

난류 경계층에서 컴플라이언트 코팅과 점탄성 벽면의 방사 소음에 관한 실험적 연구

이승배*, 이창준**, 권오섭***, 전우평****

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

Seungbae Lee*, Chang-Jun 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 the 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.

1. 서론

경계층 천이지연에 대한 실험적 연구로서 항력감소를 위한 컴플라이언트 코팅의 사용은 Kramer⁽¹⁾에 의해 소개되어졌고, 그 후 다른 연구자들에 의해 여러 차례 실험이 수행되었지만 항력 감소라는 분명한 결과를 얻지 못하였다. Oklahoma 대학의 Blick⁽²⁾의 여러 사람들이 공기 중에서 실험을 수행하여 컴플라이언트 코팅에 의해 표면저항이 감소됨을 보고한 바 있지만 역시 재검증되지는 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. 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 유연표면(flexible surface)에 대한 Blasius 층류경계층의 유동안정성, Orr-sommerfeld식의 고유치 및 불안정성에 대한 시간적·공간적 모드를 고려, e-방법을 이용한 천이 레이놀즈수 계산 등을 통해 컴플라이언트 코팅의 불안정성을 해석하였다. 컴플라이언트 모델을 제작하여 모델의 물성치 변화에 따라 20~40%의 천이 레이놀즈수가 증가하였음을 관찰하였다. Abraham 등⁽⁵⁾은 다공질의 컴플라이언트 코팅면(porous and compliant coating)에서 난류 경계층 실험을 수행하

였다. 고주파수 영역에서 대류 벽압력 스펙트럼의 감쇄 현상이 발생함을 확인하였다.

또한 수치·이론적 연구로서 Benjamin⁽⁶⁾은 표면이 유연한 경우에 발생하는 유동 불안정성에 대해 물리적인 현상에 중점을 두어 분류하였다. Class A 불안정성은 강체 표면에서 발생하는 불안정성과 비슷하며 일반적으로 댐핑에 의해 불안정화되고 Class B 불안정성은 유동장에 의해 변하는 자유표면파로 되어 있으며 댐핑에 의해 안정화된다. Class C 불안정성은 두 유체층의 상호면에서 발생하는 Kelvin-Helmholtz 타입의 불안정성으로 댐핑에 비교적 영향을 받지 않는다고 밝힌 바 있다. Carpenter⁽⁷⁾는 Kramer-type 컴플라이언트 코팅에서 발생하는 불안정성에 대한 수치적인 연구를 통하여 댐핑에 의해 불안정화되는 TSI(Tollmien-Schlichting instability)와 반대로 댐핑에 의해 안정화되는 FISI(flow-induced surface instability)의 두 가지 모드가 나타남을 보였다. 또한 Kramer-type 코팅이 이론적으로 상당한 천이 지연을 보이며 댐핑에 대한 상반된 결과를 바탕으로 최적의 댐핑 물질의 점도(substrate viscosity)를 찾을 수 있다고 발표한 바 있다.

경계층 내의 주요 소음원에 대해서는 많은 추정과 논쟁이 있어 왔다. 소음방사 측면에서 이극자 소음원은 벽에 의한 거울상(image)효과에 의해 상쇄되며, 레이놀즈 응력에 의한 종방향 사극자 소음원은 벽에 의해 강화된다⁽⁸⁾. Landahl⁽⁹⁾은 벽 근처에서의 버스팅 구조(bursting mechanism)가 경계층으로부터 방사되는 소음에 크게 기여하는 이극자 소음원을 발생시킨다고 주장하였다. 최근 연구에 따르면 후기 천이에서 관찰되는 K-type의 스파이크(spike)가 버스팅 이벤트와 비슷한 메커니즘으로 주장되기도 하였다. 이승배 등⁽¹⁰⁾은 난류 경계층 내에서 큰 진폭의 벽압력 섭동 이벤트가 방사 조건을 만족하는 경우 원거리장 소음에

* 인하대학교 기계공학과, sblee@inha.ac.kr

** 인하대학교 대학원, solar23@hanmail.net

*** 인하대학교 대학원, seskos@hanmail.net

**** 서울대학교 난류제어연구단, wpjeon@plazal.snu.ac.kr

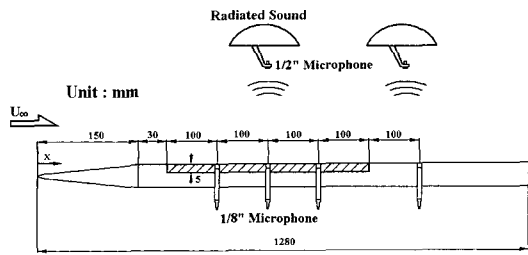


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

기여를 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. 그러나 수중무기체계에서는 물수체 앞부분에서의 천이에 의한 소음이 회절되어 소나부로 들어오면서 소나의 탐지성능을 떨어뜨리게 된다.

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 유속계를 이용하여 시간 평균 통계량인 평균 속도를 측정하였고 수치 프레스톤 튜브법(computational preston tube method)의 원리를 도입하여 벽 마찰계수를 구하였다. 벽면 압력섭동의 영향을 파악하기 위해서 핀 홀 마이크로폰을 사용하였으며 벽압력 스펙트럼을 스케일링(scaling)하여 실험 결과를 분석하였다. 또한 유동장 밖에서의 방사음장은 음향미러(acoustic mirror)를 이용하여 지배 주파수를 측정하였다⁽¹¹⁾.

2. 실험 장치 및 방법

본 연구는 인하대학교 내에 설치된 무향풍동에서 수행되었다. 밀폐된 형태의 무향풍동(anechoic wind tunnel)은 400mm(H)×400mm(W)×2500mm(L)의 시험부를 가지며 유동이 없을 때의 압소음 레벨은 20dB_A 이하를 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 재질(open-cell, urethane-type foam)과 0.75mm 두께의 천 덮개(fabric cover)로 구성되어진다. 실크 재질의 천 덮개와 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 충전제, 바인더 및 특수 첨가제를 혼합한 제진 도료를 사용하여 코팅면을 만들었다. 실제 시험부의 제원은 5.1mm(t)×400mm(W)×400mm(L)이다.

실험은 레이놀즈수(Re_δ)가 298에서 1002의 범위에서, 풍속이 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. 벽면재질과 천이와의 상관관계를 알아보기 위해 Fig.1과 같이 네 곳(x=280mm, 380mm, 480mm, 680mm)에 핀 홀 마이크로폰을 설치하였다. 실제 실험 장치는 수축부가 끝나는 지점과 연결하지 않아 수축부에서 발달되는 경계층의 영향을 없게 하였다. 평판의 앞전은 유동이 박리되는 것을 막기 위해

Table 1 Boundary layer characteristics

	U ₀ (m/s)	x(mm)	δ*(mm)	θ(mm)	U _r (m/s)	Re _δ
Rigid plate	9.95	680	1.547	0.624	0.315	421
	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
Porous plate	15.1	680	1.337	0.638	0.495	631
	9.7	680	1.386	0.937	0.495	612
	15.1	280	0.960	0.452	0.477	444
	15.0	380	1.478	0.865	0.629	841
Visco-elastic plate	15.1	480	1.615	0.960	0.654	938
	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

타원(ellipse)형태로 가공하였으며 연결 부위 영향을 최소화하기 위해 왁스로 틈을 메웠다. 경계층의 평균 속도 측정은 1/50mm 까지 정밀 자동이송이 가능한 이송장치를 이용해 I형 열선 유속계를 0.1mm씩 이송하면서 수행하였다.

속도 측정은 경계층 프로브(DANTEC 55P15)와 CTA 시스템을 사용하였고 평균 속도 측정시에는 20초 동안 10,000개의 데이터를 획득하여 한 측정점에서의 평균값으로 취하였다. 열선의 과열비는 15로 하였다. 실험실의 온도 변화, 열선의 산화 부식의 영향을 줄이기 위해 실험 전 속도 검정(velocity calibration)을 풍동내 시험부에서 직접 수행하였으며 출력 전압(voltage)과 속도의 검정식은 4차 다항식을 사용하였다. 계측된 아날로그 신호는 A/D변환기를 통하여 GPIB card가 내장된 노트북으로 데이터를 저장하였다. 근거리장 벽면 섭동 압력은 1/8" 마이크로폰(B&K4138) 헤드에 d가 7.0가량인 핀 홀 캡을 장착하여 측정하였다. 평판과 동일한 면에 핀 홀 끝을 밀착하여 가능한 유동 교란이 없도록 하였다.

외부 방사소음은 음향미러를 이용하여 측정하였으며 각 경우 별로 벽압력 스펙트럼과 비교하였다. 측정에 사용되었던 음향미러는 이승배 등⁽¹¹⁾에 의해서 그 성능이 검증되어진 것이며 유동장 내에서 발생하는 음원은 유동장의 영향에 의해 회절 현상이 발생하므로, 이 영향을 고려해야 한다. 본 실험에 사용된 음향미러의 성능 계수는 1.05로 아래와 같은 성능식을 갖는다.

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

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

3. 실험 측정 결과

3.1 벽압력에 대한 실험 결과

강체 벽면과 다공성 컴플라이언트 코팅된 벽면에 대한 벽압력과 경계층의 측정은 전연(leading edge)부로부터 680mm 떨어진 곳에서 측정하였다. Table 1은 강체판, 다공성 컴플라이언트 코팅된 판, 점탄성 판에서 구해진 경계층 특성치를 나타낸다. Table 1을 보면 강체판과 다공성 컴플라이언트 코팅된 판에서

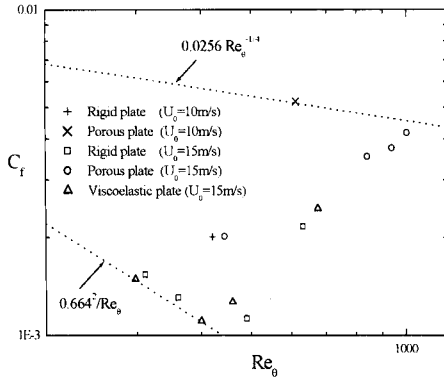


Fig. 2 Skin friction coefficients obtained from CPM using near-wall velocity profiles

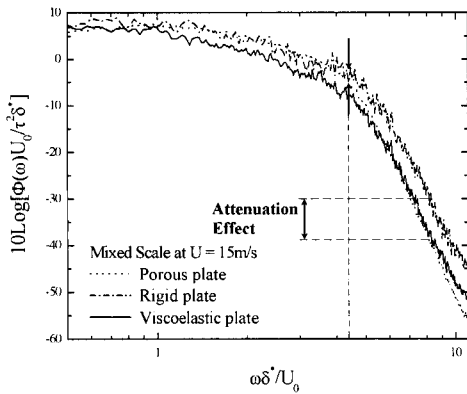


Fig. 3 Non-dimensional wall pressure spectra scaled on mixed variables at 15m/s

큰 차이가 나고 있음을 볼 수 있다. 이것은 천דת개의 거칠기에 의해 평균 벽 전단응력(mean wall shear stresses)이 더 크게 형성되었고, 강체 벽면에 비해 다공성 컴플라이언트 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. 2과 같이 운동량 두께를 기준으로 한 레이놀즈수에 따른 변화를 살펴보았다. 경계층 데이터로부터 수치 프레스톤 튜브법을 이용하여 얻은 마찰계수 분포가 타당함을 확인할 수 있다.

측정된 벽압력 섭동스펙트럼을 무차원하기 위해 Keith 등⁽¹²⁾이 제시한 혼합 변수(mixed variable)를 이용하였다. 이 혼합 변수들은 주파수의 외층 변수(outer variable)인 $\omega \delta^*/U_0$, 스펙트럼 에너지는 $\Phi(\omega)U_0/(\tau_w^2 \delta^*)$ 으로 무차원하여 사용한다. 이 스케일링은 경계층 두께와 평균 벽 전단응력의 증가에 의한 스펙트럼의 변화를 설명하는데 매우 효과적이다. 저주파수에서의 에너지 레벨이 일치되는 것은 무차원의 영향에 의한 것으로 사료되어진다. 저주파수 대류 파수는 코팅에 의해 효과적으로 필터링되지 못하기 때문에 에너지레벨이 감소되지 않은 것으로 파악된다. Figure 3에는 세가지 모델에 대해 같은 위치에서 측정된 무차원 벽압력 스펙트럼 결과를 나타냈다. 다공성 코팅면과 점탄성 코팅면 모두 강체면보다 고주파 영역에서 에너지레벨이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 코팅면에서 감쇄가 3dB이상 되는 주파수는 $\omega \delta^*/U_0=4.1$ 근처가 된다. 이런 현상이 일어나는 무차원한 대류 파수는 다음과 같이 계산된다.

$$k_c h = \left(\frac{\omega \delta^*}{U_0} \right) \left(\frac{U_0}{U_c} \right) \left(\frac{h}{\delta^*} \right) \quad (2)$$

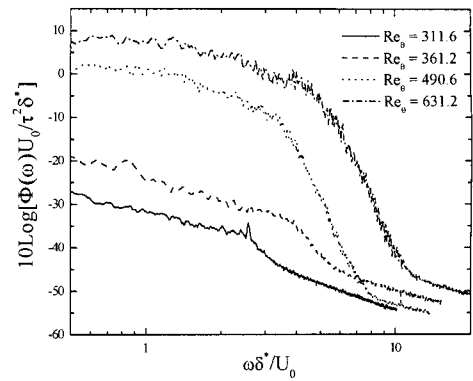


Fig. 4 Non-dimensional wall pressure spectra scaled on mixed variables on the rigid plate at 15m/s

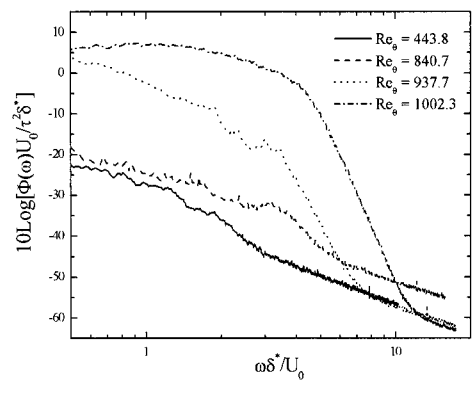


Fig. 5 Non-dimensional wall pressure spectra scaled on mixed variables on porous plate at 15m/s

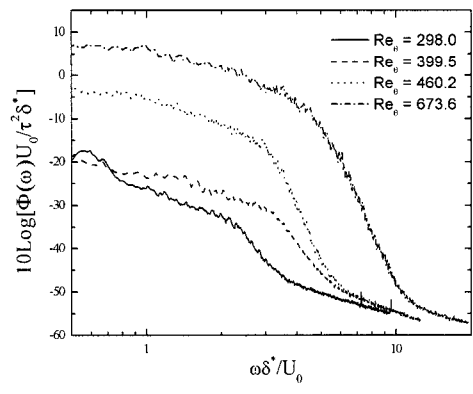


Fig. 6 Non-dimensional wall pressure spectra scaled on mixed variables on viscoelastic plate at 15m/s

본 실험에서 h/δ^* 는 0.3에서 0.75까지 분포하므로, h/δ^* 값은 대략 0.5, U_0/U_0 는 0.7을 사용한다. 따라서 $k_c h$ 가 2.93이상에서 고주파수 에너지가 3dB이상 감소함을 볼 수 있다. 이것은 대류 파장이 $2.2h$ 보다 작음을 의미한다. Figure 4에서 6까지는 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.

3.2 방식소음에 대한 실험 결과

강체 벽면, 다공성 컴플라이언트 코팅된 벽면, 점탄성 벽면 위

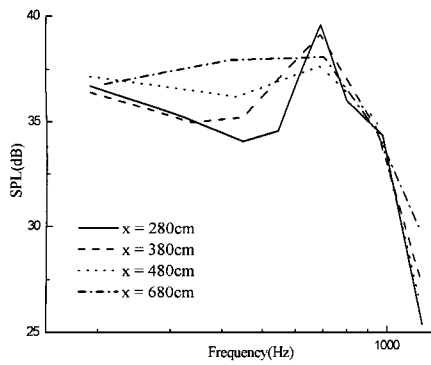


Fig.7 Radiated Sound Spectra on the rigid plate

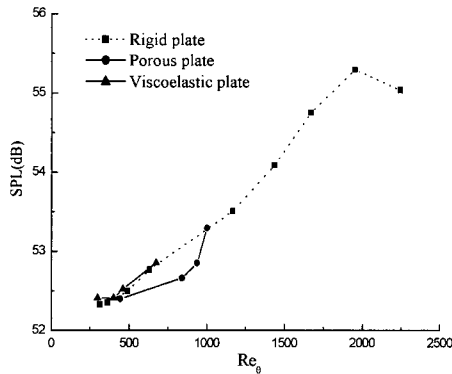


Fig.8 Radiated sound pressure levels measured by acoustic mirror system

위의 경계층 내 주소음원을 분석하기 위해, 유동장 외부에 음향 미러를 설치하였다. 방사 소음 측정은 벽압력을 측정된 위치에서 수행되었다. Figure 7은 각 측정점에서의 방사소음 스펙트럼을 나타내고 있다. 하류로 갈수록 고주파수의 에너지가 증가하고 피크(peak) 주파수가 감소하고 있음을 볼 수 있다. Figure 8은 무차원 경계층 Re_0 수에 따른 벽면에서 방사된 음압 레벨을 나타내고 있다. 측정된 방사 음압 레벨은 이차 불안정성의 초기 천이 지역에서 증가하기 시작하며 다공성 재질 벽면의 경우, 비록 난류 발달은 상대적으로 빠르지만 같은 레이놀즈 수에서는 천이 지역에서 낮은 방사 소음 레벨을 보인다. 최근 Hahn 등⁽¹³⁾은 다공성 벽면 위의 채널 난류 유동 계산을 통해 강체 벽면에 비해 벽면 전단응력 감소와 함께 벽면 섭동압력 등이 감소하는 결과를 보고한 바 있다.

또한 후기 천이로 발달함에 따라 모든 벽면에서 벽면 소음원에 의한 방사 음압이 크게 증가하고 있다. 강체 벽면의 경우 후기 천이에서 난류로 발달함에 따라 방사 음압이 크게 증가하며, 완전 발달한 난류에서는 음압이 약간 감소하는 현상이 관찰된다. 이것은 완전 발달된 난류 경계층에서 주 소음원의 와(eddy)의 길이 스케일이 작아지면서 방사 효율이 낮아지는 것으로 여겨진다.

4. 결론

본 실험은 강체 벽면과 다른 코팅 벽면에 의한 파수의 필터링 특성과 범위를 알아보기 위해 풍동에서 경계층, 벽압력 스펙트럼, 방사소음을 측정하였다. 강체판에 비해 다공성 컴플라이언트 코팅된 판에서 상대적으로 발달된 경계층이 발생하였다. 이러한 현상은 천달개의 거칠기와 코팅면이 시작되는 후향계단에 의한 영향으로 파악된다. 그러나 점탄성 벽면에서는 강체 벽면

과 비슷한 천이 특성이 나타나고 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 2.2배 이하에서 즉, k_h 가 2.93이상에서 고주파수 에너지 레벨이 3dB이상 크게 감소하였다.

방사 음압 레벨은 초기 천이 지역에서 증가하기 시작하여 후기 천이를 거쳐 완전 발달한 난류 경계층까지 크게 증가한다. 다공성 재질의 벽면은 비록 천달개 거칠기 등으로 벽면 전단응력의 증가에도 불구하고, 같은 천이 지역의 같은 레이놀즈 수에서 저감된 방사 소음 특성을 보였으며 이는 저감된 고주파수 벽 에너지와도 무관하지 않다고 여겨진다.

후기

본 연구는 수중음향특화연구센터 UA-42과제 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 깊은 감사를 표합니다.

참고문헌

- [1] Kramer, M.O., "Hydrodynamics of the dolphin," *Advances in Hydrosience*, Vol. 2 (ed. V. T. Chow) (1965), pp.111-130.
- [2] .Blick, E.F., Walters, R.R., Smith, R. and Chu, H., "Compliant coating skin friction experiments," *AIAA Paper No.* (1969), pp.69-165
- [3] Gad-el-Hak, M., "Boundary layer interactions with compliant coatings: an overview," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 39, No. 4 (1986), pp.511-524.
- [4] Willis, G.J.K., *Hydrodynamic stability of boundary layers over compliant surfaces*, PhD thesis. Univ. Exeter, Engl., (1986).
- [5] Abraham, B.M. and Cipolla, K.M., "Experimental measurement of the turbulent boundary layer wall pressure beneath a porous and compliant coating," *A.S.M.E., FEDSM2001-18207*, (2001).
- [6] Benjamin, T.B., "The threefold classification of unstable disturbances in flexible surfaces bounding inviscid flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 16 (1963), pp.436-450.
- [7] Carpenter, P.W. and Garrad, A.D., "The hydrodynamic stability of flow over Kramer-type compliant surfaces. Part 1. Tollmien-Schlichting instabilities," *J. Fluid Mech.*, Vol. 155 (1985), pp.465-510.
- [8] Powell, A., "Aerodynamic Noise and the Plane Boundary," *J.A.S.A.*, Vol. 32 (1960), pp.982-990.
- [9] Landahl, M.T., "Mechanics of Boundary Layer Turbulence Layer," *J.A.S.A.*, Vol. 57 (1975), pp.824-831.
- [10] 이승배, 김희중, "평판 난류경계층에서 의 벽 압력섭동에 대한 실험적 연구," *대한기계학회논문집 B권*, Vol. 23, 제6호 (1999), pp.722-733.
- [11] 이승배, 권오섭, 이창준, "난류 유동장 내에 놓인 탄성을 갖는 박판의 방사소음에 대한 실험적 연구," *대한기계학회논문집 B권*, Vol. 25, 제10호 (2001), pp.1327-1336.
- [12] Keith, W.L. and Bennett, J.C., "Low Frequency Measurements of the Wall Shear Stress and Wall Pressure in a Turbulent Boundary Layer," *A.I.A.A.*, Vol. 29, No. 4 (1991), pp.526-530.
- [13] Hahn, S., Je, J. and Choi, H., "Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow with Permeable Walls," *J. Fluid Mech.*, Vol. 450 (2002), pp.259-285.