

미세 Riblet 평판에서의 난류구조 변화에 관한 실험적 연구

최용석* · 이상준**

Experimental Study on Turbulent Structure of Flow over a Micro Riblet Plate

Yong Seok Choi* and Sang Joon Lee**

Keywords : Flow control(유동제어), Micro riblet plate(미세 리블렛 평판), Dynamic PIV(다이내믹 PIV), Vortex identification(와류구명)

Abstract

Turbulent structure of a boundary-layer over a flat plate coated with micro riblet film(MRF) has been investigated experimentally. The turbulent structure was visualized using a dynamic particle image velocimetry (Dynamic PIV) system. We identified the vortex structures from 2-D velocity field data by applying the complex eigenvalue definition. The velocity field images acquired by using the complex eigenvalue definition showed the whole 2-D vortex structures clearly. In addition, the spatial distributions of small-scale vortices as well as large-scale vortices were obtained with high accuracy. The difference of vortex structures between the MRF coated flat plate and the smooth flat plate was analysed in detail. With varying upstream flow speed, the characteristics of vortex structure over the MRF coated flat plate was compared with those over the smooth flat plate.

1. 서론

주 유동 방향을 따라 홈이 파진 표면을 갖는 리블렛은 항력 감소에 효과적인 수동적 유동 제어기법으로 알려져 있다. 몇몇 연구를 통해서 리블렛은 표면 근처의 유동구조를 변화시킴으로써 물체에 작용하는 항력을 줄여주는 것으로 밝혀졌다.

리블렛을 이용한 저항감소에 관한 초기연구는 Walsh[1]에 의해 이루어졌다. 그는 저항감소를 위한 최적의 리블렛 형태로 깊은 골(valley)과 날카로운 팁(tip)을 갖는 리블렛 형상을 제시하였다. Bacher & Smith[2]는 유동가시화 실험을 통하여 리블렛 판 위에 형성되는 저속의 스트릭(streak) 간격이 매끈한 평판보다 더 넓게 형성된다는 점과 리블렛 홈 내부 유동이 매우 느리고 고요하다는 사실을 밝혔다. 이들이 설명한 리블렛 효과는 리블렛 팁 부분에서 형성된 이차(secondary) 와가 주 유동 방향 와를 약화시키고 횡 방향의 스트릭 형성을 억제하여, 궁극적으로 난류경계층 내에서의 운동량 전달을 억제한다고 보았다. 최근에는 입자영상유속계(PIV)나 입자추적유속계(PTV)를 이용한 리블렛 형상에 따른 난류 유동구조의 연구가 이루어지고 있다[3][4]. 응용 연구로 본 연구실에서는 MEMS기법으로 제작한 미세 리블렛 필름(micro riblet film, MRF)을 실린더 및 NACA 0012 익형에 부착하여 유동구조 변화를 실험적으로 연구하였다[5][6].

일반적으로 난류의 유동구조는 유동내부의 와(vortex)구조를 규명함으로써 파악될 수 있다. Chong 등[7]은 와영역이 속도구배 텐서(tensor)의 고유치(eigenvalue)가 복소수 값을 가지는 영역으로

정의하였으며, Adrian 등[8]은 2차원 속도장에서의 와영역은 2차원 속도구배 텐서의 고유치가 복소수 값을 가지는 영역임을 보였다. 이와 같은 와영역 정의를 사용하면 물체 표면 근처를 흐르는 경계층 유동처럼 급격한 전단응력변화가 존재하는 영역에서도 효과적으로 와영역을 구분해 낼 수 있다.

본 연구에서는 난류경계층 내에서 매끈한 평판과 MRF를 부착한 평판 상부의 와구조를 비교함으로써 미세 리블렛이 난류 경계층에 미치는 영향을 실험적으로 살펴보고자 한다.

2. 실험장치 및 구성

2.1 미세 리블렛

미세 리블렛의 형틀은 MEMS기법 중에서 비등방성 에칭(anisotropic etching)기술을 이용하여 제작하였다. 실리콘 웨이퍼(wafer)가 비등방성 에칭액(anisotropic etchant)에 의해 에칭(etching)이 시작되면 각도 35.26°의 V 형의 홈(grooves)이 웨이퍼 위에 형성된다. 6cm×6cm 크기의 웨이퍼 위에 형성된 리블렛 홈은 약 200개이며 각 리블렛 홈들은 너비 $s=300\mu\text{m}$, 높이 $h=176.8\mu\text{m}$ 를 이루고 있다. 미세 리블렛 필름은 미세 리블렛 형틀에 PDMS micro-molding 기술을 적용하여 반복적으로 제작되었다.

2.2 PIV 속도장 측정시스템

Fig.1은 실험부의 개략도를 나타낸 것이다. 본 실험은 폐쇄형 저난류 아음속 풍동에서 수행되었다. 인위적으로 난류경계층을 형성시키기 위해 평판 선단부에 트립 와이어(trip wire)와 560mm 길이의 사포(sandpaper, #220)를 부착하였다. 측정단면의 크기는 35mm×35mm이며 평판 선단부로부터 거리는 $x=1.1\text{m}$ 이다. 높은 시간해상도(time resolution)로 속도장 정보를 획득하기 위해

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과, yschoi98@postech.ac.kr

** 포항공과대학교 기계공학과, sjlee@postech.ac.kr

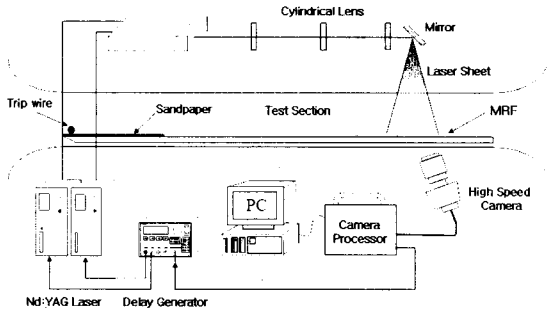


Fig.1 Schematic diagram of experiment set-up.

1k×1k 해상도에서 2,000fps의 속도로 이미지 획득이 가능한 고속 카메라와 높은 반복율(high repetition rate)을 갖는 레이저(Pegasus Nd:YAG)를 사용하였다. 산란입자로는 평균직경이 3 μ m인 올리브 오일입자가 사용되었다.

3. 실험결과

실험시 자유흐름속도를 $U_0=5.2\text{m/s}$ 로 고정하였으며 평판 선단 부로부터 $x=1.1\text{m}$ 하류위치에서의 모멘텀 두께는 $\theta=3.03\text{mm}$, 경계층 두께는 $\delta=28.29\text{mm}$ 였다. 이를 근거로한 레이놀즈 수는 $Re_x=381,333$, $Re_\theta=1,050$, $Re_\delta=9,806$ 이다. 총 1000장의 속도장을 1msec의 시간간격으로 획득하였다.

Fig.2-5는 획득된 순간속도장으로부터 와영역을 규명하는 과정을 순차적으로 보여주고 있다. 순간속도장 정보로부터 속도구배 텐서를 얻은 후 그 고유치가 복소수 값을 가지는 영역을 얻고 다시 그 영역의 중심속도를 구하면 각각의 와의 이동속도를 알 수 있다. 순간속도장으로부터 각각의 와영역에서 그 중심속도를 빼줌으로써 Fig.5와 같은 와구조의 공간분포를 구하였다.

Fig.4를 보면 각각의 와가 이동하는 속도가 다양하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한 표면근처에서 강하고 넓게 분포하고 있는 와구조를 관찰할 수 있으며 시계방향과 반시계방향의 와가 서로 번갈아가며 나타나고 있다.

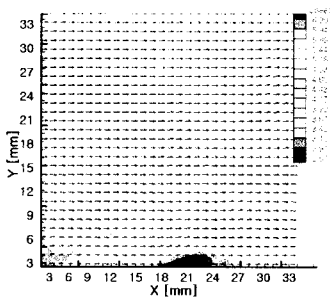


Fig.2 Velocity vectors

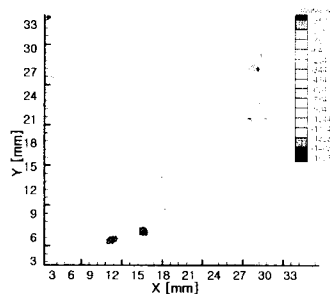


Fig.3 Vortex regions

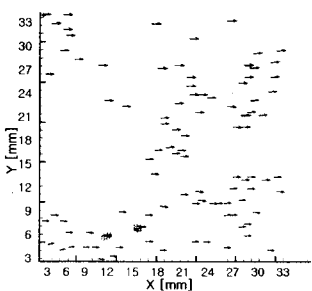


Fig.4 Vortex center velocity distribution

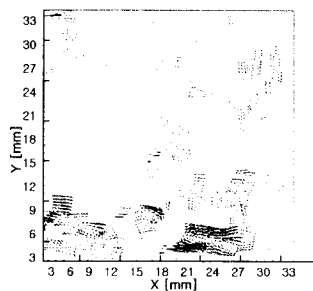


Fig.5 Velocity field around center of vortices

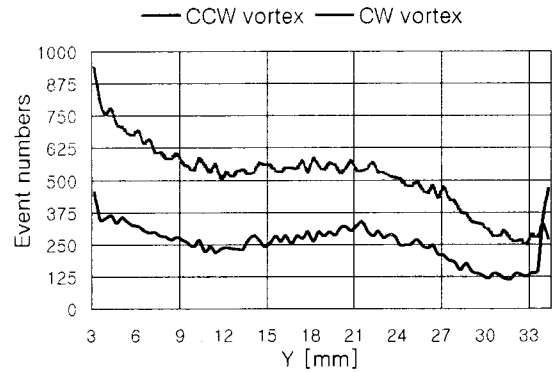


Fig.6 Event numbers of counter-clockwise direction vortex and clockwise direction vortex

Fig.6은 평판 바닥면으로부터의 높이에 따른 와의 개수를 나타낸 것이다. 시계방향과 반시계방향으로 회전하는 와의 분포는 서로 유사한 경향을 보이나 반시계방향으로 회전하는 와가 시계방향으로 회전하는 와에 비해 개수가 절반정도였다. 또한 시계방향 회전 와의 경우 $y=12\sim 21\text{mm}$ 의 분포가 거의 일정한 경향을 보이나 반시계방향 와의 경우 21mm 근처에서 개수가 약간 증가하는 경향을 보여주고 있다.

4. 결론

미세 리블렛이 난류경계층에 미치는 영향을 매끈한 평판과의 와구조 비교를 통해 알아보고자 하였다. 난류경계층 내에서 와구조는 순간속도장 정보로부터 속도구배 텐서의 고유치 판별을 통해 획득하였다. 와구조의 규명을 통한 매끈한 평판과 미세 리블렛 평판의 유동차이는 학술대회에서 발표하고자한다.

참고문헌

- [1] Walsh, M. J., 1983, "Riblets as a Viscous Drag Reduction Technique," *AIAA Journal*, Vol 21, pp. 485-486.
- [2] Bacher, E. V., and Smith, C. R., 1986, Turbulent Boundary Layer Modification by Surface Riblets, *AIAA Journal*, Vol 24, pp. 1382-1385.
- [3] 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.
- [4] Suzuki, Y., and Kasagi, N., 1994, "Turbulent Drag Reduction Mechanism above a Riblet Surface", *AIAA Journal*, Vol 32, pp. 1781-1790.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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
- [8] Adrian, R. J., Christensen, K. T., and Liu, Z. C., 2000, "Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields", *Experiments in Fluids*, Vol 29, pp. 275-290