

## MEMS 기술을 이용한 미소 리블렛 필름 제작 및 항력 감소에의 응용

한만희\* · 허정기\*\* · 이승섭† · 이상준\*\*\*

(2001년 12월 3일 접수, 2002년 5월 9일 심사완료)

### Fabrication of a Micro-Riblet Film Using MEMS Technology and Its Application to Drag Reduction

Manhee Han, Jeong-Ki Huh, Seung S. Lee and Sang-Joon Lee

**Key Words :** MEMS, Micro-Riblet Film(MRF), Drag Reduction(항력 감소), Bulk Micromachining(기판미세가공), Polydimethylsiloxane(PDMS), NACA 0012 Airfoil(NACA 0012 익형), Particle Image Velocimetry(PIV).

#### Abstract

This paper presents the fabrication method of a micro-riblet film (MRF) using MEMS technology and the experimental results of the drag reduction of an airfoil with MRFs. Riblets having grooved surface in the streamwise direction has been proven as an effective passive control technique of the drag reduction. A V-grooved pattern on (100) silicon wafer is etched with anisotropic bulk micromachining. The MRF is completed by replicating the V-grooved pattern with polydimethylsiloxane (PDMS). Experiments were performed by measuring a velocity field behind the trailing edge of a NACA 0012 airfoil with and without MRFs in a closed-type subsonic wind tunnel using particle image velocimetry (PIV) technique. The MRF provides about 3.8 % drag reduction compared to the drag on a smooth airfoil when the freestream velocity of wind tunnel is 3.3 m/s.

#### 1. 서론

에너지 소비량은 날로 증가하고 있지만 이용 가능한 에너지량은 한정되어 있으므로 이에 대체 에너지를 찾으려는 노력과 함께 에너지 소비량을 줄이려는 노력이 다방면에서 이루어지고 있다. 일상 생활과 밀접한 관련이 있는 비행기나 자동차 등의 운송체의 에너지 소비량을 줄이기 위해서는, 엔진이나 동력전달장치의 효율을 높이는 방법뿐만

아니라 유체가 운송체에 미치는 항력을 감소시키는 방법에 대한 연구도 이루어지고 있다.

항력은 전단 응력과 압력에 의해 발생되는데, 전체 항력 중에서 표면 전단 응력이 차지하는 비율이 비행기나 배의 경우에는 50%, 잠수함은 70%, 긴 수송관의 경우 100%나 되므로 표면 전단 응력을 줄이는 것은 매우 중요하다.<sup>(1)</sup> 1960년대 이후로 표면 난류 유동의 구조에 대한 지식이 쌓이면서, 표면 근처에서 생기는 유선 방향의 미세한 와류 구조에 의해 표면 전단 응력이 크게 증가하는 것으로 알려졌다. 따라서 이러한 와류 구조를 약화시키면 표면 전단 응력을 줄일 수 있다.

비행기의 경우에 해당하는  $10^5$  정도의 Reynolds number 에서는 와류 구조의 크기가 수 mm 이내이고 시간과 공간 상으로 불규칙적으로 생성되었다가 수 밀리 초 내에 사라지므로 지금까지 이를 제어하기는 상당히 어려웠으나, 최근 MEMS(Micro Electro Mechanical System)기술의 발달로 미세하며

\* 포항공과대학교 학부 기계공학과  
\*\* 포항공과대학교 대학원 기계산업공학부  
† 책임지자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과  
E-mail : sslcc@postech.ac.kr  
TEL : (054)279-2183 FAX : (054)279-5899  
\*\*\* 회원, 포항공과대학교 기계공학과

응답 속도가 빠른 장치의 개발이 가능하면서 능동적으로 미세한 와류 구조를 제어하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다.<sup>(2,4)</sup>

능동제어는 효율이 매우 높지만 소자 제작 과정이 다소 복잡하고 에너지 공급이 지속적으로 이루어져야 한다는 문제점이 있다. 이에 비해 에너지 공급이 필요 없는 수동제어는 비록 능동제어에 비해 효율은 낮지만, 공정이 간단하고 에너지 공급 장치에 대한 고려가 필요 없으며 능동제어에 필요한 소자에 비해 그 수명도 길기 때문에 실생활에 적용하기 용이하다는 장점이 있다. 그 중에서 유도방향으로 미세한 골이 있는 리블렛(riblet)을 이용하는 방법은 그 효율도 비교적 높기 때문에 많은 관심을 받고 있다.

Fig. 1 과 같이 상어표면에서도 관찰할 수 있는 리블렛을 이용한 항력 감소 효과에 대한 연구는 NASA Langley Research Center 의 Walsh 와 그의 동료들에 의해서 최초로 시작되었다.<sup>(5)</sup> 그들에 의하면 다음과 같이 정의된  $h^*$  와  $s^*$  에 의해 리블렛의 항력 감소 효과가 결정된다.

$$h^* = \sqrt{C_f / 2} (h U_\infty / \nu)$$

$$s^* = \sqrt{C_f / 2} (s U_\infty / \nu)$$

여기서,  $h$  와  $s$  는 리블렛의 높이와 간격을  $\nu$  와  $U_\infty$ ,  $C_f$  는 각각 동점성계수(kinematic viscosity)와 자유흐름속도(freestream velocity), 표면 마찰력(skin friction)을 나타내며,  $h^*$  와  $s^*$  가 각각 30 과 25 보다 작을 때 리블렛의 항력 감소 효과가 나타난다. 또한 산맥의 끝부분은 뾰족하고 골부분은 둥근 형상이 항력을 더 효율적으로 감소시킴을 밝히고, 최대 8%까지 항력을 감소시킬 수 있는 리블렛 형상을 디자인하였다. 이 후 항력 감소 메커니즘에 대한 연구도 많이 진행되었으나 현재까지 확실히 밝혀지지는 않고 단지 몇몇 학설이 있을 뿐이다.<sup>(6)</sup> 한편 Bechert 는 리블렛 형상을 최적화 하여 최대 10%까지 항력 감소 효과를 얻었다.<sup>(7)</sup>

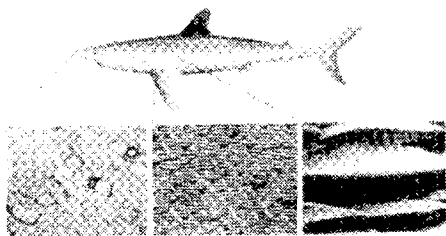


Fig. 1 Configuration of skin of a shark

이러한 연구들은 대부분 mm 단위의 리블렛 형상을 이용하여 실현한 것들인데, 실제 비행기나 자동차 등에 리블렛을 적용하기 위해서는 산맥의 높이가 수 십에서 수 백  $\mu\text{m}$  단위이어야 한다.  $\mu\text{m}$  단위의 리블렛 제작에 대해서는 현재까지 3M 사 (Minnesota Mining and Manufacturing Co.)의 특허에서만 보고 되고 있다. 3M 사는 Airbus 사와 함께 일반적인 플라스틱 성형 방법으로 Fig. 2 와 같은 리블렛 필름을 제작하였다.<sup>(8)</sup> 그러나 특허에서는 형틀의 제작방법에 대해서는 언급되지 않았다. 또한, 지금까지의 연구에 의하면 골 부분이 둥글고 이랑 부분이 뾰족한 형상이 더 효율적이지만, 3M 사가 제작한 필름의 형상을 보면 골 부분이 뾰족하고 이랑 부분이 둥글기 때문에 효율이 높은 형상은 아니다.

본 연구에서는 (100)실리콘 기판을 방향성 기판 미세가공(bulk micromachining)으로 가공하여 형틀을 만든 후에 Polydimethylsiloxane(PDMS)로 이를 모사하여 산맥 끝이 뾰족한  $\mu\text{m}$ 단위의 미소 삼각 리블렛 필름(MRF : Micro-Riblet Film)을 제작하였다. PDMS 는 최근 micro fluidics 분야에서 각광 받고 있는 물질로서, 실리콘이나 유리에 비해 가격이 저렴하며 공정도 간단하다는 이점이 있다.<sup>(9,10)</sup>

제작한 리블렛 필름에 대한 항력 변화 계속 실험은 필름을 NACA 0012 익형에 붙여서 폐쇄형 풍동에 설치한 후, particle image velocimetry (PIV) system 을 이용하여 실시하였다. PIV 속도장 측정 기술은 3 차원 난류유동의 시간에 따른 속도의 공

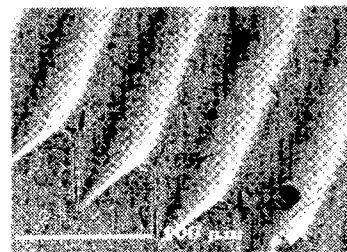


Fig. 2 SEM image of the poly-vinylidene-fluoride riblet film produced by 3M

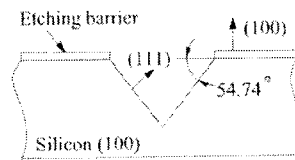


Fig. 3 Illustration of anisotropic wet etching of (100) silicon wafer

간적인 변화를 측정할 수 있으며, 연속적으로 구한 속도장을 통계 처리하여 주어진 유동의 난류구조까지 해석할 수 있는 첨단 기술이다.

## 2. 제작 원리 및 공정

### 2.1 제작 원리

실리콘 기판은 실리콘 단결정으로 이루어져 있어 결정면마다 원자의 조밀도가 다르기 때문에, 비등방성 식각 용액을 사용하여 실리콘을 식각하면 결정면에 따라서 식각 속도가 다르게 된다. 결정면 중에서도 (111)면이 가장 조밀하여 (110)면의 식각 속도가 다른 결정면에 비하여 현저히 느리고, (111)면과 (100)면이 이루는 각이  $54.74^\circ$ 이기 때문에, (100)실리콘 기판을 비등방성 식각 용액으로 식각하면 Fig. 3와 같은 형태로 식각된다. 이때 형성되는 골짜기는 서로 다른 두 (111)면이 만나는 것이므로 그 끝부분은 원자단위의 폭을 가지게 된다. 따라서 (100)실리콘 기판을 이용하면, 산맥 끝부분이 뾰족하고 밑각의 크기가  $54.74^\circ$  인 이등변 삼각형 형상의 리블렛을 제작할 수 있다.

### 2.2 형틀 제작 공정

형틀 제작 공정은 Fig. 4와 같다. 우선, (100)실리콘 기판을  $1050^\circ\text{C}$ 에서 15분간 건식 산화를 하고, 약 4시간동안 습식 산화를 한 후, 다시 건식 산화를 15분간하여 기판에 약  $1\mu\text{m}$ 의 산화막을 형성한다. 다음으로 기판과 감광재(AZ5214)의 접착력을 높이기 위해 HMDS를 입힌 후 감광재를 회전 도포하고  $90^\circ\text{C}$ 에서 100초간 soft baking을 한다. 기판의 후면에도 같은 공정으로 감광재를 입힌다. Fig. 4(c)와 같이 자외선 노광을 하여 자외선 마스크의 패턴을 전사시킨 후, 감광재를 현상하고  $120^\circ\text{C}$ 에서 120초간 hard baking을 한다. 이를 산화막 식각액인 BHF에 약 30분 동안 넣으면 Fig. 4(d)와 같이 산화막이 식각된다. 유기용매를 이용하여 감광제를 제거한 후,  $90^\circ\text{C}$ 의 20% TMAH 용액으로 실리콘 기판을 약 7시간동안 식각하면 실리콘 기판에 Fig. 4(f)와 같은 삼각골짜기가 형성된다. 마지막으로 BHF에 약 30분 동안 넣어 산화막을 모두 제거하면 Fig. 4(g)와 같은 미소 리블렛 필름 제작을 위한 형틀이 완성된다.

본 논문에서 제작한 미소 리블렛 형틀은 Fig. 5와 같이 V형 홈으로 이루어져 있으며, 골의 깊이는  $180\mu\text{m}$ 이고 골과 골 사이의 거리는  $300\mu\text{m}$ 이다.

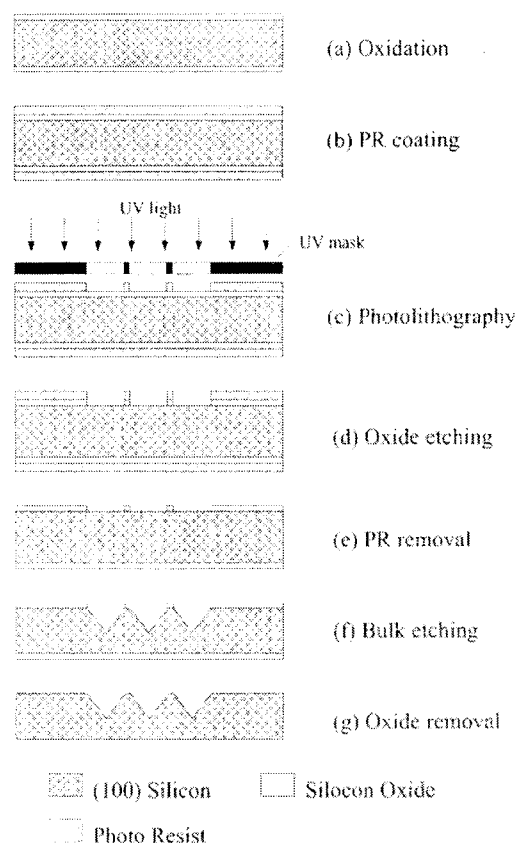


Fig.4 Fabrication process of a silicon master using bulk micromachining.

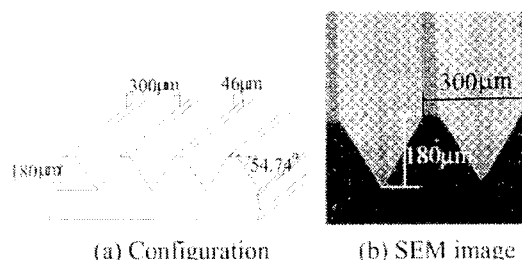


Fig. 5 Fabricated silicon master of a MRF.

### 2.3 리블렛 필름 제작 공정

Fig. 6는 실리콘 형틀을 이용하여 PDMS 리블렛 필름을 제작하는 공정을 나타낸다. 우선, 후 공정에서 경화된 PDMS를 형틀에서 쉽게 분리하기 위해, 완성된 실리콘 형틀을 소량의 Trichloro(3,3,3-Trifluoro propyl)silane이 있는 진공 챔버에 넣어 약 8시간 보관하여 실리콘 표면에 silanization 처리를 해준다. PDMS prepolymer와 curing agent를 10:1로 섞은 후, 진공 챔버에서 기포를 제거하고 spacer 역할을 할 필름을 얹은 형틀 위에 붓는다. 붓는 과정 중에 생긴 기포를 진공 챔버에서 제거하고, 그 위에 기포가 생기지 않게 주의하며 필름을 덮

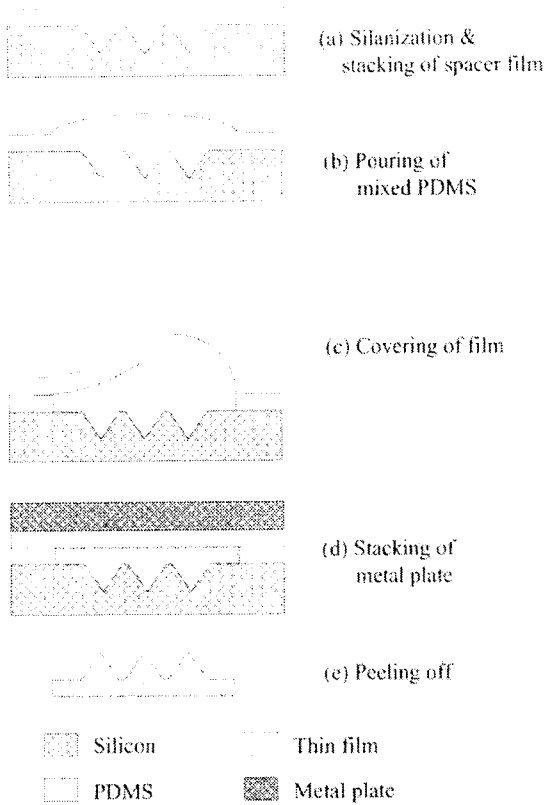


Fig. 6 Fabrication process of a PDMS replica



(a) Curved MRF by fingers (b) SEM image  
Fig. 7 Completed PDMS MRF

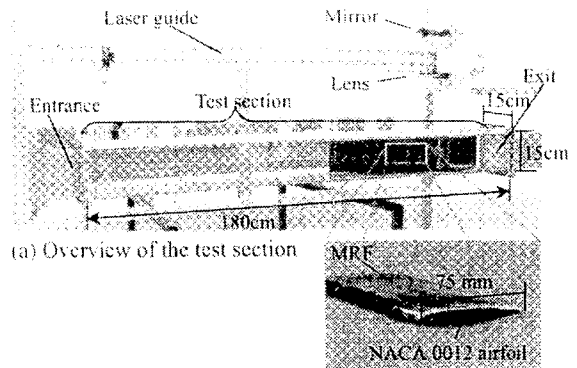
는다. 필름 위에 평평한 금속판을 올리고 이를 85°C 의 오븐에 2 시간 동안 넣어 경화 시킨다. 평평한 금속판과 필름을 분리하고 굳어진 PDMS 를 떼어내면 산맥 같이 뾰족한 미소 리블렛 필름이 완성된다. 이러한 공정에서 형틀 표면의 silanization 처리는 처음에 한 번만 하면 되므로 쉽게 다량의 리블렛 필름을 얻을 수 있다.

본 논문에서 제작한 미소 삼각 리블렛 필름은 Fig. 5 와 같은 형틀을 모사한 필름이므로 Fig. 7 과 같다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험 장치 및 방법

항력 변화 계측 실험은 실험부(test section)에 균



(b) Enlarged view of NACA 0012 airfoil  
Fig. 8 Test section of Wind tunnel

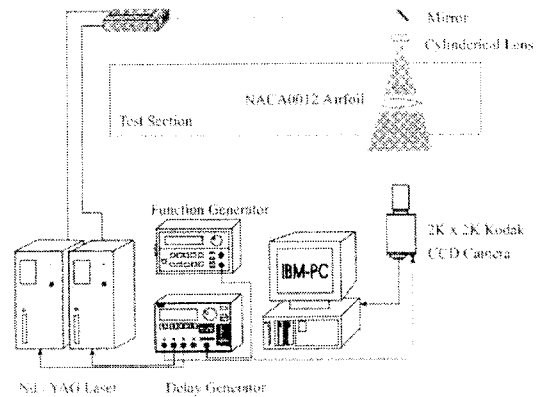


Fig. 9 Schematic diagram of Experimental

일한 공기 흐름을 제공하여 실제와 유사한 유동 환경을 제공하는 장비인 풍동에서 이루어졌다. 본 실험에서는 공기를 순환시키는 폐쇄형이며, 자유 흐름속도( $U_0$ )가 7m/s 일 때 난류강도가 0.001% 이하인 유질이 좋은 저난류 아음속 풍동을 사용하였다.

Fig. 8 과 같이 실험부의 폭과 높이는 모두 0.15m 이고 길이는 1.8m 인데, 입구(entrance)로 들어온 공기가 안정화되어 균일한 속도를 가지게 되는 출구(exit)부근의 실험부에 NACA 0012 익형을 설치하였다. 익형에 리블렛 필름을 붙인 것과 붙이지 않은 것에 대해서, 자유흐름속도를 3.3m/s 와 7m/s 로 하여 실험하였는데, 이들 속도의 익형의 길이에 기초한 레이놀즈 수는 각각  $1.7 \times 10^4$  과  $3.6 \times 10^4$  이다.

실험에 대한 측정은 Fig. 9 와 같이 Nd : YAG 레이저와 2K x 2K Kodak CCD 카메라, 프레임 grabber, delay generator, PC 등으로 PIV system 을 구성하여 이루어졌다. 측정시에 카메라 프레임 노출시간 중 원하는 순간에 레이저 평면광을 조사할 수 있도록 delay generator 로 2K x 2K Kodak CCD 카메라와 Nd : YAG 레이저를 동기 시켜 깨끗한 영상을 얻

을 수 있도록 하였다. 산란입자로는 공기에 대해 투과성이 우수한 평균 직경이 3  $\mu\text{m}$ 인 올리브 오일을 사용하였다.

본 실험에서는 익형을 지난 공기의 속도장을 측정하고 이를 바탕으로 항력 계수를 구하였는데, 이 때 속도장을 측정하는 단면은 주유동 방향과 같은 방향으로 하였으며 좌표계는 Fig. 10 과 같이 정의하였다.

### 3.2 실험 결과 및 고찰

자유흐름속도가 3m/s 와 7m/s 인 경우에 대해서, 리블렛을 부착한 익형과 부착하지 않은 익형의 후방 속도장은 Fig.11 과 같이 측정이 되었다. 여기서 좌표들은 모두 익형의 길이(L=75mm)로 무차원화하였다. 이렇게 얻은 속도장 데이터 중에서, 익형으로부터 주유동 방향으로의 거리(x)가 익형의 길이에 대해 1.0, 1.2, 1.4 인 면에서의 데이터를 바

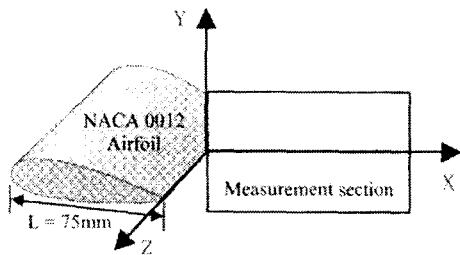


Fig. 10 Measurement section and coordinate system

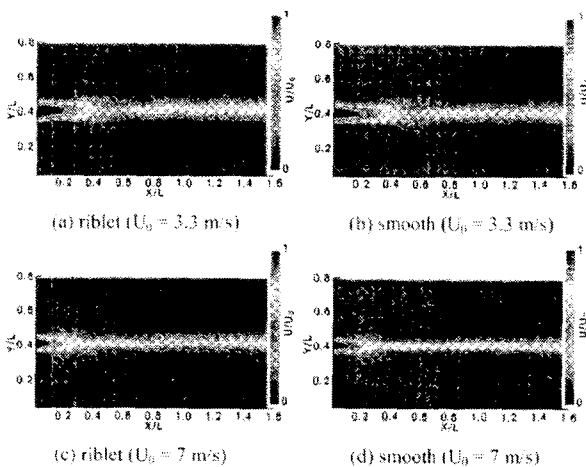


Fig. 11 Spatial distributions of streamwise velocity components

탕으로, 공기의 실제 속도(U)를 자유흐름속도로 무차원시켜서 그래프화 하면 Fig.12 와 같이 된다.

속도 성분들을 이용하여 항력계수를 계산하였더니 Table 1 과 같이 자유흐름속도가 3.3m/s 인 경우에는 2.41 ~ 3.83 % 항력 감소 효과가 있었고, 7m/s 인 경우에는 36.2 ~ 38.6 % 의 항력 증가 효과가 있었다. 결과 값에서 x/L 에 따라서 항력 감소율이 서로 다른 이유는 익형 후류에서 발생하는 강한 3 차원 유동 특성때문에, 2 차원 유동에 기초한 운동량 방정식의 계산 값이 x/L 에 따라서 변화하기 때문이다. 한편 PIV 측정법으로 평균 속도장을 측정하면 2% 이내의 오차가 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>(11)</sup>

위 결과에서 3.3 m/s 에서는 항력 감소 효과가 7m/s 에서는 항력 증가 효과가 나타난 이유는 선행된 연구들에서도 지적하였듯이, 리블렛으로 항

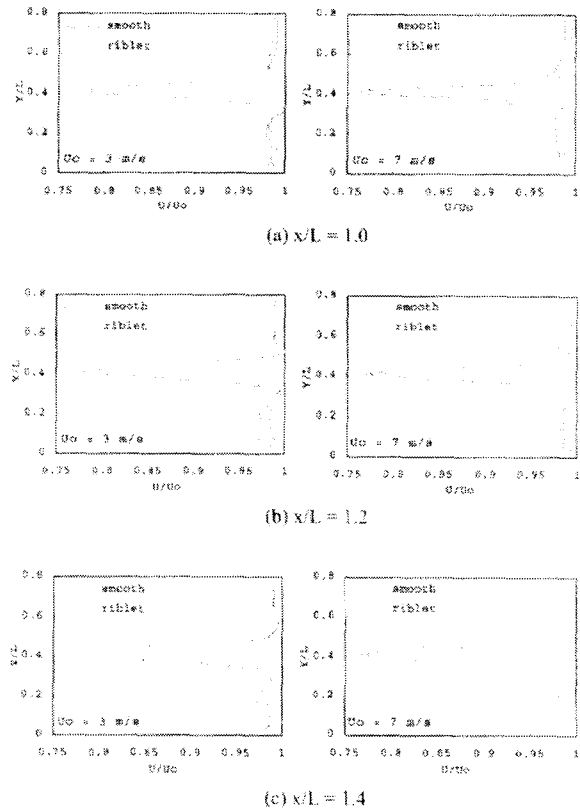


Fig. 12 Velocity profiles at  $x/L = 1.0, 1.2$  and  $1.4$

Table 1 Drag coefficient on the NACA 0012 airfoil with and without the MRFs

Freestream Velocity ( $U_0$ )	$C_D$ (with MRFs)			$C_{D(\text{smooth})}$ (without MRFs)			$\Delta C_D / C_{D(\text{smooth})}$ (%)		
	$x/L=1.0$	$x/L=1.2$	$x/L=1.4$	$x/L=1.0$	$x/L=1.2$	$x/L=1.4$	$x/L=1.0$	$x/L=1.2$	$x/L=1.4$
3.3 m/s	0.0486	0.0496	0.0502	0.0498	0.0514	0.0522	-2.41	-3.50	-3.83
7 m/s	0.0551	0.0564	0.0591	0.0398	0.0407	0.0434	Drag Reduction		
							38.4	38.6	36.2
							Drag Increase		

력을 감소시키기 위해서는 물체를 지나는 유속에 따라서 그 크기가 달라야 저야 되기 때문이다.<sup>(5)</sup> 유속이 빠르면 리블렛의 크기가 작아져야 하므로, 7m/s 에서 항력 감소 효과를 얻기 위해서는 본 연구에서 제작한 리블렛 보다 더 작은 크기의 리블렛이 적용되어야 한다는 것을 뜻한다.

본래 리블렛은 난류유동에 보다 효과적이기 때문에, 실험시 trip wire 나 거친 표면을 설치해 두꺼운 난류경계층을 생성시킨다. 그러나 본 실험에서는 우선 실험이 보다 쉬운 층류 속에서 리블렛의 항력 감소 효과를 알아본 것이며, 향후 난류경계층을 형성하여 난류 유동 속에서 리블렛의 항력 감소 효과에 대한 실험도 수행할 계획이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 (100)실리콘 기판을 방향성 기판 미세 가공으로 형틀을 만들고, PDMS micro-molding 기법으로 이를 모사하여 산맥 끝이 뾰족한 미세 리블렛 필름을 제작하였다. 이렇게 제작된 리블렛 필름은 1 $\mu$ m 단위의 리블렛 형상을 만들 수 있어서 자동차나 비행기등에도 적용할 수 있으며, 유연하여 곡면에도 적용할 수 있고, 공정이 간단하며 재료비도 비교적 적게 소요되므로 실생활에의 응용 가능성이 매우 크다. 또한 이러한 방법으로 제작된 리블렛 필름은 기존의 리블렛 필름보다 산맥 끝이 더 뾰족한 형상을 만들 수 있으므로 더 효율적으로 항력을 감소시킬 수 있다.

본 논문에서는 높이가 180  $\mu$ m, 끝 사이의 간격이 300  $\mu$ m인 미세 삼각 리블렛 필름을 제작하였으며, 이를 NASA 0012 익형에 붙여서 쾌쇄혈 저난류 아음속 풍동에 설치한 후, PIV system 으로 속도장을 측정하여 항력 감소 실험을 한 결과, 자유 흐름 속도가 3.3m/s 에서 약 3.8 %의 항력 감소 효과가 7m/s 에서는 약 38%의 항력 증가 효과가 있었다. 이는 본 연구에서 이용한 리블렛 제작 방법으로, 7m/s 에서 항력 감소 효과를 보기 위한 리블렛을 제작하려면 산맥의 높이와 간격이 더 작아야 됴을 나타낸다.

#### 후 기

본 연구는 포항공과대학교 학부생 연구프로그

램(Undergraduate Research Opportunities Program: IRC0140401)과 국가 지정 연구실 사업(2000-NL-01-C-148)의 연구지원으로 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Wang, J. J., Lan, S. L. and Chen, G., 2000, "Experimental Study on the Turbulent Boundary Layer Flow over Riblets Surface," *Fluid Dynamics Research*, Vol. 27, pp. 217~229.
- (2) Tsao, T., Jiang, F., Miller, R., Tai, Y. C., Gupta B., Goodman R., Tung S. and Ho C. M., 1997, "An Integrated MEMS System for Turbulent Boundary Layer Control," *Transducer '97*, pp. 315~318.
- (3) Kumar, S. M., Reynolds, W. C. and Kenny, T. W., 1999, "MEMS Based Transducers for Boundary Layer Control," *MEMS'99*, pp. 135~140.
- (4) Sherman, F., Tung, S., Kim, C. J., Ho, C. M. and Woo, J., 1999, "Flow Control by Using High-Aspect-Ratio, In-Plane Microactuators," *Sensors and Actuators A*, Vol. 73, pp. 169~175.
- (5) Walsh, M., 1983, "Riblets as a Viscous Drag Reduction Technique," *ALAA J.*, Vol. 21, No. 4, pp. 485~486.
- (6) Choi, K. S. and Orchard, D. M., 1997, "Turbulence Management Using Riblets for Heat and Momentum Transfer," *Experimental Thermal and Fluid Sci.* Vol. 15, pp. 109~124.
- (7) Bruse, M., Bechert, D. W., van der Hoeven, J. G. Th., Hage, W. and Hoppe, G., 1993, "Experiments with Conventional and Novel Adjustable Drag-Reducing Surfaces," *In Near-Wall Turbulent Flows*, So, R. M. C., Speziale, C. G. and Launder, B. E., Eds., pp. 719~738, Elsevier, Amsterdam.
- (8) Marentic, F. J. and Morris, T. L., 1992, "Drag Reduction Article," United States Patent, Patent No. 5133516.
- (9) Jo, B. H., Van Lerberghe, L. M., Motsegood, K. M. and Beebe, D. J., 2000, "Three-Dimensional Micro-Channel Fabrication in Polydimethylsiloxane (PDMS) Elastomer," *J. MEMS*, Vol. 9, No. 1, pp. 76~81.
- (10) Duffy, D. C., McDonald, J. C., Schueller, O. J. A. and Whitesides, G. M., 1998, "Rapid Prototyping of Microfluidic Systems in Poly(dimethylsiloxane)," *Anal. Chem.*, Vol. 70, No. 23.
- (11) Lee, S. J., 2002, "PIV Velocity Field Measurement Technique and Application," Postech.