

## 피에조 필름을 이용한 평판에서의 유동유기 소음원의 능동제어

### Active Control of Flow Noise Sources of Flat Plate Using Piezo Film

신승열\* · 송우석\* · 이승배\*\*

Seungyeol Shin, Wooseog Song and Seungbae Lee

**Key Words** : Piezoelectric Bimorph Actuator(바이몰프), Wavenumber-Frequency Spectra(파수-주파수 스펙트럼)

#### ABSTRACT

Measurements of fluctuating wall pressures were made with a linear array of 16 piezo-electric transducers beneath a fully-developed turbulent boundary layer. The piezoelectric bimorph actuator applied in this experiment has bonding structures of each polarity to make out-of-plane displacements rather than in-plane ones by using piezoelectric effect. To specify the boundary layer characteristics at the location where the actuation was applied, the wall friction coefficients and  $Re_\theta$  were measured by using the CPM method. The actuating frequency for the bimorph film was determined according to the priori bursting frequency from boundary layer parameters. The reduction of convecting energies in wave-number space was clearly observed at the specified actuating frequencies.

#### 1. 서론

수중무기체계의 고속화로 인하여 물수체(submerged body)주위의 천이 및 난류 유동장에 의한 소음이 중요해지고 있다. 예를 들어 소나부 주변의 유동소음은 소나의 탐지 성능을 저하시키므로 이 영역에서의 소음 특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 또한 자동차와 같은 고속 운송 기관의 경우에도 고속 운행 시 주변 유동에 의해 천장부분등이 가 진력을 받게 되며, 객실로 전달되는 소음의 영향이 승객의 안락성 등에 영향을 주는 등, 고속화에 따른 유동소음의 영향은 매우 중요시 되고 있다

이러한 난류압력변동은 급격하게 변화하는 난류의 와 구조와 유동장에 접하는 고체표면과의 상호작용으로부터 생성되며, 따라서 난류유동은 유기되는 소음 혹은 구조물 진동의 주요한 원인이 되기도 한다.

또한, 경계층 내의 주요 소음원에 대해서는 많은 추정과 논쟁이 있어왔다. 소음방사 측면에서 이극자 소음원은 벽에 의한 거울상(image)효과에 의해 상쇄되며, 레이놀즈 응력에

의한 종방향(longitudinal) 사극자 소음원은 벽에 의해 강화된다고 알려져 있다<sup>(1)</sup>. Landahl<sup>(2)</sup>은 난류경계층 벽면 근처에서의 버스팅 구조(bursting mechanism)가 경계층으로부터 방사되는 소음에 크게 기여하는 이극자 소음원을 발생시킨다고 주장하기도 하였다. 이승배 등<sup>(3)</sup>은 난류 경계층 내에서의 큰 진폭의 벽압력 섭동 이벤트가 방사 조건을 만족하는 경우 원거리장 소음에 기여를 한다고 발표한다 있다.

지금까지의 난류 유동의 제어는 1960, 70년대의 폴리머 침가나 경계층내 흡입(suction)등에 의한 방법과 지난 10년에 걸친 리브렛(riblet)에 의한 수동적인 제어 연구로 요약할 수 있다. 그러나 최근의 미국의 항공우주국 자료에 따르면 양력대 항력비를 2배 이상 증가 시킬 계획을 가지고 있으며, 따라서 능동적인 난류유동제어가 그 대안으로 제시되어 왔다. 수중 물수체의 경우에는 경계층에 의한 근거리 방사소음레벨의 저감이 소나의 탐지성능을 개선하게 되므로 수동적인 컴플라이언트(compliant) 코팅 기술<sup>(4)</sup>과 극소형 액츄에이터에 의한 천이지연에 대한 연구<sup>(5)</sup>가 진행되었다. 그러나 현재까지 실제 물수체에서 수동적 또는 능동적 제어를 통한 천이지연 성공은 보고되고 있지는 않다.

본 연구에서는 피에조 바이몰프(piezoelectric bimorph) 가 진기를 이용하여 난류유동장내의 벽 근처의 버스팅 구조를 제어함으로써, 경계층으로부터 방사되는 소음원을 저감하는데 목적을 두고 있다.

\* 인하대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : shinsy16@hanmail.net  
Tel : (032)860-8745, Fax : (032)868-1716

\*\* 인하대학교 기계공학과

## 2. 피에조 바이모ρφ (piezoelectric bimorph) 가진기를 이용한 유동유기 소음원의 제어 기법

많은 난류 유동은 일치되는 구조적 특징을 갖는다. 특히 난류 경계층 벽면 근처에서는 일치된(coherent) 유동이 난류 변동 에너지의 약 80%를 갖는다. 난류경계층에서는 벽 근처의 유선방향의 와동이 벽면 전단력 증가와 밀접한 관계가 있음이 일반적으로 알려져 있다.

벽면 부근에서는 유선방향 유동의 낮은 속도와 높은 속도 영역이 교차되면서 나타나는 속도차로 인해 머리핀 모양의 와(hairpin vortex)가 형성된다.

이러한 와동은 스펠방향(spanwise)으로 주속도가 변곡을 갖는 불안정성을 일으키며(Swearingen & Blackwelder (1987)<sup>(6)</sup>) 또한 Kline<sup>(7)</sup>의 유동가시화 실험을 통하여 발견된 벽면 근처에 있는 저속의 띠가 들어 올려져서 발생하는 벽면에 수직인 방향으로의 변곡을 갖게 되는 불안정성이 발생하여 주기적인 버스팅(bursting)으로 이어진다. 이러한 일치된(coherent) 구조는 버스팅을 통해 큰 스케일의 구조에서 작은 스케일로 에너지 전달이 이루어지며, 큰 난류섭동을 동반하게 된다. 이때 벽으로부터 들어 올려진 느린 속도의 유체유동을 분출(ejection)이라 한다. 이렇듯 벽면근처에서의 난류구조는 분출(ejection), 버스팅(bursting), 스위프(sweep)현상이 주기적으로 나타나며, 이러한 과정에서 레이놀즈 응력이 발생하여 벽면 난류항력이 커지는 영향을 주게 된다.

따라서 일치된(coherent) 유동과 버스팅 과정이 가능한 일어나지 않도록 억제하면 운동량 혼합과 벽면 항력이 줄어들게 되며 이로 인한 근거리 소음 방사도 줄어들 수가 있다. 즉, 일치된(coherent) 유동과 버스팅 과정이 일어나지 않도록 하여 운동량의 혼합과 벽면 항력을 줄어줄게 하려면, 벽면 근처에서 일어나는 주요한 난류구조의 스케일을 먼저 파악해야 한다.

난류 경계층에서 벽면 근처 저속의 와도 띠의 스펠방향으로의 평균 간격  $\Delta x^+$ 는 약 100정도이며 (Kline(1967)), 유선방향으로의 평균길이  $\Delta z^+$ 는 약 1000정도가 된다. (Blackwelder & Eckelmann (1978)<sup>(8)</sup>). 또한 Blackwelder와 Haritonidis(1983)<sup>(9)</sup>에 의하면 벽면 에디가 부쉬지는 평균 주파수  $f_b^+ (\equiv \nu/u_\tau^2)$ 는 약 0.004라고 한다. 따라서, 버스팅의 난류구조를 제어하기 위한 제어모듈의 크기는 Fig.1에서 볼 수 있듯이, 스펠방향으로는 약  $20\nu/u_\tau$  그리고 유선방향으로는 약  $200\nu/u_\tau$  이내가 되어야 한다.

위에서 저술한 언급된 일치된 유동의 버스팅 구조를 흡입 또는 분출 모드를 갖는 바이모ρφ를 이용하여 가진하면 머리핀 모양의 와(hairpin vortex)는 유기속도에 의하여 상승하며 버스팅 되는 와의 에너지를 소산시켜서 유동유기 소음원을 제어 할 수 있게 한다.

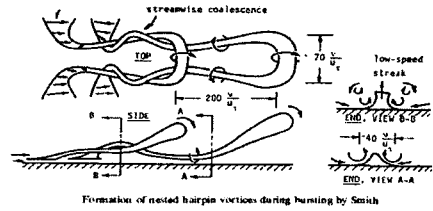


Fig.1 Formation of nested hairpin vortices during bursting by Smith<sup>(10)</sup>

## 3. 실험 장치 및 방법

### 3.1 실험 장치

본 실험은 인하대학교 내에 설치된 밀폐형 무향풍동(close type anechoic wind tunnel)에서 수행되었다. 밀폐된 무향풍동은  $400\text{mm}(H) \times 400\text{mm}(W) \times 2500\text{mm}(L)$  시험부를 갖으며, 유동이 없을 때의 암소음 레벨은 20dB(A)를 유지한다. 또한 최대 난류강도는 0.25%를 유지하며,  $0 \sim 30\text{m/s}$ 까지 연속적인 유동속도 변화가 가능하다.

실험 세트는 Fig. 3과 같이 너비 700mm, 길이 1280mm이며 소재는 아크릴이다. 상기에서 언급된 버스팅 난류구조를 제어하기 위한 피에조 바이모ρφ(piezoelectric bimorph) 가진기는 길이방향으로 가진되는 피에조 필름의 양극끼리 접합시켜서 길이방향이 아닌 상하방향으로 가진 될 수 있도록 만들어졌다. 이 필름은 재료의 극 전화 현상을 통해 기계적 변형을 일으키면 전압이 발생하고, 역으로 전기장이 부가되면 기계적 변형을 발생시키는 압전효과(piezoelectric effect)를 가진 재료이다. 또한, 변형량은 적지만 큰 힘을 발생시키고 응답속도가 매우 빠르며 넓은 주파수 대역과 감지 및 작동의 이중능력, 그리고 변위 분해능이 우수하여 mm단위의 미동을 얻을 수 있어 정밀 위치제어나 진동제어에 우수한 성능을 발휘 할 수 있다. 이러한 바이모ρφ의 양쪽 끝을 고정시켜서 가진하게 되면 Fig. 2에서 보는 바처럼 한 개의 node를 갖는 정상파가 만들어지며, 평판위의 유동장에 직접 노출시켜서 가진한다.

실험세트 내에 설치된 바이모ρφ의 두께는  $52\mu\text{m}$ 이며 너비와 길이는 각각  $100\text{mm} \times 30\text{mm}$ ,  $60\text{mm} \times 15\text{mm}$ 이다. 이처럼 제어모듈의 크기를 다르게 한 것은 모듈의 크기에 따라 난류구조를 제어하는데 어떤 영향을 미치는지 관찰하기 위함이다. Fig. 3은 평판에서의 바이모ρφ와 어레이 마이크로폰의 세트를 나타낸 그림이다..

평판 위의 유동장에서 경계층 안의 속도분포를 측정하기 위하여 I형 열선 유속계(DANTEC55P15)와  $1/50\text{mm}$ 까지 정밀 자동이송이 가능한 2축 이송장치를 사용했으며, 벽면 압력섭동의 공간간적인 영향을 파악하기 위해서 16채널 어레이 마이크로폰을 이용하였다.

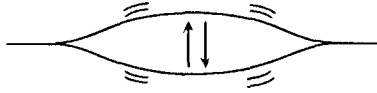


Fig. 2 Schematic of standing waves of piezoelectric bimorph actuator

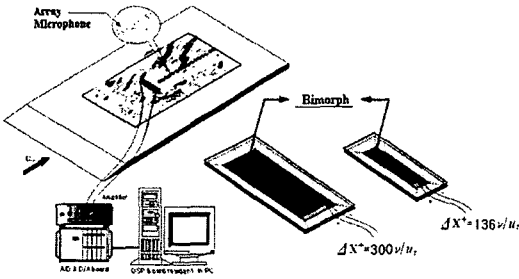


Fig. 3 Schematic of piezoelectric bimorph actuator assembly & array microphone system

### 3.2 실험방법

본 실험은 유속  $15m/s$ 에서 수행되었으며, 풍동의 속도 검정(calibration)시에 전압(voltage)과 속도의 검정식은 4차 다항식을 사용하여 구했다.

열선 유속계의 검정(calibration)을 실시하고, 경계층 내에서의 평균속도분포 측정 시에는 열선유속계를 이용하여 열선의 과열비(over-heat ratio)를 1.5로 하고 30초 동안 300,000개의 데이터를 취하고 평균하여 한 측정 점에서의 평균값으로 취해서, Nitsche et al.<sup>(11)</sup>이 제시한 수치 프레스트온 튜브법(computational preston tube method, CPM)의 원리를 도입하여 벽 마찰계수를 구하였다. 결정된 벽 마찰계수와 점성계수를 식  $f_0^* (= \nu/u_*^2) = 0.004$ 에 대입하여 가진 주파수를 결정한다. 결정된 가진 주파수로 피에조 바이올프(piezoelectric bimorph)를 가진 하여 일치된(coherent) 유동의 버스팅 구조를 제어한다.

난류 스케일 간의 평균 간격  $\Delta x^+$ 가 약 1000정도인 것으로 생각했을 때 현재의 경계층에서 벽면 근처 저속의 와도 띠가 나타나는 주기는 약  $20mm$  정도 됨을 알 수 있다. 이때 제어모듈인 바이올프의 크기에 대한 영향을 확인하기 위해 그 크기를 유선방향으로 일정한 간격을 두고 발생하는 난류 유동구조의 평균 간격의 1.5배, 0.68배로 결정하여 두 가지 경우에 대해 실험하였다.

또한, 16개의 다채널 압력센서를 이용하여 벽압력 신호를 측정하고 시공간 푸리에 변환을 통해 파수-주파수 스펙트럼을 얻어 시공간적인 벽 압력 스펙트럼의 결과를 비교 분석하였다.

### 4. 실험 결과 및 고찰

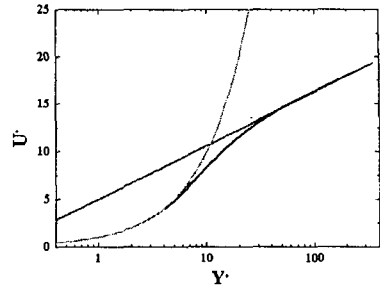
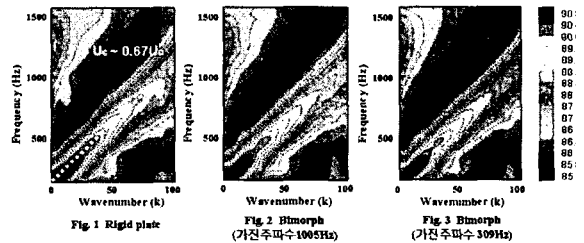
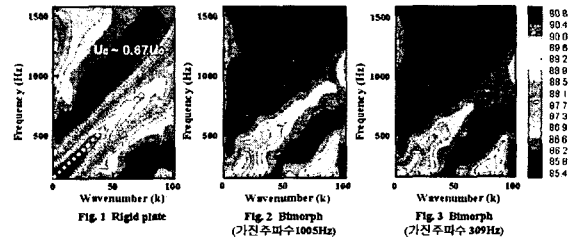


Fig. 4 Velocity profiles for rigid plate at  $x=700mm$  ( $Re_\delta = 1548$ )



(a) Bimorph (30mm×100mm)



(b) Bimorph (15mm×60mm)

Fig. 5 Wavenumber-frequency spectra for each other bimorph actuator

Fig. 4는 유속이  $15m/s$ 인 평판에서 평판의 선단부에서  $700mm$  떨어진 위치에서의 속도 분포를 나타내고 있으며 현 위치에서 난류 경계층을 형성하고 있음을 확인할 수 있다. ( $Re_\delta = 1548$ ) Fig. 5는 바이올프 크기가 각각 (두께  $52\mu m$ , 가로  $100mm$ , 세로  $30mm$ ), (두께  $52\mu m$ , 가로  $60mm$ , 세로  $15mm$ )일 때 다채널 압력 센서로 압력을 측정하여 시공간 푸리에 변환을 통해서 얻은 파수-주파수 스펙트럼이다.

Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 난류유동 구조의 평균 간격보다  $10mm$  큰 바이올프를 사용한 평판에서의 스펙트럼과 강제 평판에서의 스펙트럼을 비교 했을 때 눈에 띄는 에너지 저감을 확인하기 힘들다. 하지만, Fig. 5(b)에서 보듯이 난류유동 구조의 평균 간격보다  $5mm$  작은 바이올프를 사용했을 때는 강제평판에서 보다 현저한 에너지 저감상태를 확인할 수 있었다.

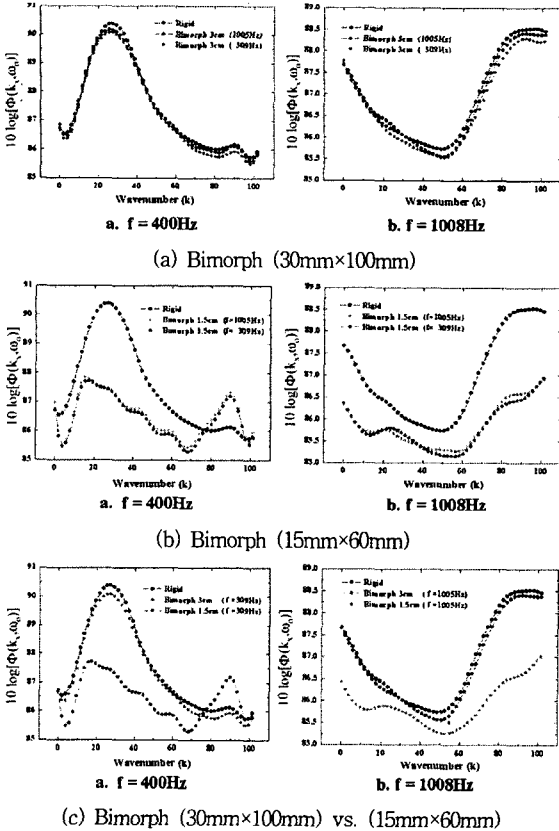


Fig. 6 Wall pressure wavenumber-frequency spectra comparison for bimorph films of 30mm×100mm and 15mm×60mm

정량적인 에너지의 확인을 위해서 Fig. 6(a), (b)는 각각 바이몰프의 크기가 유선방향으로 30mm, 15mm인 경우, 400Hz와 1005Hz인 특정 주파수에 대해 파수영역에서의 에너지 스펙트럼을 비교한 그림이다.

Fig. 6(a)의 경우에 나타나고 있는 에너지 스펙트럼의 크기는 강체인 경우에 비해 저감된 특성을 보이지만 그 값이 전체 대류 에너지에 비해 매우 적은 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 반면 Fig. 6(b)의 경우에 나타나는 에너지 스펙트럼의 차이는 대류 에너지의 전체적인 영역에서 큰 폭의 저감 상태를 확인할 수 있다. 특히 400Hz의 경우 약  $K_x=25$ 인 영역에서 상당한 에너지 저감을 가져왔으나 약  $K_x=90$ 인 영역에서는 새로운 에너지 상승을 보이고 있는 것을 볼 수 있다. 이와같은 현상은 가진 주파수에 의해 움직이는 바이몰프의 가진력이 대류하는 유동의 대류 에너지를 저감시키는 역할을 하는 반면 더욱 작은 구조의 대류 구조들을 형성시키는 결과를 가져오게 됨을 알 수 있다.

Fig. 6(c)는 강체 평판과 유선방향으로 각각 30mm, 15mm인 바이몰프를 400Hz와 1008Hz일때의 특정 주파수에서의 파수영역에서의 에너지 저감 상태를 비교한 결과이다. 유동 방향 난류스케일보다 10mm 큰 바이몰프에 비해서 5mm 작은

바이몰프가 에너지 저감에 훨씬 효과적인 것을 관찰 할 수 있다.

## 5. 결론

가진 주파수의 영향은 대류하는 유동구조에 어느 정도 영향을 주지만, 제어모듈 크기에 대한 영향이 더욱 지배적인 것을 알 수 있었다. 난류 유동구조를 제어 하는데 사용되는 제어모듈의 크기가 머리편 모양 와동의 길이방향의 1.5배인  $\Delta x^+ = 300 \nu / u_\tau$ 보다 0.68배인  $\Delta x^+ = 136 \nu / u_\tau$ 에서 더욱 현저한 저감효과가 나타나는 것을 볼 수 있었다.

본 실험에서는 피에조 바이몰프 (piezoelectric bimorph) 가진기를 통한 유동의 능동제어를 유동의 간단한 동적특성을 이용함으로써 적당한 모듈의 크기와 가진 주파수에 의해서 유동을 능동제어 할 수 있는 시스템으로 확장 할 수 있는 기반과 가능성을 제시하였다.

## 후 기

본 연구의 일부는 수중음향특화센터 UA-42과제 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 센터 및 국방과학연구소에 깊은 감사를 표합니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Powell, A., 1960, "Aerodynamic Noise and the Plane Boundary," J.A.S.A., Vol.32, pp. 982~990.
- (2) Landahl, M.T., 1975, "Mechanics of Boundary Layer Turbulence Layer," J.A.S.A., Vol. 57, pp. 824~831.
- (3) 이승배, 김휘중, 1999, "평판 난류경계층에서의 벽 압력섭동에 대한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 B권, Vol. 23, 제6호, pp.722~733.
- (4) Gadel-Hak, M., 1998, "Compliant coatings: The simpler alternative," Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 16, pp. 141~156.
- (5) Lennart Lofdahl, Gadel-Hak, 1999, "MEMS applications in turbulence and flow control," Progress in Aerospace Sciences, Vol. 35, pp. 101~203.
- (6) Swearingen, J. D., Blackwelder, R. F., 1987, "The growth and break-down of streamwise vortices in the presence of a wall," J. Fluid Mech. vol. 182, pp. 255~290.
- (7) Kline, S. J., 1967, "The Structure of Turbulent Boundary Layers," J. Fluid Mech, vol. 30, pp. 741~773.
- (8) Smith C. R., 1984, "A synthesized model of the near-wall behavior in turbulent boundary layers," Proceedings of the Eighth Symposium on Tubulence, University of Missouri-Rolla.
- (9) Blackwelder, R. F., Eckelmann, H., 1979, "Streamwise vortices associated with the bursting phenomenon," J. Fluid Mech, vol. 94, pp. 577-594.
- (10) Blackwelder, R. F., Haritonidis, J. H., 1983, "Scaling of the burst frequency in turbulent boundary layers," J. Fluid Mech, vol.132, pp. 87.
- (11) Nitsche, W., Thunker, F. and Haberland, C., 1983, "A computational preston tube method, Turbulent Shear Flows," Vol. 4, pp. 261~276.