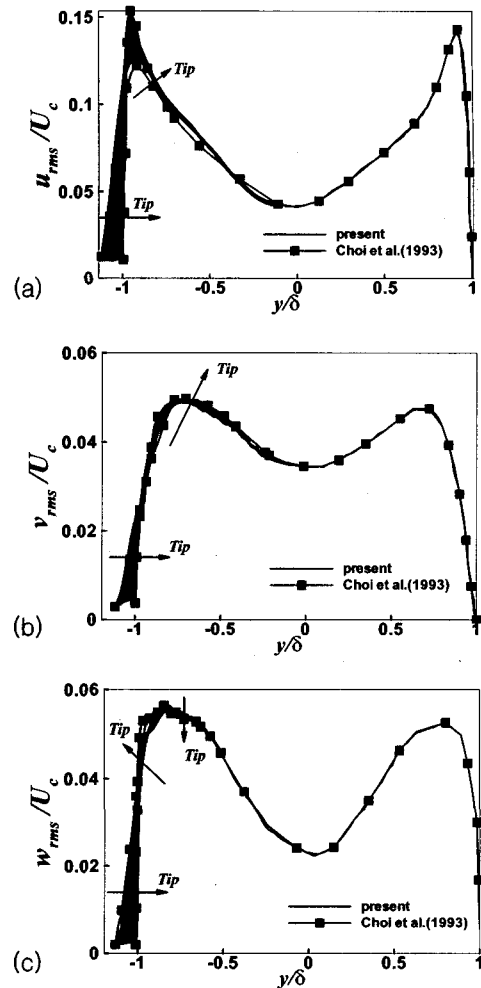


Fig. 8 RMS normalized by the mean centerline velocity U_c in global coordinates for $s^+ = 40$, $\alpha = 60^\circ$; (a) streamwise, (b) normal, (c) spanwise velocity fluctuation

값들은 Choi et al.(1993)의 값들과 잘 일치한다.

Fig. 9는 y-z평면에서의 순간 속도벡터 보여주고 있다. $s^+ = 40$ 의 경우, Fig. 9(a)에서 와들이 리블렛의 팁과 팁 사이에 존재하며 빨리 가까이까지 큰 속도벡터를 가지는 것을 볼 수가 있다. 이로 인해서 리블렛의 벽면들은 상대적으로 큰 마찰저항을 받게된다. 하지만, $s^+ = 20$ 경우, Fig. 9(b)에서 볼 수 있듯이 리블렛의 팁과 팁사이에서는 거의 유동이 없다. 이로 인해서, 유동의 접수면적(wetted area)이

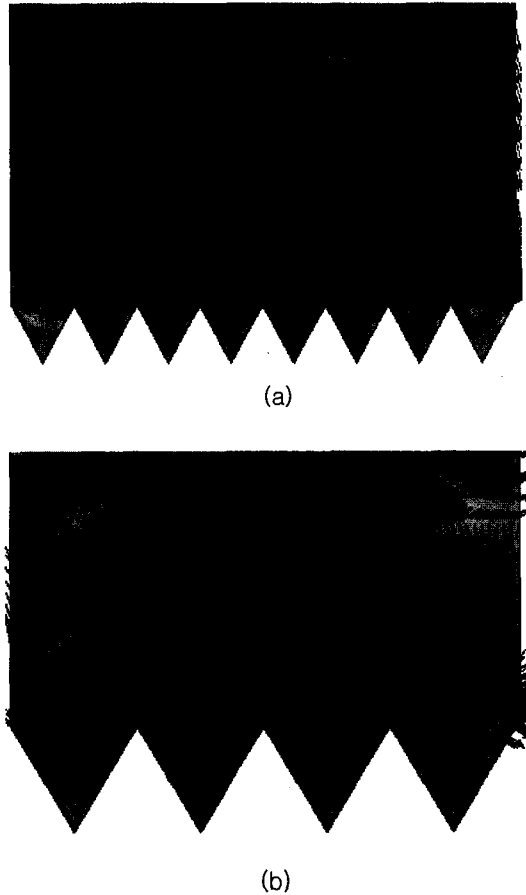


Fig. 9 Instantaneous flows over riblets with $\alpha = 60^\circ$; (a) $s^+ = 20$ and (b) $s^+ = 40$ in the (y-z) plane.

감소 하므로 마찰저항이 상대적으로 $s^+ = 40$ 보다 작다.

Fig. 10 과 Fig. 11 는 $s^+ = 20$, $s^+ = 40$ 두 경우의 각 지점들((a) $y^+ \approx 10$ from riblet tip, (b) $y^+ \approx 10$ from flat wall)에서의 주유동방향의 변동속도를 각각 보여주고 있다. 두 경우 모두 주유동방향으로 길게 늘어진 streak 구조를 관찰할 수 있다. Fig. 10(a)의 $s^+ = 20$ 경우는 Fig. 11(a)의 $s^+ = 40$ 경우에 비해 streak 구조가 더 규칙적인 것을 확인할 수 있다. 이것은 Fig. 9 에서 설명하였듯이 $s^+ = 40$ 의 경우는 유동이 리블렛의 팁과 팁사이에서도 매우 활발하여 이 영향으로 인하여 팁에서 같은

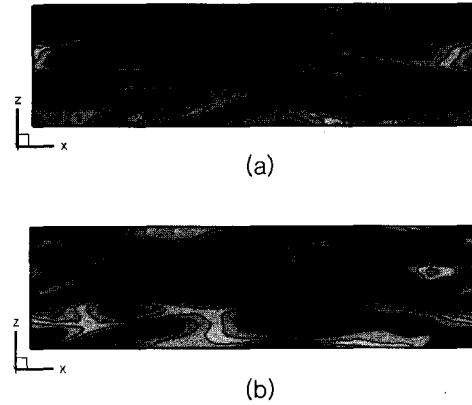


Fig. 10 Contours of u fluctuation for $s^+ = 20$ in the (x, z) plane at (a) $y^+ \approx 10$ from riblet tip, (b) $y^+ \approx 10$ from flat wall

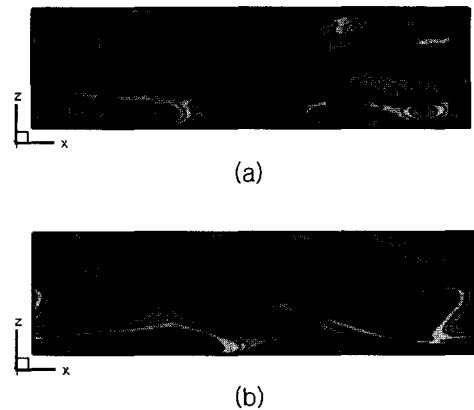


Fig. 11 Contours of u fluctuation for $s^+ = 40$ in the (x, z) plane at (a) $y^+ \approx 10$ from riblet tip, (b) $y^+ \approx 10$ from flat wall

거리만큼 떨어진 곳에서 $s^+ = 20$ 의 유동장보다 더 불규칙적인 것을 Fig. 10(a)와 Fig. 11(a)의 비교를 통해 확인할 수가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 유한체적법을 이용하여 직접수치 모사방법을 사용하여 리블렛이 장착된 채널유동에

서의 마찰 저항감소에 대한 연구를 수행하였다.

마찰저항 증가 형상 ($s^+ = 40$)과 마찰저항 감소 형상 ($s^+ = 20$)의 두 가지 리블렛 형상들에 대하여 연구를 수행하였다. 두 경우 모두 리블렛 각은 $\alpha = 60^\circ$ 와 레놀즈수는 $Re_\tau = 180$ 에 관해서 수치해석이 이루어졌다.

시간에 따른 전단율을 보면 리블렛이 없는 평판에 비해서 $s^+ = 20$ 은 약 6% 감소 그리고 $s^+ = 40$ 은 약 12%의 마찰저항이 증가했고 이 결과는 Choi et al.(1993), Nobile et al.(2003)의 결과와 잘 일치하였다.

두 형상에 대한 평균 속도분포, 난류강도(Root Mean Square)등이 비교되었다. 마찰 저항 감소와 관련하여 $s^+ = 20$ 경우는 점성 아층(viscous sublayer) 두께의 증가에 기인하여 평균속도가 로그법칙선 보다 위로 이동되고, 마찰 저항 증가 형상인 $s^+ = 40$ 경우는 점성 아층 두께의 감소에 의해서 평균속도가 로그법칙선 아래에 위치한다. 예측되는 바와 같이 $s^+ = 40$ 경우의 리블렛 근처에서 각 난류강도들의 값이 평판 근처의 값보다 크며, $s^+ = 20$ 경우는 $s^+ = 40$ 경우와 반대 결과를 보여주었다.

본 연구의 결과들은 Choi et al.(1993)이 설명한 난류 마찰 저항감소와 증가의 메커니즘을 잘 보여 주었다. 즉, $s^+ = 40$ 의 경우는 주유동방향 와들의 평균 직경이 리블렛의 공간보다 작기 때문에 주유동방향 와들이 자유롭게 운동하고 리블렛 벌리 안으로도 움직인다. 이것은 더 넓은 리블렛 표면이 와들이 만드는 sweep 운동에 노출되어서 마찰저항을 증가시킨다. 반면, $s^+ = 20$ 의 경우는 와들의 평균직경이 리블렛의 공간보다 크기 때문에 대부분의 주유동방향 와들이 리블렛 위에 있다. 그리고 리블렛 팁의 제한된 공간만이 sweep 운동에 노출되기 때문에 마찰저항이 감소되는 메커니즘이다. 위의 메커니즘은, 팁에서 $y^+ \approx 10$ 떨어진 단면에서 $s^+ = 40$ 과 $s^+ = 20$ 의 streak 구조의 차이를 뒷받침한다.

본 연구에서는 최소의 채널영역에서 리블렛을 영향을 해석하였다. 향후 연구에서는 본 연구에서 사용한 계산 영역보다 큰 영역에서 더욱 많은 격자계를 사용하여 공간에 대한 더욱 다양한 난류 응집

구조(coherent structures)를 해석하여, 리블렛에 의한 마찰저항 감소 메커니즘을 더욱 체계화하고자 한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 강성희, 1997, Riblet 을 가진 난류 경계층의 난류 구조 변화에 관한 연구, 포항공대 기계공학부 석사학위논문.
- 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.
- 안일준, 장진호, 김효철, 2001, "횡방향 riblet 이 선저의 공기 공동 형성에 미치는 영향," 대한조선학회 논문집, 제 19 권, 제 20 호, pp. 228-232.
- 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.
- Bechert, D.W. and Bartenwerfer, M., 1989, "The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs," J. Fluid. Mech. 206, pp. 105 - 129.
- Choi, H., Moin, P. & Kim, J., 1993, "Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets", J. Fluid. Mech. 255, pp. 503 - 539.
- Choi, K. S., 1989, "Near-wall structure of turbulent boundary layer with riblets," J. of Fluid Mechanics, Vol. 208, pp. 417-458.

- Chu, D.C. and Karniadakis, G.E., 1993, " A direct numerical simulation of laminar and turbulent flow over riblet-mounted surfaces" , J. Fluid. Mech. 250, pp. 1 - 42.
- Goldstein, D., Handler, R. and Sirovich, L., 1995, " Direct numerical simulation of turbulent flow over a modelled riblet-covered surface" , J. Fluid. Mech. 302, pp. 333 - 376.
- Lee, D. H. and Choi, H. C. 2001, " Magneto-hydro-dynamic turbulent flow in a channel at low magnetic Reynolds number" , J. of Fluid Mechanics, Vol. 439, pp. 369-394.
- 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.
- Stalio, E., Nobile, E., 2003, " Direct numerical simulation of heat transfer over riblets" , Int. J. of Heat and Fluid, vol. 24, pp. 356-371.
- Suzuki, Y. and Kasagi, K., 1994, " Turbulent Drag Reduction Mechanism Above a Riblet Surface." AIAA Journal, 32, No. 9, pp. 1781-1790.
- Vukoslavcevic, P., Wallace, J. M., and Balint, J. -L., 1991, " Viscous Drag Reduction Using Streamwise-Aligned Riblets," AIAA Journal, 30, No. 4, pp. 1119-1122.
- Walsh, M. J., 1982, " Turbulent Boundary Layer Drag Reduction Using Riblets" , AIAA paper 82-0169.
- Walsh, M. J., 1983, " Riblets as a Viscous Drag Reduction Technique" , AIAA Journal, Vol. 21, No. 4, pp. 485-486.



< 구본국 >



< 윤현식 >



< 전호환 >