

마이크로 리블렛이 부착된 NACA 0012 익형의 항력 감소 연구

장영길*·이상준**

Drag Reduction of NACA0012 Airfoil with a Flexible Micro-riblet

Young Gil Jang* and Sang Joon Lee**

Key words : Micro-riblet(마이크로 리블렛), NACA 0012 Airfoil(NACA 0012 익형), Drag Reduction(항력 감소), Cross-correlation PIV(상호상관 PIV), Flow Control(유동 제어)

Abstract

Riblets with longitudinal grooves along the streamwise direction have been used as an effective flow control technique for drag reduction. A flexible micro-riblet with v-grooves of peak-to-peak spacing of 300 μm was made using a MEMS fabrication process of PDMS replica. The flexible micro-riblet was attached on the whole surface of a NACA0012 airfoil with which grooves are aligned with the streamwise direction. The riblet surface reduces drag coefficient about 7.9% at $U_o=3.3\text{m/s}$, however, it increases drag about 8% at $U_o=7.0\text{m/s}$, compared with the smooth airfoil without riblets. The near wake has been investigated experimentally for the cases of drag reduction ($U_o = 3.3 \text{ m/s}$) and drag increase ($U_o = 7 \text{ m/s}$). Five hundred instantaneous velocity fields were measured for each experimental condition using the cross-correlation PIV velocity field measurement technique. The instantaneous velocity fields were ensemble averaged to get spatial distribution of turbulent statistics such as turbulent kinetic energy. The experimental results were compared with those of a smooth airfoil under the same flow condition. The micro-riblet surface influences the near wake flow structure largely, especially in the region near the body surface

1. 서론

지난 수십 년간 물체에 걸리는 항력을 효과적으로 감소시키기 위하여 많은 연구들이 수행되어왔다. 자동차나 항공기와 같은 운송체의 항력감소는 연료 소비를 줄여줌으로써 비용 절감에 직접적으로 영향을 미치게 된다.

주유동 방향을 따라 홈이 파진 표면을 갖는 리블렛은 항력 감소에 효과적인 수동적 유동제어기법으로 알려져 있다. 리블렛 표면 근처의 유동구조를 변화시킴으로써 물체에 작용하는 항력을 줄여주는 것이다. 리블렛을 이용한 저항감소에 관한 초기 연구는 Walsh⁽¹⁾에 의해 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 팁(tip)을 갖는 리블렛 형상을 제시하였다.

Bacher & Smith⁽²⁾는 유동가시화 실험을 통하여 리블렛 판 위에 형성되는 저속의 스트리크(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 와(secondary vortex)가 주유동 방향 외를 약화시키고 횡 방향의 스트리크 형성을 억제하여,

궁극적으로 난류 경계층 내부에서의 운동량 전달을 억제한다고 보았다.

Bechert & Bartenwerfer⁽³⁾는 리블렛 팁 부분이 점성저층(viscous sublayer)내에서 순간적인 횡방향 유동의 형성을 방해하여 난류 운동량 교환을 감소시킨다고 보았다. Choi⁽⁴⁾는 리블렛에 의한 주유동 방향 외의 횡 방향 이동 억제와 벽 근처에서 와쌍의 생성 억제를 저항감소의 주요 요인으로 생각하였다. Choi등⁽⁵⁾은 DNS방법으로 $s^+=20$ 과 $s^+=40$ 인 리블렛 표면에 대하여 순간적인 난류구조를 DNS기법으로 수치모사 하였다. 그들은 $s^+=40$ 인 경우 벽 단위 길이로 30정도인 주유동 방향 외가 리블렛 홈 내부에 형성되어 보다 넓은 표면적이 이들 외가 유발하는 down-wash 유동에 드러나게 되어 저항이 증가하고, $s^+=20$ 인 경우에는 이들 외가 리블렛 팁 보다 높은 위치에 형성되어 저항이 감소한다고 보았다.

Goldstein등⁽⁶⁾은 횡 방향 속도섭동성분의 억제를 저항감소의 중요한 요인으로 제시하였으며, 리블렛 간격이 넓은 경우에는 경계층 외가 리블렛 홈 내부로 유입되어 리블렛의 저항감소 효과가 줄어든다고 하였다. Suzuki & Kasagi⁽⁷⁾는 3차원 PTV측정을 통해서 난류 에너지가 주 유동 방향에서 횡 방향으로 재배치 되는 것을 리블렛이 억제한다고 하였다.

리블렛에 대한 기존의 연구는 대부분 평판에 리블렛을 부착한 평판 경계층 유동에 대해 수행되었다. 하지만 자동차나 항공기와 같은 실제적인 응용을 고려할 경우에는, 리블렛의 tip-to-tip 간격 s 는 micro 스케일로 줄여야 하며 리블렛은 평판이 아닌 뿔뿔한 물체(bluff body)에도 부착할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 유연한(flexible) 미세 리블렛을 MEMS 가공기법으로 제작하고, 이를 익형 양면에 부착하여 익형 후류의 유

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과
E-mail: bulldog@postech.ac.kr

Tel: (054) 279-2839, Fax: (054) 279-3199

** 회원, 포항공과대학교 기계공학과

E-mail: sjlee@postech.ac.kr

Tel: (054) 279-2169, Fax: (054) 279-3199

동특성과 미세 리블렛이 항력감소에 미치는 영향에 대해 살펴 보았다. 미세 리블렛의 유용성을 검증하기 위하여 고해상도 PIV기법을 이용하여 리블렛이 부착된 NACA 0012 익형 후류 유동의 난류 특성을 구하고, 이를 같은 재료로 만들어진 smooth한 표면을 붙인 같은 크기의 NACA 0012 익형에 대한 결과와 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 리블렛과 실험조건

본 실험은 폐쇄형 저난류 아음속 풍동(유속 7m/s에서 난류 강도는 0.01%이하)에서 수행되었으며, 익현(chord) 길이가 75mm인 NACA 0012 익형을 양각 $\alpha=0^\circ$ 로 시험부에 고정하였다. 리블렛은 난류유동에 보다 효과적이기 때문에 난류경계층 실험의 경우 대개 trip wire를 익형 전단에 설치해 두꺼운 경계층을 생성시킨다. 그러나 본 연구에서는 미세 리블렛이 항력 감소에 직접적으로 미치는 영향을 알아보기 위하여 난류경계층은 생성시키지 않았다.

본 실험에서는 MEMS기법을 이용해 제작된 너비 $s=300\mu\text{m}$, 높이 $h=353.6\mu\text{m}$ 의 V자형 리블렛을 사용하였다. 그리고 같은 PDMS재질로 만들어진 smooth한 표면도 함께 제작하여 비교 대상으로 사용하였다. 실험에 사용된 리블렛의 기하학적인 형상을 Fig. 1에 나타내었다.

자유흐름속도는 $U_0=3.3$ 와 7m/s의 두 가지로 나누어 실험 하였는데, 익현 길이에 기초한 레이놀즈 수는 각각 1.7×10^4 , 3.6×10^4 이다

2.2 디지털 화상처리장치

Fig. 2는 디지털 PIV 속도장 측정시스템을 나타낸 것으로 Nd:YAG 레이저, Kodak 2Kx2K CCD 카메라, 프레임 grabber, delay generator, PC등으로 구성되어 있다. 본 실험에서 사용된 펄스형 Nd:YAG 레이저는 노출시간이 7ns이고 강도가 25mJ이상인 이중헤드(2-head) 방식이다.

실험시 Nd:YAG 레이저와 2Kx2K CCD 카메라를 동기하여 프레임 노출시간 중 원하는 순간에 레이저 평면광을 조사할 수 있도록 delay generator로 동기시켜 깨끗한 입자 영상을 얻을 수 있도록 하였다.

산란입자로는 올리브 오일에 압축공기를 가해 평균 직경이 $3\mu\text{m}$ 인 올리브 오일 입자를 생성시켰는데, 유체 추종성이 우수한 것으로 나타났다.

본 실험에서 수행한 속도장 측정 단면과 좌표계를 Fig. 3에 나타내었다. 속도장은 주유동 방향의 두 단면과 주유동 방향에 수직인 3개의 횡단면, 총 다섯 단면에 걸쳐 측정하였고, A, B 단면의 크기는 $6 \times 6\text{cm}^2$ 이고 C, D, E 단면은 크기가 $5 \times 5\text{cm}^2$ 이었다. PIV 속도벡터 측정 시 미소조사구간의 크기를 $48 \times 48 \text{ pixels}^2$ 로 하고, 50% overlap하였다.

이렇게 얻어진 500장의 순간 속도장을 앙상블 평균하여 평균 속도장을 구하였다. 또한, 순간 속도장과 평균 속도장의 차이로부터 얻어진 변동속도성분의 통계처리를 통해 NACA 0012 익형 후류 영역에서의 난류 통계치 변화를 살펴보았다.

한편 미소 리블렛이 부착된 익형과 smooth한 익형 사이의 항력감소 효과를 살펴보기 위하여 3축 로드셀을 사용하여 항력을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

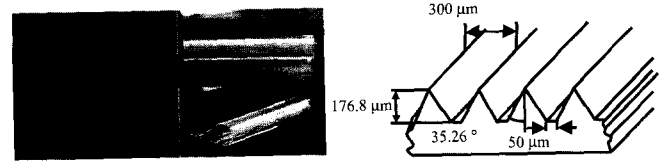


Fig. 1 Configuration of Flexible Micro-riblet

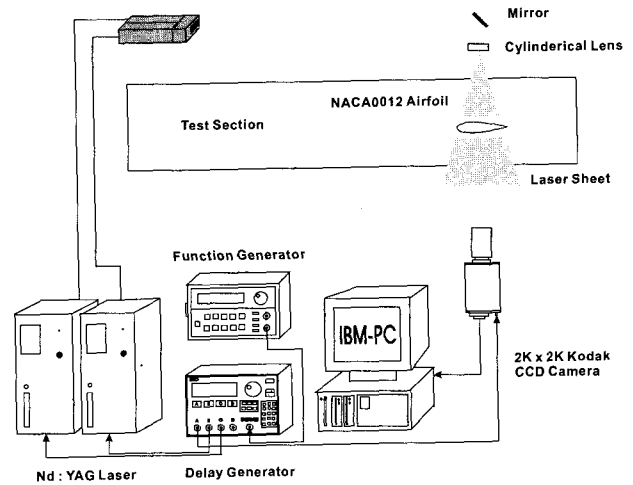


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

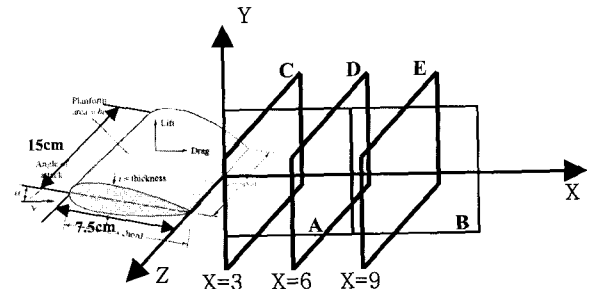


Fig. 3 Measurement sections and coordinate system (units : cm)

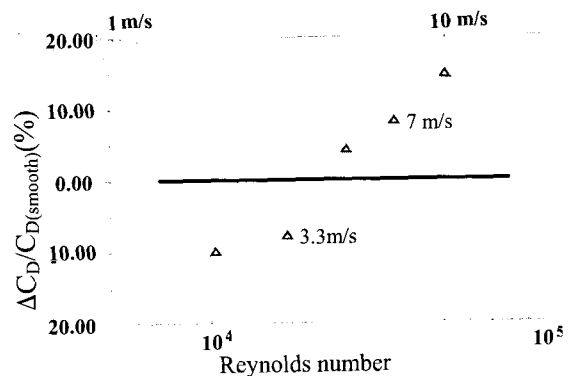


Fig. 4 Variation of drag coefficient vs Reynolds number

Fig. 4는 리블렛을 붙인 익형에 대해 3축 로드셀로 측정된 항력계수 값의 변화를 보여주고 있다. $U_0=3.3\text{m/s}$ 인 경우 smooth한 표면에 비해 7.9%의 항력이 감소하였으며, $U_0=7\text{m/s}$ 인 경우는 오히려 8%정도 항력이 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 측정단면 A와 B에서의 주 유동 방향(X)의 평균 속

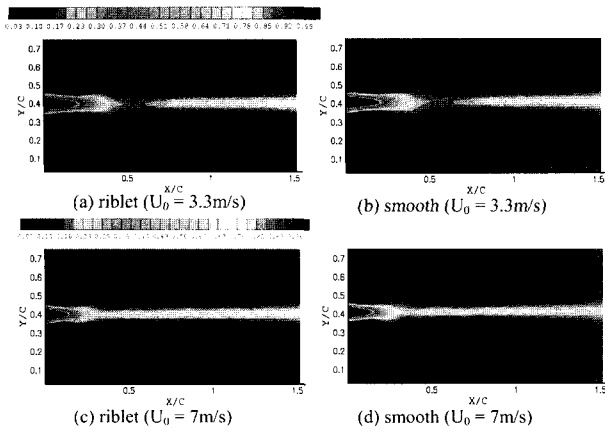


Fig. 5 Spatial distribution of streamwise velocity component at axial planes A and B

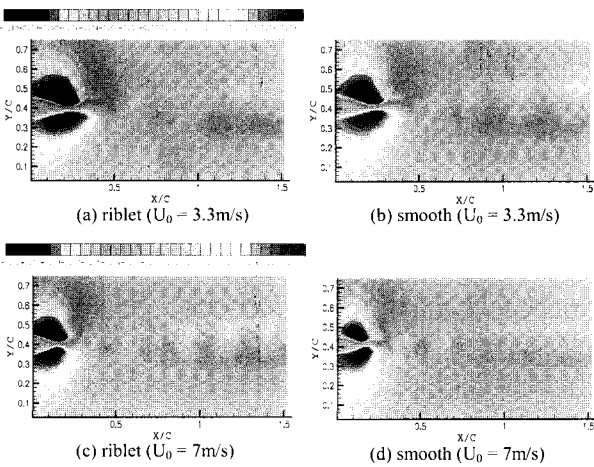


Fig. 6 Spatial distribution of vertical mean velocity component at axial planes A and B

도장 결과를 나타내고 있다. 속도 $U_0=3.3\text{m/s}$ 인 경우와 $U_0=7\text{m/s}$ 인 경우 모두 후류 중심축을 기준으로 아래, 위 대칭적인 구조를 보여주고 있다. 자세히 보면 $U_0=3.3\text{m/s}$ 인 실험조건 하에서 리블렛이 부착된 익형의 경우가 부착되지 않은 익형의 경우에 비해 와형성 영역(vortex formation region)구간이 짧게 나타나고 있다. $U_0=7\text{m/s}$ 인 경우에는 smooth한 경우에 비해서 리블렛의 후류의 폭이 약간 넓은 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 측정단면에서의 Y방향 평균속도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 6-(a), (c)에서 보는 바와 같이 리블렛이 부착된 경우에 큰 수직방향 속도 성분이 발생하고 있다. 특히, 와형성 영역의 끝부분에서 큰 수직방향의 속도성분들을 볼 수 있는데 이것은 익형에 부착한 리블렛이 후류 중심축으로의 유입 유동을 증가시켜 와가 형성되는 구간을 줄이는 것으로 생각되어진다. 또한 이와 같이 빠른 속도를 가진 수직방향 유동은 후류 중심축에서 만나 상호작용에 의해 높은 난류 운동 에너지를 가짐을 유추할 수 있다.

Fig. 7은 난류 운동에너지 분포를 나타내고 있다. 와형성 영역 후방에서 큰 값을 보이는데, 이것은 앞서 Fig. 6에서 설명한 것처럼 강한 수직 방향의 유동과 관련이 있을 수 있다. 속도에 상관없이 근접후류 중심영역에서는 리블렛이 부착된 경우의 난류 운동에너지 값이 부착되지 않은 경우에 비해 보다 큰 값을 나타내고 있다. 이로부터 익형 표면에 부착된 미세 리블렛이 근접 후류 영역에서 수직방향 난류강도를 증가시켜

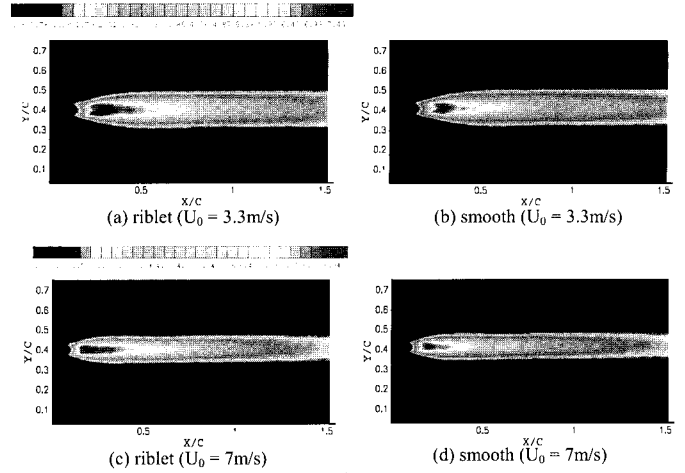


Fig. 7 Contour plots of turbulent kinetic energy at axial plane A and B

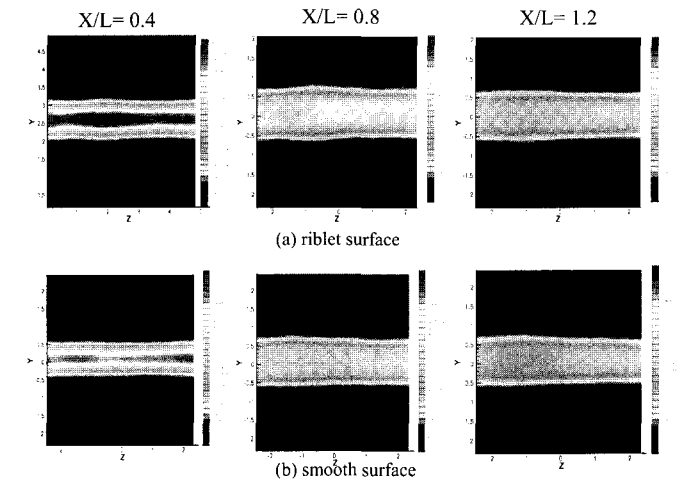


Fig. 8 Contour plots of turbulent kinetic energy at saggital planes ($U_0=3.3\text{m/s}$)

는 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 후류 중심축을 따른 난류 운동에너지 변화를 보면, 리블렛 표면을 가진 익형의 경우, $U_0=3.3\text{m/s}$ 조건에서는 와형성 영역 끝부분에서 최대값을 가진 후 하류로 나아감에 따라 급격히 감소하고 있다. 특히, $X/L>1.0$ 의 후방에서는 일정 값 이상의 운동에너지를 갖는 후류폭도 smooth한 익형보다 좁음을 알 수 있다. 항력이 증가하는 경우인 $U_0=7\text{m/s}$ 의 경우, 후류 전 구간에서 smooth한 익형보다 큰 난류 운동에너지 분포를 보여주고 있다.

Fig 8은 횡단면 C($x/L=0.4$), D($x/L=0.8$), E($x/L=1.2$)에서의 난류 운동 에너지 분포를 나타낸 것이다. 대체적으로 후류 중심축 ($Y=0$)부근에서 리블렛이 부착된 경우 난류 운동에너지 값이 smooth한 경우에 비해 큰 값을 보여주고 있다. $X/L=0.4$ 위치단면에서 큰 난류 운동에너지 값을 가지는 리블렛 익형의 경우, 하류로 나아감에 따라 후류 중심에서의 난류 운동에너지가 급격히 감소하며, $X/L=1.2$ 위치단면을 지나면서 오히려 smooth한 익형의 경우보다 작아지게 된다. 그러나, smooth한 익형의 경우는 하류로 나아감에 따른 운동에너지 감소율이 상대적으로 낮았다.

4. 결론

PIV 속도장 측정을 통해 V형 미세 리블렛을 부착한 NACA 0012 익형 후류의 유동특성에 대하여 연구하였다.

항력계수를 측정된 결과 낮은 속도에서는 항력이 감소하며 Re 수가 증가함에 따라 항력이 증가하였다. PIV속도장 측정을 수행한 $U_0=3.3\text{m/s}$ 조건에서 항력이 약 7.9% 감소하였고, $U_0=7\text{m/s}$ 조건에서는 항력이 약 8% 증가하였다.

익형 후류 영역에서 속도 분포를 살펴보면 저항이 감소하는 경우는 수직방향 속도 성분이 증가하며 와형성 영역의 길이가 smooth한 익형보다 감소하였다. 근접 후류의 중심축 부근에서 큰 난류 운동 에너지를 가졌는데, 이것은 리블렛 표면이 후류 중심축으로의 유입을 증가시켜 강한 혼합이 일어나기 때문으로 생각되어진다.

향후 항력감소를 유발하는 보다 근원적인 유동구조를 파악하기 위하여 미세 리블렛 valley 내부에서의 유동구조 변화를 계속할 예정이다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Walsh, M. J., "Riblets as a Viscous Drag Reduction Technique," AIAA Journal, Vol. 21, No. 4 (1983), pp.485-486.
- [2] Bacher, E. V. and Smith, C. R., "Turbulent Boundary Layer Modification by Surface Riblets", AIAA Journal, Vol. 24, No. 8 (1985), pp.1382-1385.
- [3] Bechert, D. W. and Bartenwerfer, M., "The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs", J. Fluid Mech., Vol. 206 (1989), pp.105-129.
- [4] Choi, K. S., "Near-wall structure of a turbulent boundary layer with riblets", J. Fluid Mech., Vol. 208 (1989), pp.417-458.
- [5] Choi, H. C., Moin, P. and Kim, J., "Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets", J. Fluid Mech., Vol. 255 (1993), pp.503-539.
- [6] Goldstein, D., Handler, R. and Sirovich, L., "Direct numerical simulation of turbulent flow over a modeled riblet covered surface", J. Fluid Mech., Vol.302 (1995), pp.333-376.
- [7] Suzuki, Y. and Kasagi, N., "Turbulent drag reduction mechanism above a riblet surface", AIAA Journal, Vol.32 (1994), pp.1781-1790.