

반원형 리블렛 상부 난류경계층의 유동 구조 연구

이 상 현*, 이 상 준**

(1999년 3월 12일 접수)

Study on Flow Structure of Turbulent Boundary Layer Over Semi-Circular Riblets

Sang Hyun Lee and Sang Joon Lee

Key Words: Riblet(리블렛), Turbulent Boundary Layer(난류경계층), Longitudinal Vortex(주 유동방향 와), Cross-Correlation PIV(상호 상관 PIV), Flow Control(유동 제어)

Abstract

The near-wall flow structures of turbulent boundary layer over riblets having semi-circular grooves were investigated experimentally for the drag decreasing ($s^*=25.2$) and drag increasing ($s^*=40.6$) cases. The field of view used for the velocity field measurement was $6.75 \times 6.75\text{mm}^2$ in physical dimension, containing two grooves. One thousand instantaneous velocity fields over the riblets were extracted for each case of drag increase and decrease. For comparison, five hundreds instantaneous velocity fields over a smooth flat plate were also obtained under the same flow conditions. To see the global flow structure qualitatively, the flow visualization was also performed using the synchronized smoke-wire technique. For the drag decreasing case ($s^*=25.2$), most of the streamwise vortices stay above the riblets, interacting with the riblet tips. The high-speed in-rush flow toward the riblet surface rarely influences the flow inside the riblet valleys submerged in the viscous sublayer. The riblet tips seem to impede the spanwise movement of the longitudinal vortices and induce secondary vortices. The turbulent kinetic energy in the riblet valley is sufficiently small to compensate the increased wetted area of the riblets. In addition, in the logarithmic region, the turbulent kinetic energy are small or almost equal to that of a smooth flat plate. For the drag increasing case ($s^*=40.6$), however, the streamwise vortices move into the riblet valley freely, interacting directly with the riblet inner surface. The penetration of the high-speed in-rush flow on the riblets increases the skin-friction. The turbulent kinetic energy is increased in the riblet valleys and even in the outer region compared to that over a flat plate.

기호설명

- Re_0 : 모래립 두께를 기준으로 한 레이놀즈 수
- s^* : 벽 단위로 무차원화 된 리블렛 간격:
 su_r/v
- T^* : 벽 단위로 무차원화 된 시간: Tu_r^2/ν
- y^* : 벽 단위 수직 좌표: yu_r/v
- z^* : 벽 단위 횡 좌표: zu_r/v
- H : 형태 비교 상수(Shape factor)
- h_p : 가상 원점에서 팁까지의 돌출 높이
- r_w : 리블렛 립 두께
- u_r : 전단 속도

1. 서론

리블렛을 이용한 난류경계층의 제어는 그 적용 범위가 넓을 뿐 아니라 저항감소 효과가 비교적 큰 것으로 알려져 있다.

리블렛을 이용한 저항감소에 관한 초기 연구는 Walsh⁽¹⁾에 의해 많이 이루어졌다. 그는 리블렛의 크기가 $s^* < 30$ 과 $h^* < 25$ 인 조건에서 공기저항이 감소함을 밝혔다. 특히 $h^*=s^*=12$ 의 V자 형태의 리블렛과 $h^*=8, s^*=16$ 의 값을 갖는 반원형태의 리블렛에서 약 8%의 저항감소를 얻었다. 또한 저항감소를 위한 최적의 리블렛 형태로 깊은 골(valley)과 날카로운 립(tip)을 갖는 리블렛 형상을 제시하였다.

Bacher & Smith⁽²⁾는 유동가시화 실험을 통하여 리블렛 판 위에 형성되는 저속의 스트리크(streak)

* 포항공대 첨단유체공학연구소

** 회원, 포항공대 기계공학과

간격이 매끈한 평판보다 더 넓게 형성된다는 점과 리블렛 홈 내부 유동이 매우 느리고 고요하다는 사실을 밝혔다. 이들이 설명한 리블렛 효과는 리블렛 립 부분에서 형성된 이차 와가 주유동 방향 와를 약화시키고 횡 방향의 스트리크 형성을 억제하여, 궁극적으로 난류 경계층 내에서의 운동량 전달을 억제한다고 보았다.

Bechert & Bartenwerfer⁽³⁾는 리블렛 립 부분이 점성내층의 순간적인 횡방향 유동의 형성을 방해하여 난류 운동량 교환을 감소시킨다고 보았다. Choi⁽⁴⁾는 리블렛에 의한 주유동 방향 와의 횡방향 이동 억제와 벽 근처에서 와쌍의 생성 억제를 저항감소의 주요 요인으로 생각하였다. Choi 등⁽⁵⁾은 DNS 방법으로 $s^+ = 20$ 과 $s^+ = 40$ 인 리블렛 표면에 대하여 순간적인 난류구조를 DNS 기법으로 수치모사 하였다. 그들은 $s^+ = 40$ 인 경우 벽 단위 길이로 30 정도인 주유동 방향 와가 리블렛 홈 내부에 형성되어 보다 넓은 표면적이 이들 와가 유발하는 하향 강하(down-wash) 유동에 드러나게 되어 저항이 증가하고, $s^+ = 20$ 인 경우에는 이들 와가 리블렛 립 보다 높은 위치에 형성되어 저항이 감소한다고 보았다.

Goldstein 등⁽⁶⁾은 횡 방향 속도섭동성분의 억제 효과를 저항감소의 중요한 요인으로 제시하였으며, 리블렛 간격이 넓을 경우에는 경계층 와가 리블렛 홈 내부로 유입되어 리블렛의 저항 감소 효과가 감소함을 제시하였다. Suzuki & Kasagi⁽⁷⁾는 3차원 PIV 측정을 통해서 난류 에너지가 주 유동 방향에서 횡 방향으로 재배치 되는 것을 리블렛이 억제한다고 밝혔다. 이처럼 리블렛에 의한 저항감소는 리블렛 표면 근처의 난류경계층의 유동구조와 매우 밀접한 관계를 가지고 있다.

본 연구에서는 PIV 속도장 측정을 통해 매끈한 평판과 반원형상의 리블렛 상부 유동의 난류구조를 공기저항이 증가하는 경우와 감소하는 경우로 나누어 비교함으로써 저항감소 원리를 밝히고자 한다. 이를 위하여 공기 저항이 증가하는 경우와 감소하는 경우에 대하여 유동가시화와 함께 리블렛 상부 유동의 순간 속도장을 각각 1000 장씩 측정하여 난류 통계치를 구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 리블렛과 실험조건

본 실험은 폐쇄형 저 난류 아음속 풍동(10m/s에서 난류 강도는 0.08% 이하)에서 수행되었으며 시험부의 크기는 길이 6m, 높이 0.6m, 폭 0.72m이다. 풍동 시험부 바닥면으로부터 약 100mm 정도 높이

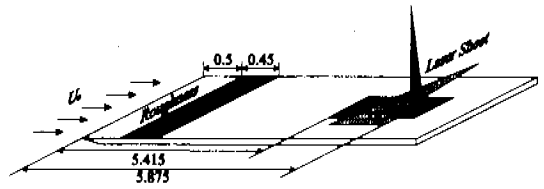


Fig. 1 Schematic diagram of test plate (unit: m).

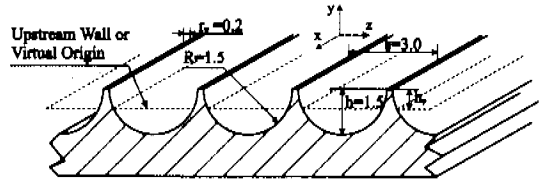


Fig. 2 Geometry of riblet surface and coordinate system (unit: mm).

에 6.2m 길이의 아크릴 판을 설치하고, 선단으로부터 0.5m 지점에 거친 표면을 설치하여 리블렛 표면을 두꺼운 난류경계층 속에 잠기게 하였다. 리블렛 표면은 Fig. 1과 같이 측정부 선단으로부터 5.415m 위치에 설치하였으며, 5.875m 지점에 레이저 시트를 형성시켜 입자 영상을 획득하였다.

본 실험에 사용된 리블렛의 기하학적 형상을 Fig. 2에 표시하였다. 리블렛 표면은 길이 600mm, 폭 300mm의 알루미늄 판을 밀링 가공하여 반지름 1.5mm인 반원형상의 홈을 길이 방향으로 파서 제작하였고, 매끈한 평판은 같은 크기의 알루미늄 판을 사용하였다. 리블렛 립은 두께가 $r_w = 0.2\text{mm}$ 되도록 가공하였다.

자유흐름속도는 저항이 증가하는 경우($U_0 = 5\text{m/s}$)와 감소하는 경우($U_0 = 3\text{m/s}$)의 두 가지로 나누어 실험하였는데, 이는 리블렛 간격(s^+)을 기초로 하여 Walsh⁽¹⁾의 결과에 의거하여 설정하였다.

이들 실험조건에 대해 열선 풍속계를 이용하여 리블렛 주위 속도 분포를 측정한 결과 본 연구에 사용되어진 변수들은 다음 표와 같다.

Table 1 Experimental conditions of this study.

U_0	Re_θ	U_r	s^+	H	T^+	Walsh ⁽¹⁾
3m/s	2340	0.126	25.2	1.34	14.8	5% 저항 감소
5m/s	4950	0.203	40.6	1.21	13.7	4% 저항 증가

속도장 측정시 평판 선단으로부터 5.875m 하류 지점의 횡단면에서 $6.75 \times 6.75\text{mm}^2$ 크기의 유동 영상을 취득하였는데, 여기에는 리블렛 홈 두개가 들어간다.

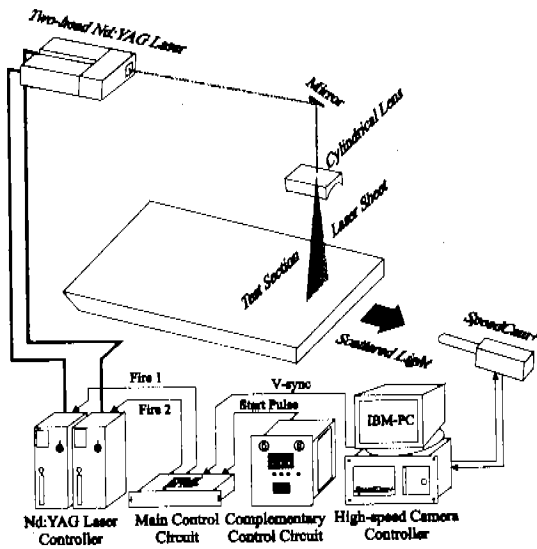


Fig. 3 Digital PIV velocity field measurement system.

2.2 디지털 화상처리장치

Fig. 3은 디지털 PIV 속도장 측정 시스템을 나타낸 것으로 Nd:YAG 레이저, 고속 CCD 카메라, 동기회로, PC 등으로 구성되어 있다. 기존 방식과 비교하여 본 연구에서 구현된 PIV 시스템이 갖는 장점은 고속 CCD 카메라를 사용함으로써 고속 유동에 대한 2-프레임 PTV 혹은 상호 상관 PIV 속도장 측정을 수행할 수 있으며, 시간에 따른 유동 구조의 변화를 연속적인 속도장 측정을 통해 해석할 수 있다는 것이다. Nd:YAG 레이저는 순간적으로 강한 펄스 빛을 내는 광원으로써 본 실험에서 사용된 것은 노출시간이 7ns 이고 강도가 25mW 이상인 PIV 전용으로 이중헤드(2-head) 방식이다.

본 실험에서는 Nd:YAG 레이저와 고속 CCD 카메라를 동기하여 프레임 노출시간 중 원하는 순간에 레이저가 발진하도록 조절할 수 있는 동기회로를 제작하여 깨끗한 입자 영상을 얻을 수 있도록 하였다. 동기회로에 대한 설명은 참고문헌⁽⁹⁾에 자세히 나와 있다.

수직동기신호(V-sync signal)는 CCD 카메라의 프레임 노출시간과 프레임 전송시간을 나타내주는 신호로, 이 수직동기신호를 기준으로 레이저와 카메라 장치들을 동기 하였다. 본 연구에 사용되어진 SpeedCam⁺ 고속 CCD 카메라의 경우, 초당 촬영횟수를 31-1000Hz 까지 1Hz 간격으로 조절할 수 있으므로 프레임 노출시간을 실험조건에 따라서 다양하게 선택할 수 있다. 또한 프레임 전송시간은 10μs로 일반 CCD 카메라의 1ms에 비하여 매우 짧다. 따라서 연속적으로 취득한 두 영상사이

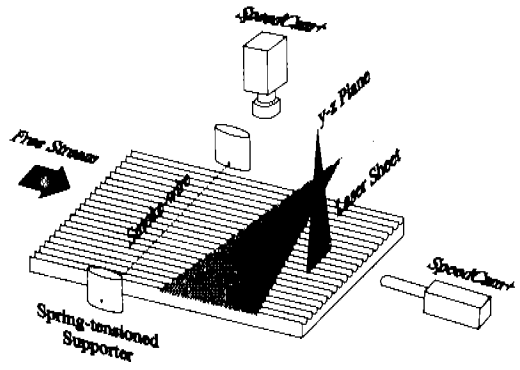


Fig. 4 Schematic diagram for synchronized flow visualization technique.

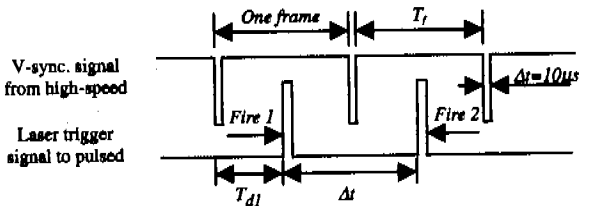


Fig. 5 Signal diagram for synchronized flow visualization.

의 시간차 Δt 를 100μs 정도로 매우 짧게 할 수 있어서 고속 유동의 속도장 측정을 속적으로 수행할 수 있다.

2.3 유동 가시화

Fig. 4는 본 연구에 사용된 연선(smoke-wire) 가시화 장치를 나타낸 것으로, 속도장 측정에 사용된 Nd:YAG 레이저, 고속 CCD 카메라 외에 연선 장치가 추가되었다. 일반적으로 연선 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수가 40보다 큰 유동에는 연선 가시화 기법을 적용하기 어려운 것으로 알려져 있다. 그러나 본 실험에서 개발한 동기화된 연선 기법의 경우, 레이놀즈 수 66.7(자유흐름속도 5m/s)까지 어려움 없이 유동 구조를 가시화할 수 있었다.

연기 발생 용액은 SAFEX 오일과 파라핀 오일을 사용하였다. 일반적으로 연기 발생시간은 수초정도로 짧다(Fukamachi 등⁽⁹⁾). 그러나 동기화 연선 가시화 장치는 초당 40 프레임의 가시화 영상을 받게 되므로 한번의 연기 발생으로 100장 이상의 가시화 영상을 얻을 수 있다. 따라서 연기발생 시간의 연장 보다는 가능한 많은 연기 발생을 위해, 가해주는 전압을 자유흐름 속도에 따라 적절하게 변화시켜 속도가 증가함에 따라 증가하는 강제 대류의 영향을 보상하였다. 이중 헤드 방식의

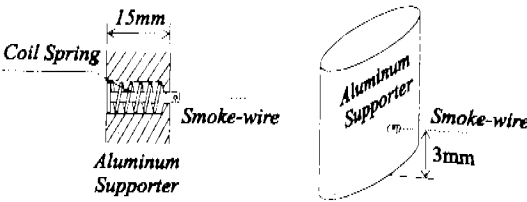


Fig. 6 Spring tensioned smoke-wire supporter.

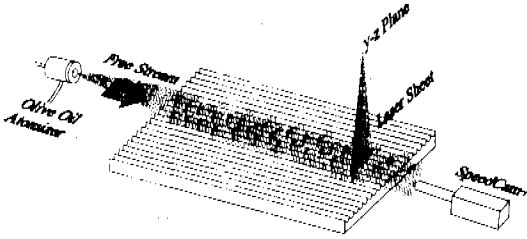


Fig. 7 Experimental apparatus for PIV measurement.

Nd:YAG 레이저를 교대로 동기하여 40Hz 의 레이저 펄스를 얻게 되므로 Fig. 5 에서처럼 $\Delta t = 25\text{ms}$ 시간 간격으로 레이저와 고속 CCD 카메라를 동시시켜 연속적으로 가시화 영상을 얻었다. 동기화된 연선 가시화기법에 대한 자세한 내용은 참고문헌⁽¹⁰⁾에 나와 있다.

유동가시화는 주 유동 방향에 수직인 y-z 단면에 대해 수행하였다. 연선으로는 0.1mm 직경의 니크롬선 두 가닥을 꼬아서 사용하였으며, 열팽창에 의한 선의 늘어짐을 방지하기 위하여 Fig. 6 처럼 코일 스프링으로 장력을 가하였다.

2.4 PIV 속도장 측정

주 유동 방향에 수직인 횡단면(y-z 단면)에 대한 속도장 측정은 Fig. 7 과 같이 풍동 시험부 위쪽에서 레이저 시트를 주사하고 리플렛 후방에서 입자 영상을 촬영하였다. 산란 입자는 올리브 오일 입자 발생장치를 풍동의 수축부에 장착하여 공급하였다. 리플렛 홈 내부 유동을 측정하기 위해서는 매우 작은 영역을 확대하여 촬영하여야 하기 때문에 고속 CCD 카메라 앞에 마이크로 줌 렌즈를 부착하였다.

횡단면 내부 속도장 측정의 경우, 유동 입자들이 레이저 시트를 수직으로 통과하기 때문에 두 번째 영상 획득 시 첫 번째 영상의 입자 중 일부가 레이저 시트를 빠져 나가고 새로운 입자들이 들어 오게 된다. 따라서 가능한 한 시간간격 Δt 를 짧게 하여 레이저 시트를 비추어 줄 필요가 있다. 그러나 PIV 측정에서 시간 간격 Δt 는 보통 미소조사구 간 내 입자들의 최대 변위를 기준으로 정해지기 때문에 서로 상충되므로 정확한 검증이 필요하다.

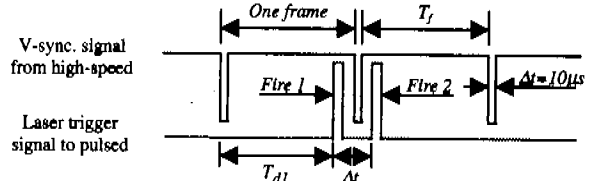


Fig. 8 Signal diagram for PIV measurement.

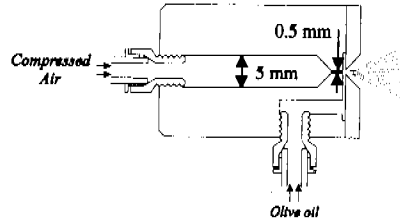


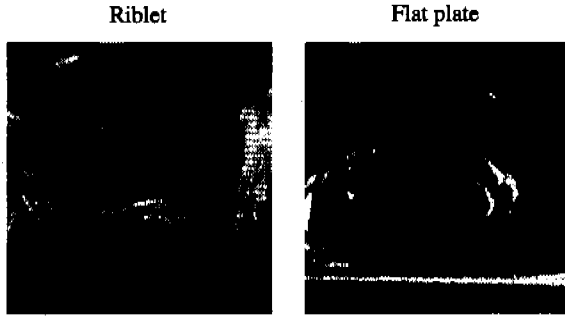
Fig. 9 Schematic diagram of the olive oil atomizer.

Fig. 8 은 속도장 측정시 사용한 동기 신호도를 나타낸 것으로 한장의 영상 프레임울 얻는데 걸리는 시간은 25ms 이다. 본 연구에서는 시간간격 Δt 를 $U_0=3\text{m/s}$ 에서 $160\mu\text{s}$ 로, $U_0=5\text{m/s}$ 에서는 $110\mu\text{s}$ 로 하여 유동 영상을 측정하였다. 레이저 시트 두께를 4mm 로 하였으므로 평균적으로 $U_0=3\text{m/s}$ 에서는 최대 6.2% 최소 1.58%, $U_0=5\text{m/s}$ 에서는 최대 7.8% 최소 3.25%의 입자가 두 번째 영상에서 레이저 시트를 빠져 나가는 것으로 평가 되었다.

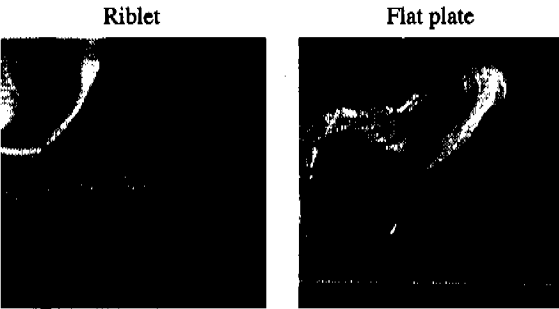
산란 입자로는 올리브 오일을 사용하였으며 입자 발생장치는 압축공기를 이용하는 방식으로 Fig. 9 와 같은 형태로 제작하였다. PIV 측정에 있어서 입자 크기와 단위 부피 당 입자 밀도를 적절히 선정하는 것이 중요하다. 넓은 영역에서는 상관이 없으나 리플렛 홈 내부의 속도장을 측정하기 위해서는 측정 입자의 밀도를 높여야 한다. 따라서 오일과 공기와 혼합비율을 변화시켜가며 파악한 결과, 가장 분무 밀도가 높게 되는 공기 유량은 5.077 Umin 이었으며, 이 조건에서 산란 입자를 생성시켰다. 생성된 올리브 오일 입자의 평균 직경은 $3\mu\text{m}$ 로 유체 추종성이 우수한 것으로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 10 은 $6.75 \times 6.75\text{mm}^2$ 크기의 수직단면(y-z 평면)에서 리플렛 상부 순간 유동을 가시화 결과를 나타낸 것이다. 저항이 증가하는 경우($s^+=40.6$)와 감소하는 경우($s^+=25.2$) 모두 벽 단위로 약 30 정도 외 비슷한 크기의 와가 리플렛과 평판 상부에 형성되는 것을 볼 수 있다. 따라서 저항이 감소하는 경우에는 이 와가 리플렛 간격보다 크게 되어



(a) Drag decreasing case: $s^*=25.2$



(b) Drag increasing case: $s^*=40.6$

Fig. 10 Flow visualization images of streamwise vortices.

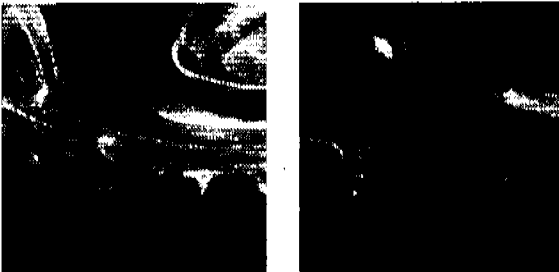
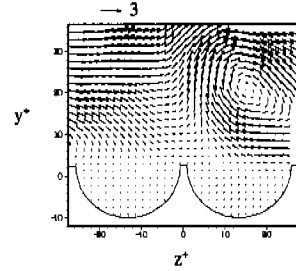


Fig. 11 Riblet tip effect for the drag decreasing case.

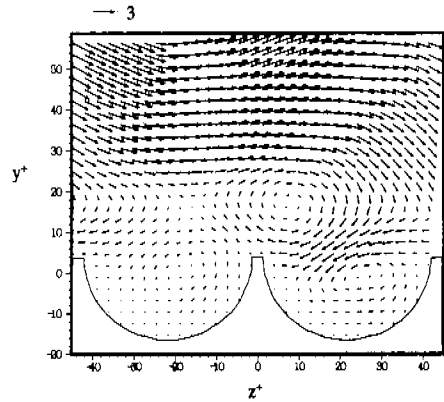
리블렛 홈 내부로의 침투가 억제되며, 저항이 증가하는 경우에는 주 유동방향 와가 리블렛 간격보다 작게 되어 이들이 리블렛 홈(valley) 내부로 자유롭게 들어가게 된다.

Fig. 11은 저항이 감소하는 조건($s^*=25.2$)에서 취득한 가시화 영상 중 리블렛 팁 효과를 보여주는 결과를 나타낸 것이다. 리블렛 팁에 의하여 주 유동 방향의 와가 제약 받고 있으며 이차 와(secondary vortex)가 리블렛 팁 주위에 생성되고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 12는 리블렛 상부 유동의 순간 속도장 결과를 나타낸 것이다. 저항이 증가하는 경우($s^*=40.6$)와 감소하는 경우($s^*=25.2$) 모두 벽 단위로 30정도의



(a) Drag decreasing case: $s^*=25.2$



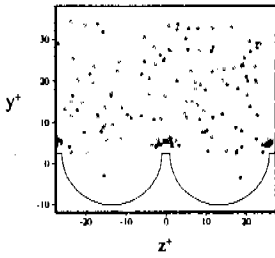
(b) Drag increasing case: $s^*=40.6$

Fig. 12 Instantaneous velocity fields over riblets.

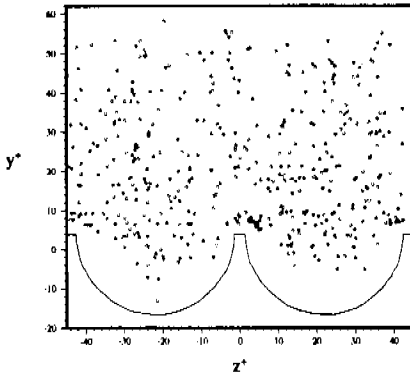
비슷한 크기의 와가 리블렛 상부에 형성되는 것을 볼 수 있다. 따라서 저항이 감소하는 경우에는 주 유동방향 와가 리블렛 간격보다 크게 되어 리블렛 홈 내부로의 침투가 억제되며, 저항이 증가하는 경우에는 주 유동방향 와의 크기가 리블렛 간격보다 작게 되어 이들이 리블렛 홈 내부로 활발히 침투하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 13은 연속적인 100장의 순간 속도장으로부터 주 유동 방향 와도의 중심위치를 구하여 그 결과를 나타낸 것이다. 이때 무차원화한 와도 값이 일정 한계 값(threshold value:100)보다 큰 와도의 중심을 선택하였다. 저항이 감소하는 경우에는 와도의 중심이 거의 가상원점($y^*=0$) 위쪽에 형성되어 있는데, 이는 주 유동방향 와가 리블렛 홈 내부로 침투하는 것이 억제되고 있음을 의미한다. 또한 리블렛 팁 근처에 와도 중심이 집중적으로 모여 있음을 알 수 있는데, 이는 이차 와의 형성에 의한 것으로 리블렛 팁 효과가 활발하게 발생하고 있음을 나타낸다.

반면에 저항이 증가하는 경우에는 주 유동 방향 와가 리블렛 상부에서 가상원점 아래쪽까지 전 영역에 고르게 분포하고 있음을 볼 수 있는데, 이것으로부터 주 유동방향 와가 리블렛 홈 내부까지



(a) Drag decreasing case: $s^+=25.2$



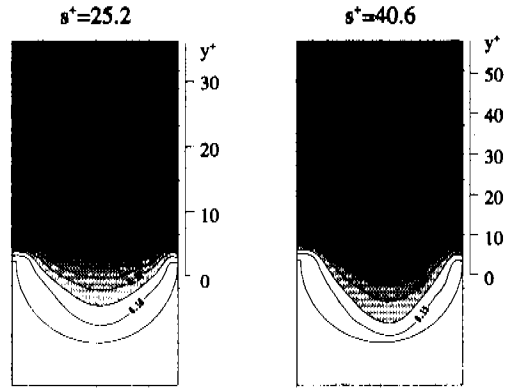
(b) Drag increasing case: $s^+=40.6$

Fig. 13 Distribution of vorticity centers.

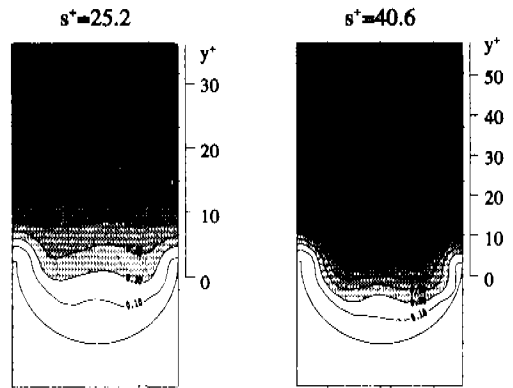
침투하고 있음을 알 수 있다. 또한 리블렛 팁 효과가 감소하여 리블렛 팁 주위에 형성된 와도 중심의 숫자가 저항이 감소하는 경우에 비해 감소하였다.

저항이 증가하는 경우와 감소하는 경우에 대한 난류 통계치 변화율 보기 위하여 각각의 경우에 대해 리블렛 상부 유동은 1000장의 속도장을, 그리고 평판 상부 유동에 대해서는 500장의 순간 속도장을 구하여 통계 처리하였다. Fig. 14는 마찰 속도 u_τ 로 무차원화 된 속도 섭동성분(난류강도)의 등고선도를 나타낸다. 저항이 증가하는 경우 ($s^+=40.6$)에는 리블렛 홈 내부와 리블렛 상부에서 난류강도 성분이 모두 증가하고 있다.

전체적인 분포 형태를 보면 수평 방향(w 방향)의 속도 성분의 난류강도 분포는 리블렛의 홈 내부에서 옅은 선을 가지며, 수직 방향(y 방향)의 속도 성분의 난류강도는 리블렛 홈 중심부가 위로 돌출한 형태의 등고선 형태를 보이고 있다. 이로부터 수직 방향의 속도 성분의 난류강도는 리블렛 중앙에서 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 리블렛외 기하학적 형태는 약간 다르지만 V-자형 리블렛에



(a) Lateral velocity fluctuations: $\sqrt{w'^2}/u_\tau$



(b) Vertical velocity fluctuations: $\sqrt{v'^2}/u_\tau$

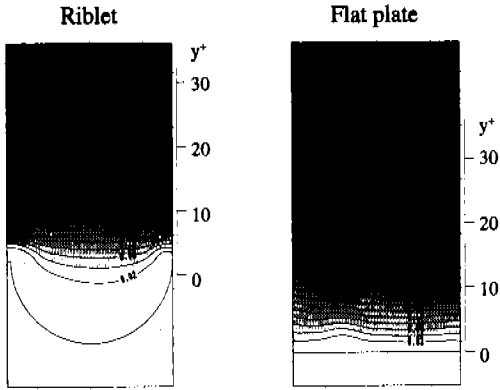
Fig. 14 Contour plots of velocity fluctuations.

대한 Choi 등⁽⁵⁾의 계산 결과와 전체적인 분포 형태가 잘 일치하고 있다.

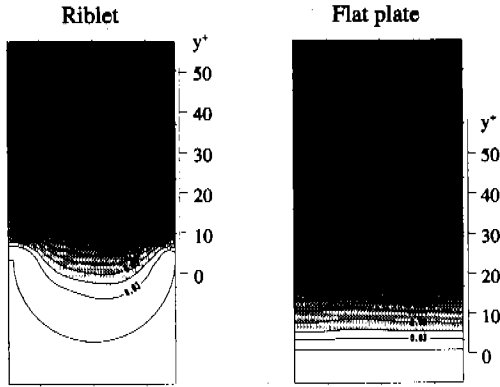
Fig. 15는 난류 운동에너지 등고선도를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 2차원 속도장 측정기법으로 횡유동(cross flow)의 속도성분 v 와 w 만을 측정하였으므로 등방성 가정(isotropic assumption)을 사용하여 난류 운동에너지 값을 다음과 같이 구하였다.

$$k = \frac{1}{2} \rho (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \approx \frac{3}{4} \rho (\overline{v^2} + \overline{w^2}). \quad (1)$$

Fig. 15를 보면 저항이 감소하는 경우에는 리블렛 홈 내부의 유동이 매우 중요하며 전체적으로 난류 에너지 생성이 평판에 비하여 약간 줄어들었다. 이는 주 유동방향 와(vortex)와 상부로부터 유입되는 빠른 하강 유동이 리블렛 홈 내부로 제대로 침투하지 못하고 리블렛 팁에 의한 주 유동 방향 외 성장과 횡 방향 모멘텀 전달이 감소되기 때문이다. 리블렛 표면 부근에서의 이러한 유동 제어



(a) Drag decreasing case: $s^*=25.2$



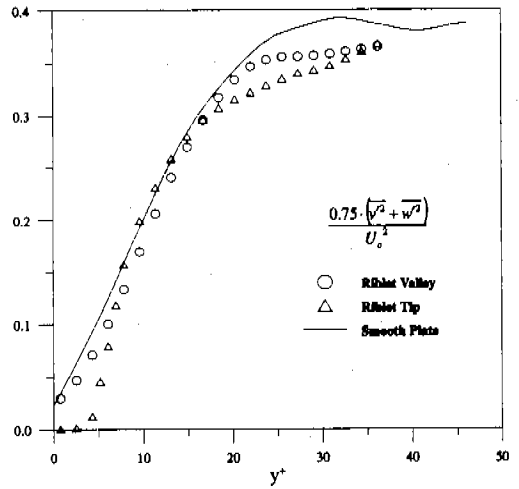
(b) Drag increasing case: $s^*=40.6$

Fig. 15 Contour plots of turbulent kinetic energy.

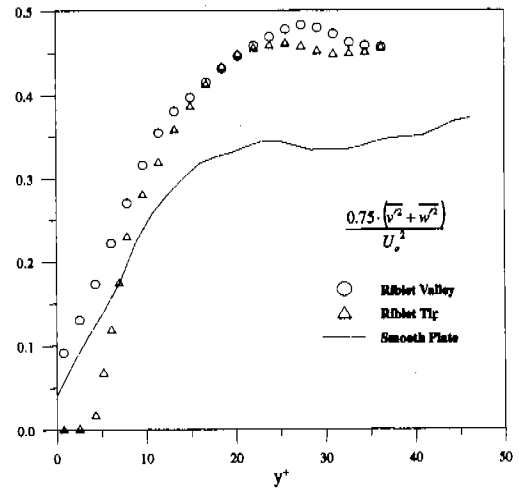
효과는 리블렛 상부영역의 유동특성에도 영향을 주게 된다.

저항이 증가하는 경우에는 리블렛 홈 내부까지 난류 에너지 생성이 활발하게 전파되고 있으며, 리블렛 상부 영역에서도 평판에 비하여 큰 난류 에너지를 가진다.

Fig. 16은 평판 및 리블렛 팁($z^*=0$)과 끝짜기($z^*=s/2$) 상부위치에서의 난류 운동에너지 값을 저항이 증가하는 경우와 감소하는 경우에 대하여 상호 비교한 것이다. 저항이 감소하는 경우, 점성저층 영역에서 리블렛 팁과 끝짜기 모두 평판에 비해 낮은 운동에너지 값을 가지며 $y^*>20$ 인 바깥영역에서도 같은 결과를 보여주고 있다. 반면에 저항이 증가하는 $s^*=40.6$ 의 경우, 점성저층 영역에서도 리블렛 끝짜기 위치에서는 평판에 비해 큰 운동에너지 값을 가진다. 또한 상부 영역에서는 리블렛 팁과 끝짜기 모두 평판에 비해 30% 이상



(a) Drag decreasing case ($s^* = 25.2$)



(b) Drag increasing case ($s^* = 40.6$)

Fig. 16 Comparison of turbulent kinetic energy profiles.

큰 값을 가진다. 이는 주 유동방향 와와 상부로부터 유입되는 빠른 하강 유동이 리블렛 홈 내부까지 침투하여 리블렛 표면과 활발하게 접촉을 일으키기 때문이다. 평판에 비해 넓은 표면적을 갖는 리블렛과의 직접적인 마찰은 저항 증가의 주된 요인으로 작용하며, 그 효과는 리블렛 상부의 유동 특성에도 영향을 크게 미쳐 평판 보다 더 큰 난류 에너지를 생성하고 있다.

4. 결 론

유동가시화와 PIV 속도장 측정을 통하여 반원

형 리블렛 상부 난류경계층의 유동구조를 저항이 감소하는 경우와 증가하는 경우에 대하여 비교하였다.

(1) 저항이 감소하는 경우 ($s^+ = 25.2$)

리블렛 간격보다 크기가 큰 주 유동방향 와는 주로 리블렛 상부에 형성되며, 리블렛 홈 내부로의 침투가 억제 되어 리블렛 표면과의 직접적인 마찰이 감소한다. 또한 리블렛 팁 효과로 주 유동방향 와의 중심이 리블렛 팁 주위에 집중적으로 모여 있으며, 대부분 가상원점 위쪽에 형성 되어 있다. 또한 이와 같은 유동 특성으로 인해 리블렛 홈 내부와 상부 영역에서 유동의 난류강도와 난류 에너지 생성이 평판의 경우에 비해 감소하였다.

(2) 저항이 증가하는 경우: $s^+ = 40.6$

주 유동방향 와의 크기가 리블렛 간격보다 작게 되어 이들 와가 리블렛 홈 내부로 자유롭게 침투하며, 상부로부터 하강하는 빠른 유동도 리블렛 홈 내부로 깊이 침투한다. 따라서 평판보다 표면적이 넓은 리블렛 표면과의 마찰 저항이 크게 증가하며, 리블렛 팁 효과도 감소하게 된다.

그리고 리블렛 홈 내부에서 난류강도와 난류 운동에너지가 증가하고, 리블렛 상부 영역에서도 평판에 비해 큰 값을 가진다.

후 기

본 연구는 첨단유체공학 연구센터(AFERC)의 연구비 지원에 의한 것으로 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Walsh, M. J., 1983, "Riblets as a Viscous Drag Reduction Technique," *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 4, pp.485~486.
- (2) Bacher, E. V. and Smith, C. R., 1985, "Turbulent Boundary Layer Modification by Surface Riblets," *AIAA Journal*, Vol. 24, No. 8, pp.1382~1385.
- (3) Bechert, D. W. and Bartenwerfer, M., 1989, "The Viscous Flow on Surfaces with Longitudinal Ribs," *J. Fluid Mech.*, Vol. 206, pp.105~129.
- (4) Choi, K. -S., 1989, "Near-Wall Structure of a Turbulent Boundary Layer with Riblets," *J. Fluid Mech.*, Vol. 208, pp.417~458.
- (5) Choi, H. C., Moin, P. and Kim, J., 1993, "Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow Over Riblets", *J. Fluid Mech.*, Vol. 255, pp.503~539.
- (6) Goldstein, D., Handler, R. and Sirovich, L., 1995, "Direct Numerical Simulation Of Turbulent Flow Over a Modeled Riblet Covered Surface," *J. Fluid Mech.*, Vol.302, pp.333~376.
- (7) Suzuki, Y. and Kasagi, N., 1994, "Turbulent Drag Reduction Mechanism Above a Riblet surface," *AIAA Journal*, Vol.32, pp.1781~1790.
- (8) Lee, S. H., 1999, "Study on Near-Wall Structure of Turbulent Boundary Layer Over a Riblet Surface for Drag Reduction Using the Velocity Field Measurement Technique," *MS Thesis*, Dept. Mech. Eng., POSTECH.
- (9) Fukamachi, N., Ohya, Y. and Nakamura, Y., 1991, "An Improvement of the Smoke-Wire Method of Flow Visualization" *Fluid Dynamic Research*, Vol.169, pp.23~29.
- (10) Lee, S. J. and Lee, S. H., 1999, "Synchronized Smoke-Wire Technique for Flow Visualization of Turbulent Flows," *J. Flow Visualization and Image Processing*, accepted.