

<논 문>

## 축대칭 물체 선단에서 발생하는 경계층 내 벽면 변동 압력에 관한 연구

Wall Pressure Fluctuations of the Boundary Layer Flow at the Nose of an  
Axisymmetric Body

신 구 균\* · 홍 진 숙\* · 김 상 윤\*\* · 김 상 렬\*\*\* · 박 규 철\*\*\*\*

Ku-Kyun Shin, Chin-Suk Hong, Sang-Youn Kim, Sang-Ryul Kim and Kyu-Chol Park

(2000년 2월 8일 접수 : 2000년 6월 30일 심사완료)

**Key Words** : Boundary Layer Flow(경계층 유동), Turbulent(난류), Transition(천이), Wall Pressure Fluctuation  
(벽면 변동 압력), Axisymmetric Body(축대칭 물체), Flow Noise(유체소음)

### ABSTRACT

When an axisymmetric body moves through air the boundary layer near the stagnation region remains laminar and subsequently it goes through transition to turbulent. The experimental investigation described in this paper concerns the characteristics of wall pressure fluctuations at the initial stage of boundary layer flow including transition. Flush-mounted microphones are used to measure the wall pressure fluctuations at the transition and turbulent boundary layer region of a blunt axisymmetric body in the low noise wind tunnel. It is found from this study that the wall pressure fluctuations in the transition region is higher than that in the turbulent region.

### 1. 서 론

축대칭 물체 주위로 유체가 흐르면 유체의 점성에 의해 축대칭 물체의 표면에서는 경계층이 형성되며, 이때 경계층 유동은 축대칭 물체 선단부에서부터 층류, 천이 그리고 난류 경계층으로 발달한다. 경계층 유동 내의 복잡한 유체 입자의 거동에 의해 발생하는 벽면 변동 압력(wall pressure fluctuations)은 물체가 탄성체일 경우 진동을 유발시킬 수 있는 중요한 기진원이 될 수 있으며, 유발된 진동은 다시 주변 유체를 가진시켜 소리를 방사시키거나 물체 내부로 파동의 형태로 전파되어 간다. 이와 같이 유체

유동에 의해 발생하는 소음을 유체 소음(flow noise)이라 하며, 특히 물체 선단부에 마이크로폰과 같은 음향 센서가 있는 경우에는 낮은 레이놀드 수의 유동에서는 정체점을 포함한 물체 선단부는 이론적으로 변동 압력 성분이 존재하지 않는 초기의 층류 경계층이 형성되어 음향 센서는 난류 경계층에 의한 직접적인 영향을 받지 않으나, 하류로 갈수록 층류에 이어 발달하는 천이 경계층 및 난류 경계층 유동의 벽면 변동 압력은 직접 혹은 간접적으로 선단부에 위치한 음향 센서에 감지되어 자체소음을 증가시킨다. 따라서, 유체 유동에 의한 자체 소음을 최소화하기 위하여는 이들 기진원에 대한 특성을 파악하고 그 특성에 맞는 감소 대책을 수립하지 않으면 안된다.

일반적으로 축대칭 물체 선단에서의 유동장 발달 과정은 변동 압력 성분이 거의 없는 초기의 층류 경계층 유동에 이어 천이 경계층 유동에서 비로소 작은 진폭을 가진 변동 성분이 발생되며 천이 경계층은 주로 정압 계수가 최소가

\* 정회원, 국방과학연구소  
\*\* 연암공업대학 기계설계과  
\*\*\* 정회원, 한국기계연구원  
\*\*\*\* 한국기계연구원

되는 위치의 부근에서 시작되어<sup>(1)</sup> 역압력 구배 ( $dp/dx < 0$ )를 가지는 영역을 따라 발달된다. 이때 발생하는 변동 성분은 Tollmien-Schlichting wave(T-S 파)라고 불리워지며 유동이 하류로 갈수록 그 진폭이 증가하고 난류 파쇄(turbulent bursting)를 거쳐서 완전히 발달된 난류 경계층 유동으로 진행하게 된다. 천이 경계층 유동에서의 벽면 변동 압력은 T-S 파의 급격한 발달로 인하여 비선형성(nonlinearities)을 보이고 있으며<sup>(1)</sup> 측정된 스펙트럼에서는 T-S 파의 주파수 뿐만 아니라 그 주위의 주파수들도 상당한 증가를 초래한다. 이러한 특성을 가진 천이 경계층 유동의 벽면 변동 압력에 대한 음압 수준(sound pressure level)이 국소적이거나 난류 경계층에 비하여 약 10~25 dB 정도 높다는 점에서<sup>(2),(3)</sup> 많은 관심의 대상이 되고 있다.

경계층 유동에서의 벽면 변동 압력에 대하여는 1956년 Willmarth<sup>(4)</sup>가 압력 구배가 없는 평판의 충분히 발달된 난류 경계층에서의 벽면 변동 압력을 측정 한 이후 많은 연구자들에 의한 실험 및 연구 결과가 보고되고 있으나 대부분의 연구 대상이 평판상에서 발달하는 난류 경계층 유동으로 제한되어 있다.<sup>(5)</sup> 그러나 본 연구에서 대상으로 하는 축대칭 물체의 선단에서의 경계층 유동은 일반적으로 압력 구배가 선단에서는 순압력 구배이지만 하류로 갈수록 최저점을 지나 역압력 구배를 가질 뿐 아니라 흐름 방향 혹은 흐름의 수직 방향으로의 물체 곡률 효과 등으로 평판에서와는 달리 복잡한 특성을 보이고 있다. 특히 축대칭 물체 선단의 천이 영역에서 난류 파쇄의 거동들은 평판에 비하여 아직 명확한 해석이 이루어져 있지 않으며 관련 분야의 연구 성과도 극히 제한적이다.<sup>(6)</sup> 또 축대칭 물체 선단부의 유동의 중요한 현상 중 하나는 유동의 박리와 재부착 현상이다. 이와 관련하여 Arakeri<sup>(7)</sup>는 수중에서의 실험 결과로부터 반구 형태의 선단부가 층류 박리 현상을 유발시키며 재부착 영역 부근에서 벽면 변동 압력 성분의 근평균자승치(rms)는 난류 경계층 유동의 경우보다 약 10배 정도 높다고 보고하고 있다. 이 과도한 벽면 변동 압력은 선단부의 음향 센서에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로, 유체 소음의 제어를 위하여는 반드시 유동의 박리 현상이 발생되지 않는 선단부 형상의 설계가 필요하다. Perraud<sup>(2)</sup>는 긴 타원체 형상의 선단부에서의 벽면 변동 압력을 측정하고 선단부에서 발생하는 천이 경계층 영역에서의 대류 속도가 자유 흐름 속도의 약 45% 정도라고 보고하고 있으나 선단부 주위 유동의 박리 현상에 대한 고찰이 이루어져 있지 않다. 1990년 Katz 등<sup>(1)</sup>은 유동의 박리 현상이 발생하지 않는 선단부 형상을 이용하여 부상체 실험(buoyantly-propelled vehicle test)에 의한 경계층내 벽면 변동 압력의 측정 결과로부터 1 kHz 대역에서 발생한 T-S 파로 인하여 천이 경계층 유동의 벽면 변동 압력의 근평균자승치(rms)

가 난류 경계층의 경우보다 약 18 dB 정도 높음을 보였다. 그러나 부상체가 수중에서 상승할 때 부상체의 영각이 0°를 지속적으로 유지할 수 있는가에 대한 의문이 제기될 수 있다. 이 점에 대하여 1987년 Gad-el-Hak<sup>(8)</sup>은 경미한 영각의 변화가 비정상(unsteady) 층류 박리 현상을 유발시킬 수도 있으며 이로 인하여 천이 경계층 유동내의 벽면 변동 압력이 증가함을 밝혔다.

이와 같이 축대칭 물체 선단에서의 유동의 박리 현상은 경계층내 벽면 변동 압력에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로 유동의 박리 현상이 발생되지 않는 선단부 형상에 대하여 영각이 안정적으로 0°를 유지할 수 있는 조건하에서의 실험적 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 실험의 유속 범위에서 유동의 박리 현상이 발생하지 않은 변형 타원체의 형상을 가지는 축대칭 물체를 모델로 하여 선단부에서 자연적으로 발생하는 층류, 천이, 난류 경계층 유동의 벽면 변동 압력을 측정하고 스펙트럼, 코히어런스 그리고 위상 변화등의 분석을 통하여 그 특성을 파악하고자 하였으며, 또한 천이 경계층 유동에서의 벽면 변동 압력과 난류 경계층 유동에서의 벽면 변동 압력의 수준을 비교 검토하였다.

## 2. 실험장치의 구성

### 2.1 실험장치

본 실험은 한국기계연구원(KIMM)에 설치되어 있는 저소음 풍동에서 수행되었으며 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 계측장소는 무향실로 이루어져 있다. 풍동은 개방형 토출식으로, 유로는 400 mm×400 mm의 정사각형 단면을 가지고 있으며 최대 유속은 56 m/sec 이다. 풍동의 난류 강도는 1% 이하이며,<sup>(9)</sup> 배경 소음의 저소음화를 위하여 풍동의 유로에는 능동형 소음 제어기와 사이렌서가 장착되어 있고, 최대 유속에서 음압 수준이 약 60 dB[ ref. 20 μPa ]인 배

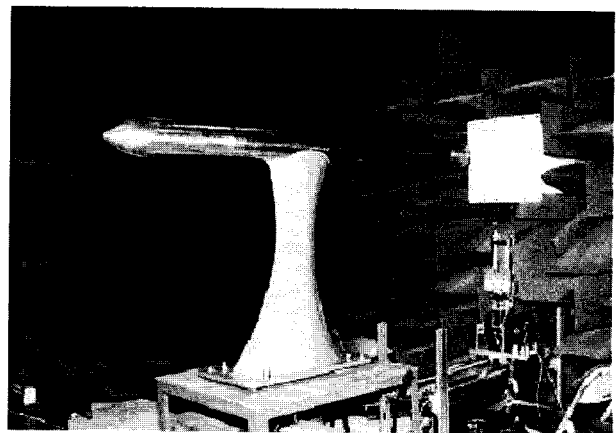


Fig. 1 Axisymmetric body and test section in the wind tunnel(KIMM)

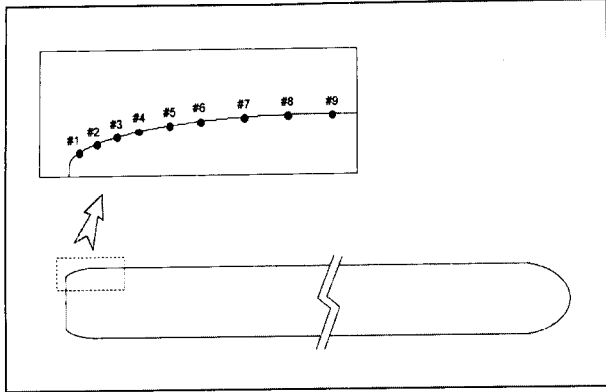


Fig. 2 Configuration of the model and sensor position

경 소음 수준을 가지고 있다. 실험을 위한 모형은 알루미늄 재질의 원통형 실린더로서 최대 직경이 160 mm이며 길이는 2 m로서 내부는 센서 및 케이블 설치를 위하여 비어있고 그 두께는 약 10 mm이다. 실험을 용이하게 하기 위하여 모형은 선단부, 직선부 그리고 후단부를 각각 가공한 후 조립하였으며 선단부의 형상의 일부는 변형 타원체(modified ellipsoidal body)로서 개략적 형상과 벽면 변동 압력 측정용 센서 부착 위치를 Fig. 2에 나타내었다. 무향실에서 모형을 거치하기 위하여 모형 지지부를 유동장의 교란을 최소화할 수 있도록 NACA0018의 형상으로 가공하여 모형의 중간 지점인 선단부로부터 1 m 되는 위치에 설치하였다.

### 2.2 측정시스템의 구성

축대칭 모형의 선단부에서 발달되는 경계층 유동장의 특성을 분석하기 위하여 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 전두부의 5개 지점(1번~5번)과 만곡된 부위의 9개 지점(6번~14번)에 직경 1 mm의 정압 측정용 구멍을 내고 정압 측정 탭을 설치하였으며 Furness사의 Micromanometer를 이용하여 정압을 측정하였다. 벽면 변동 압력 측정용 센서로서는 B&K사의 1/8" 마이크로폰을 사용하였으며, Fig. 2에서와 같이 층류, 천이, 난류 유동이 차례로 발생하는 영역인 만곡된 부위에 모형의 선단부로부터 유동 방향으로 모두 9개를 설치하였다. 센서의 위치는 1번 센서를 기준으로 곡면을 따라 측정된 거리  $s$ 와 이를 모형의 최대 반지름  $R$ 로 무차원한 좌표값을 Table 1에 나타내었다. 또 난류 경계층 내 고체 표면에서의 변동 압력을 직접 측정하기 위하여 마이크로폰은 다이어프램(diaphragm)이 모형의 몸체 표면과 일치하도록 설치(flush mounting)하였다. 측정 및 분석 시스템으로는 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 마이크로폰의 전치증폭기, PCB사의 모델 483 A10 앰프, Krone-Hite사의 모델 3100 필터 및 B&K사의 모델 3550 스펙트럼 분석기로 구성되어 있다.

Table 1 Sensor position numbers and distance of the measurements.

센서 번호	$s$ [mm]	$s/R_0$
1	0	0.0
2	10	0.14
3	23	0.29
4	36	0.44
5	53	0.66
6	70	0.88
7	95	1.18
8	119	1.49
9	143	1.79

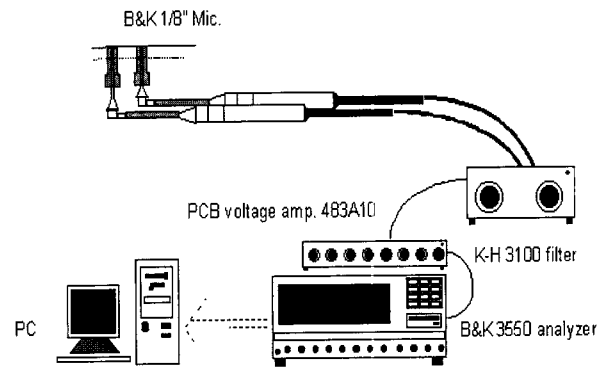


Fig. 3 Measurement system of wall pressure fluctuations

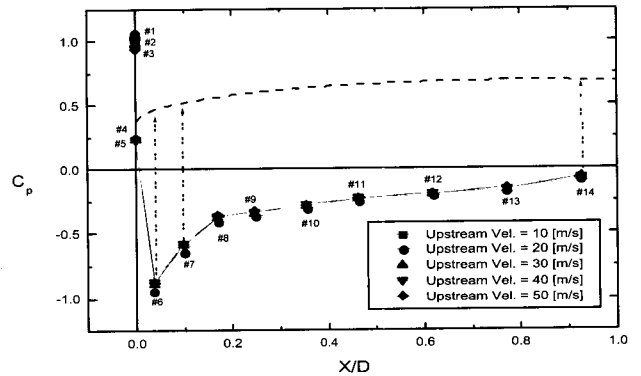


Fig. 4 Pressure coefficient( $C_p$ ) curves

## 3. 실험 결과 및 토의

### 3.1 유속별 정압계수( $C_p$ ) 및 배경 소음 수준

정압 계수는 10, 20, 30, 40, 50 m/sec의 5가지 유속에 대하여 앞서 언급한 바와 같이 전두부에 5개 지점과 만곡부위 9개 지점에서 측정된 정압을 이용하여 계산하였다. 이

때 사용된 정압 계수는 다음의 식으로 표현되어진다.

$$C_p = \frac{(P - P_\infty)}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 측정된 국소 정압,  $P_\infty$ 는 기준 압력,  $\rho$ 는 공기의 밀도 그리고  $U_\infty$ 는 자유 흐름의 속도(free stream velocity)이다.

Fig. 4는 전두부 앞면으로 부터의 거리를 지름  $D$ 로 무차원화한 위치에서의 측정된 정압 계수를 나타낸 것으로, 본 연구에 사용된 모형의 유동장의 특징은 6번 측정 지점 이전 즉 모형 선단의 평면 부분에서는 강한 순압력 구배가 발생되고 있으나 측면의 만곡부가 시작되는 6번 측정 지점 이후에는 역압력 구배가 발생되며 이 경향은 유속에 따라 거의 변하지 않음을 알 수 있었다.

다음으로 모형의 선단부 만곡 부위에 발달되는 천이 및 난류 경계층 유동의 벽면 변동 압력을 측정하기 전에 풍동의 토출부 중심으로부터 1100 mm 떨어진 위치에서 10, 20, 30, 40, 50 m/sec의 유속에서의 배경 소음을 측정하고 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 측정된 배경 소음 수준은 30 m/sec~40 m/sec의 유속인 경우, 1 kHz이상의 주파수 대역에서의 음압 수준은 약 30 dB 이하이고, 200 Hz~1 kHz의 주파수 대역에서는 최대 약 40 dB를 초과하고 있지 않음을 알 수 있다.

### 3.2 벽면 변동 압력

풍동을 이용한 경계층 유동의 벽면 변동 압력 측정은 배경 소음 문제와 마이크로폰 크기 등 많은 실험상의 제약이 따른다. 그 중에서 배경 소음은 저 주파수 대역에서 특히 문제가 되나 무향실의 사용으로 인하여 많은 향상을 가져왔다. 반면에 변동 압력 성분을 측정하는데 사용하는 마이크로폰은 압력의 감지 영역 즉 다이어프램이 유한한 크기를 가진다. 따라서 실제로 측정되는 압력은 감지 영역에 분포된 압력의 공간적 평균 압력이므로, 고주파수 대역에서는 그 크기에 따라 많은 감쇠 현상을 초래한다.<sup>(10)</sup> Blake<sup>(11)</sup>는 측정 면적을 가능한 작게 할 수 있도록 하기 위하여 핀홀(pin-hole) 시스템을 사용하여 센서의 공간 분해능을 향상시켰으나 핀홀 시스템 자체의 음향 감쇠 현상으로 인한 보상 문제 등의 까다로운 문제가 예상되므로, 본 실험에서 채택한 1/8" 마이크로폰의 압력 측정 면적이 관심 주파수 대역에서 충분히 작은 것으로 판단되어 본 연구에서는 크기에 따른 보정을 고려하지 않았다.

실험 결과의 분석은 모형에 부착된 마이크로폰의 설치 영역에서 자연스러운 층류, 천이 난류 경계층이 발달하는 30 m/sec와 40 m/sec 두가지 유속에 대하여 수행하였으며

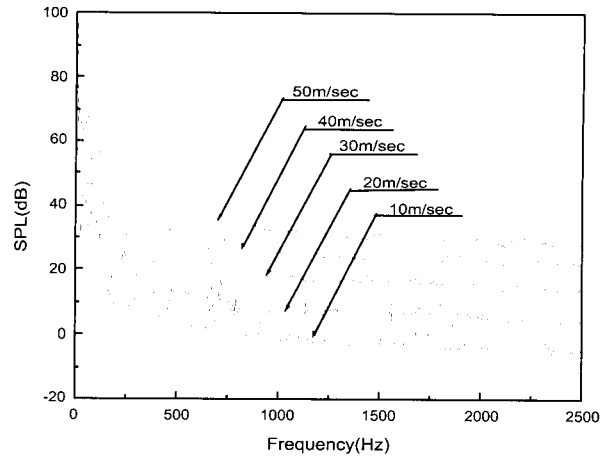


Fig. 5 Measured background noise levels

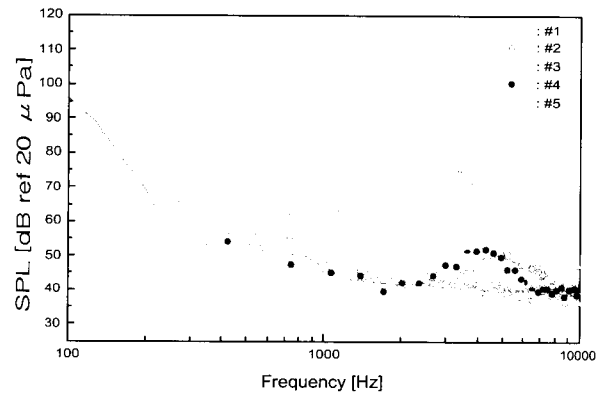


Fig. 6 Spectra of wall pressure fluctuations at sensor No. 1~No.5 ( $Re_D = 3.2 \times 10^5$ )

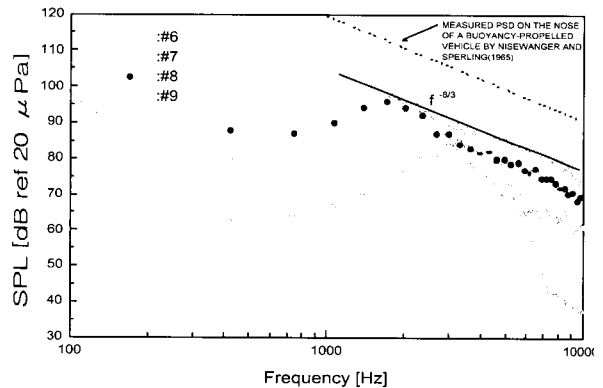


Fig. 7 Spectra of wall pressure fluctuations at sensor No. 6~No.9 ( $Re_D = 3.2 \times 10^5$ )

이들 유속을 모형의 지름을 기준으로 한 레이놀즈수로 표시하면 각각  $Re_D = 3.20 \times 10^5$  과  $4.27 \times 10^5$  이다.

Fig. 6과 Fig. 7은  $Re_D = 3.20 \times 10^5$  에서 각 마이크로폰에서의 벽면 변동 압력의 음압 수준 스펙트럼을 나타낸

것으로 풍동 자체의 기계적 배경 소음인 200 Hz 이하의 주파수 대역을 제외하면 1번과 2번 센서에서는 상대적으로 음압 수준이 상당히 낮고 스펙트럼 형상은 평탄하여 특이한 현상이 없으나 3번 센서부터 5 kHz를 중심 주파수로한 완만한 봉우리 형상의 스펙트럼이 보이기 시작하여 하류로 갈수록 중심 주파수는 점점 낮아지면서 음압 수준은 급격히 증가해가는 특성을 보이고 있다. 그러므로, 1, 2번 센서 위치는  $Re_D = 3.20 \times 10^5$ 의 유속에서는 층류의 상태이고 3번 센서 위치에서부터 천이 경계층 유동이 시작되는 것으로 판단할 수 있으며 3~5번 센서 위치에서 관찰되는 3~5 kHz 부근의 피크 현상은 천이 경계층 유동의 T-S파에 기인한 것으로 생각된다. 또한 6번 센서 위치까지는 8 kHz 이상의 고주파수 대역의 음압 수준이 거의 증가되지 않으나 7번 센서 위치부터는 급격히 상승함을 볼 수 있는데 2 kHz 이상의 주파수 대역에서는 스펙트럼의 기울기가  $-8/3$  제곱 정도임을 보이고 있다. 이는 레이놀즈 수에서 많은 차이가 있지만 Fig. 7에서 점선으로 표시한 Nisewanger 등<sup>(12)</sup>의 부상체 실험 결과 ( $Re_D = 6.79 \times 10^6$ )에서와 같은 주파수 기울기를 가지고 있음을 알 수 있다. George<sup>(13)</sup> 등은 자유 전단류에서 압력에 대한 Poisson 방정식의 후리에 변환을 수행함으로써 난류 변동 압력에 대한 주파수 모델을 제시한 바 있다. 즉, 난류 유동내 두가지 주요한 압력 변동의 생성항 중에서 고주파수 대역에서는 난류-난류 상호작용 항에 의하여  $-7/3$  제곱의 주파수 기울기가 만들어 짐을 보였다. 따라서 이것은 6번 센서 위치 이후의 천이 경계층 내에서 고주파수의 난류 성분이 지속적으로 증가하고 있는 것으로 생각되므로 6번 센서 위치 이후는 후기 천이 영역으로 판단된다. 더 하류에 위치한 9번 센서 위치에서는 1.5 kHz 부근에서 음압 수준이 약 100 dB로서 최고치를 보여주고 있다.

다음으로 유속을 증가시켜 레이놀즈수가  $Re_D = 4.27 \times 10^5$  일 때 동일 위치에서의 벽면 압력 변동에 관한 음압 스펙트럼을 측정하고 그 결과를 Fig. 8과 9에 나타내었다. 여기에서는 1~5번 센서 위치까지는 피크 성분이 나타나고 하류로 갈수록 음압 수준이 증가하는 전체적 경향은  $Re_D = 3.20 \times 10^5$ 에서의 경우와 유사하나 3번 및 4번 센서 위치에서 나타난 T-S파의 주파수는 이 보다 약 2 kHz 정도 높아졌음을 알 수 있다. 이러한 T-S파의 주파수 증가는 유속이 증가함에 따라 경계층 두께가 감소함에 기인되는 것으로 생각된다. Fig. 9에서는 Fig. 7에서와는 달리 6번 센서 위치 이후의 스펙트럼은 피크 현상은 보이지 않고 난류 경계층 유동의 벽면 변동 압력의 일반적 스펙트럼 형상을 따른다. 난류 경계층 유동에 대한 변동 압력의 스펙트럼의 특성 비교는 잘 알려진 바와 같이 경계층의 내

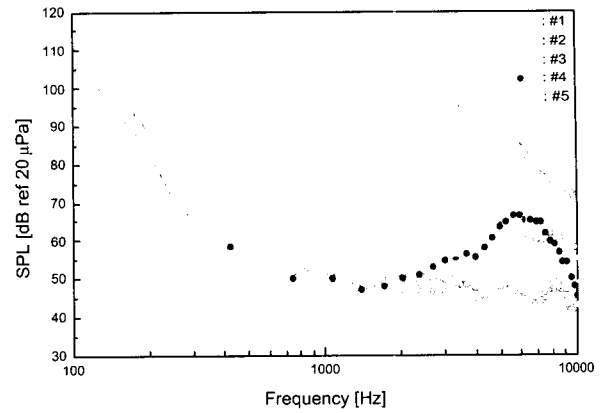


Fig. 8 Spectra of wall pressure fluctuations at sensor No. 1~No. 5 ( $Re_D = 4.27 \times 10^5$ )

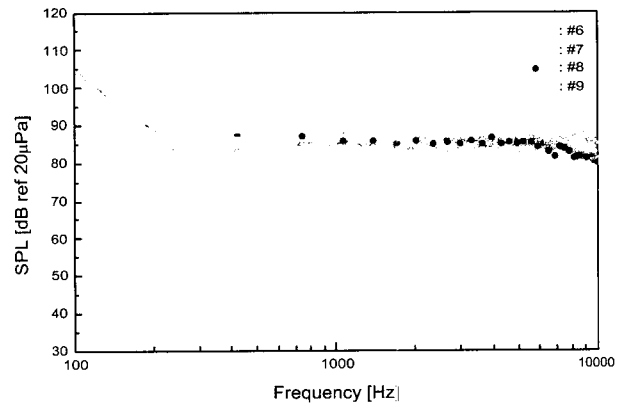


Fig. 9 Spectra of wall pressure fluctuations at sensor No. 6~No. 7 ( $Re_D = 4.27 \times 10^5$ )

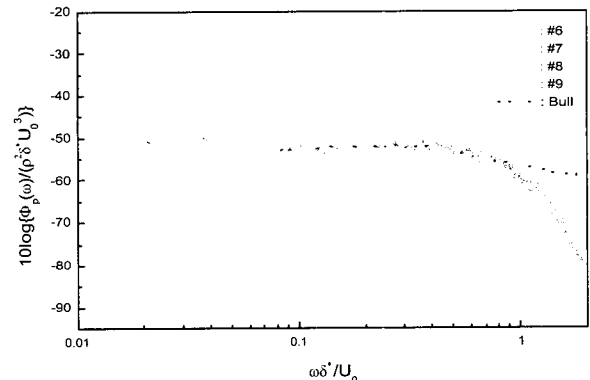


Fig. 10 Nondimensional wall pressure spectra scaled on outer variables at  $Re_D = 4.27 \times 10^5$

부 변수, 외부 변수 그리고 혼합 변수를 사용한 무차원화 기법이 이용된다. Fig. 10에서는 Fig. 9의 스펙트럼을 외부 변수를 이용하여 무차원화한 결과와 평판 상의 충분히 발달된 난류 경계층 유동에 대한 Bull<sup>(14)</sup>의 실험 결과와 비교하여 나타내었다. 여기서  $\delta^*$ 는 경계층 유동의 배제 두께를 나타내며  $\omega \delta^* / u_0 < 1$ 의 주파수 대역에서는 두

결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 난류 경계층의 두께가 축대칭 물체의 반지름에 비하여 훨씬 작을 경우 난류 경계층 유동의 변동 압력은 자유 흐름의 수직 방향으로의 곡률의 효과가 무시되어 평판의 것과 동일함을 의미한다. 그러나  $\omega \delta^* / u_0 > 1$ 의 고주파수 대역에서는 무차원화된 주파수가 증가할수록 두 결과의 차이가 증가한다. 이것은 앞절에서 언급한 바와 같이 센서의 크기에 따른 공간 분해능의 영향으로 사료된다. 따라서 이 영역에서는 고주파수의 난류 성분이 충분히 발달한 난류 경계층 유동인 것으로 판단되며 음압은 10 kHz 까지 약 85 dB의 수준을 나타내고 있다.

충분히 발달된 난류 경계층으로 생각되는 영역에서의 벽면 변동 압력의 스펙트럼을 나타낸 Fig. 9와 Fig. 7의 7번 센서 이후에서의 스펙트럼 및 Fig. 8의 5번 센서 위치에서의 스펙트럼을 비교하여 보면, 후기 천이 영역으로 판단되는  $Re_D = 3.20 \times 10^5$ 의 7번 센서 위치 이후에서의 음압 수준이  $Re_D = 4.27 \times 10^5$ 의 난류 영역에서의 스펙트럼보다 피이크 주파수 대역에서 오히려 높은 것을 쉽게 관찰할 수 있으며, 동일 유속인  $Re_D = 4.27 \times 10^5$ 의 경우에서도 천이 영역으로 생각되는 5번 센서 위치의 음압 수준이 피이크 주파수 대역에서는 6~9번 센서 위치의 경우보다 약 10 dB정도 높게 나타난 것을 알 수 있다.

### 3.3 코히어런스(coherence)

측정 지점간의 거리  $\Delta(x/R) = 0.3048$  인 6번과 7번 센서에 대한 벽면 변동 압력을  $Re_D = 3.20 \times 10^5$  와  $Re_D = 4.27 \times 10^5$ 의 경우에 각각 동시에 측정하여 계산된 코히어런스를 Fig. 11과 Fig. 12에 각각 나타내었다. 여기서 두 위치를 각각 하첨자  $a$ 와  $b$ 라 하면 이들 사이의 코히어런스 함수  $\gamma_{ab}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma_{ab}^2(r, \omega) = \frac{|\phi_{ab}(r, \omega)|}{\phi_a(\omega) \cdot \phi_b(\omega)} \quad (2)$$

여기서  $\phi_a$ 와  $\phi_b$ 는 각각  $a$ 와  $b$  위치에서의 자기 스펙트럼(auto-spectrum)이고  $\phi_{ab}$ 는 교차 스펙트럼(cross-spectrum)을 뜻한다.

Fig. 11에서는 2~4 kHz 주파수 대역에서 강한 코히어런스를 보여주고 있다. 이는 상류 6번 위치에서의 유동이 하류 7번 위치에 강한 영향을 미치고 있음을 의미하며 이 주파수 대역은 Fig. 7의 피이크 성분의 주파수 대역과도 일치한다. 따라서 이 주파수 대역의 강한 코히어런스는 앞절에서 언급되었던 천이 경계층 유동의 T-S파의 상호 작용에 기인한 것으로 판단된다. 그러나, Fig. 11에서는 두 지점간

의 코히어런스가 거의 보이고 있지 않으며 두 위치에서의 스펙트럼 역시 난류 경계층에서와 같은 경향을 따르고 있고 난류 경계층 유동의 특성이 비교적 짧은 상관거리를 가지며 랜덤한 특성을 가지고 있음을 고려해 볼 때  $Re_D = 4.27 \times 10^5$ 의 유속에서는 이들 센서 영역은 최소한 초기 난류 이후의 난류 영역에 있음을 확인할 수 있다.

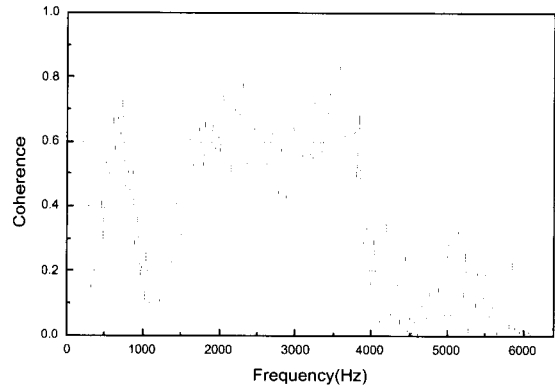


Fig. 11 Coherence function between sensor No. 7 and No. 6 ( $Re_D = 3.2 \times 10^5$ )

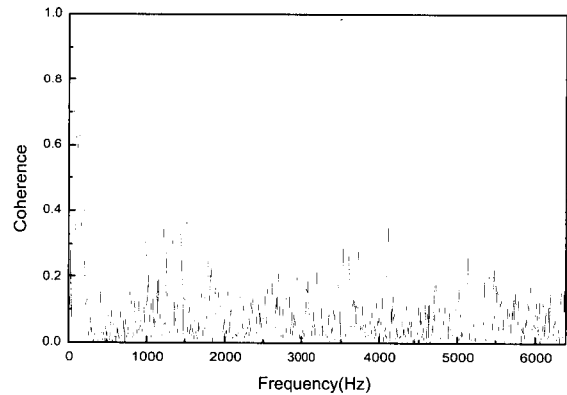


Fig. 12 Coherence function between sensor No. 7 and No. 6 ( $Re_D = 4.27 \times 10^5$ )

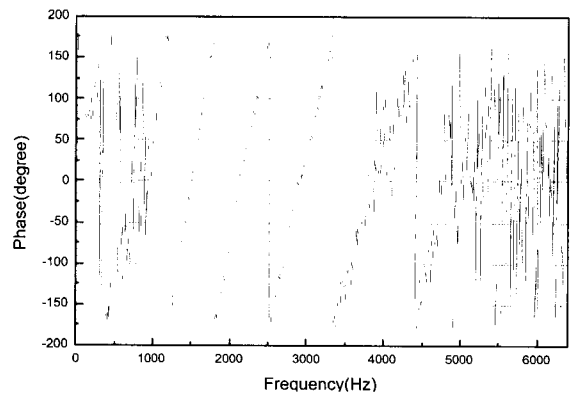


Fig. 13 Phase of cross-spectrum between sensor No. 7 and No. 6 ( $Re_D = 3.2 \times 10^5$ )

### 3.4 교차스펙트럼의 위상

Fig. 11에서의 2~4 kHz 주파수 대역의 강한 코히어런스를 근거로 하여 천이 경계층 유동의 벽면 변동 압력에 대한 대류 속도를 구하기 위하여 교차 스펙트럼의 위상을 주파수의 함수로써 표현하여 이를 Fig. 12에 나타내었다. 위상 그래프에서 대류 속도를 구하는 식은 다음과 같이 주어진다.<sup>(15)</sup>

$$U_c = \frac{2\pi d}{\Delta\theta(f)/\Delta f} \quad (3)$$

여기서  $d$  는 두 지점 사이의 거리이고 식 (3)의 분모는 위상 그래프에서의 단위 주파수 당 위상의 경사도를 나타낸다. Fig. 12의 위상 그래프로부터 식 (3)을 이용하여 계산한 결과 1 kHz에서 5 kHz까지 구간 별로 자유 흐름 속도로 무차원화한 대류 속도는 각각 0.5, 0.57, 0.65, 0.85로 주파수가 증가함에 따라 벽면 변동 압력의 대류 속도는 증가함을 알 수 있었다. 이들 값은 천이 경계층 유동의 초기에 해당하는 무차원 대류 속도 0.45와 난류스팟의 0.9<sup>(11)</sup> 그리고 완전히 발달된 난류 유동인 경우의 0.7인 값과 비교할 만한 결과로 사료된다. 따라서 6번 센서와 7번 센서 사이의 구간은 천이 경계층 유동에서 후기 영역에 속하여 초기에 발달된 T-S파가 후기 영역까지 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한, 3. 2절에서 논의되었던 8 kHz 이상의 고주파수 성분은 무차원화 대류 속도가 0.85인 난류 스팟에 의하여 발생된 것으로 판단할 수 있다.

다음으로  $Re_D = 4.27 \times 10^5$ 의 경우를 Fig. 13에 나타내었다. 여기에서는 3 kHz 주파수 대역에서 불명확한 선형위상을 볼 수 있는데 이것은 Fig. 8에서 보여주는 5번 센서 위치에서 3 kHz 주파수 대역의 강한 성분의 영향인 것으로 생각된다.

## 4. 결 론

축대칭 물체 선단의 만곡된 영역에서 자연적으로 발달하는 층류, 천이 및 난류 경계층의 벽면 변동 압력을 저소음 풍동에서 마이크로폰을 사용하여 측정하고 분석한 결과, 천이 영역에서는 특정 주파수 성분의 피이크 성분이 나타나며 이 피이크 성분은 하류로 갈수록 중심 주파수는 낮아지고 음압 수준은 증가하며, 대류 속도는 자유 흐름 속도의 50~85% 정도임을 관찰하였다. 특히 후기 천이 영역에서의 벽면 변동 압력의 피이크 성분의 음압 수준은 난류 경계층에서 보다 10 dB 이상 높음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) Katz, R. A., Galib T. A. and Cembrola, J. M., 1990, "Classical and Nonlinear Analysis of Transitional and Turbulent Boundary Layer Flow", Proceeding 2nd Int. Symp. on Perf. Enhancement for Marine App., pp. 119~127.
- (2) Perraud, J. C., 1989, "Studies of Laminar-Turbulent Transition in Air and Water Wall Pressure Fluctuations and Acoustic Emission from the Turbulent Intermittency", NCA, Vol. 5, pp. 17~24.
- (3) Abarbanel, H. D., Katz R. A. and Frison, T. W., 1994, "Nonlinear Analysis of High-Reynolds-Number over a Buoyant Axisymmetric Body, Physical Review", Vol. 49, No. 5, pp. 4003~4018.
- (4) Willmarth, W. W., 1956, "Wall Pressure Fluctuations in a Turbulent Boundary Layer", J. Acoust. Soc. Am. 28, pp 1048~1053.
- (5) Blake, W. K., 1986, "Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration I, II", Academic, 1986.
- (6) Lauchle, G. C., 1991, "Hydroacoustics of Transitional Boundary-Layer Flow", ASME, Appl. Mech. Rev. Vol. 44, No 12, Part 1, pp. 517~531.
- (7) Arakeri, V. H., 1975, "A Note on the Transition Observations on an Axisymmetric Body and Some Related Fluctuating Wall Pressure Measurement", Trans. ASME, J. of Fluids Eng., Vol. 97, pp. 82.
- (8) Gal-el-Hak, M., 1987, "Unsteady Separation on Lifting Surfaces", Appl. Mech. Rev. Vol. 40, pp. 441
- (9) 김재승 외, 1998, "저소음 풍동을 이용한 축대칭 물수체의 유체소음 시험", NWS-417-980039, 국방과학연구소.
- (10) Lueptow, R. M., 1993, "Wall Pressure Transducer Spatial Resolution", NCA, Vol 15/FED-Vol. 168, pp. 49~55.
- (11) Blake, W. K., 1970, "Turbulent Boundary-Layer Wall-Pressure Fluctuations on Smooth and Rough Walls", J. Fluid Mech. Vol. 44, pp. 637~660.
- (12) Nisewanger C. R. and Sperling, F. B., 1965, "Flow Noise Inside Boundary Layers of Buoyancy-Propelled Test Vehicles", NAVWEPS Report 8519.
- (13) Georage, W. K., Beuther P. D. and R. G. Arndt, 1984, "Pressure Spectra in Turbulent Free Shear Flows", J. of Fluid Mech., Vol. 148, pp. 155~191.

(14) Bull M. K. and Thomas, S. W., 1976, "High Frequency Wall Pressure Fluctuations in Turbulent Boundary Layers", Physics of Fluids, Vol. 19, No. 4, pp. 597~599.

(15) Bendat J.S. and Piersol, A. G., 1993, "Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis", 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc. pp. 176~177.