

천이 경계층 유동의 벽면 변동 압력에 관한 실험적 연구

Experimental Study of Wall Pressure Fluctuations in the Regions of Flow Transition

신 구 균[†] · 홍 진 숙* · 전 재 진* · 김 상 윤**

Shin Ku-Kyun, Hong Chin-Suk, Jeon Jae-Jin and Kim Sang-Youn

(2001년 9월 19일 접수 : 2002년 3월 8일 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

It has been long suspected that the transition region may give rise to local pressure fluctuations and radiated sound that are different from those created by the fully-developed turbulent boundary layer at equivalent Reynolds number. Experimental investigation described in this paper concerns the characteristics of pressure fluctuations at the transition. Flush-mounted microphones and hot wires are used to measure the pressure fluctuations and local flow velocities within the boundary layer in the low noise wind tunnel. From this experiment we could observe the spatial and temporal development process of T-S wave using Wigner-Ville method and find the relations between the characteristic frequency of T-S wave and free stream velocity and the boundary layer thickness based on nondimensional pressure spectra scaled on outer variables.

1. 서 론

유체 중을 주행하는 물체의 표면에는 유체의 점성에 의해 물체의 선단에는 층류 경계층이 형성되고 하류로 갈수록 천이 경계층과 난류 경계층이 차례로 발달되며 경계층의 두께가 점점 두꺼워진다. 초기의 층류 경계층 유동은 박리현상이 발생할 경우를 제외하고는 이론적으로는 변동성분이 존재하지 않는 것으로 알려져 있다. 천이 경계층 유동의 발생 초기 위치에서는 유동 내 작은 교란은 감쇠되지만 경계층 두께가 증가함에 따라 임의 위치에서부터는 감쇠되지 않는 특정 주파수 성분을 가진 교란(Tollmien-Schlichting

wave, T-S 파)이 발생한다. 이 교란 성분은 유동방향으로 진행함에 따라 그 진폭이 증가하여 난류파쇄(turbulent bursting)를 거쳐서 난류 경계층 유동으로 진행하게 된다. 이러한 경계층 유동에서 발생하는 벽면 변동 압력(WPF : wall pressure fluctuations) 성분은 고속으로 운항하는 항공기 주위에도 발생되어 구조물의 진동을 유발시킬 뿐만 아니라 유발된 진동은 방사소음의 원인이 되기도 한다. 또한 유동장 가운데 위치한 축대칭 물체의 선단부에서도 발생되어 부근에 위치한 센서에 감지되므로서 자체소음을 증가시킨다. 이와 같이 천이 및 난류 경계층 유동의 벽면 변동 압력은 유체 유발 소음원으로 많은 관심의 대상이 되어 왔다.⁽¹⁻³⁾

유동장 가운데 놓여있는 축대칭 물체의 경우는 선단부의 형상에 따라 경계층 유동의 특성들이 많이 변화가 되므로 반구 형태의 선단부를 가지는 경우에는 층류 박리현상이 발견되었으며 박리 재부착 지점에서 측정된 벽면 변동 압력의 rms는 난류 유동의 경우보

† 책임저자, 정회원, 국방과학연구소
E-mail : kkshin@add.re.kr
Tel : (055) 540-6153, Fax : (055) 542-3737
* 정회원, 국방과학연구소
** 연암공업대학 기계설계학과

다 약 10배, 천이 유동의 경우보다 약 4배정도가 크다고 알려져 있으므로^(4,5) 유동의 박리현상이 발생되지 않을 선단부의 설계가 자체소음 감소 측면에서는 필요할 것이다. 천이 경계층 유동에서의 벽면 변동 압력은 T-S 파의 급격한 발달로 인하여 비선형성(nonlinearities)을 보이고 있으며⁽⁶⁾ 측정된 스펙트럼에서는 T-S파의 주파수 뿐만아니라 그 주위의 주파수들도 상당한 증가를 초래한다. 또한 천이영역에서 벽면 변동 압력의 전달속도(convection velocity)는 최저 $0.45 U_0$ ⁽⁶⁾에서 최고 $0.9 U_0$ ⁽⁷⁾까지 보고되고 있다. 이러한 특성을 가진 천이 경계층 내의 벽면 변동 압력은 음압레벨(sound pressure level)이 국소적이거나 마 난류 경계층에 비하여 약 10~25 dB정도 높다는 점에서^(7,8) 많은 관심의 대상이 되고 있다.

축대칭 물체 선단에서 발달하는 층류, 천이 및 난류 경계층 내 벽면 변동 압력에 대한 주파수 특성에 대하여는 저자들은 기 발표한 문헌⁽⁹⁾에서 제시하였다. 그러나, 충분히 발달한 난류 경계층 내 벽면 변동 압력은 시간적으로 정상(steady)이고 공간적으로는 균질(homogeneous)하지만, 천이 경계층에서의 변동 압력은 비정상, 비균질하므로 천이 경계층에 의한 유체소음 발생 기구를 해석하기 위하여는 변동 압력의 시간적, 공간적 변화 특성에 대한 이해가 선행되어야 한다. 특히, 다른 유동 조건에서 천이 경계층 내 변동 압력의 주파수 특성을 예측하기 위하여는 유동 조건, 경계층 두께 등 유동장 요소와 변동 압력과의 상관관계를 분석할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 유동의 박리와 공동현상이 발생되지 않는 변형 타원체의 선수부를 가지는 축대칭 물체에서 자연적으로 발생하는 천이 경계층 유동의 벽면 변동 압력의 측정 결과를 이용하여 입력신호의 시간적 변화, 스펙트럼, 시간-주파수 스펙트럼을 통하여 그 특성을 파악하고 난류 경계층에서의 변동 압력 해석에 사용되는 무차원화 기법을 이용하여 천이 경계층 벽면 변동 압력의 주파수 특성과 유동장 요소와의 관계를 분석하였다.

2. 실험장치의 구성

실험은 한국기계연구원(KIMM)에 설치되어 있는 저소음 풍동에서 수행되었으며 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 계측장소는 무향실로 이루어져 있다. Fig. 2

는 변형 타원체(modified ellipsoidal body)인 선단부의 개략적 형상과 벽면 변동 압력 측정용 센서 부착 위치를 나타내고 있으며 측정 시스템의 구성 및 풍동의 배경 소음 수준등은 저자들의 논문⁽⁹⁾에 상세히 기술되어 있으므로 여기에서는 생략한다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 벽면 변동 압력 신호

초기 천이 경계층 유동으로부터 발달되는 2차원 T-S파는 주로 벽면으로부터 수직거리에 따른 유동장의 측정으로부터 크기와 위상(phase)변화⁽¹¹⁾ 등의 특성을 고찰 할 수 있으나 벽면의 한 지점에 설치한 마이크로폰으로서는 주변의 압력 성분이 모두 측정되는 소위 적분 효과로 인하여 수직거리에 따른 T-S파의 특성을 고찰하는 것은 어려운 일이다. 그러나 난류 경계층 유동 현상과 같이 경계층 내부에 존재하는 에디의 크기에 따른 공간적 분포가 구명되어 있는 경우에는 보다 효과적으로 사용될 수 있다.

Figs. 3~6에서는 축대칭 물체의 지름을 기준으로 한 레이놀즈 수(Re_D)에 따른 각 위치에서의 벽면 압력 변동 신호를 200 Hz이상 6 kHz이하의 대역 필터를 사용하여 추출한 결과를 나타내었다. $Re_D = 2.13 \times 10^5$ 인 경우인 Fig. 3에서는 6번 센서에서 발달된 T-S 파가 후류로 갈수록 증폭되어 가는 현상을 쉽게 관찰할 수 있다. Goldstein 등⁽¹⁰⁾ 이 경계층 유동에서 역압력 구배의 영향은 2차원 T-S파를 증폭시켜 난류화시킬 수 있는 불안정파로 변환시킬 수 있음을 제시한

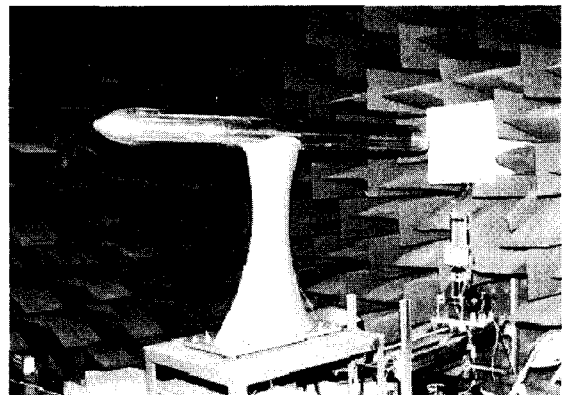


Fig. 1 Axisymmetric body and test section in the wind tunnel (KIMM)

사실을 고려해 볼 때, 이는 국소적으로 초기 천이 경계층 유동에서 후기 천이 경계층 유동으로 발달해가는 단계인 것으로 판단된다. 여기서 두 측정 위치에서 신호의 시간 간격과 센서 사이의 거리로부터 계산되는 전달 속도는 $U_c = 0.63 U_0$ 로서 Perraud⁽⁷⁾의 실험 결과인 $0.3 \sim 0.5 U_0$ 보다 다소 큰값을 얻었다.

$Re_D = 3.2 \times 10^5$ 의 경우인 Fig. 4에서는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 압력 변동의 고주파수 성분이 증가되는 것을 확인할 수 있으며 8번 센서 위치에서는 매우 큰 진폭의 압력 변동 성분을 관찰할 수 있다. 이 현상은 다음 절에서도 언급될 것이지만 후기 천이

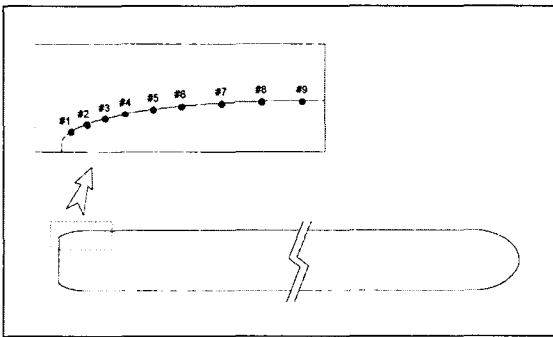


Fig. 2 Configuration of the model and sensor position

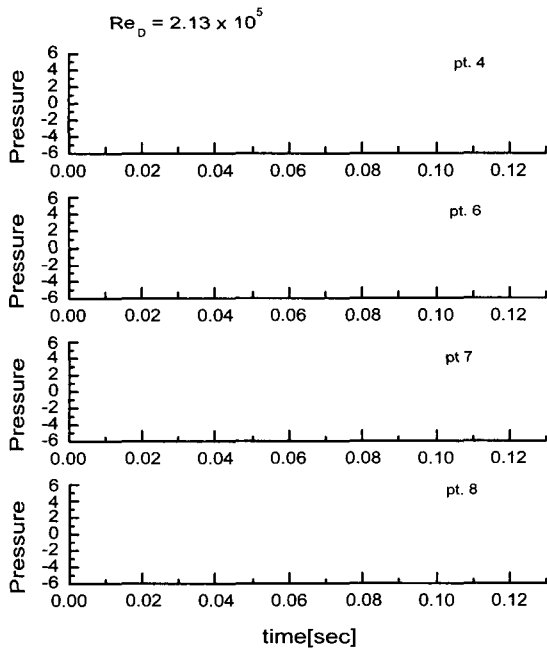


Fig. 3 Time history of WPF at $Re_D = 2.13 \times 10^5$

경계층 유동의 특징인 것으로 사료되지만, 보다 자세한 고찰이 요구되어진다고 하겠다.

후기 천이 경계층 유동과 난류 경계층 유동의 신호를 Fig. 5의 $Re_D = 4.27 \times 10^5$ 인 경우에 6번 센서 위치와 8번 센서 위치에도 동시에 비교 관찰할 수 있는

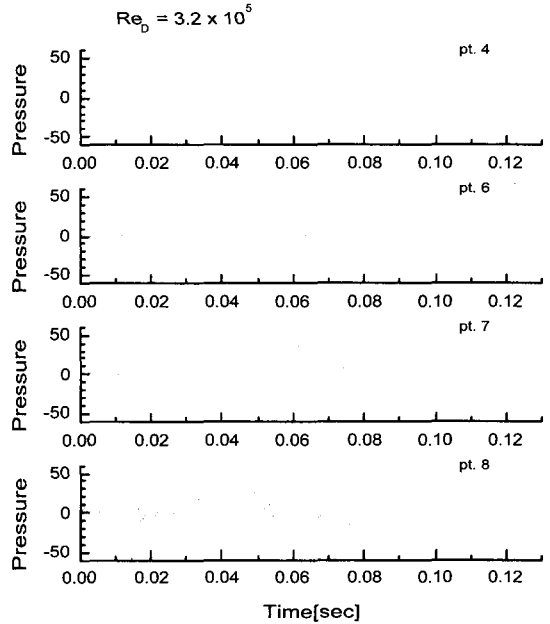


Fig. 4 Time history of WPF at $Re_D = 3.2 \times 10^5$

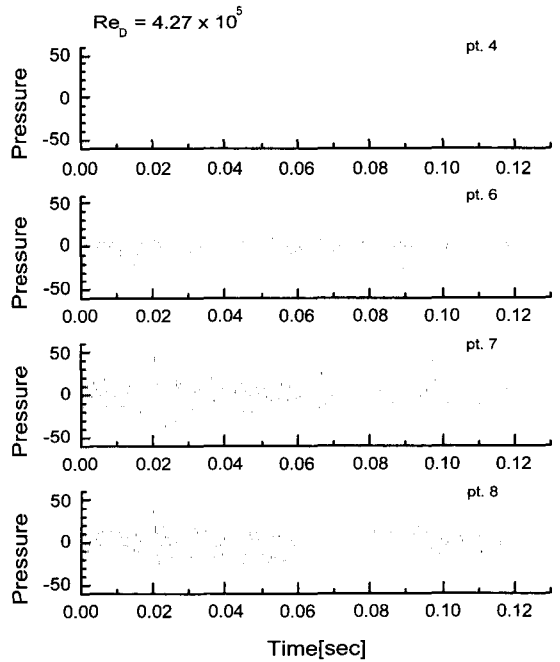


Fig. 5 Time history of WPF at $Re_D = 4.27 \times 10^5$

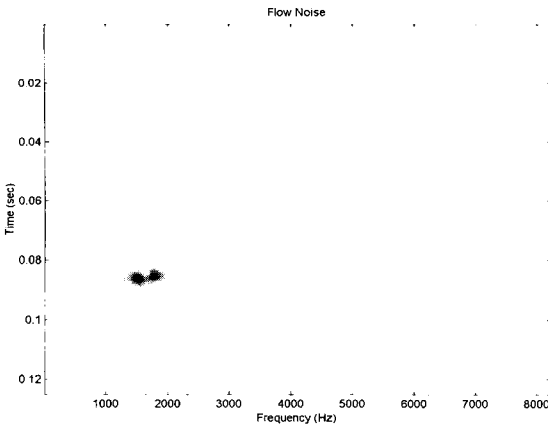


Fig. 6 WVD of WPF at sensor 6 ($Re_D = 2.13 \times 10^5$)

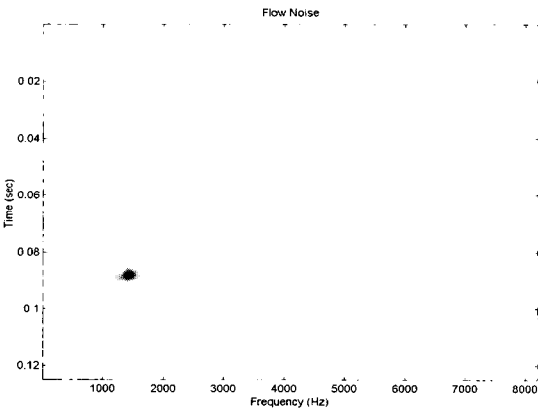


Fig. 7 WVD of WPF at sensor 7 ($Re_D = 2.13 \times 10^5$)

며 6번 센서 위치에서는 몇몇 순간적인 피크 성분들은 난류 경계층 유동의 압력 변동 성분치들보다 높음을 관찰할 수 있다. 이 현상은 다음절에도 논의될 천이 경계층 유동의 벽면 변동압력이 부분적으로 난류 경계층 유동의 변동 압력보다 다소 높다는 것을 보여준다고 하겠다.

3.2 시간-주파수 스펙트럼

앞 절에서 언급된 시간 영역에서의 변동 압력 신호들은 천이 영역에서는 시간에 지배적인 신호 특성을 보이므로 시간에 따라 변동하는 신호의 주파수 특성을 알아 보기 위하여 Wigner-Ville distribution 기법(WVD)을 적용하여 $Re_D = 2.13 \times 10^5$ 경우에 대하여 6~8번 센서에서의 신호를 이용하여 시간-주파수

분석을 수행하고 그 결과를 Figs. 6~8에 나타내었다.

Fig. 3과 Figs. 6~8을 비교하여 보면 시간 영역 신호에서 관찰된 펄스성 압력은 센서 6번에서는 중심 주파수 1.8 kHz의 주파수 밴드폭이 적은 토널성 스펙트럼 특성을 가지고 있고 이 성분은 하류로 이동할수록, 7번 센서에서는 1.5 kHz, 8번 센서에서는 1.3 kHz로 중심 주파수가 낮아지면서 일정한 속도로 대류하고 있음을 명확히 관찰할 수 있다. 이는 교란이 하류로 흘러가면서 크기가 증가하고 따라서 교란의 특성 주파수가 낮아지고 있음을 의미한다.

3.3 벽면 변동 압력 스펙트럼의 무차원화

경계층 내 벽면 변동 압력 스펙트럼을 비교하기 위하여 일반적으로 아래의 3가지 무차원화 변수들이 사용된다.⁽¹³⁾

$$\text{외부 변수} : \Phi(\omega) / \rho^2 \delta^* U_0^3, \omega \delta^* / U_0$$

$$\text{내부 변수} : \Phi(\omega) U_\tau^2 / \tau_w^2 \nu, \omega \nu / U_\tau^2$$

$$\text{혼합 변수} : \Phi(\omega) U_0 / \tau_w^2 \delta^*, \omega \delta^* / U_0$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, δ^* 는 경계층 유동의 배제 두께, U_0 는 자유흐름의 속도, τ_w 는 벽면 전단 응력, ν 는 유체의 동점성계수 그리고 $U_\tau (= \sqrt{\tau_w / \rho})$ 는 마찰속도를 뜻한다.

위에서 언급된 3가지 무차원화 변수의 주파수 대역별 특성들에 대하여 Keith 등⁽¹⁴⁾에 따르면, 경계층 내 벽면 부근의 변동 성분은 비교적 고주파수 대역이므로 벽면 부근의 특성을 표현하는 데는 내부 변수가 비교적 적합한 반면에 경계층 외곽 지역의 저주파수 특성은 외부 변수가 적합하다고 알려져 있다. 그러나 이러한 무차원 변수들의 이용은 충분히 발달된 난류 경계층 유동에 주로 사용되어 왔으며 천이 경계층 유동의 특성에 맞는 무차원 변수는 아직까지 언급된 바가 없다. 따라서 본 실험에서는 비교적 규모가 큰 천이 경계층 유동의 벽면 변동 압력의 특성을 난류 경계층 유동의 경우와 같이 외부 변수를 사용하여 무차원화하여 비교하고자 한다. 레이놀즈 수에 따른 벽면 변동 압력 스펙트럼을 Figs. 9~11까지 보여주고 있다. Fig. 9의 $Re_D = 2.13 \times 10^5$ 일 경우 4번 센서 위치까지는 천이 경계층 유동 현상이 보이지 않으나 그 이후부터는 $\omega \delta^* / U_0 = 0.2$ 부근에서 천이 경

계층 유동의 특징인 2차원 T-S파가 좁은 주파수 대역에서 발달되고 있음을 쉽게 관찰할 수 있다. Walker 등⁽¹⁵⁾은 약한 역압력 구배를 갖는 유동에서 1차 피크값은 T-S파이고 고주파로 갈수록 조화 성분

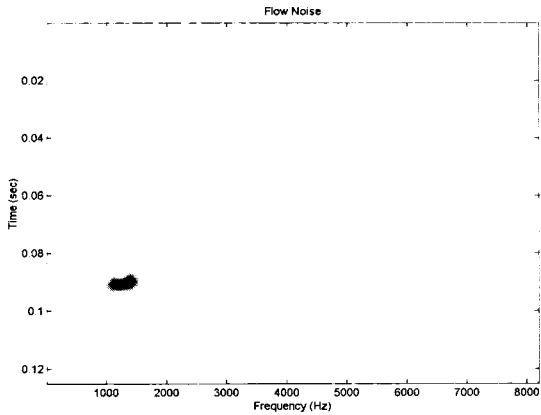


Fig. 8 WVD of WPF at sensor 8 ($Re_D = 2.13 \times 10^5$)

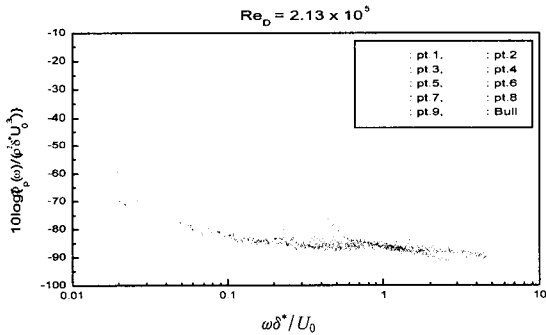


Fig. 9 Nondimensional wall pressure spectra scaled on outer variables at $Re_D = 2.13 \times 10^5$

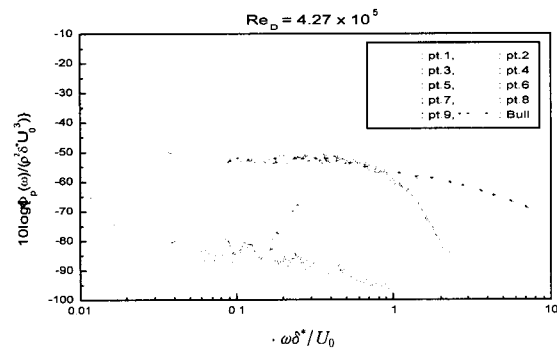


Fig. 10 Nondimensional wall pressure spectra Scaled on Outer Variables at $Re_D = 4.27 \times 10^5$

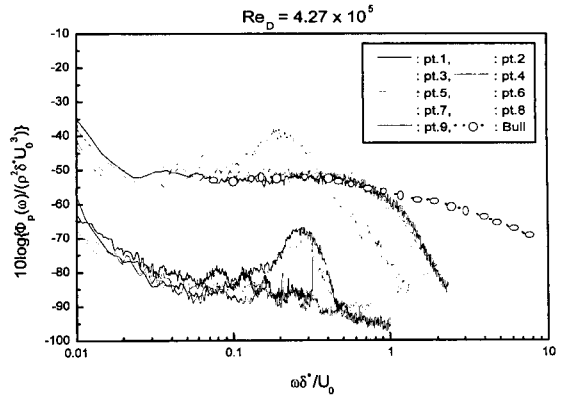


Fig. 11 Nondimensional wall pressure spectra scaled on outer variables at $Re_D = 4.27 \times 10^5$

이 나타난다고 보고하고 있으나, 본 실험에서는 조화 성분의 관찰은 다소 곤란하였다. 그러나, 측정된 T-S파의 벽면 변동 압력은 비교적 초기 단계의 천이 경계층 영역에 속할 것으로 생각된다. 이것은 앞 절의 벽면 변동 압력의 시간 영역 신호에서 언급되었던 바와 같이 초기 단계의 천이 경계층 유동에서 발달된 T-S파가 유동 방향으로 대류 및 증폭되어 가고 있음을 알 수 있다. 또한 9번 센서 위치에서의 변동 압력 수준은 $Re_D = 4.27 \times 10^5$ 의 6번 센서 이후의 난류 경계층 유동과 비교해서 5 dB정도 높음은 주목할 만하다.

Fig. 10의 $Re_D = 3.2 \times 10^5$ 에서는 천이 경계층의 시작이 레이놀즈 수의 증가로 인하여 2번 센서의 위치로 변화하였으며 6번 센서 위치 이후부터는 고주파수의 난류 성분이 지속적으로 증가함을 볼 수 있으므로 난류 스팟이 발생하는 후기 천이 경계층 유동으로 판단할 수 있다. 또한 9번 센서 위치에서는 $\omega \delta^* / U_0 = 0.2$ 부근에서 약 -35 dB의 최대치를 관찰할 수 있으며 Bull⁽¹⁶⁾의 난류 경계층 유동과 $Re_D = 4.27 \times 10^5$ (Fig. 11)인 경우를 비교하면 약 15 dB 정도 높음을 알 수 있다. 또한, 수중에서 $Re_D = 1 \times 10^7$ 일 때 Katz의 부력을 이용한 실험(Buoyantly-propelled test)⁽⁶⁾의 결과와 비교하여 T-S파의 발생 주파수 대역 및 음압 레벨이 잘 일치하고 있지만 레이놀즈 수와 선단부 형상의 차이에 따른 $\omega \delta^* / U_0 = 0.2$ 에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 11에 $Re_D = 4.27 \times 10^5$ 인 경우에 측정된 벽면 압력 변동을 나타내었다. 5번 센서의 위치에서는 앞

서 언급되었던 천이 경계층 유동의 발달이 완료되는 위치로 생각되며 6번 센서 위치부터는 외부 변수의 무차원화 기법을 사용할 경우 -50 dB의 평탄한 구역을 가지는 전형적인 난류 경계층 유동의 벽면 변동 압력 형상을 보여주고 있다. 두 경계층 유동의 벽면 변동 압력은 $\omega\delta^*/U_0 = 0.2$ 부근에서 약 10 dB정도 차이가 나는 것을 볼 수 있으며 본 실험과 같은 무차원화 기법을 사용한 Bull⁽¹⁶⁾의 난류 경계층 유동의 경우와 $\omega\delta^*/u_0 \leq 1$ 의 범위에서는 비교적 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

4. 결론

이상과 같이 풍동 시설을 이용하여 축대칭의 모형의 선단부에서 자연스럽게 발달되는 층류, 천이 및 난류 경계층에서의 벽면 변동 압력 및 경계층 내 유속 분포를 측정하고 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 천이 경계층 내 변동 압력은 펄스성 신호 특성을 가지며 자유 흐름 속도의 약 63%의 속도로 하류로 이동하는 대류 특성을 가진다.

(2) 천이 경계층의 펄스성 변동 압력은 특정 주파수를 중심으로 좁은 주파수 대역의 스펙트럼 특성을 보이며 하류로 갈수록, 즉 경계층이 두꺼워지는 영역으로 이동함에 따라 중심 주파수가 낮아진다.

(3) 또한, 천이 경계층에서의 변동 압력을 경계층 외부 변수로 무차원화한 결과 경계층의 배제 두께와 자유 흐름 속도로 무차원화한 주파수 ($\omega\delta^*/U_0$)의 0.15~0.2 범위에서 일치하고 있음을 보아 천이 경계층에서 발생하는 T-S파의 주파수는 경계층 두께와 유속에 밀접한 관계가 있을 가능성이 있음을 확인하였다.

(4) 외부 변수로 무차원화한 변동 압력의 스펙트럼은 후기 천이 영역에서는 충분히 발달된 난류 경계층에 대한 무차원화 스펙트럼보다 부분적으로 10~15 dB정도 높음을 알 수 있었다.

참고 문헌

(1) Lauchle, G. C., 1980, "On the Radiate Noise Due to Boundary Layer Transition," JASA, Vol.

67, No. 1, pp. 158~167.

(2) Lauchle, G. C., 1977, "Noise Generated by Axisymmetric Turbulent Boundary Layer Flow," JASA, Vol. 61, No. 3, pp. 694~703.

(3) Arakerie, V. H., Satyanarayana, S. G., Mani, K. and Sharma, S. D., 1991, "Studies on Scaling of Flow Noise Received at the Stagnation Point of Axisymmetric Body," JSV, Vol. 146, No. 3, pp. 449~462.

(4) Arakerie, V. H., 1975, "A Note on the Transition Observations on an Axisymmetric Body and Some Related Fluctuating Wall Pressure Measurements," Trans. ASME J. Fluids Eng., Vol. 97, p. 82.

(5) Huang, T. T. and Shen, Y. T., 1989, "Wall-pressure Fluctuations in Adverse-pressure Gradients Transition Regions," ASME NCA, Vol. 5, p. 5.

(6) Katz, R. A., Galib, T. A. and Cembrola, J. M., 1989, "Classical and Nonlinear Analysis of Transitional and Turbulent Boundary Layer Flow," ASME NCA, Vol. 5, p. 179.

(7) Perraud, J. C., 1989, "Studies of Laminar-turbulent Transition in Air and Water Wall Pressure Fluctuations and Acoustic Emission from the Turbulent Intermittency," ASME NCA, Vol. 5, p. 17.

(8) 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.

(9) 신구균, 홍진숙, 김상윤, 김상렬, 박규철, 2000, "축대칭 물수체 선단에서 발생하는 경계층 내 벽면 변동 압력에 관한 연구," 한국소음진동공학회지, 제 10 권 제 4 호, pp. 602~609.

(10) Goldstein, M. E. and Hultgren, L. S., 1987, "A Note on the Generation of Tollmien-Schlichting Waves by Sudden Surface-curvature," J. of Fluid Mechanics, Vol. 181, pp. 519~525.

(11) 김재승 외, 1998, "저소음 풍동을 이용한 축대칭 물수체의 유체소음 시험," NWSD-417-980039, 국방과학연구소.

(12) Arnal, D., Juillen, J. C. and Michel, R., 1977, "Analyse Experimentale et Calcul de l'Apparition et du Developpement de la Transition de la Couche Limite," AGARD CP 224, 13-1.

(13) Lueptow, R. M., 1993, "Wall Pressure Transducer Spatial Resolution," ASME NCA- Vol. 15, FED-Vol. 168, p. 49.

(14) Keith, W. L., Hurdis, D. A. and Abraham, B. M., 1991, "A Comparison of Turbulent Boundary Layer Wall-pressure Spectra," ASME NCA-Vol. 11, FED-Vol. 130, pp. 1~9.

(15) Walker, G. J. and Gostelow, J. P., 1990, "Effect of Adverse Pressure Gradients on the Nature and Length of Boundary Layer Transition," ASME J. of Turbomachinery, Vol. 112, pp. 198~205.

(16) 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.

(17) Blake, W. K., 1986, Mechanics of Flow-induced Sound and Vibration, Academic Press.