

난류 경계층에서 컴플라이언트 코팅된 벽면과 점탄성 벽면의 방사 소음에 관한 실험적 연구

이창준*·이승배†·권오섭*·전우평**
(2002년 5월 20일 접수, 2003년 1월 18일 심사완료)

Radiated Sound from Compliant and Viscoelastic Plates in a Turbulent Boundary Layer

Chang-Jun Lee, Seungbae Lee, O-Sup Kwon and Woo-Pyung Jeon

Key Words: Compliant Surface(유연 벽면), Turbulent Boundary Layer(난류 경계층), Radiated Sound(방사 소음), Wall Pressure Spectrum(벽압력 스펙트럼)

Abstract

We examine a problem in which porous/viscoelastic compliant thin plates are subject to pressure fluctuations under transitional or turbulent boundary layer. Measurements are presented of the frequency spectra of the near-field pressure and radiated sound by compliant surface. A porous plate consisting of 5mm thick, open-cell foam with fabric covering and a viscoelastic-painted plate of 1mm thick over an acoustic board of 4mm thick were placed over a rigid surface in an anechoic wind tunnel. Streamwise velocity and wall pressure measurements were shown to highly attenuate the convective wall pressure energy when the convective wavenumber ($k_c h$) was 3.0 or more. The sound source localization on the compliant walls is applied to the measurement of radiated sound by using an acoustic mirror system.

기호설명

- | | |
|--|-----------------------------------|
| a_0 : 음속(m/s) | U_c : 대류속도 |
| C_f : 벽면 마찰계수($=2\tau_w/\rho U_0^2$) | u_r : 전단속도 |
| d^* : 무차원화된 핀 홀 지름($=du_r/v$) | Δx : 유동에 의한 음향미리의 초점 편향거리 |
| h : 컴플라이언트 코팅된 판의 두께 | y_T : 소음원으로부터 유동장 경계까지의 거리 |
| k_c : 대류파수 | δ^* : 배제 두께 |
| K_1 : Von Karman 상수 | θ : 운동량 두께 |
| K_2 : Van Driest 상수 | τ_w : 평균 벽 전단응력 |
| K_3 : 압력구배의 효과를 나타내는 매개변수 | |
| Re_θ : 운동량 두께를 기준으로 한 레이놀즈수 | |
| U_0 : 자유유동속도 | |

1. 서론

경계층 천이지면에 대한 실험적 연구로서 항력 감소를 위한 컴플라이언트 코팅의 사용은 Kramer⁽¹⁾에 의해 소개되어졌고, 그 후 다른 연구자들에 의해 여러 차례 실험이 수행되었지만 항력 감소라는 분명한 결과를 얻지 못하였다. 또한 Blick⁽²⁾의 많은 연구자들도 공기 중에서 실험을

† 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : sbaelee@inha.ac.kr
TEL : (032)860-7325 FAX : (032)868-1716
* 인하대학교 대학원 기계공학과
** 서울대학교 난류제어연구단

수행하여 컴플라이언트 코팅에 의해 표면저항이 감소됨을 보고한 바 있으나, 이것 역시 재검증되지 못했다. Gad-el-Hak⁽³⁾은 탄성 표면 (elastic surface)과 점탄성 표면 (visco-elastic surface)에서 발생하는 불안정성 (instability)에 대한 실험적인 연구를 수행하였다. 그의 실험에서는 탄성 표면으로 젤라틴 (gelatin)을 사용하였으며, 점탄성 표면은 PVC로 코팅하여 수동 (water tunnel)에서 실험을 수행하였다. 두 표면에서 각기 다른 수탄성 (hydroelastic) 불안정성이 발생함을 관찰하였으며 그 특성들에 대해 분석하였다. 점탄성 표면에서 발생하는 A 불안정성은 탄성 표면에서 발생하는 B 불안정성에 비해 긴 파장, 낮은 위상속도를 가지며 고주파의 비조화곡선처럼 보이는 반면, B 불안정성은 높은 위상속도를 가지고 유속과 일정한 관계를 보이며 상호 대칭관계에 있다고 제시했다. Willis⁽⁴⁾는 국소변위를 갖는 유연표면에 대한 Blasius 층류경계층의 유동안정성, Orr-sommerfeld식의 고유치 및 불안정성에 대한 시간적·공간적 모드를 고려, e-방법을 이용한 천이 레이놀즈수 계산 등을 통해 컴플라이언트 코팅면의 불안정성을 해석하였다. 또한 댐핑 물질로 구성된 굴힘판과 다층 경계를 갖는 균질 점탄성 표면의 컴플라이언트 모델을 제작하였다. 실제 실험은 모델의 물성치를 변화시키면서 수행되어졌고, 20~40%의 천이 레이놀즈수가 증가하였음을 관찰하였다. 다른 여러 실험 역시 같은 경향성을 나타냈으며, 다층 경계로 된 모델이 천이 지연에 보다 효과적임을 보여주었다. Abraham 등⁽⁵⁾은 최근 다공질의 컴플라이언트 코팅면에서 난류 경계층 실험을 수행하였으며, 고주파수 영역에서 대류 벽압력 스펙트럼의 감쇄 현상이 발생함을 확인하였다.

난류경계층 내의 주요 소음원에 대해서는 많은 추정과 논쟁이 있어 왔다. 소음방사 측면에서 이극자 소음원은 벽면에 의한 거울상 (image)효과에 의해 상쇄되며, 레이놀즈 응력 (Reynolds stress)에 의한 종방향 사극자 소음원은 벽면에 의해 강화된다.⁽⁶⁾ 그러나 Landahl⁽⁷⁾은 난류경계층 내의 버스팅 구조(bursting mechanism)가 경계층으로부터 방사되는 소음에 크게 기여하는 이극자 소음원을 발생시킨다고 주장하였다. 이승배 등⁽⁸⁾은 난류 경계층 내에서 큰 진폭의 벽압력 섭동 이벤트가 방사 조건을 만족하는 경우 원거리장 소음에 기여

를 한다고 발표한 바 있다.

완전히 발달된 난류유동과는 달리, 자연적 천이의 경우에는 이차원 T-S파에 의한 선형적 불안정과, 3차원 비선형의 2차 불안정과, K-type의 붕괴에 의한 스파이크, 그리고 난류 스팟 (spot)을 거치면서 매우 독특한 소음원들을 갖게 되며, 이들에 대한 방사소음의 측정은 거의 전무한 실정이다. 최근 연구에 따르면 후기 천이에서 관찰되는 K-type의 스파이크 (spike)가 난류 버스팅 이벤트와 비슷한 메카니즘으로 설명되기도 한다.

본 연구에서는 다공성 컴플라이언트 코팅된 벽면과 점탄성 벽면이 경계층과 벽면 압력섭동에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 평판 위의 경계층 측정은 경계층용 I형 열선 유속계 (DANTEC 55P15)를 이용하여 시간 평균 통계량인 평균 속도를 측정하였고 수치프레스톤 튜브법 (computational preston tube method)의 원리를 도입하여 벽 마찰계수를 구하였다. 벽면 압력섭동의 영향을 파악하기 위해서 편 홀 마이크로폰을 사용하였으며, 벽압력스펙트럼을 스케일링 (scaling)하여 실험 결과를 분석하였다. 또한 유동장 밖에서의 방사음장은 음향거울을 이용하여 방사소음 지배 주파수를 측정하였다.⁽⁹⁾

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치 및 실험조건

본 연구는 인하대학교 내에 설치된 무향풍동에서 수행되었다. 밀폐된 형태의 무향풍동은 400(H) × 400(W) × 2500mm(L)의 시험부를 가지며 유동이 없을 때의 암소음 레벨은 20dB_A이하를 유지한다. 또한 난류강도는 0.25%를 유지하며, 0~30m/s까지 연속적인 유동속도 변화가 가능하다. 실험 모델은 Fig. 1과 같이 너비 800mm, 길이 1280mm이며 소재는 아크릴이다. 컴플라이언트 코팅을 위해 다공질 물질을 포함하는 코팅 표면을 제작하였다. 다공성 코팅은 5.0mm 두께를 가지는 다공의 우레탄 재질과 0.75mm두께의 천달개로 구성되어 있다. 실크 재질의 천달개와 우레탄 층이 떨어지지 않게 접착제를 이용하여 단단하게 고정하였다. 또한 점탄성 벽면을 만들기 위해서 아랫면은 소재가 폴리에스테르 섬유인 음향 보드를 사용하였으며 윗면은 수분산성 액상 폴리머에 기능성

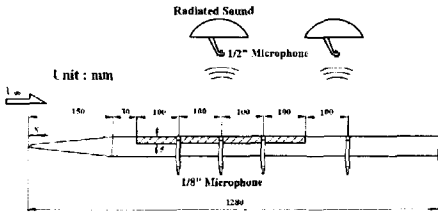


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

충전제, 바인더 및 특수 첨가제를 혼합한 제진 도료를 사용하여 코팅면을 만들었다. 실제 시험부의 제원은 400mm(W)×400mm(L)×5.1mm(t)이다.

실험은 레이놀즈수 (Re_0)가 298에서 1002의 범위에서, 풍동 유속이 10m/s, 15m/s인 두 가지 경우에 대해 수행하였다. 유속이 10m/s인 경우에는 난류 경계층 내 벽압력 스펙트럼에 대한 실험을 수행하였고, 유속이 15m/s인 경우는 경계층이 발달함에 따른 벽압력 스펙트럼과 방사 소음의 변화를 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 벽면 재질과 천이와의 상관관계를 알아보기 위해 Fig. 1과 같이 네 곳 ($x=280\text{mm}$, 380mm , 480mm , 680mm)에 편 홀 마이크로폰을 설치하였다. 실제 실험 장치는 수축부가 끝나는 지점과 연결하지 않아 수축부에서 발달되는 경계층의 영향을 없게 하였다. 평판의 앞전은 유동이 박리되는 것을 막기 위해 타원 형태로 가공하였으며 연결 부위 영향을 최소화하기 위해 왁스로 틈을 메웠다. 경계층의 평균 속도 측정은 1/50mm까지 정밀 자동이송이 가능한 이송장치를 이용해 1영 열선 유속계를 0.1mm씩 이송하면서 수행하였다.

속도 측정은 경계층 프로브 (DANTEC 55P15)와 CTA 시스템을 사용하였고 평균 속도 계측시에는 20초 동안 10,000개의 데이터를 획득하여 한 측정점에서의 평균값으로 취하였다. 열선의 과열비는 1.5로 하였다. 실험실의 온도 변화, 열선의 산화 부식의 영향을 줄이기 위해 실험 전 속도 검정을 풍동내 시험부에서 직접 수행하였으며 출력 전압과 속도의 검정식은 4차 다항식을 사용하였다. 계측된 아날로그 신호는 A/D변환기를 통하여 GPIB 카드가 내장된 노트북으로 데이터를 저장하였다. 근거리장 벽면 섭동 압력은 1/8" 마이크로폰 (B&K4138) 헤드에 d^* 가 7.0가량인 편 홀 캡을 장착하여 측정하였다. 평판과 동일한 면에 편 홀 끝을 밀착하여 가능한 유동 교란이 없도록 하였다.

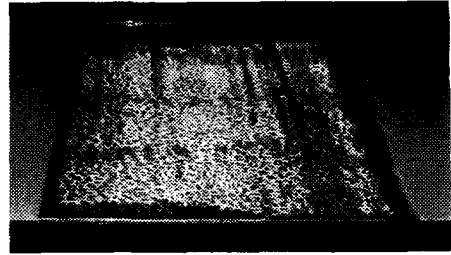


Fig. 2 Picture of coated material sample

외부 방사소음은 음향거울을 이용하여 측정하였으며 각 경우별로 벽압력 스펙트럼과 비교하였다. 측정에 사용되어진 음향거울은 이승배 등⁽⁹⁾에 의해서 그 성능이 검증되어진 것이며 유동장 내에서 발생하는 음원은 유동장의 영향에 의해 회절 현상이 발생하므로, 이 영향을 고려해야 한다. 본 실험에 사용된 음향거울의 성능 계수는 1.05로 아래와 같은 성능식을 갖는다.

$$\Delta x = 1.05 \times y_T \frac{U_0}{a_0} \quad (1)$$

y_T 는 소음원으로부터 유동의 경계면까지 거리이다. 즉, 15m/s의 유동장에서 방사소음 측정은 벽압력의 측정 위치보다 대략 1.3cm 후류 쪽에서 수행하였다.

2.2 수치 프레스톤 튜브 방법의 적용

천이 과정의 여러 가지 유체역학적 변수 중 벽면 전단응력은 공학적으로 매우 중요한 양이다. 천이 경계층의 예측과 관련된 풍동실험이나 여러 가지 난류 모델이 적용된 수치해석에 있어 가장 중요하게 비교 검증되는 대상이다. 프레스톤 튜브법은 벽 상사법칙을 이용하는 간접적인 방법으로, 벽 법칙이 알려진 유동에서만 적용 가능하다는 제한성에도 불구하고 매우 간편하고 적용하기 쉽기 때문에 공학적인 예측에서 많이 사용된다.

Nitsche 등⁽¹⁰⁾은 일반적인 프레스톤 튜브법의 한계성을 보완하고자 보다 다양한 경계층 유동에서 쉽고 정밀하게 벽 전단응력을 예측하는 수치 프레스톤 튜브법을 제시하였다. 이 방법의 기본 가정은 천이 경계층과 같은 임의의 경계층도 벽 가까이에서($y^+ < 30$) 벽법칙이 존재하며, 벽변수로 무차원화된 평균속도 분포가 완전 발달된 난류 경계층의 벽법칙식과 기본 형태는 같지만 몇 개의 매개변수를 더 포함하는 식으로 전개할 수 있다는 것이다. 일반경계층이론의 기본 원리를 만족하면서 실제 경계층에 영향을 줄 수 있는 조건을

Table 1 Boundary layer characteristics

	U_0 (m/s)	x (mm)	δ^* (mm)	θ (mm)	U^+ (m/s)	Re_θ
Rigid	9.95	680	1.547	0.624	0.315	421
Porous	9.7	680	1.386	0.937	0.495	612
Rigid plate	15.0	280	0.821	0.317	0.416	312
	15.0	380	0.924	0.367	0.384	361
	15.0	480	1.216	0.499	0.356	491
	15.1	680	1.337	0.638	0.495	631
Porous plate	15.1	280	0.960	0.452	0.477	444
	15.0	380	1.478	0.865	0.629	841
	15.1	480	1.615	0.960	0.654	938
Visco-elastic plate	14.7	680	1.597	1.053	0.672	1002
	15.2	280	0.680	0.297	0.415	298
	15.2	380	1.103	0.399	0.358	400
	15.3	480	1.082	0.458	0.385	460
	15.0	680	1.298	0.685	0.524	674

고려한 3가지의 매개변수를 이용한 다음의 벽법칙을 사용한다.

$$u^+ = \int_0^{y^+} \frac{2(1 + K_3 v^+)}{1 + [1 + 4(K_1 v^+)^2(1 + K_1 v^+)]^{0.5}} dv^+ \quad (2)$$

여기서, K_1 은 Von Kaman 상수, K_2 는 Van Driest 상수, K_3 는 압력구배의 효과($p^+ = u/pu_\tau^2(dp/dx)$)를 나타내는 매개변수이다. 평형 난류 경계층의 벽법칙에서는 $K_1=0.4$, $K_2=26$, $K_3=0$ 으로 완전히 발달된 난류 경계층에 적용될 수 있다. 그러나 일반적인 경우 이들 매개변수는 실제적으로 물리적 의미는 없으나, 단지 다양한 경계층 유동에서 벽법칙이 존재하며 이들을 식 (2) 형태로 나타낼 수 있다고 가정하는 것이다. 여기서 2개 이상의 프레스톤 튜브를 이용하여 벽면 동압을 계속함으로써 벽법칙이 존재하는 벽면 근처 몇 개의 위치에서 속도를 계속할 수 있다면 매개변수 K_1 , K_2 , K_3 과 벽 전단응력을 결정할 수 있게 된다. 이것이 수치 프레스톤 튜브법의 기본 원리이다.

본 연구와 같이 영 압력구배의 평판 경계층의 경우에 매개변수 중 $K_2=26$, $K_3=0$ 으로 하며, 계속된 벽 근처 평균 속도장에 수치 프레스톤 튜브 방법을 적용하여 나머지 K_1 과 벽 마찰 속도 u_τ 를 구한다. 수치 프레스톤 튜브법의 적용법과 계산 방법은 전우평 등⁽¹¹⁻¹³⁾에 보다 구체적으로 설명되어 있다. 강신형 등⁽¹⁴⁾은 직경이 다른 프레스톤 튜브로 계속한 속도 분포를 이용하여 평판 위 중

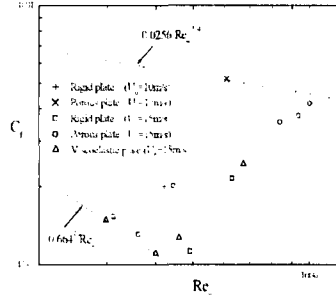


Fig. 3 Skin friction coefficients obtained from CPM using near-wall velocity profiles

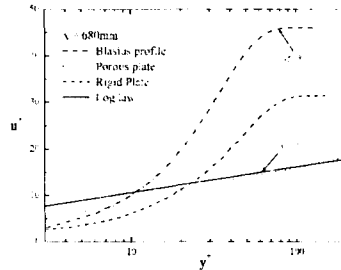


Fig. 4 Velocity profiles on a rigid plate and a porous compliant plate

류 경계층과 원관 내 난류 경계층에서 수치 프레스톤 튜브법의 유효성을 검증하였으며, 전우평 등⁽¹¹⁻¹³⁾도 프레스톤 튜브를 이용하여 평판 위 전이 경계층에 이 방법을 적용하여 합리적인 결과를 얻은 바 있다.

3. 실험 측정 결과

3.1 벽압력에 대한 실험 결과

강제 벽면과 다공성 컴플라이언트 코팅된 벽면에 대한 벽압력과 경계층은 전연부로부터 680mm 떨어진 곳에서 측정하였다. Table 1은 강제판, 다공성 컴플라이언트 코팅된 판, 점탄성 판에서 구해진 경계층 특성치를 나타낸다. Table 1을 보면 강제판과 다공성 컴플라이언트 코팅된 판에서 큰 차이가 나고 있음을 볼 수 있다. 이것은 전도계의 저질기에 의해 평균 벽 전단응력이 더 크게 형성되었고, 강제 벽면에 비해 다공성 컴플라이언

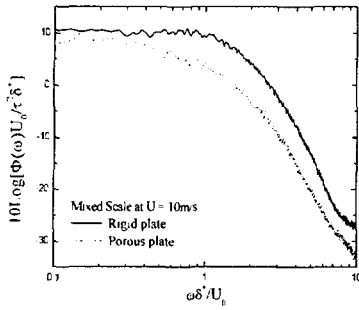


Fig. 5 Non-dimensional wall pressure spectra scaled on mixed variables at 10m/s

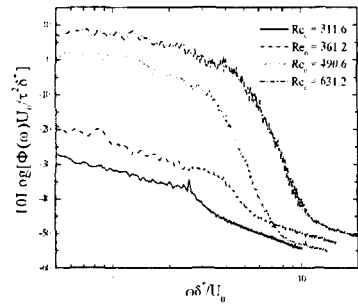


Fig. 7 Non-dimensional wall pressure spectra scaled on mixed variables on the rigid plate at 15m/s

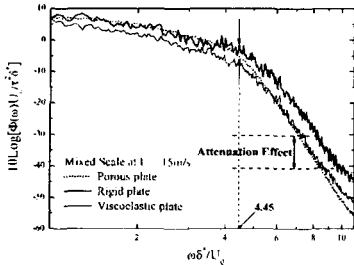


Fig. 6 Non-dimensional wall pressure spectra scaled on mixed variables at 15m/s

트 코팅된 벽면에서 경계층이 더 빨리 발달하였다. 즉, 벽면 마찰계수가 2배 이상 증가하였음을 볼 수 있다. Table 1에 나타난 벽면 마찰계수의 값은 수치 프레스톤 튜브법을 이용하여 예측된 값으로 이들 값의 신뢰성 분석을 위해 Fig. 3과 같이 운동량 두께를 기준으로 한 레이놀즈수에 따른 변화를 살펴보았다. 경계층 데이터로부터 수치 프레스톤 튜브법을 이용하여 얻은 마찰계수 분포가 타당함을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 경계층 내의 속도 분포를 벽면 좌표계로 변환한 결과이다. 층류와 난류를 비교하기 위하여 Blasius 속도 분포를 벽면 마찰계수로 무차원 변환한 그래프와 완전 발달한 난류일 때의 로그 법칙을 함께 나타내었다.

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (x=0.41, B=5.0) \quad (3)$$

Fig. 4를 보면 같은 하류 지점(x=680mm)에서 강

체 벽면의 경우는 천이 영역에 있고 다공성 컴플라이언트 코팅된 벽면은 난류로 거의 발달되고 있음을 확인할 수 있다. 부분적으로 존재하는 컴플라이언트 코팅의 효과가 강체 벽면에 비해 큰 평균 벽 전단응력과 발달한 경계층에 의해 감추어지게 된다.

측정된 벽압력 섭동스펙트럼을 무차원하기 위해 Keith 등⁽¹⁵⁾이 제시한 혼합 변수를 이용하였다. 이 혼합 변수들은 주파수의 외층 변수인 $\omega \delta^+ / U_0$. 스펙트럼 에너지는 $\Phi(\omega) U_0 / (\tau_w^2 \delta^3)$ 으로 무차원하여 사용한다. 이 스케일링은 경계층 두께와 평균 벽 전단응력의 증가에 의한 스펙트럼의 변화를 설명하는데 매우 효과적이다. Fig. 5는 강체벽면과 다공성 컴플라이언트 코팅된 벽면에서 측정된 섭동압력 스펙트럼을 혼합 변수로 무차원한 그림이다. 저주파수에서의 에너지레벨이 일치되는 것은 무차원의 영향에 의한 것으로 사료되어진다. 저주파수 대류 파수는 코팅에 의해 효과적으로 필터링되지 못하기 때문에 에너지레벨이 감소되지 않은 것으로 파악된다. Fig. 6에는 세가지 모델에 대해 전연부로부터 680mm 떨어진 곳에서 측정된 무차원 벽압력 스펙트럼 결과를 나타냈다. 다공성 코팅면과 점탄성 코팅면 모두 강체면보다 고주파 영역에서 에너지레벨이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 코팅면에서 감쇄가 3dB 이상 되는 주파수는 $\omega \delta^+ / U_0 = 4.45$ 근처가 된다. 이런 현상이 일어나는 무차원한 대류 파수는 다음과 같이 계산된다.

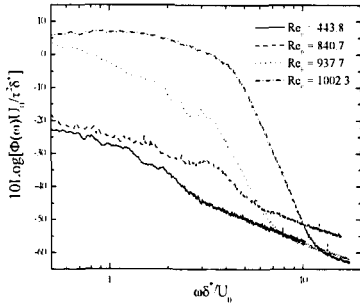


Fig. 8 Non-dimensional wall pressure spectra scaled on mixed variables on the porous plate at 15m/s

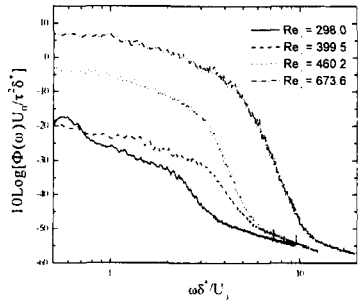


Fig. 9 Non-dimensional wall pressure spectra scaled on mixed variables on the viscoelastic plate at 15m/s

$$k_c h = \left(\frac{\omega \delta^*}{U_0} \right) \left(\frac{U_0}{U_c} \right) \left(\frac{h}{\delta^*} \right) \quad (4)$$

본 실험에서 h/δ^* 는 0.3에서 0.75까지 분포하므로, h/δ^* 값은 대략 0.5, U_0/U_c 는 0.7을 사용한다. 따라서 $k_c h$ 가 3.18이상에서 고주파수 에너지가 3dB 이상 감소함을 볼 수 있다. 이것은 대류파장이 $2.0h$ 보다 작음을 의미한다. Fig. 7에서 9까지는 강체 벽면, 다공성 컴플라이언트 코팅된 벽면, 점탄성 벽면 위의 경계층들이 발달함에 따라 벽압력 스펙트럼의 발달 형태를 혼합 변수로 각각 나타낸 결과이다. 경계층 특성치들과 벽압력 스펙트럼을 통해 볼 때, 점탄성으로 코팅된 벽면은 고주파수 에너지의 감쇄 현상이 나타나며 동시에 강체와 비슷한 수준의 천이 특성을 보임을 알 수 있다.

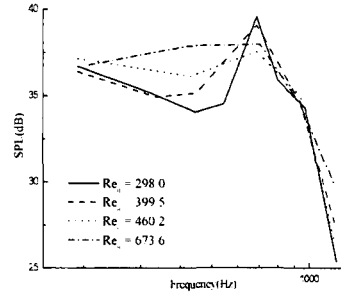


Fig. 10 Radiated Sound Spectra on the rigid plate

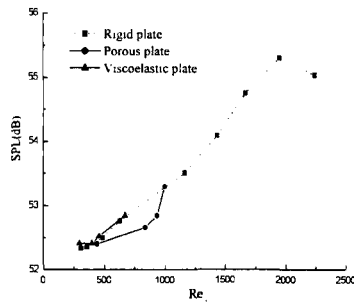


Fig. 11 Radiated sound pressure levels measured by acoustic mirror system

3.2 방사소음에 대한 실험 결과

자연천이 초기에 발생하는 T-S파에 의한 방사 소음은 그 영역의 길이가 짧을수록 파군 (wave packet)의 강도가 강해지며 이극자 음원의 방사특성을 보인다고 알려져 있다.⁽¹⁶⁾ 천이 후기의 비선형 파군에 의한 방사소음에 대하여 Wang 등⁽¹⁷⁾은 K-type 붕괴시의 람다(Lambda) 와동과 고전단층 붕괴에 의한 레이놀즈 응력의 증가가 사극자 소음원 방사소음에 큰 기여를 한다고 주장한 바 있다. 또한 완전 발달된 난류 이전의 난류 스팟 (spot)에 의한 간헐적인 천이영역에서는 섭동하는 벽면 전단응력에 의한 방사소음에의 기여도는 크지 않으며, 간헐도(intermittency) 크기에 따른 경계층 배제두께의 변동이 사극원 이상의 방사소음 기여도를 갖는다고 한다.⁽¹⁸⁾ 즉, 천이영역에서의 벽압력 변동은 간헐적인 람다 와동과 고전단층 붕괴에 의한 사극자 음원의 발생으로 저주파 영

역 (1kHz 이하)에서 협대역 (narrow-band)의 작은 피크소음이 발생하며, 이는 다시 간헐적인 경계층 배제두께의 변동으로 이어지게 된다. 이러한 저주파수 변동은 매우 방사효율이 높으므로 방사 소음도 벽압력 스펙트럼과 비슷한 형태를 보이게 된다.

본 연구에서는 강제 벽면, 다공성 컴플라이언트 코팅된 벽면, 점탄성 벽면 위의 천이경계층 내 주소음원을 분석하기 위해, 유동장 외부에 음향거울을 설치하였다. 방사 소음 측정은 벽압력을 측정된 위치에서 수행되었다. Fig. 10은 각 천이 위치에서 반복적으로 측정된 방사소음 스펙트럼의 앙상블 평균값을 주파수 로그스케일로 나타내고 있다. 하류로 갈수록 고주파수의 에너지가 증가하고 피크주파수 레벨이 약간 감소하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 11은 무차원 경계층 Re_δ 수에 따른 벽면의 한 위치에서 방사된 음압 레벨의 반복적 측정결과를 나타내고 있다. 측정된 방사 음압 레벨은 이차 불안정성의 초기 천이 지역에서 증가하기 시작하며 다공성 재질 벽면의 경우, 비록 난류 발달은 상대적으로 빠르지만 좁은 레이놀즈 수 범위의 천이 지역에서 약간 낮은 방사 소음 레벨을 보인다. 최근 Hahn 등⁽¹⁹⁾은 다공성 벽면 위의 채널 난류 유동 계산을 통해 강제 벽면에 비해 벽면 전단응력 감소와 함께 벽면 섭동 압력 등이 감소하는 결과를 보고한 바 있다.

또한 후기 천이로 발달함에 따라 모든 벽면에서 벽면 소음원에 의한 방사 음압이 증가하고 있다. 강제 벽면의 경우 후기 천이에서 난류로 발달함에 따라 방사 음압이 크게 증가하며, 완전 발달한 난류에서는 음압이 약간 감소하는 현상이 관찰된다. 이것은 천이영역의 간헐적인 경계층 배제두께의 변동에 의한 방사구조에서 완전 발달된 난류 경계층에서는 분출과 쓸림 현상에 의한 큰 진폭의 벽압력 섭동 이벤트에 의한 방사구조로 바뀌면서 방사 효율이 낮아지는 것으로 여겨진다.

4. 결론

본 실험은 강제 벽면과 다른 코팅 벽면에 의한 파수의 필터링 특성과 범위를 알아보기 위해 풍동에서 경계층, 벽압력 스펙트럼, 방사소음을 측정하였다. 강제판에 비해 다공성 컴플라이언트

코팅된 판에서 상대적으로 발달된 경계층이 발생하였다. 이러한 현상은 천덜개의 거칠기와 코팅면이 시작되는 후향계단에 의한 영향으로 파악된다. 그러나 점탄성 벽면에서는 강제 벽면과 비슷한 천이 특성을 나타내고 있으며, 다공성 및 점탄성 벽면 모두 측정된 벽압력 스펙트럼의 무차원 해석을 통해 대류 벽압력 스펙트럼이 코팅면에 의해 필터링되는 현상이 관찰되었다. 다공성 컴플라이언트 코팅된 면에 의한 대류파장은 코팅 두께의 2.0배 이하에서 즉, $k_\delta h$ 가 3.18이상에서 고주파수 에너지 레벨이 3dB 이상 크게 감소하였다.

방사 음압 레벨은 초기 천이 지역에서 증가하기 시작하여 후기 천이를 거쳐 완전 발달한 난류 경계층까지 크게 증가한다. 다공성 재질의 벽면은 비록 천덜개 거칠기 등으로 벽면 전단응력의 증가에도 불구하고, 좁은 레이놀즈 수 범위의 천이 지역에서 저감된 방사 소음 특성을 보였으며 이는 코팅벽면에 의해 필터링된 고주파수 벽압력 에너지와도 무관하지 않다고 여겨진다.

후 기

본 연구는 수중음향특화연구센터 UA-42과제 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 센터 및 국방과학연구소에 깊은 감사를 표합니다.

참고문헌

- (1) Kramer, M.O., 1965. "Hydrodynamics of the Dolphin." *Advances in Hydroscience*, Vol. 2 (ed. V. T. Chow), pp. 111~130.
- (2) Blick, E.F., Walters, R.R., Smith, R. and Chu, H., 1969. "Compliant Coating Skin Friction Experiments." AIAA Paper No. 69-165
- (3) Gad-el-Hak, M., 1986. "Boundary Layer Interactions with Compliant Coatings: an Overview." *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 39, No. 4, pp. 511~524.
- (4) Willis, G.J.K., 1986. Hydrodynamic Stability of Boundary Layers over Compliant Surfaces, Ph.D. thesis. Univ. Exeter. Engl.
- (5) Abraham, B.M. and Cipolla, K.M., 2001. "Experimental Measurement of the Turbulent

- Boundary Layer Wall Pressure Beneath a Porous and Compliant Coating." *A.S.M.E., FEDSM2000-18207*.
- (6) Powell, A., 1960, "Aerodynamic Noise and the Plane Boundary." *J.A.S.A.*, Vol. 32, pp. 982~990.
- (7) Landahl, M.T., 1975, "Mechanics of Boundary Layer Turbulence Layer." *J.A.S.A.*, Vol. 57, pp. 824~831.
- (8) S. Lee, H.-J. Kim, 1999, "Experimental Study on Wall Pressure Fluctuations in the Turbulent Boundary Layer on a Flat-Plate." *J. K.S.M.E.*, Part B, Vol. 23, No. 6, pp. 722~733. (in Korean)
- (9) S. Lee, O.-S. Kwon, C.-J. Lee, 2001, "An Experimental Study of Radiated Sound from Elastic Thin Plate in a Turbulent Boundary Layer." *J. K.S.M.E.*, Part B, Vol. 25, No. 10, pp. 1327~1336. (in Korean)
- (10) Nitsche, W., Thunker, R. and Haberland, C., 1983, "A Computational Preston Tube Method." *Turbulent Shear Flows*, Vol. 4, pp. 261~276.
- (11) Jeon, W.P. and Kang, S.H., 1995, "Measurement of Transitional Boundary Layer on a Flat Plate Using a Computational Preston Tube Method." *Experiments in Fluids*, Vol. 20, pp. 29~37.
- (12) W.P. Jeon, 1994, "Measurements of transitional boundary layer on a flat plate in wakes." Ph.D. thesis. Univ. Seoul. Kor.
- (13) W.P. Jeon, S.H. Kang, 1995, "Measurement of Wall Shear Stress in Transitional Boundary Layer on A Flat Plate Using Computational Preston Tube Method." *J. K.S.M.E.*, Part B, Vol 19, No. 1, pp. 240~250. (in Korean)
- (14) S.H. Kang, M.S. Yoon and W.P. Jeon, 1994, "Measurement of wall shear stress using preston tubes." *J. K.S.M.E.*, Part B, Vol 18, No. 7, pp. 1873~1880. (in Korean)
- (15) Keith, W.L. and Bennett, J.C., 1991, "Low Frequency Measurements of the Wall Shear Stress and Wall Pressure in a Turbulent Boundary Layer." *A.I.A.A.*, Vol. 29, No. 4, pp. 526~530.
- (16) Akylas, T.R. and Toplosky, N., 1986, "The Sound Field of a Tollmien-Schlichting Wave." *Phys. Fluids*, Vol. 29, pp. 685~689.
- (17) Wang, M., Lele, S.K., and Moin, P., 1996, "Sound Radiation during Local Breakdown in low Mah-number Boundary Layer." *J. Fluid Mech.*, Vol. 319, pp. 311~328.
- (18) Lauchle, G.C., 1991, "Hydroacoustics of Transitional Boundary-Layer Flow." *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 44, No. 12, pp. 517~531.
- (19) Hahn, S., Je, J. and Choi, H., 2002, "Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow with Permeable Walls." *J. Fluid Mech.*, Vol. 450, pp. 259~285.