

미세 리블렛 평판 상부 난류경계층 유동에서 횡방향 와의 공간적 분포특성

최용석[†] · 이상준^{*}

Spatial Distributions of Spanwise Vortices in a Turbulent Boundary Layer over a Micro-riblet Film

Yong Seok Choi, Sang Joon Lee

Key Words : Micro-riblet film(미세 리블렛 필름), Vortex identification(와류규명), Turbulent structure(난류구조), Drag reduction(항력감소), PIV(입자유속계)

Abstract

Turbulent boundary-layer over a micro-riblet film(MRF) was investigated experimentally. The MRF has sharp V-shaped micro scale grooves of 300 μ m in width and 176.8 μ m in height. Particle image velocimetry(PIV) system was employed to measure velocity fields of flow over the MRF coated plate. Flow over a smooth plate was also measured for comparison. The PIV measurements were taken in the streamwise wall-normal planes at $Re_{\theta} = 985$ and 2342. Vortex structures of the flow were analyzed by extracting the swirling strength as an unambiguous vortex-identification criterion. As a result the number of spanwise vortices with clockwise(negative) rotation decreases rapidly in the near-wall region($y < 0.2h$), but decreases slowly in the outer region($0.2h < y < h$). However, the number of positive spanwise vortices is increased rapidly in the near-wall region, but maintains nearly a constant value in the outer region. In addition, in the case of drag reduction, the number of spanwise vortices over MRF surface is smaller than that over a smooth plate.

기호설명

- s^+ : 벽 단위 리블렛 간격: s/y^*
 h^+ : 벽 단위 리블렛 높이: h/y^*
 y^+ : 벽 단위 수직좌표: y/y^*
 u^* : 마찰속도: $(\tau_w/\rho)^{1/2}$
 y^* : 벽 단위(viscous wall unit): v/u^*
 Re_{θ} : 모멘텀 두께 기준의 레이놀즈 수
 λ_{cl} : 와 회전강도(swirling strength)

1. 서론

주 유동 방향을 따라 미세한 홈들이 파여진 표면을 갖는 리블렛은 항력감소에 효과적인 수동적 유동제어 기법으로 잘 알려져 있다. 몇몇 연구를 통해서 리블렛은 물체 표면 부근의 유동 구조를 변화시킴으로써 물체에 작용하는 항력을 줄여주는 것으로 밝혀졌다.

리블렛을 이용한 저항감소에 대한 초기연구는 Walsh⁽¹⁾에 의해 이루어졌다. 그는 저항감소를 위한 최적의 리블렛 형태로 깊은 골(valley)과 날카로운 팁(tip)을 갖는 리블렛 형상을 제시하였다. Bacher와 Smith⁽²⁾는 유동가시화 실험을 통하여 리블렛 판 위에 형성되는 저속의 스트릭(streak) 간격이 매끈한 평판보다 더 넓게 형성되며 리블렛 홈 내부 유동이 매우 느리고 고요

[†] 포스텍 기계공학과

E-mail : yschoi98@postech.ac.kr

TEL : (054)279-5552 FAX : (054)279-3199

^{*} 회원, 포스텍 기계공학과

하다는 사실을 밝혔다. 이들은 리블렛 팁 부분에서 형성된 이차(secondary) 와가 주 유동 방향의 와를 약화시키고 횡방향의 스트릭 형성을 억제하여, 궁극적으로 난류경계층 내에서 운동량 전달을 억제한다고 보았다.

Bechert & Bartenwerfer⁽³⁾는 리블렛 팁 부분이 점성내층의 순간적인 횡방향 유동의 형성을 방해하여 난류 운동량 교환을 감소시킨다고 보았으며 Choi⁽⁴⁾는 리블렛에 의한 주유동 방향 와의 횡방향 이동 억제와 벽 근처에서 와쌍의 생성 억제를 저항감소의 주요요인으로 생각하였다. Choi 등⁽⁵⁾은 DNS 수치모사를 통해 $s^+ = 40$ 인 경우 벽 단위 길이로 30 정도인 주유동 방향 와가 리블렛 홈 내부에 형성되어 보다 넓은 표면적이 와유동에 드러나게 되어 저항이 증가하고 $s^+ = 20$ 인 경우에는 이들 와가 리블렛 팁 보다 높은 위치에 형성되어 저항이 감소한다고 하였다. Lee 등⁽⁶⁾은 Choi 등의 수치 모사결과를 PIV 실험으로 측정하여 주유동 방향 와의 생성위치를 확인하였다.

Goldstein 등⁽⁷⁾은 횡 방향 속도 섭동성분의 억제 효과를 저항감소의 중요한 요인으로 제시하였으며, 리블렛 간격이 넓은 경우에는 경계층 와가 리블렛 홈 내부로 유입되어 리블렛의 저항 감소 효과가 감소한다고 하였다. Suzuki & Kasagi⁽⁸⁾는 3차원 PTV 측정을 통해서 난류 에너지가 주 유동 방향에서 횡방향으로 재배치 되는 현상을 리블렛이 억제한다고 밝혔다. 이처럼 리블렛에 의한 저항감소는 리블렛 표면 부근 난류경계층의 유동구조와 매우 밀접한 관계를 가지고 있다.

응용연구로 본 연구실에서는 MEMS기법으로 제작한 미세 리블렛 필름(micro riblet film, MRF)을 실린더⁽⁹⁾ 및 NACA 0012 익형⁽¹⁰⁾에 부착하고 풍동 실험을 통해 항력을 측정한 결과 최대 7~8%의 항력감소 효과를 실험적으로 확인하였다.

일반적으로 난류의 유동구조는 유동내부의 와(vortex)구조를 규명함으로써 파악될 수 있다. Chong 등⁽¹¹⁾은 와영역이 속도구배 텐서(velocity gradient tensor)의 고유치(eigenvalue)가 복소수 값을 가지는 영역으로 정의하였으며, Adrian 등⁽¹²⁾은 2차원 속도장에서 와영역 또한 속도구배 텐서의 고유치가 복소수 값을 가지는 영역임을 보였다. 이와 같은 와영역의 정의를 사용하면 물체 표면 부근을 흐르는 경계층처럼 급격한 전단유력 변화가 존재하는 영역에서 와영역을 효과적으로 구분해 낼 수 있다는 장점이 있다. 이러한 와영역

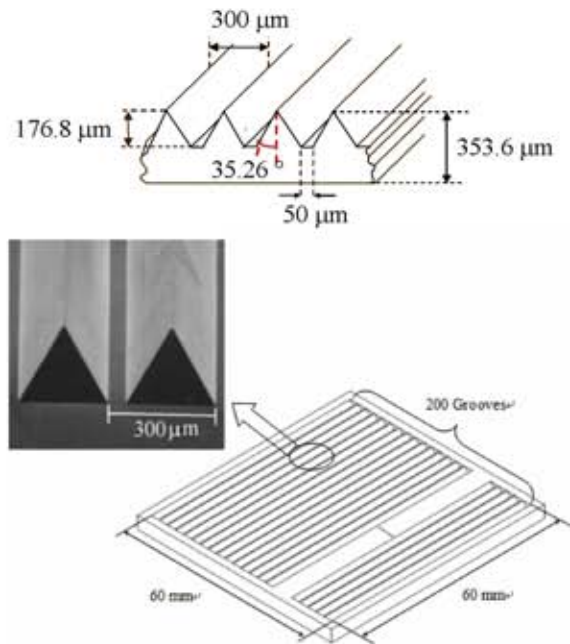


Fig. 1 Micro riblet film

정의를 이용하여 Christensen 등⁽¹³⁾은 매끈한 평판 상부의 난류경계층에서 횡방향 와의 분포 및 와 크기의 확률분포를 연구하였다.

본 연구에서는 와영역 정의를 적용하여 매끈한 평판과 MRF가 부착된 평판 상부 경계층 유동의 와구조를 비교해 보고자 한다. 리블렛에 기인한 유동저항의 감소는 접촉면으로의 운동량 전달이 감소됨을 의미하므로 와구조에 차이가 있을 것으로 예상된다. 와구조의 변화양상을 확인하고 저항감소의 원리를 밝혀보고자 본 실험에서는 매끈한 평판 및 MRF 상부 유동의 순간 속도장을 각각 1000장씩 측정하여 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 구성

2.1 미세 리블렛 필름(MRF)

MRF의 형틀은 MEMS기법 중에서 비등방성 식각(anisotropic etching)기술을 이용하여 제작하였다. 먼저 실리콘 웨이퍼를 비등방성 식각액으로 식각시켜 각도 35.26°의 V형 홈(grooves)을 웨이퍼 위에 형성시킨다. 60×60mm² 크기의 웨이퍼 위에 형성된 리블렛 홈의 개수는 200개이며 Fig. 1과 같이 각각의 리블렛 홈은 너비가 300μm이고 높이는 176.8μm이다. MRF는 웨이퍼를 형틀로 사용하여 PDMS micro-molding 기술로 반복적으로 제작하였으며, 전자현미경을 통해 날카로운 V형의 리블렛 끝단(tip)을 관찰할 수 있었다. 본 실험에

사용된 MRF를 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 실험장치 및 측정기법

본 실험은 PIV 실험 전용으로 개발된 폐쇄형 아음속 풍동에서 수행되었다. 본 풍동은 $150 \times 150 \times 1800 \text{mm}^3$ 크기의 시험부를 가지며 자유흐름속도 7m/s에서 난류강도는 약 0.1% 이내이다.

실험은 1.6m 길이의 평판을 풍동 실험부 내에 설치한 후 수행되었는데 평판의 설치 높이로 인한 시험부 단면의 크기는 $116 \times 150 \text{mm}^2$ (높이 \times 폭)이다. 인위적으로 난류경계층을 형성시키기 위해 평판 선단부에 트립 와이어와 560mm 길이의 사포(#220)를 부착하였다. 리블렛 표면의 항력감소는 주유동 방향 외의 크기와 리블렛 골의 너비가 밀접한 연관성을 가지고 있으므로 주유동 방향 외를 생성시키기 위해 층류가 아닌 난류 유동 조건에서 실험을 수행하였다.

Fig. 2는 평판에 MRF를 부착한 모습의 개략도이다. MRF는 평판 선단부로부터 1200mm 하류 지점($x=0$)에 부착하였으며, 리블렛의 돌출높이(protrusion height)를 고려하여 MRF 부착부위의 평판을 $300 \mu\text{m}$ 깊이로 정밀하게 깎아내어 리블렛 표면의 가상원점을 평판표면과 일치시켰다.

고속 CMOS카메라(FASTCAM-ultra APX)를 사용하여 1024×1024 픽셀해상도에서 초당 2,000 프레임씩 유동영상을 취득하였다. 이러한 dynamic PIV 방식의 속도장 측정기법은 높은 시간분해능으로 시간에 따른 유동의 속도장 변화 양상을 관찰할 수 있다는 장점이 있다. 이와 더불어 10mJ의 레이저 펄스를 2000Hz의 반복율(repetition rate)로 방출할 수 있는 고속 Nd:YLF레이저(Pegasus)를 사용하였으며, 카메라와 레이저의 동기화를 위해서 동기장치(BNC 555)가 사용되었다. 추적입자로는 평균직경이 $3 \mu\text{m}$ 정도인 올리브 오일입자를 사용하였는데, 이는 유동 추종성이 매우 우수한 것으로 알려져 있다.

속도장 정보는 본 연구실에서 자체 개발된 PIV

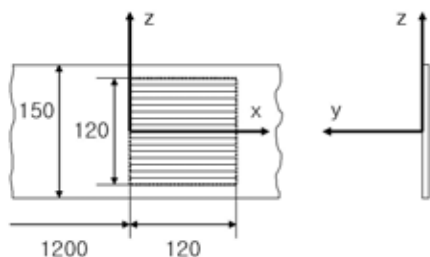


Fig. 2 Configuration of the flat plate attached with micro riblet films

프로그램을 사용하여 얻었으며 상호상관(cross correlation) 알고리즘과 순환(recursive) 알고리즘을 적용하여 속도장 정보를 획득하였다.

2.3 실험조건

실험은 $U_0=3.3 \text{m/s}$ 와 $U_0=10 \text{m/s}$ 의 2가지 자유흐름속도에서 수행되었으며 MRF 상류에 해당하는 $x=-30 \text{mm}$ 위치에서 측정된 속도장 결과로부터 얻어진 변수들을 Table. 1에 나타내었다. Walsh(1)의 결과에 의거할 때 두 경우 모두 저항이 감소하는 경우에 해당한다.

유동영상은 x-y 평면에서 획득하였으며 각 측정 단면의 크기는 $52 \times 52 \text{mm}^2$ 로 Table. 2는 PIV 속도장 측정을 통해 획득된 속도벡터들의 공간 해상도를 나타낸 것이다.

본 실험에서 매끈한 평판 상부는 벽에 근접한 영역까지 속도장 결과를 얻을 수 있었으나 MRF 평판의 경우 PDMS재질에 의한 레이저 광의 심한 난반사로 인해 $y=5 \text{mm}$ 정도의 높이까지는 깨끗한 입자영상을 얻을 수 없었다. 따라서 매끈한 평판과 MRF 평판 상부의 와 구조는 자유흐름속도 3.3m/s와 10m/s에서 y^+ 가 각각 63, 147 이상인 로그층(log-layer)에서만 비교하였다.

Table. 1 Experimental parameters of this study

U_0 (m/s)	Re_θ	U^* (m/s)	y^* (μm)	s^+	h^+
3.3	985	0.19	79	3.8	2.2
10	2342	0.46	34	8.8	5.2

Table 2 Spatial resolutions of vector fields

U_0 (m/s)	Δx (mm)	Δx^+	Δy (mm)	Δy^+
3.3	0.42	5.3	0.42	5.3
10	0.42	12.4	0.42	12.4

3. 결과 및 고찰

3.1 와(vortex) 구조 규명

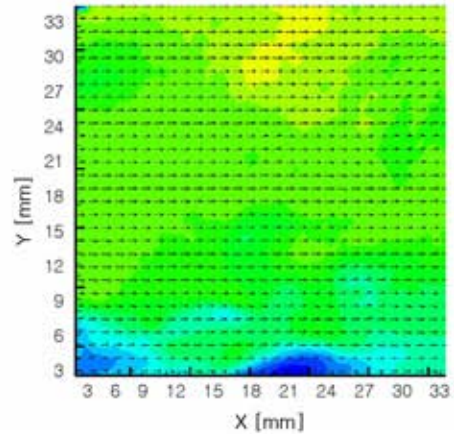
와 구조는 서론에서 언급했던 바와 같이 고유치를 통한 판별 방법을 통해 분석하였다. PIV 기법으로 측정된 속도장은 2차원 정보를 담고 있으므로 속도구배 텐서 $\nabla \mathbf{u}_i$ 로부터 고유치(eigen value, λ_i)를 계산하면 실수(λ_r) 또는 한 쌍의 켈레복소수($\lambda_{ci} \pm i\lambda_{ci}$) 형태로 나타난다. 이때 $\lambda_{ci} > 0$ 인 영역이 바로 유동장 내에서 회전운동을 하는

와 영역이다. 이러한 고유치를 통한 판별방법은 경계층처럼 전단응력이 급격하게 변하는 영역에서 효과적으로 와 영역을 규명해 낼 수 있다는 장점이 있다.

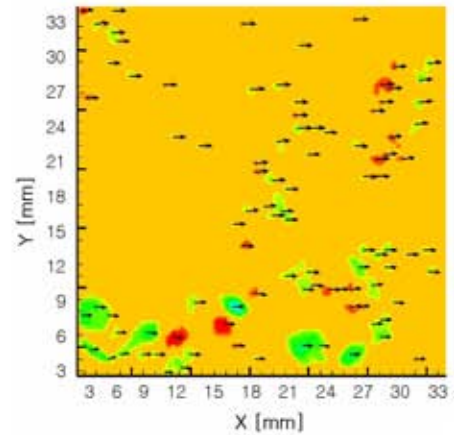
Zhou 등⁽¹⁴⁾은 와의 회전강도(swirling strength)를 λ_{ci} 로 정의할 수 있음을 보였는데, λ_{ci} 는 와 회전강도의 절대값으로 그 값이 클수록 강하게 회전함을 의미한다. Christensen 등⁽¹³⁾은 λ_{ci} 에 와도(vorticity, ζ)의 부호를 곱해 와의 회전강도뿐만 아니라 회전방향까지 함께 파악하는 방안을 제시하였다. 본 실험에서도 상기의 와 규명기법을 적용하여 와 영역, 와의 회전강도와 회전방향을 함께 파악하였다.

Fig. 3은 본 실험에서 측정된 순간 속도장 정보로부터 와 구조를 규명하는 과정을 보여준다. Fig. 3(b)는 순간 속도장 정보(Fig. 3(a))로부터 도출한 와의 회전강도와 와중심의 속도벡터를 함께 나타낸 것이다. 와 중심은 와 영역 내부에서 회전강도가 최대값을 가지는 지점으로 정의하였다. 붉은색 영역은 반시계방향 와이고 푸른색 영역은 시계방향 와를 나타낸다. 경계층 내에서 시계방향 와가 반시계방향 와에 비해 그 개수가 서너배 많은 것으로 나타났는데 이는 경계층 유동과 바닥면 사이의 직접적인 마찰로 인해 강한 전단응력이 발생하고 바닥면 부근에서 시계방향 와들이 지속적으로 생성되기 때문이다. 또한 바닥면으로부터 멀어짐에 따라 와의 직경이 점차 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이는 상부로 나아갈수록 속도구배가 감소하여 운동량 전달이 줄어들기 때문으로 보인다. 운동량 전달이 감소하게 되면 유동 내부의 전단응력도 감소하게 되므로 새로운 와의 생성이 감소하고 와 회전강도를 유지하기도 어렵게 된다. 실험결과를 보면 바닥면에서 생성된 와들이 유동을 따라 흘러가면서 상부로 이동하는 도중에 회전강도를 유지하지 못하고 큰 와는 작은 와로 깨어지고 결국엔 점성에 의해 소산되고 마는 것을 볼 수 있다. 뿐만 아니라 와의 중심속도는 와가 유동을 따라 흘러가는 속도를 의미하는데 각 와마다 조금씩 다른 값을 보여주고 있다. Fig. 3(c)는 Fig. 3(b)에서 정의된 와 영역에 대해서 Fig. 3(a)의 순간 속도장 결과로부터 각 와 중심의 속도를 빼준 것으로 각 와 영역에서 회전하는 유동의 모습을 확인할 수 있다.

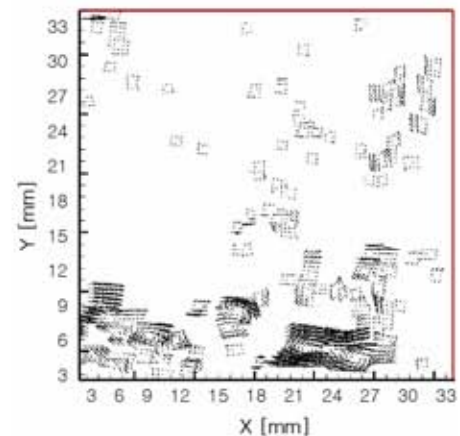
본 연구에서 와 영역을 정의할 때 와의 직경이 격자점 3개의 거리보다 작을 경우 와를 확인할 만큼 공간해상도가 충분하지 못하게 된다. 따라서



(a) Instantaneous velocity field



(b) Spatial distribution of instantaneous swirling strength



(c) Velocity fields around vortex cores

Fig. 3 Vortex identification in a 2D PIV velocity field

자유유속이 $U_0=10\text{m/s}$ 인 경우에는 격자점 3개의 거리보다 작은 직경의 와 영역은 제외하였으며, $U_0=3.3\text{m/s}$ 의 경우에는 10m/s 의 경우와 벽단위 길이를 맞추기 위해 격자점 7개의 거리보다 작은 직경의 와 영역을 제외시켰다. 이러한 방법을 통해 두 속도영역에서 같은 제외기준을 적용할 수 있었으며 결과적으로 두 경우 모두에서 정의된 와의 직경은 벽 단위로 약 37 이상이 된다.

3.2 와의 분포 경향

Fig. 4, 5는 각각 자유흐름속도 3.3m/s 와 10m/s 에서의 속도장 결과로부터 구한 횡방향 와의 개수 분포를 나타낸다. 검은색 표식은 매끈한 평판, 흰색표식은 MRF 상부에서의 횡방향 와의 개수이다. MRF 상부의 경우 레이저 광의 난반사로 인해 바닥면으로부터 6mm 높이까지는 속도정보를 얻지 못했다.

시계방향(negative) 와의 개수는 바닥면 부근에서 가장 많고 상부로 나아감에 따라 값이 감소하였다. 바닥에서 채널 중심까지의 거리(h)가 58mm 이므로 약 $0.2h$ 까지는 그 값이 급격히 감소하다가 그 이후 구간에서는 일정한 기울기로 감소하였다. 반시계방향(positive) 와의 경우에는 약 $0.2h$ 까지 증가하다가 그 이후에는 약간 줄어들거나 일정한 개수를 유지하고 있다. 그리고 채널 중심으로 나아감에 따라 시계방향 와의 개수와 반시계방향 와의 개수가 거의 같아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 매끈한 평판과 MRF 평판에서 공통적으로 나타났으며 단지 차이점은 매끈한 평판에 비해 MRF 평판의 경우 와의 개수가 전반적으로 줄어드는 경향을 보인다는 것이다. 유동상부 $y=6\text{mm}$ 부터 $y=46\text{mm}$ 사이 구간에서의 와의 개수를 비교하였을 때 3.3m/s 의 경우에는 22.7% 가 감소하였고 10m/s 의 경우에는 9.5% 가 감소하였다. 이러한 와 개수가 감소하는 것은 MRF에 의해 유동저항이 감소함에 기인한 것으로 보인다. 이것은 바닥면과 유동사이의 상호작용이 감소하고 이로 인해 바닥부근에서의 전단응력이 줄어들게 되고 따라서 바닥면으로부터의 와 생성이 억제되어 유동상부로 유입되는 와 개수가 줄어들기 때문인 것으로 풀이된다.

이러한 결과로부터 역으로 바닥면에서 직접적으로 유동저항을 측정하지 않더라도 유동상부의 와 구조를 비교함으로써 유동저항의 변화양상을 유추해볼 수 있으리라 예상할 수 있다. 그러나 유동저항 감소량을 정량적으로 측정하지 않았기 때문에 향후 저항 감소와 와 개수의 감소

사이의 정량적인 비교연구를 해볼 필요가 있다.

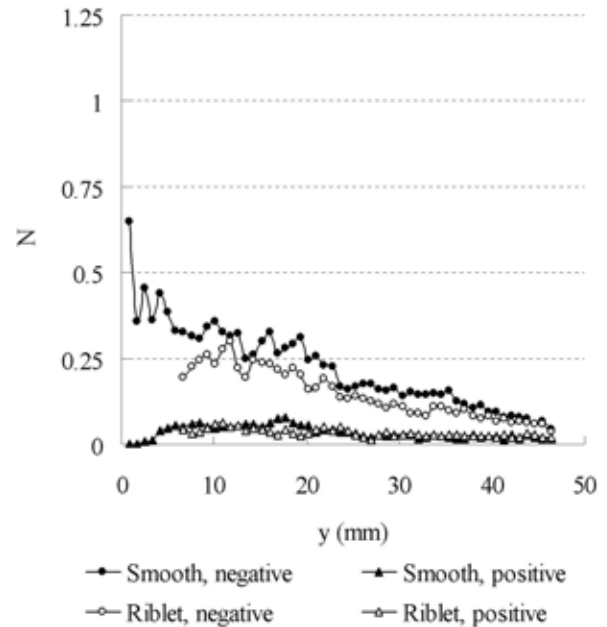


Fig. 4 Number of spanwise vortices at $U_0=3.3\text{m/s}$

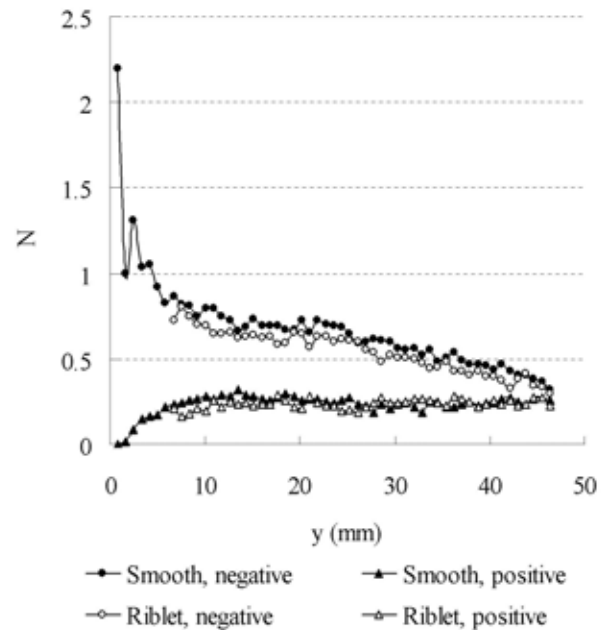


Fig. 5 Number of spanwise vortices at $U_0=10\text{m/s}$

4. 결 론

본 연구에서는 미세 리블렛 필름(MRF)을 평판 상부에 부착하고 MRF가 난류경계층 유동에 미치는 영향을 유동양상의 변화를 통해 연구하였다. 매끈한 평판 및 MRF 평판 상부의 난류 경계층 유동의 순간속도장 결과를 빠른 시간 분해능으로 획득한 후, 고유치 판별을 통해 와영역을 정의함으로써 와 구조의 양상을 비교 분석하였다.

또한 와 개수를 비교한 결과 매끈한 평판에 비해 MRF 평판 상부에서 와 개수가 감소하였는데, 이는 MRF에 의해 유동저항이 감소함에 따라 와 생성이 억제되어 나타난 결과로 보인다

후 기

이 논문은 2006년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. M10600000276-06J0000-27610).

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., 1986, "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) Lee, S. J., and Lee, S. H., 2001, "Flow Field Analysis of a Turbulent Boundary Layer over a Riblet Surface," *Experiments in Fluids*, Vol. 30, pp.53-166.
- (7) 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.
- (8) Suzuki, Y., and Kasagi, N., 1994, "Turbulent Drag Reduction Mechanism above a Riblet Surface," *AIAA Journal*, Vol. 32, pp.1781-1790.
- (9) Lee, S. J., and Lim, H. C., Han, M. H., and Lee, S. S., 2005, "Flow control of circular cylinder with a V-grooved micro-riblet film," *Fluid Dynamics Research*, Vol. 37, pp.246-266.
- (10) Lee, S. J., and Jang, Y. G., 2005, "Control of flow around a NACA 0012 airfoil with a micro-riblet film," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 20, pp.659-672.
- (11) Chong, M. S., Perry, A. E., and Cantwell, B. J., 1990, "A general classification of three-dimensional flow fields," *Phys Fluids*, A2, pp.765-777.
- (12) Adrian, R. J., Christensen, K. T., and Liu, Z. C., 2000a, "Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields," *Experiments in Fluids*, Vol. 29, pp.275-290.
- (13) Christensen, K. T. and Wu, Y., 2005, "Visualization and Characterization of Small-Scale Spanwise Vortices in Turbulent Channel Flow," *Journal of Visualization*, Vol. 8, No. 2, pp.177-185.
- (14) Zhou, J., Adrian, R. J., Balachandar, S. and Kendall, T. M., 1999, "Mechanisms for generating coherent packets of hairpin vortices in channel flow", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 387, pp.353-396