

침투성 코팅 처리된 벽면 주위의 벽 압력 특성

송우석* · 신승열* · 이승배*†

* 인하대학교 기계공학과

Characteristics of Wall Pressure over Wall with Permeable Coating

Woo-Seog Song*, Seungyeol Shin* and Seungbae Lee*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received May 13, 2010 ; Revised August 24, 2012 ; Accepted August 29, 2012)

Key Words: Permeable Wall(침투성 벽면), Wavenumber-Frequency Spectrum(파수-주파수 스펙트럼)

초록: 16채널 어레이 마이크로폰을 이용하여 난류 유동장 내 벽면 압력섭동에 대한 측정을 수행하였다. 본 실험에 사용된 코팅재질은 약 50 ppi (pores per inch)의 다공성 구조로 이루어진 우레탄 물질로 이루어져 있다. 코팅의 주된 목적은 난류 유동장 내 최소한의 공간을 유지하면서 대류속도로 진행되는 난류 와들을 필터링하는 역할을 하는 것이다. 평판 위 경계층의 측정은 열선 유속계를 이용하였으며 표면 마찰계수 값을 얻기 위해 CPM법을 사용하였다. 벽압력 스펙트럼과 파수-주파수 스펙트럼 측정은 코팅에 의해 얼마나 에너지가 저감되는지를 비교하기 위해 사용되었다. 벽면 코팅은 대류하는 무차원 벽면섭동압력에너지를 저감시켰지만, 컴플라이언트 코팅된 벽면 거칠기로 인해 일반 강제 평판에 비해 상대적으로 발달된 경계층을 형성하였으며 벽면 평균전단응력과 저주파수 압력스펙트럼 레벨도 함께 증가하였다.

Abstract: Fluctuating wall pressures were measured using an array of 16 piezoelectric transducers beneath a turbulent boundary layer. The coating used in this experiment was an open-cell, urethane-type foam with a porosity of approximately 50 ppi. The ultimate objective of the coating is to provide a mechanical filter to reduce the wall pressure fluctuations. The boundary layer on the flat plate was measured by using a hot wire probe, and the CPM method was used to determine the skin friction coefficient. The wall pressure autospectra and streamwise wavenumber-frequency spectra were compared to assess the attenuation of the wall pressure field by the coating. The coating is shown to attenuate the convective wall pressure energy. However, the relatively rough surface of the coating in this investigation resulted in a higher mean wall shear stress, thicker boundary layer, and higher low-frequency wall pressure spectral levels compared to a smooth wall.

- 기호설명 -

C_f : 표면 마찰 계수
 d^+ : 내층변수로 무차원화 된 핀 홀 지름(= du_τ/v)
 K_c : 대류 파수
 U_0 : 유동 속도
 U_c : 대류 속도
 u_τ : 전단 속도
 δ : 경계층 두께
 δ^* : 배제(displacement) 두께
 $G(\xi, \tau)$: 상관함수
 $\Phi(\omega)$: 벽면 압력 스펙트럼
 $\Phi(k, \omega)$: 벽면 압력 파수-주파수 스펙트럼

ω_c : 일차 주파수
 $\mathcal{C}(r, \omega)$: 교호 스펙트럼
 x : 흐름방향 거리
 ξ : 흐름방향 공간지연
 t : 시간
 τ : 시간지연
 p : 압력
 k : 파수
 f : 주파수
 d_m : m번째 센서에서 측정된 벽 압력 섭동값
 x_m : 첫 센서에서부터 m번째 센서까지의 위치
 t_n : n번째 데이터가 측정될 때까지의 시간
 Δt : 시간간격

† Corresponding Author, sbaelee@inha.ac.kr

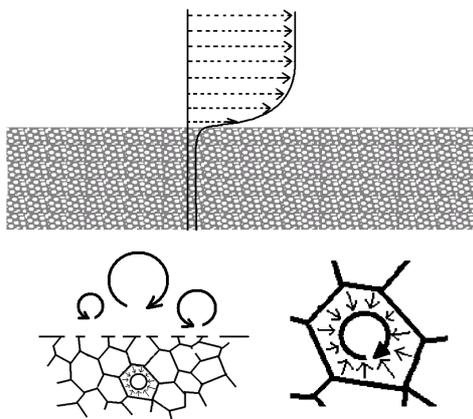


Fig. 2 Schematic diagram of streamwise vortex over porous-coated surface

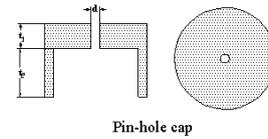
2. 실험 장치 및 방법

2.1 난류 경계층 측정

본 실험은 인하대학교 내에 설치된 밀폐형 무향풍동에서 수행되었다. 밀폐된 형태의 무향풍동의 노즐의 크기는 $400\text{ mm} (H) \times 400\text{ mm} (W) \times 2,500\text{ mm} (L)$ 의 시험부 그리고 유동이 없을 때의 압소음 레벨은 20dBA를 유지한다. 또한 난류 강도는 0.25% 이하를 유지하며, 0~30 m/s까지 연속적인 유동속도 변화가 가능하다.

전체 벽면 세트는 Fig. 1과 같이 너비 800 mm, 길이 1,280 mm의 아크릴 소재를 사용하였다. 침투성 코팅은 대략 50 ppi(pores per inch)의 다공의 폴리우레탄 물질(open-cell, polyurethane foam)로 이루어진 $5\text{ mm} (T) \times 500\text{ mm} (W) \times 500\text{ mm} (L)$ 의 크기로 설정되었다. 레이놀즈 수 (Re_θ)의 범위는 524에서 1822까지, 즉 유속 11 m/s, 14 m/s, 17 m/s인 경우에 대해 실험을 수행하였다. Figure 2에는 다공성 코팅벽면 위의 유동특성과 다공성 물질 형태가 나타나 있다.

실험 장치는 수축부가 끝나는 지점으로부터 500 mm가량의 충분한 거리를 확보함으로써 수축부에서 발달되는 경계층의 영향을 최소화하였다. 평판 앞전은 유동의 박리를 막기 위해 타원(ellipse) 형태로 가공하였고 연결 부위의 영향을 최소화하기 위해 왁스와 유연고무로 틈을 메웠다. 경계층 안의 속도분포를 측정하기 위하여 과열비(over-heat ratio) 1.5인 I형 열선 유속계와 경



Diameter (d : mm)	0.2
Throat length (t_1 : mm)	0.3
Cavity height (t_2 : mm)	0.4

Fig. 3 Pin-hole cap dimensions

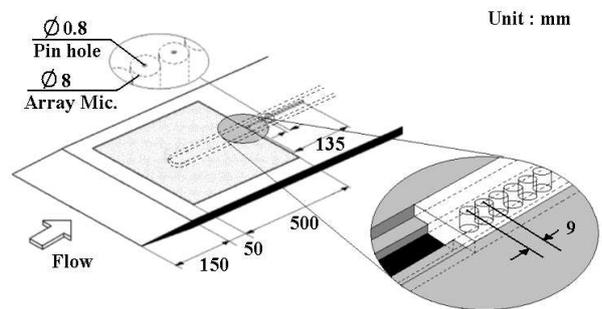


Fig. 4 Array microphone sitting in a slot

계층 프로브(boundary layer probe, DANTEC 55P15), CTA 시스템을 구성하였고 1/50 mm까지 자동이송이 가능한 3축 이송장치가 사용되었다. 평균속도 계측 시 20초 동안 200,000개의 데이터를 A/D 변환기가 내장된 Pentium PC에 저장하였으며 그 값을 시간 평균하여 한 측정점에서의 평균 속도값으로 취하였다. 열선 유속계의 검정은 피토판을 이용하여 풍동 내 시험부에서 직접 이루어졌으며 전압과 속도의 검정식은 4차 다항식을 사용하여 구하였다.

2.2 벽면 압력섭동 측정

근거리장 벽면 섭동 압력은 1/8" 마이크로폰(B&K 4138)헤드에 $d+$ 가 7.1인 핀 홀 캡을 사용하여 김휘중 등⁽¹⁰⁾에 의해서 혼합 변수로 무차원한 벽 압력 스펙트럼 특성을 측정하는 바 있다. 핀 홀 캡의 정확한 차원은 Fig. 3에서와 같다. 측정 위치는 시험 세트 선단부로부터 660 mm 떨어진 곳의 코팅 면 밑의 벽면에서 측정하였다. 강제 평판의 경우 동일한 면에 핀 홀 끝을 밀착하여 가능한 유동 교란이 없도록 하였고 평판 밑으로 유입되는 난류영향이 측정 장비에 왜곡된 신호를

발생하므로 그 영향을 최소화 하기위해 마이크로폰을 방음재를 내포한 익형 내부에 보호하여 실험을 수행하였다. 1/8" 마이크로폰으로 계측된 아날로그 신호의 파워 스펙트럼은 2 채널 FFT 분석기 (Stanford Research SR780)를 사용하여 500번 이상불 평균하여 취하였으며 본 스펙트럼 에너지 측정에서의 불규칙 오차, ϵ_d 는 $1/\sqrt{n_d}$ 로부터 약 2.2%정도이다.⁽¹¹⁾

압력변동의 시·공간적인 특성을 분석하기위해 Acoustical Microphone System(Sound Telecom Co., Model TMS-060A)을 이용하여 경계층 내 압력장을 측정하였다. 이 시스템은 직경 8 mm, 높이 25.4 mm인 16개의 원통형 콘덴서 마이크로폰과 연결 케이블, 그리고 16채널 신호 증폭기로 구성되어 있다. 각 마이크로폰의 주파수 응답특성은 10 Hz~10 kHz 범위에서 크기 왜곡 ± 1 dB, 위상차 $\pm 3^\circ$ 이며, 42~140 dB에 이르는 동적영역을 지니고 있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 내부 다채널 압력센서는 흐름방향으로 일정한 간격으로 설치되어 있다. 여러 위치에서 코팅된 시험부를 교체하면서 그에 따른 벽 압력 특성을 자유롭게 측정하기 위해 두 개의 평판을 제작하여 밑에 설치된 아크릴 판은 다채널 마이크로폰이 흐름방향으로 자유롭게 이동할 수 있도록 일정한 폭의 홈으로 가공하였다. 윗 평판은 시험부 코팅면을 손쉽게 교체할 수 있도록 시험부와 고정부로 나누어서 제작하였다. 다채널 마이크로폰 사이의 간격은 9 mm이고 전체 16개의 다채널 마이크로폰이 차지하는 길이는 135 mm로 하였다. 작은 이벤트 특성을 측정하기 위해 윗 판에는 0.8 mm의 압력 측정공을 가공하였으며 정확한 신호를 측정하기 위해 그 중심이 다채널 압력센서의 중심에 맞춰지도록 하였다. 침투성 코팅 윗면에 다채널 압력센서를 설치할 경우 다공의 특성을 충분히 나타내지 못하고 왜곡된 신호를 나타낼 수 있으므로 벽면 바로 후단부분에 흐름방향으로 설치하여 측정하였다. 데이터 저장은 각각의 속도에 대해 16개의 다채널 압력 센서에서 동시에 1초당 20,000 개씩 30초 동안 이루어졌으며, 각각의 채널을 통해서 계측된 압력신호는 앞에서 소개한 공간 신호의 보간, 제로연장처리 등과 함께 2,048개씩 시·공간 푸리에 변환을 수행하고 240번 평균하여 결과를 분석하였다.

2.3 벽면 압력 섭동의 파수-주파수 스펙트럼

파수-주파수 스펙트럼은 시간정보인 주파수와 공간 정보인 파수의 함수로 표현된다. 따라서 난류 경계층 내 압력장의 시공간적 특성 파악에 중요한 도구가 된다. 어떠한 정해진 위치에서의 시간정보의 취득은 쉽게 이루어질 수 있지만, 공간정보의 취득을 위해서는 여러 개의 센서를 사용해야 한다는 어려움이 있다.

해석의 편의를 위해 1차원의 경우를 생각하면, 시간지연과 공간지연의 함수로 표현되는 상관함수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G(\xi, \tau) = E[p(x, t)p(x + \xi, t + \tau)] \quad (1)$$

여기서, p 는 압력을 그리고 t 와 τ 는 각각 시간과 시간지연을, 그리고 x 와 ξ 는 각각 공간과 공간지연을 의미한다.

식 (1)에 표현된 상관함수의 시간 축을 따른 푸리에 변환을 상관 스펙트럼으로 정의하며 그 수학적 표현은 다음과 같다.

$$C(\xi, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} G(\xi, \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2)$$

여기서 ω 는 각주파수를 나타낸다.

파수-주파수 스펙트럼은 식 (1)에 표현된 상관함수의 시간과 공간에 따른 두 번의 푸리에 변환으로 정의된다. 따라서 식 (2)에 표현된 상관 스펙트럼을 공간축에 따라 푸리에 변환함으로 스펙트럼이 다음과 같이 표현됨을 알 수 있다.

$$\Phi(k, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} C(\xi, \omega) e^{-ik\xi} d\xi \quad (3)$$

여기서 k 는 파수를 나타낸다.

결론적으로, 파수-주파수 스펙트럼은 교호상관함수 $G(\xi, \tau)$ 의 시공간 푸리에 변환을 통해서 정의되며 흐름방향의 스펙트럼은 다음과 같이 한식으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi(k, \omega) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G(\xi, \tau) e^{-i(k\xi + \omega\tau)} d\xi d\tau \quad (4)$$

실질적으로 파수-주파수 스펙트럼은 벽면 압력 섭동값의 이산된 시공간 데이터의 앙상블 평균된 시공간 이산 푸리에 변환을 수행하여 얻어진다. 또한 시공간적으로 제한된 데이터를 가지게 되므로 파수, 주파수 영역 모두에 대해서 각각의 창

함수가 고려되어야 한다. 본 실험에서는 특별한 교호상관함수를 구하지 않고 직접 측정된 압력 신호를 통해 파수-주파수 스펙트럼을 얻을 수 있도록 다음과 같은 식을 이용하였다.⁽⁶⁾

$$\Phi_m(k, \omega) = \frac{\left\langle \left| \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^M W(x_m, t_n) p_m(x_m, t_n) e^{-i(kx_m + \omega t_n)} \Delta x \Delta t \right|^2 \right\rangle}{(2\pi)^2 N M C_w} \quad (5)$$

$$W(x_m, t_n) = W(x_m) W(t_n)$$

$$W_t(t_n) = 1 - \cos^2 \left[\frac{(n-1)\pi}{(N-1)} \right] \quad : \text{해닝 창문함수}$$

$$W_x(x_m) \quad : \text{공간 창문함수}$$

$$C_w = \frac{1}{NM} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M W^2(x_m, t_n) \quad : \text{창문 상수}$$

윗 식에서 $\langle \rangle$ 는 앙상블 평균을 나타내고, p_m 은 m번째 압력 센서에서 측정된 벽 압력 섭동값, x_m 은 첫 번째 압력 센서에서부터 m번째 압력 센서까지의 위치, t_n 은 첫 번째 측정된 데이터로부터 n 번째로 측정된 데이터가 측정될 때까지의 시간을 나타낸다. 창문 함수는 해닝 창을 사용하였다. 이는 해닝 창문함수가 사각 창문함수와 비교했을 때 양 끝으로 갈수록 부엽레벨이 낮은 값을 갖기 때문에 사각 창문함수에 비해 분산의 감소 면에서 좋은 결과를 가져올 수 있다. 또한, 무한 길이를 갖는 가우시안 창문함수와는 달리 일정한 길이를 갖기 때문에 그 적용이 용이하다.

주파수 영역과 달리 파수 영역은 제한된 센서의 개수와 센서간의 간격으로 인해서 낮은 분해능과 엘리어징 문제가 발생할 수 있다. 따라서 넓은 파수 영역을 높은 분해능으로 분석하기 위해서는 작은 센서간의 간격을 유지하면서 동시에 많은 수의 센서가 필요하게 된다. 그러나 센서간의 간격을 최소화 시키는 것은 센서의 크기가 결정되면 임의로 조절할 수 없으므로 본 실험에서는 임의의 가상 센서를 가정하여 파수 영역을 넓힘으로써 원래의 파수 표시값 사이를 내삽하는 효과를 주는 것으로 분해능을 높였으며 시공간 푸리에 변환을 수행한 후 저대역통과 필터링 작업을 통해 엘리어징 현상을 제거하였다.

3. 실험 측정 결과

경계층 데이터는 전연부에서 700 mm 떨어진 곳에

서 측정하였으며 경계층 데이터 중 중요한 변수인 벽면 마찰계수 예측은 Nitsche (1983)가 제안한 수치 프레스톤 튜브법(computational preston tube method)을 이용하여 예측하였다. 이 방법은 전우평 등,⁽¹²⁻¹⁴⁾ 강신형 등⁽¹⁵⁾에 의해 그 유효성이 검증된 바 있다.

Figures 5, 6는 경계층 내의 속도 분포를 벽면 좌표계로 변환한 결과이다. 층, 난류 영역의 구분을 위해 Viscous Sublayer 속도분포와 로그 영역에서 성립하는 로그법칙을 함께 나타내었다. 각 속도에 따른 경계층 측정 결과를 통해 강체는 유속 11 m/s, 14 m/s에서 천이영역, 17 m/s에서는 완전히 발달된 난류 경계층 영역에 근접하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 침투성 코팅면을 가진 벽면위의 경계층은 11 m/s에서는 천이 영역, 14 m/s, 17 m/s에서는 난류 영역에 있는 것을 확인할 수 있다.

Figure 7에는 CPM을 이용한 경계층 데이터의 신뢰성 확인을 위해 운동량 두께를 기준으로 한 레이놀즈수에 대한 표면 마찰계수의 변화가 나타나 있다. 경계층 데이터와 비교하여 본 결과 CPM을 이용하여 예측한 마찰계수 값이 타당함을 확인할 수 있다.

Figures 8, 9는 17 m/s 속도에 대한 파수-주파수 스펙트럼을 벽면의 종류에 따라 나타내고 있다. 난류 경계층 내 압력장의 시공간적인 특성은 유동 내 대류되는 난류 구조들의 특성자취라고 할 수 있다. 이는 압력 섭동을 유발하는 유동 구조가 대류속도 U_c 로 흘러감을 나타내며 그 값은 큰 에너지 능선의 기울기를 통해 확인할 수 있다.⁽¹⁶⁾

우선 강체벽면의 경우, Fig. 8에서 보는바와 같이 에너지 능선의 영역이 고파수-주파수 영역으로 진행할수록 얇게 펼쳐진 부채꼴 모양으로 확산되어짐을 확인할 수 있으며 그 에너지 레벨이 능선을 따라 완만한 기울기로 저감되어지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 대류되는 여러 스케일의 유동구조들이 순차적인 생성과 소멸과정을 반복하면서 나타난 벽 압력 스펙트럼의 결과로 볼 수 있다. 반면 침투성 코팅면 후단의 경우는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 저파수-주파수영역에 상당히 응집된 에너지를 가지고 있으며 고파수-주파수 영역으로 갈수록 에너지 능선뿐 아니라 능선 주위의 영향이 상대적으로 급속하게 저감되어지는 것을 관찰할 수 있다. 이는 Finnigan⁽¹⁷⁾에 의해 주장된 바와 같이 침투성 코팅면의 유동특성이 마치 평탄한 혼합유동과 흡사해져 코팅면 벽 근

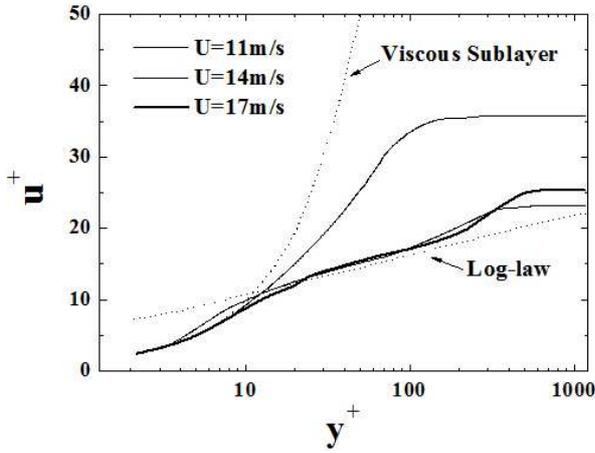


Fig. 5 Streamwise velocity profile scaled on permeable coating plate

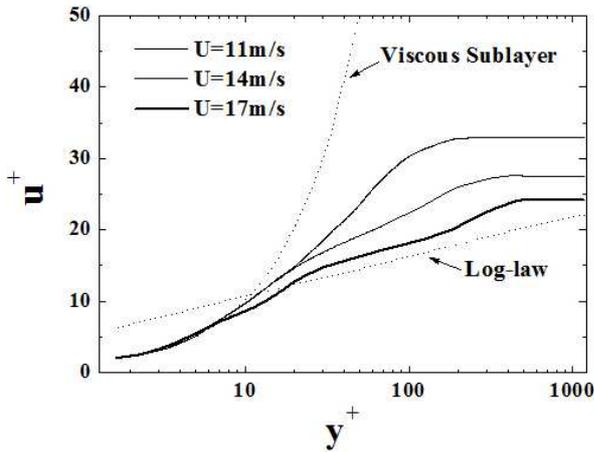


Fig. 6 Streamwise velocity profile scaled on rigid plate

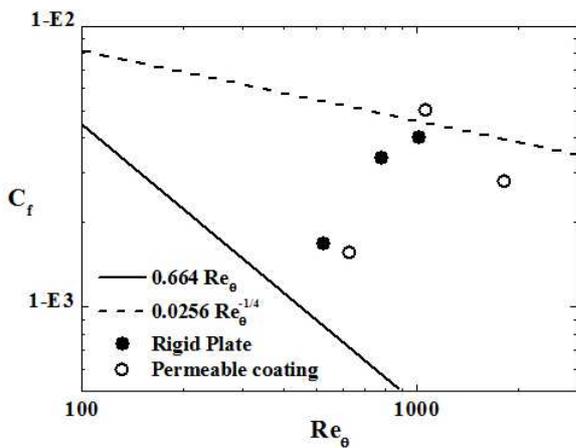


Fig. 7 Skin friction coefficients obtained from CPM

처에서 선회하는 큰 유동 구조들이 형성되었음을 알 수 있다. 또한 고과수-주과수 영역에서의 급격한 에너지 저감현상은 발달된 여러 스케일의 응

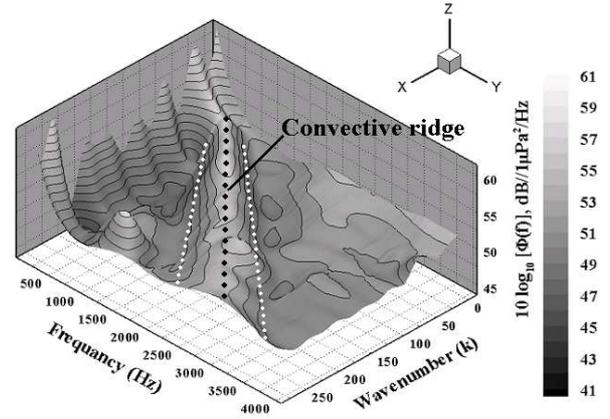


Fig. 8 Surface plot of frequency-wavenumber spectrum on rigid plate (U=17m/s)

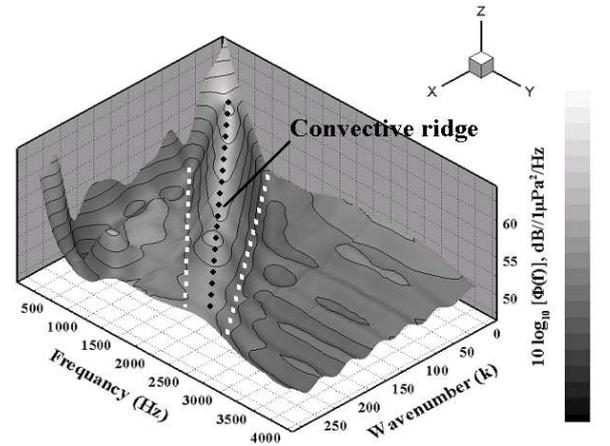


Fig. 9 Surface plot of frequency-wavenumber spectrum on permeable coating (U=17m/s)

집된 유동 구조가 침투성 코팅 내외로 흡입, 분출을 반복하면서 미세한 다공구조에 의해 작은 스케일로 여과되어진 결과로 설명할 수 있다.

Figure 10은 평균 속도와 벽면 종류에 따른 벽 근처 벽 압력 특성을 과수-주과수 스펙트럼으로 나타낸 결과이다. 모든 경우에 대해 평균 유속의 상승이 대류 속도의 증가로 나타나고 있으나, 대류속도를 평균유속으로 무차원한 경우 강체면은 $U_c/U_0 \sim 0.70$, 코팅면은 $U_c/U_0 \sim 0.60$ 으로 다소 침투성 코팅면 위의 대류속도가 지연되어 있음을 확인할 수 있다. 이는 벽면 위 투과 특성이 대류하는 난류 구조들의 동적 특성에 변화를 주어 그 속도를 지연시킨 것으로 설명할 수 있다. 또한 Zagni와 Smith⁽¹⁸⁾ 그리고 Zippe와 Graf⁽¹⁹⁾의 실험을 통해 확인된 바와 같이 침투성 코팅면의 투과성이 대류하는 난류 구조들의 동적 특성에 중요한 요인이 됨을 확인할 수 있다.

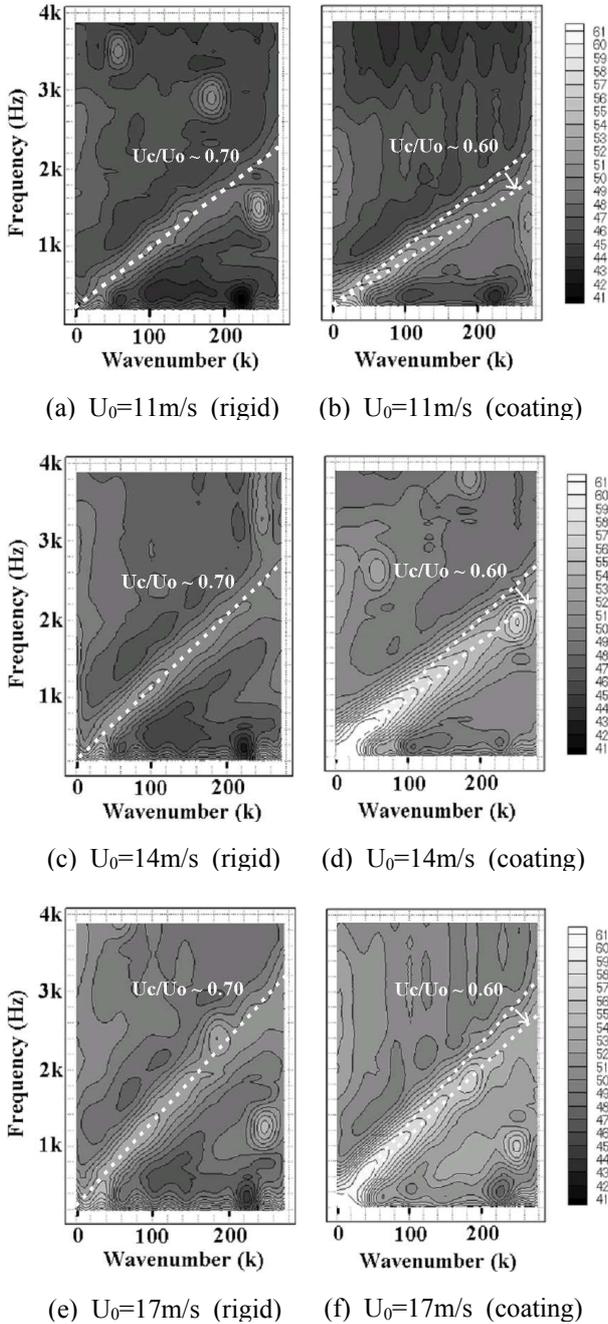


Fig. 10 Wavenumber-frequency spectrum on rigid plate and on permeable plate

Figure 11은 다공성 코팅 밀면에서의 벽압력 특성을 세 가지 속도에 대해 각각 강체면과 비교하여 나타내고 있다. 전연부에서 660 mm 떨어진 코팅면 밑에서 1/8" 마이크로폰을 사용하여 벽압력스펙트럼을 측정된 결과, 400~600 Hz 주파수 이하의 영역에서는 코팅면 후단에서의 측정 결과와 같이 저주파수 영역의 큰 에너지 상승이 나타남을 확인할 수 있다. 반면 400~600 Hz 주파수

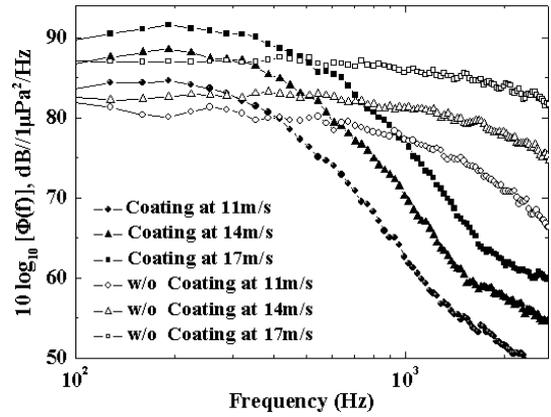


Fig. 11 Wall pressure auto-spectrums with and without coating

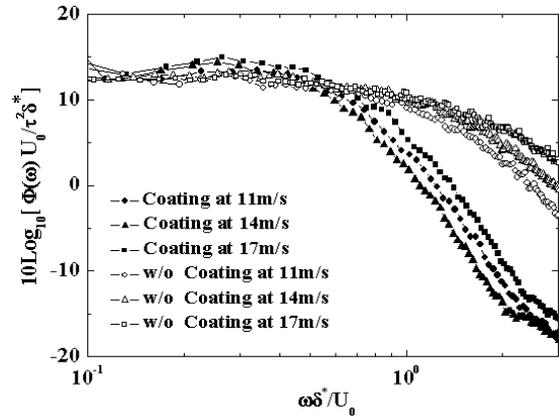


Fig. 12 Comparison of coated and un-coated wall pressure auto-spectrum levels scaled with mixed variable scaling

이상의 영역에서는 세 가지 속도 경우에 대해 모두 코팅면 후단측정결과보다 더욱 급격한 기울기와 에너지의 저감을 확인할 수 있다.

Figure 12는 경계층 두께와 평균 벽 전단응력의 증가로 인해 감추어진 코팅면 효과를 분석하기 위해 Keith 등⁽¹⁵⁾이 제시한 주파수의 혼합 변수인 $\omega\delta^*/U_0$ 와 $\Phi(\omega)U_0/(\tau_w^2\delta^*)$ 으로 무차원한 에너지 스펙트럼 결과를 비교하고 있다. $\omega\delta^*/U_0$ 가 0.6 이하에서는 $11.5 < \Phi(\omega)U_0/(\tau_w^2\delta^*) < 15.1$ 의 영역 안으로 세 가지 속도성분에 대해 무차원 에너지가 수렴되었으며, 이는 무차원 되기 이전의 코팅면 밀벽 압력 에너지 상승은 경계층 두께와 평균 벽 전단응력의 증가에 의해 나타난 현상임을 확인할 수 있다. 0.6 이상인 영역에서는 현저한 기울기로 무차원 에너지가 저감되는 것을 확인할 수 있으며 이는 다공성 구조가 다소 작은 스케일의 난류 구조들을 기계적으로 여과함으로써 일정 파수-주

과수 영역 상단의 에너지를 현저하게 저감시키는 벽 압력 저대역 필터링 효과를 가져올 수 있다.

4. 결론

본 실험 사양인 50 ppi 다공 폴리우레탄(open-cell, polyurethane foam)으로 이루어진 코팅면은 다소 거친 표면 거칠기와 코팅층위에서 흡입, 분출특성에 의해 선회하는 큰 유동 구조들이 발생되어 코팅면 후단 및 밀면 측정에서 저과수-주과수 영역의 벽 압력 에너지를 상승시키고 대류속도를 지연시킴을 알 수가 있다. 반면 미세한 다공 구조 안으로 흡입된 난류 구조를 다공 크기 이하로 여과시키는 소위 벽 압력 저대역 필터 효과를 통해 $\omega\delta^*/U_0 > 0.6$ 의 고과수-주과수 영역에서의 급격한 에너지 저감효과 나타낸다. 이러한 결과는 코팅면 후단에서 16개의 다채널 압력센서로 측정된 벽 압력 과수-주과수 스펙트럼의 시공간적인 특성비교를 통해 코팅면 바로 밑에서 1/8" 마이크로폰으로 측정된 벽압력 스펙트럼을 혼합변수 $\omega\delta^*/U_0$, $\Phi(\omega)U_0/(\tau_w^2\delta^*)$ 으로 무차원하여 분석한 결과를 통해 각각 확인할 수 있다. 또한 고과수-주과수 에너지저감특성은 침투성 코팅포어의 크기가 δ^* 의 크기보다 1/10 이하에서 효과가 있는 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토해양부의 지원으로 수행한 해양 에너지 전문인력 양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

- (1) Wills, J. A. B., 1970, "Measurements of the Wave-Number/Phase Velocity Spectrum of Wall Pressure Beneath a Turbulent Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 45, Part 1, pp. 65~90.
- (2) Blake, W. K. and Chase, D. M., 1971, "Wavenumber-Frequency Spectra of Turbulent Boundary Layer Pressure Measured by Microphone Arrays," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 49, No. 3, Part 2, pp. 862~876.
- (3) Farabee, T. M. and Geib, F. E., 1991, "Measurements of Boundary Layer Pressure Fluctuations at Low Wavenumbers on Smooth and Rough Walls," *Proceedings of the ASME Symposium on Flow Noise Modeling, Measurement, and Control, Noise Control and Acoustics*, Vol. 11, pp. 55~68.
- (4) Panton, R. L. and Robert, G., 1994, "The Wavenumber-Phase Velocity Representation for the Turbulent Wall-Pressure Spectrum," *ASME J. of Fluid Eng.*, Vol. 116, pp. 477~483.
- (5) Manoha, E., 1996, "Wall Pressure Wavenumber-Frequency Spectrum Beneath a Turbulent Boundary Layer Measured with Transducers Calibrated with an Acoustic al Method," *Proceedings of the ASME Symposium on Flow Noise Modeling, Measurement, and Control, Noise Control and Acoustics*, Vol. 11, pp. 21~35.
- (6) Chase, D. M., 1987, "The Character of the Turbulent Wall Pressure Spectrum Subconvective Wavenumbers and Suggested Comprehensive Model," *J. Sound and Vib.*, Vol. 112, No. 1, pp. 125~147.
- (7) Manoha, E., 1996, "The Wavenumber-Frequency Spectrum of the Wall Pressure Fluctuations Beneath a Turbulent Boundary Layer," *Proceedings of AIAA Aeroacoustics Conference, May 6-8, State College, PA, American Institute of Aeronautics and Astronautics*, AIAA Paper 96-1758.
- (8) Abraham, B. M. and Keith, W. L., 1996, "Direct Measurements of Turbulent Boundary Layer Wall Pressure Wavenumber-Frequency Spectra," *Proceedings of the ASME Symposium on Flow Noise Modeling, Measurement, and Control, Noise Control and Acoustics*, Vol. 22, pp. 177~187.
- (9) Abraham, B. M. and Cipolla, K. M., 2001, "Experimental Measurement of the Turbulent Boundary Layer Wall Pressure Beneath a Porous and Compliant Coating," *ASME FEDSM 2001-18207*.
- (10) Lee, I, Kulik, V. M., Boiko, A. V., Chun, H. H., 2009, "Water-Tunnel Measurement of the Drag-Reducing Effect of Compliant Coating," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 55, pp. 588~592.
- (11) Kulik, V. M., 2012, "Action of a Turbulent Flow on a Hard Compliant Coating," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 33, pp.

- 232~241.
- (12) S. Lee, H.-J. Kim, 1999, "Experimental Study on Wall Pressure Fluctuations in the Turbulent Boundary Layer on a Flat-Plate," *Trans. of the KSME B*, Vol. 23, No. 6, pp. 722~733. (in Korean)
- (13) Bendat J. S. and Piersol A. G., 1991, *Random Data : Analysis and Measurement Procedure*, 2nd Ed. John Wiley & Sons
- (14) 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.
- (15) Jeon, W. P., 1994, "Measurements of Transitional Boundary Layer on a Flat Plate in Wakes," Ph.D. thesis. Univ. Seoul, Kor.
- (16) Jeon, W.P. and Kang, S. H., 1995, "Measurement of Wall Shear Stress in Transitional Boundary Layer on A Flat Plate Using Computational Preston Tube Method," *Trans. of the KSME B*, Vol 19, No. 1, pp. 240-250. (in Korean)
- (17) Kang, S. H., Yoon, M. S. and Jeon, W. P., 1994, "Measurement of Wall Shear Stress Using Preston Tubes," *Trans. of the KSME B*, Vol 18, No. 7, pp. 1873~1880. (in Korean)
- (18) Will, J. A. B., 1970, "Measurements of Wave Number/Phase Velocity Spectrum of Wall Pressure Beneath a Turbulent Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, Vol. 45, pp. 65~90.
- (19) Finnigan, J., 2000, "Turbulence in Plant Canopies," *Annu. Review Fluid Mech.* Vol. 32, pp.519~571.
- (20) Zagni, A. F. E. and Smith, K. V. H. 1976, "Channel Flow over Permeable Beds of Graded Spheres," *J. Hydraulics Division*, Vol. 102, pp. 207~222.
- (21) Zippe, H. J. and Graf, W. H., 1983, "Turbulent Boundary-Layer Flow over Permeable and Non-Permeable Rough Surfaces," *J. Hydraulic Research*, Vol. 21, No. 1, pp. 51~65.