

< 논문 >

## 점탄성 유동벽면의 파동 감쇠 특성 해석

Victor M. Kulik\* · 정광효\*\* · 전호환\*\* · 이인원†

(2006년 5월 29일 접수, 2006년 10월 13일 심사완료)

### Analysis of Wave Decay Characteristics of Viscoelastic Compliant Coating

Victor M. Kulik, Kwang Hyo Jung, Ho Hwan Chun and Inwon Lee

**Key Words:** Drag Reduction(저항저감), Compliant Coating(유동벽면), Viscoelastic Material(점탄성 물질), Loss Factor(손실계수), Wave Propagation(파동전파)

#### Abstract

Calculation was carried out for phase velocity and deformation wave decay in a layer of viscoelastic material fixed tightly on the solid substrate. Analysis has been performed regarding the inner structure of the wave, i.e., the proportions between the vertical and horizontal displacements and their profiles. The wave characteristics depend strongly on media compressibility factor. The effect of viscous losses on parameters of the main oscillation mode was studied in detail. Results were compared with the model of coating with local deformation. A new experimental approach was made in order to measure such wave properties of a compliant coating as the dependency of deformation wave velocity on frequency and decay factor was made. The method for estimation of coating parameters enabling the drag reduction in turbulent flow was then refined.

#### 기호설명

$C_l$  : 압축·팽창파의 전파속도

$C_t$  : 전단파의 전파속도

$E$  : 강성계수

$f_0$  : 유동벽면의 1차 공진주파수

$H$  : 유동벽면의 두께

$U$  : 경계층 유동의 자유흐름속도

$U_c$  : 경계층 유동의 대류 속도

$V$  : 유동벽면 2차원 변형파의 위상 속도

$\vec{\xi}$  : 2차원 변형파의 벡터 변위  $\vec{\xi} = \zeta\vec{i} + \eta\vec{j}$

$\zeta$  : 2차원 변형파의 수평 방향 변위

$\eta$  : 2차원 변형파의 수직 방향 변위

$\lambda$  : 변형파의 파장

$\mu$  : 점탄성 물질의 손실 계수(loss tangent)

$\sigma$  : 점탄성 물질의 Poisson 계수

$\omega$  : 주파수

#### 1. 서론

유동제어기법에 의한 마찰저항저감은 자동차, 항공기 및 선박 등의 광범위한 수송기계의 고속화 및 연료 소모 절감을 달성할 수 있는 기술로서, 최근의 에너지 환경에서 그 중요성이 더욱 증대되고 있다. 유동제어기법은 제어동력이 외부에서 가해지는가의 여부에 따라 능동기법과 수동

† 책임저자, 회원, 부산대학교 첨단조선공학연구소

E-mail : inwon@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2764 FAX : (051)581-3718

\* Institute of Thermophysics, Russian Academy of Sciences

\*\* 부산대학교 첨단조선공학연구소

기법으로 대별된다.

유동벽면(compliant coating)은 수동적 유동제어 기법 중의 하나로서, 난류경계층에 접하는 벽면을 실리콘 고무와 같은 점탄성(viscoelastic) 재질로 씌워서 벽면 근방 난류 에너지를 감소시키거나 위상차에 의하여 상쇄 간섭을 일으켜 마찰 저항의 주요 요인을 약화시키는 역할을 한다. 최초로 유동 벽면의 개념을 창안한 Kramer<sup>(1)</sup>의 연구에서는 돌고래 피부조직을 모사하였는데 여러 층의 점탄성 재료 층이 빗살 혹은 기둥 모양의 조직으로 서로 연결된 가운데 일부엔 점성 유체로 채워진 매우 복잡한 구조를 보이고 있다. 이같이 복잡한 구조의 진동 및 변형 특성을 해석하기란 매우 어려워서, 현재까지 성공하지 못하고 있다. 이와 같은 박막형 코팅(membrane coating)의 변형 특성은 사용되는 유체의 점도 및 가해지는 응력의 방향에 따라 크게 변화하기 때문에 실용적이지 못하다.

강성 계수 E 가 1 MPa 전후이고 두께는 수 mm 정도인 단일막 코팅(monolithic coating)의 경우가 이 조건을 만족한다.<sup>(2,3)</sup> 이와 같은 형식에서 난류 압력변동에 의한 표면 변형의 크기 η는 매우 작아서 난류유동장의 점성 척도로 무차원화한 변형 크기 η\* = ηu<sub>r</sub>/ν 는 보통 1 보다 작아진다. 이 정도의 변형은 점성 저층의 두께보다도 작은 것이기 때문에, 유동 관점에서는 완전히 매끄러운 것으로 간주될 수 있다. 반면 공진주파수와 변형 진폭의 곱으로 주어지는 변형 속도는 코팅의 강성이 크기 때문에 1차 공진주파수가 커지므로 난류 유동의 속도 변동과 비교했을 때 무시할 수 없는 크기가 된다.<sup>(4)</sup> 이 때, Fig. 1 과 같은 방식으로 Reynolds 응력이 줄어들어 저항 저감으로 이어진다.

Fig. 1에 도시된 마찰저항 감소 기구는 Semenov<sup>(5)</sup>의 운동학적 가설에 의한 것으로서, 저항감소효과를 극대화하기 위해서는 외부가진력인 난류압력변동에 의한 유동벽면 표면에서의 변형 및 그 속도가 최대가 되는 것이 바람직하다. 유동벽면의 변형은 1차 공진주파수에서 최대가 되므로, 이 조건은 점탄성 유동벽면에서 발생하는 변형파의 1차 공진주파수 파장과 유동장의 특성 파장과의 일치 조건으로 귀결된다.<sup>(6)</sup>

Semenov<sup>(5)</sup> 이래 기존의 변형 해석 방법<sup>(2,6)</sup>은 유동 벽면이 압력 변동에 국부적으로 반응한다는

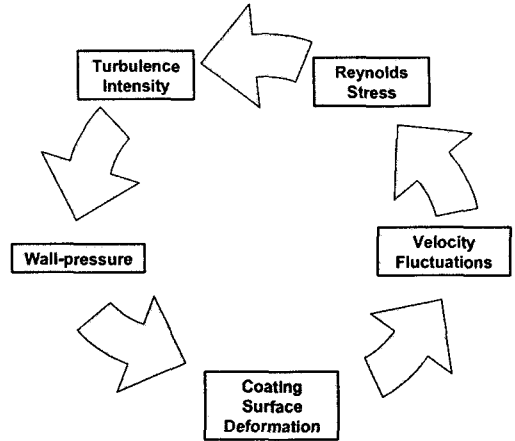


Fig. 1 Mechanism of drag reduction by compliant coating

국소 변형 모델(local deformation model)에 기초한 것이다. 이 경우, 유동벽면 표면 변형이 극대화되는 변형파의 파장 λ 는 유동벽면의 두께 H 의 4배가 되므로 경계층의 자유 흐름 속도 U 와 공진주파수 f<sub>0</sub> 사이에 다음 관계가 성립한다.<sup>(6)</sup>

$$U = \frac{4Hf_0}{0.6 \sim 0.8} = \frac{\sqrt{E/\rho}}{0.6 \sim 0.8} \left[ \frac{2(1+\eta^2)}{1+\sqrt{1+\eta^2}} \right]^{1/2} \quad (1)$$

식 (1) 은 주어진 점탄성 물성치 E, ρ, η 에서 최적의 저항 저감 효과를 얻을 수 있는 유동속도를 보이고 있다. 이상과 같은 국소 변형 모델은 해석적으로는 매우 간편하지만, 난류 경계층 압력 변동의 다양한 길이 척도의 효과를 나타낼 수 없다. 즉, 공간적인 상관관계를 지닌 압력변동에 반응하는 유동벽면의 변형 거동 역시 주변부의 가진력 혹은 변형 자체의 영향을 받는데, 국소 변형 모델에서는 이를 감안할 수 없다.

본 연구에서는 이와 같은 제약을 벗어나기 위하여 보다 일반적인 해석 방법인 2차원 파동 해석을 수행하여 점탄성 유동 벽면 내에서의 변형파의 전파 및 감쇠 특성에 대하여 고찰하고, 새로운 유동 벽면 설계 변수 최적화 과정을 제시하고자 한다.

## 2. 점탄성 유동벽면의 변형파 해석

두께 H 인 점탄성물질층에서 x 방향으로 전파되는 일정한 주파수의 파동을 고찰하자. 점탄

성 물성치는 강성 계수 (elasticity modulus)  $E$ , 밀도  $\rho$ , Poisson 계수  $\sigma$  및 손실 계수  $\mu$  로 주어진다. 파동이 전파될 때 매질 입자의 변위는 다음과 같이 기술된다.

$$\vec{\xi} = \vec{i}\zeta + \vec{j}\eta = \vec{f}^*(y)e^{ik(x-vt)}$$

여기에서  $\zeta$  와  $\eta$  는 각각 유동벽면 길이 방향 및 두께 방향의 변위성분이다. 서론에서와 같이 2차원 파동을 해석하기 위하여 다음과 같은 일반적인 2차원 매질에서의 탄성파의 지배방정식을 채택한다.<sup>(7)</sup>

$$\frac{\partial^2 \vec{\xi}}{\partial t^2} = C_t^2 \Delta \vec{\xi} + (C_l^2 - C_t^2) \nabla (\nabla \cdot \vec{\xi}) \quad (2)$$

$$C_l = \left[ \frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)} \right]^{1/2} \text{ 및 } C_t = \left[ \frac{E}{2\rho(1+\sigma)} \right]^{1/2}$$

는 각각 무한 매질에서의 압축·팽창파 (중파: 변위 방향이 파동 전달 방향과 평행) 및 전단파 (횡파: 변위 방향이 파동 전달 방향과 수직)의 속도이다.

경계조건은 밀 벽면에서 무변형조건

$$\zeta = \eta = 0 \text{ at } y = H \quad (3)$$

및 외부 표면에서의 무응력조건이다.

$$C_l^2 \frac{\partial \eta}{\partial y} + (C_l^2 - C_t^2) \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \text{ at } y = 0 \quad (4)$$

이 경우 Rayleigh 파동과 마찬가지로, 변위는 중파 성분과 횡파 성분의 합인데, 경계 조건에 따라서 중파는  $x$  축과 평행이 아니며 횡파 역시  $x$  축과 수직이 아니다.

식 (2)를 풀기 위하여 변위를 기울기 (gradient) 방향 성분과 접선 (tangent) 방향 성분으로 분리하는 표준적인 방법을 사용한다. 다음을 만족하는 스칼라 함수  $\Phi$  및  $\Psi$  를 도입하자.

$$\zeta = \frac{\partial \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \Psi}{\partial y}; \quad \eta = \frac{\partial \Phi}{\partial y} - \frac{\partial \Psi}{\partial x}.$$

위 식을 식 (2)에 대입하면 다음 식들을 얻는다.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - C_l^2 \Delta \Phi = 0 \text{ and } \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} - C_t^2 \Delta \Psi = 0$$

위 식의 해는 다음과 같다.

$$\Phi = \left[ A_1 \frac{\sinh(\alpha ky)}{\alpha k} + B_1 \cosh(\alpha ky) \right] e^{ik(x-vt)},$$

$$\Psi = \left[ A_2 \frac{\sinh(\beta ky)}{\beta k} + B_2 \cosh(\beta ky) \right] e^{ik(x-vt)}$$

$$\alpha = [1 - (V/C_l)^2]^{1/2}, \quad \beta = [1 - (V/C_t)^2]^{1/2} \text{이다.}$$

식 (3), (4)의 경계조건을 이용하면 계수  $A_1, A_2, B_1, B_2$ 에 관한 제차방정식 (homogeneous equation) 을 얻는데, 계수가 모두 0이 되어 무의미한 해 (trivial solution)를 갖지 않도록 연립방정식의 행렬식이 0이 되는 조건으로부터 다음과 같은 특성방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \left[ 2 - \left( \frac{V}{C_l} \right)^2 \right] \left[ \cosh(\alpha kH) \cosh(\beta kH) - \frac{\sinh(\alpha kH) \sinh(\beta kH)}{\alpha \beta} \right] \\ & + 4 \left[ \cosh(\alpha kH) \cosh(\beta kH) - \alpha \beta \sinh(\alpha kH) \sinh(\beta kH) \right] \\ & = 4 \left[ 2 - \left( \frac{V}{C_l} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (5)$$

$H \rightarrow \infty$  일 때, 이 식은 무한매질에서 자유표면을 따라 전파되고 깊이가 방향으로서는 지수함수적으로 감쇠되는 Rayleigh 파동의 특성방정식이 된다.

$$\alpha^2 = 1 - \left( \frac{V}{C_l} \right)^2 \left( \frac{C_l}{C_t} \right)^2 = 1 - \left( \frac{V}{C_l} \right)^2 \frac{1-2\sigma}{2(1-\sigma)} \text{이고, 포물}$$

선함수의 인수  $kH = \frac{2\pi H}{\lambda} = \frac{\omega H/C_t}{V/C_l}$  이므로, 위 식

(5)를 만족하는  $V/C_l$  와  $\omega H/C_t$  사이의 관계를 얻을 수 있다. Gad-el-Hak 등<sup>(8)</sup>은 비압축성 ( $\sigma = 0.5$ ) 및 비점성손실( $\mu = 0$ )의 이상화된 단순한 경우에 대하여 해를 구한 바 있다. Fig. 2 는 그보다 더욱 일반적인 경우의 해로서 Poisson 계수가 변화할 경우를 나타내고 있다. 각 mode 는 세 개의 부분으로 나뉘는데, 첫 번째  $\omega H/C_t \gg 1$  일 때의 Rayleigh 파동 ( $V/C_l < 1$ ), 두 번째 천이영역 ( $1 < V/C_l < [2(1-\sigma)/(1-2\sigma)]^{1/2}$ ) 및 세 번째 Fig. 2 점선 ( $V/C_l = \sqrt{2(1-\sigma)/(1-2\sigma)}$ ) 윗부분의 장파영역이다.

비압축성 물질인  $\sigma = 0.5$  일 경우(Fig. 2 실선)에는 세 번째 장파 영역은 존재하지 않는다. 첫 번째 영역에서는 정해진 주파수에서 전파속도가 가장 낮다. 주파수가  $\omega H/C_t \approx 1.8$  이하가 될 때에는 전파속도가 급격히 증가하여  $\omega H/C_t < 1.5$  에서는 진동이 없어질 것으로 예측된다. 주파수가 증가하면서 주파수 간격  $\omega H/C_t \approx 4.45$  으로 고차 mode 가 나타난다. 이는  $\beta$  가 허수가 되면서 포물선 함수가 삼각함수가 되기 때문이다. 압축성

이 있는 일반적인 물질에 있어서는 보다 복잡한 상황이 전개된다. 예를 들어  $\sigma = 0.45$  (Fig. 2의 파선)의 경우 1차 및 2차 mode에서는 점선  $V/C_1 = \sqrt{2(1-\sigma)/(1-2\sigma)}$  윗 쪽으로 장파영역이 불연속적으로 출현한다. 4차 mode 에서도 같은 양상이 나타나는데 반하여, 3차 mode 의 윗부분은 포물선형을 갖는다.

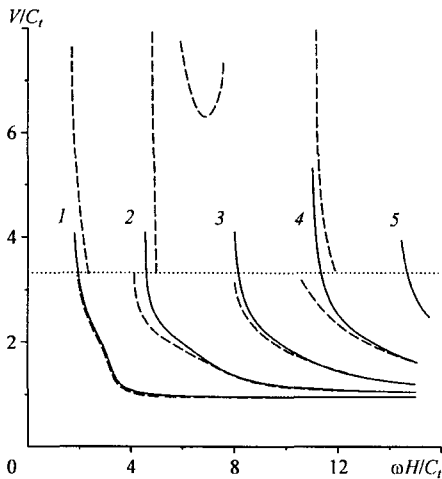


Fig. 2 Wave velocity dispersion curves,  $\sigma = 0.5$  (solid lines), 0.45 (dashed lines).  $V/C_1 = \sqrt{2(1-\sigma)/(1-2\sigma)}$  (dotted line). The digits correspond to numbers of oscillation modes

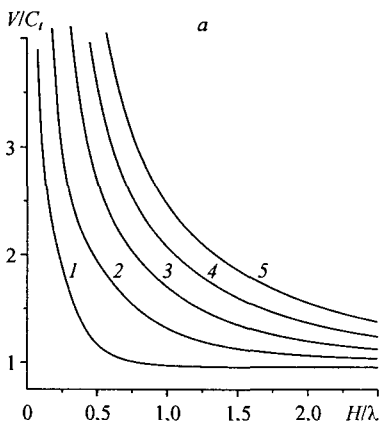


Fig. 3 Low-velocity part of dispersion curve for wave velocity, the first oscillation mode at  $\sigma = 0.5$  (1), 0.4(2), 0.3(3), 0.2(4), 0.1(5)

실질적인 응용 측면에서 1차 기본 mode가 가장 중요하다. 보통 유동벽면의 특성은 점탄성 물성치 (강성 계수 및 손실 계수의 주파수 특성) 혹은 파동특성치 (파동 전파속도 및 감쇠계수) 로서 나타낼 수 있는데, 실험결과와의 비교를 위해서 파동 특성을 무차원변수  $H/\lambda$  의 함수로 나타내는 것이 유용하다. Fig. 3 은 첫 번째 mode 저속 영역 (Rayleigh 파동)에서 파동전파속도의  $H/\lambda$  에 따른 변화를 보여주고 있다. 파동전파속도는 Poisson 계수에 따라서 변화하며 서로 다른 Poisson 계수에 대하여 유사한 형상을 보이고 있다.  $H/\lambda$  가 감소할 때 이들 곡선은  $V/C_1 = \sqrt{2(1-\sigma)/(1-2\sigma)}$  에 의하여 제약되어 더 이상 증가하지 않으며,  $H/\lambda$  가 증가할 때 Rayleigh 점근선  $V/C_1 \approx 0.141\sigma + 0.885 (\sigma > 0.3)$  에 접근한다.

Fig. 4는 유동벽면 표면( $y = 0$ )에서의 1차 mode 의 수직 방향 변위와 수평 방향의 변위의 비를 도시하고 있다. 고속 및 저속부의 분산 curve 상에서 두 개의 최대값이 발견된다. 수직 방향의 변위는 수평 방향의 변위보다 위상차  $90^\circ$  앞서서 나타나고 공진을 거치면서 위상차는  $180^\circ$  로 변화한다. Fig. 4 우측에 도시된 저속 영역파동에서는 일부의  $\sigma$  값에 대해서만 공진 peak 가 관찰된

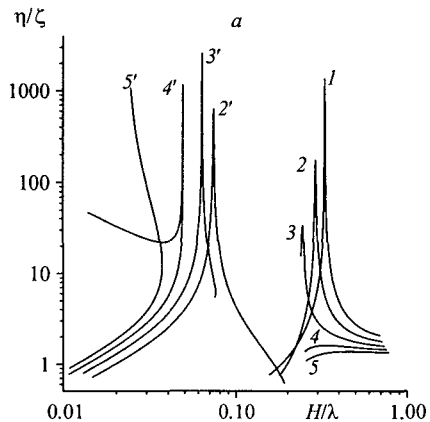


Fig. 4 Ratio of the vertical to horizontal displacement on the interface of coating, the first oscillation mode at  $\sigma = 0.5$ (1), 0.4(2), 0.3(3), 0.2(4), 0.1(5) (number with a stroke is a high-velocity part of mode)

다. peak가 나타나는 공진주파수와 Poisson 계수  $\sigma$  는  $f_0 \approx \frac{C_t}{\pi H} (\sigma + 1.11)$  의 관계를 보이는데 이는 다음 절에서 설명할 파동 전파 해석에 따른 공진주파수 예측치의 변화를 나타낸다.

변형 파동의 내부 구조는 점탄성층 두께 방향으로의 변형 파동의 분포를 조사함으로써 알 수 있다. 1차 공진 mode로부터 3차 mode까지의 분포를 Fig. 5에 도시하였다 ( $\sigma = 0.5$ ). 국소변형이론에 근거한 해석에서 각 변형 mode의 형상은 삼각함수 형상으로 주어지나, 특히 수직방향 변

위[Fig. 5(a)]의 경우 삼각함수로부터의 이탈이 두드러지게 나타난다. 본 연구에서의 유한매질에서의 2차원해석은 국소변형해석과 무한매질에 있어서의 Rayleigh 파동의 중간에 위치하며 그러한 경향은[Fig. 5(a)]에서 쉽게 찾을 수 있다.

각 mode의 진폭을 무차원화하여 유동벽면 자유 표면에서의 크기를 1로 맞추었다. 모든 수직 및 수평 mode에 있어서, 바닥면에서는 구속 조건이 작용하여 진폭은 0이다. 수직 방향 mode를 도시한 [Fig. 5(a)]를 보면, 1차 수직 mode는 1/4 파장이며 표면에 이르기까지 단조증가, 표면에서 최대가 된다. 2차 수직 mode는 3/4 파장으로  $0.3 < y/H < 1$  에서 1차 mode와 반대 위상인 음의 변위이고 나머지 4분의 1파장만 양의 변위를 갖는다. 2차 수직 mode의 최대 변위는  $y/H \approx 0.58$ 에 위치하는데 자유표면에서의 변위보다 7.5% 크다. 3차 수직 mode는 5/4 파장만큼의 분포를 보이고 있으며 차수가 늘어날 때마다 반파장씩 더해지는 것을 알 수 있다.

공진주파수와 다른 주파수의 경우의 진폭 분포를 Fig. 5 a 에 점선으로 표시하였다. 주파수가 1차 공진주파수의 절반인 경우 수직 방향 변위는 거의 선형으로 나타난다. 또한 1차 공진주파수보다 커지는 경우에는 최대 변위 지점은 자유표면 안쪽에 형성된다. Rayleigh 파동의 특징적인 로그 분포는  $H/\lambda = 30$  정도의 큰 값에서 관찰된다.

수평 방향 mode는 [Fig. 5(b)]에 나타내었는데, 바닥면 및 자유표면 양단에서 변위는 공통적으로 0이다. 1차 수평 mode는 1/2 파장으로 최대 변위는  $y/H \approx 0.54$ 에 위치한다. 2차 수평 mode는 1 파장이지만 비대칭적인 크기를 보이는데, 바닥면 쪽의 반파장은 자유표면 쪽의 반파장보다 그 크기가  $\sqrt{2}$  만큼 작다. 수평 mode 역시 차수가 늘어날 때마다 반파장 씩 더해진다.

동적 강성계수  $\hat{E} = E(1 + i\mu)$ 로 특징되는 점탄성 재질로 채워진 무한 매질에서 전파되는 평면파  $\xi \sim \xi_0 e^{i\omega(t-x/V)}$ 에서, 점성 손실에 의한 파장의 변화 및 감쇠 특성은 다음과 같다.

$$\xi = \xi_0 \exp \left[ i\omega \left( t - \frac{x}{\sqrt{E/\rho}} \sqrt{\frac{\sqrt{1+\mu^2}+1}{2(1+\mu^2)}} \right) \right] \exp \left[ -2\pi \frac{x}{\lambda} \sqrt{\frac{\sqrt{1+\mu^2}-1}{\sqrt{1+\mu^2}+1}} \right]$$

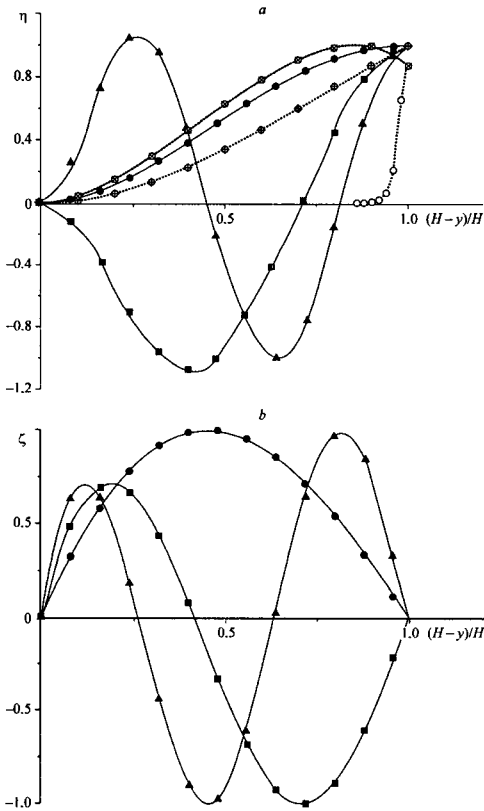


Fig. 5 Profiles of vertical (a) and horizontal (b) displacements.  $\sigma = 0.5$ . Solid lines : the first (●), second (■), third (▲) resonant modes

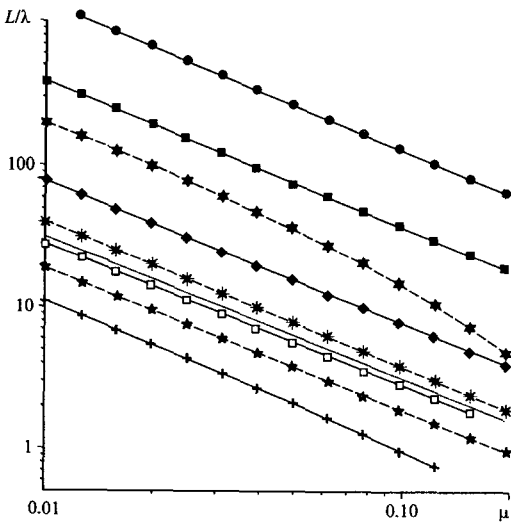
Dashed lines : half of the first resonance frequency (⊕), double of the first resonance frequency (⊗), for Rayleigh waves (○) ( $H/\lambda = 30$ )

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{2(1+\mu^2)}{\sqrt{1+\mu^2}+1}} \approx \lambda_0(1+3/8\mu^2) \quad (\mu < 0.5)$$

여기에서  $\lambda_0$  는 점성 감쇠가 없을 때의 파장이  
다. 감쇠거리  $L$  은 점성에 의하여 파동의 진폭이  
초기 진폭 대비의  $1/e$  로 감소하기까지의 진행  
거리인데, 다음과 같이 주어진다.

$$L = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{\sqrt{1+\mu^2}+1}{\sqrt{1+\mu^2}-1}} \approx \frac{\lambda}{\pi\mu} \quad (\mu < 0.5)$$

무한 매질이 아니라 유한한 두께를 지닌 점탄  
성층에 대하여도 감쇠 계수는 유사하게 정의될  
수 있다. Fig. 6에는 감쇠계수 대 파장의 비  
 $\frac{L}{\lambda} = \frac{1}{2\pi} \frac{Re(V/C_i)}{Im(V/C_i)}$  를 첫번째 고유 mode에 대하



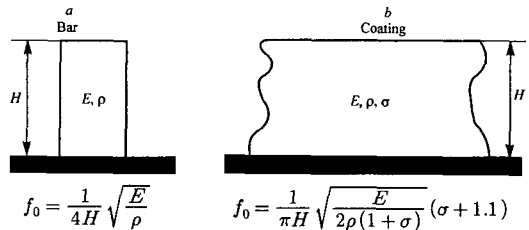
**Fig. 6** Wave decay as function of the loss tangent for coating material. Solid lines: low-velocity part of the first mode at  $\sigma = 0.5$  at the frequency : + resonance ( $\omega H/C_i = 3.22$ ),  $\square$  half resonance ( $\omega H/C_i = 2.5$ ),  $\blacklozenge$  twice ( $\omega H/C_i = 4.35$ ),  $\blacksquare$  triple ( $\omega H/C_i = 6.1$ ),  $\bullet$  quadruple ( $\omega H/C_i = 8$ )  
Dashed lines : high-velocity part of the first mode on resonant frequencies at  $\sigma = 0.4$  ( $\star$ ), 0.3 ( $\ast$ ), 0.25 ( $\circ$ ),  $\omega H/C_i = 3.22$  (+), 2.1 ( $\blacktriangle$ ), 2.18 ( $\blacktriangleright$ ), 2.2 ( $\circ$ ),  $H/\lambda = 0.074$  ( $\blacktriangle$ ), 0.63 ( $\ast$ ), 0.055 ( $\circ$ )  
Dotted line for infinite space

여 도시하였다. Fig. 6에 도시된 감쇠계수가 작을  
수록 감쇠가 강하게 일어나는 것이다. 감쇠계수  
는 공진주파수에서 가장 작고, 공진주파수 외의  
주파수(Fig. 6의 실선)에서의 감쇠거리는 무한 공  
간에서의 감쇠거리 (Fig. 6의 점선) 보다 커진다.  
손실 계수가 커질수록, 감쇠는 강하게 일어나고  
(감쇠거리 감소),  $\mu = 0.1$ 의 경우에는 한 파장 정  
도에서 진폭은  $1/e$  로 줄어든다.

Fig. 6의 파선은 Poisson 계수가 0.5가 아닌 경  
우, 1차 mode의 고속영역 에서의 감쇠계수를 보  
이고 있다. 저속 영역과 마찬가지로, 감쇠는 비압  
축성 ( $\sigma = 0.5$ ) 인 경우 가장 크고,  $\sigma$  가 증가할  
수록 감쇠는 약화된다 (감쇠계수 증가). Fig. 6에  
도시된 경우들 모두 변형파의 파장이 유동벽면  
두께보다 훨씬 크기 때문에 감쇠가 거의 일어나  
지 않는 도파관(wave guide) 역할을 한다.

### 3. 유동벽면 변수의 최적화

점탄성층에서의 교란 전파 속도의 계산은 국소  
변형 모델과의 비교를 위한 출발점이 된다 (Fig.  
7 참조). 국소 변형 모델에서는 수직 방향의 변형  
파의 파장의 4분의 1과 점탄성층 두께가 같다는  
조건으로부터 공진주파수를 결정한다. 본 연구에  
서 제시된 새로운 기법에서는 국소 변형 모델과  
는 달리 Poisson 비가 중요한 역할을 한다. 고무  
와 같이 거의 비압축성인 재질( $\sigma \approx 0.5$ )에서 손  
실 tangent 가 0.1 이하인 경우를 예로 든다면, 국  
소 변형 모델은 공진주파수를 실제보다 15.6% 적  
게 예측하는데, 이는 실제 점탄성층의 두께는 공  
진이 일어날 때 변형파 파장의 약 1/3이 됨을 의  
미하며, Lee 등<sup>(9)</sup>의 실험결과와 잘 일치한다.



**Fig. 7** Calculation of resonant frequency by the model of coating with local deformation (a) and the calculation by the present model (b)

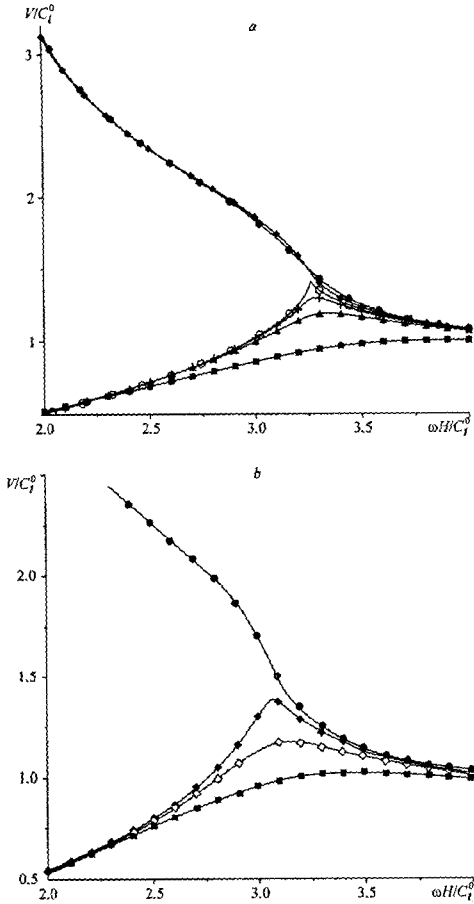


Fig. 8 Influence of viscous loss on wave velocity.  $\sigma = 0.5$  (a),  $0.4$  (b).  $\mu = 0.01$  (●),  $0.1$  (◆),  $0.13$  (○),  $0.15$  (+),  $0.2$  (▲, ◇),  $0.4$  (■)

점성 손실이 점탄성 층의 변형과의 파동 특성에 미치는 영향을 살펴보기로 하자. Fig. 8은 여러 손실 계수 값에서의 파동 속도를 보이고 있다. Fig. 8에 나타난 파동 속도 분산 곡선의 두 개의 분지로부터 식 (5)가 손실 계수  $\mu$ 에 대하여 비선형임을 알 수 있다. 비압축성 재질 [ $\sigma = 0.5$ , Fig. 8(a)]에서는  $\mu = 0.13$ 이 비선형성이 드러나는 임계값이다. 이 임계값은 Poisson 계수가 감소함에 따라 감소한다.[Fig. 8(b)에서  $\sigma = 0.4$ 일 때의 임계값은  $\mu = 0.1$ ]

앞 절에서 관찰한 것처럼, 유동벽면 표면에서의 수직/수평 방향파의 변위비는 특정 주파수에서 최대값을 갖는 공진 특성을 보이는데 그 peak 값은 손실 계수가 증가함에 따라 현저히 감소한

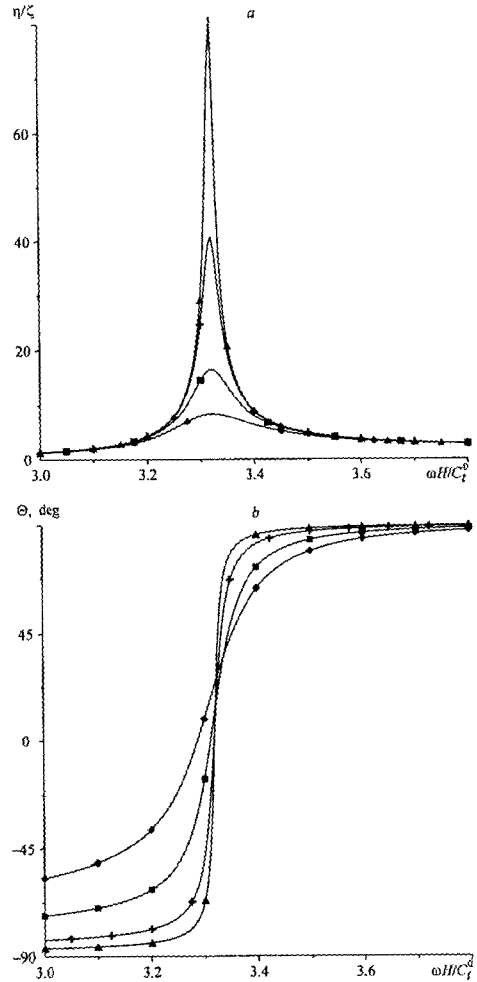


Fig. 9 Influence of viscous losses on the ratio of vertical-to-horizontal deformation (a) and phase shift between them (b).  $\mu = 0.01$  (▲),  $0.02$  (+),  $0.05$  (■),  $0.1$  (◆). Poisson coefficient equals 0.5

다. 예를 들어 [Fig. 9(a)]에서 볼 수 있는 것처럼, 공진점에서의 peak 높이는  $\mu = 0.1$ 일 때 약 8.5인데, 이는 무한 매질에서의 Rayleigh 파동의 값 (공진주파수보다 매우 큰 주파수에서) 보다 불과 네 배 큰 수치에 불과하다. 두 가지 방향 파동 성분 사이의 위상차[Fig. 9(b)]는 손실 계수  $\mu$ 가 작을 때에는 주파수가 감소하면서 공진점을 지나침에 따라  $90^\circ$ (Rayleigh 파동의 경우)로부터  $-90^\circ$ 로 변화하지만, 손실 계수  $\mu$ 가 커지면서  $-45^\circ$ 로 수렴한다.

점성 손실에 대한 공진주파수와 파동 속도의 의존도를 변화하는 Poisson 계수에 대하여 Fig. 10에 도시하였다. 공진주파수는  $\mu$  및  $\sigma$ 에 대하여 크게 변화하지 않는 반면[Fig. 10(a)], 전파 속도[Fig. 10(b)]는 크게 변화한다. 또한 수직/수평 파동 진폭비[Fig. 10(c)]는 점성 손실이 증가하고 ( $\mu$  증가) 비압축성 상태에서부터 멀어질수록 ( $\sigma$  감소), 감소하는 자연스러운 경향을 나타낸다.

응용 목적에서, 손실 계수가 작은 경우 ( $\mu < 0.1$ ), 다음의 두 근사적인 수식이 유용하다.

$$\omega_0 H / C_t = 2.244 + 1.96\sigma \tag{6}$$

$$V_0 / C_t = 2.826 - 4.5\sigma + 3.9\sigma^2 \tag{7}$$

점탄성 물성이 주파수에 대하여 변화하지 않는 물질의 경우, 파동의 전파속도는 식 (7)과 같이 유동벽면의 두께에 무관하고 물성치에 의하여만 결정된다. 또한 유동벽면의 두께에 따라 공진주파수가 결정된다. 실험적으로는 외부 가진력에 대한 변형의 크기의 비인 컴플라이언스 (compliance) 와 변형과의 전파 속도를 주파수의 함수로서 측정하는 것이 가능하다.

유동벽면에 의한 최대의 저항저감은 다음의 두 가지 조건이 충족될 때 기대된다. 첫 번째는 공간조건으로, 변형과의 파장과 난류압력변동의 길이 척도가 같을 때 유동벽면의 변형이 최대가 되는데 이는 파동의 전파 속도  $V$ 가 압력변동의 대류 속도  $U_c = 0.7 \sim 0.9U$ 와 같을 때 만족된다.<sup>(6)</sup> 두 번째의 조건은 시간조건으로, 유동벽면의 고유진동수에 해당하는 주기가 강한 압력변동을 일으키는 경계층 sweep/ejection 사건 사이의 주기  $50 < \zeta < 150$ 와 일치하여 ejection event의 upwash를 약화시킬 때 만족된다.<sup>(7)</sup>

위 두 조건을 정리하면 다음과 같다.

$$\text{공간 조건 : } V = U_c = 0.7 \sim 0.9U \tag{8}$$

$$\text{시간 조건 : } 0.04 < \omega v / u_r^2 < 0.12 \tag{9}$$

본 연구의 2차원 파동해석의 결과인 식 (6), (7)을 위 식 (8), (9)에 대입하고, Fox와 McDonald<sup>(10)</sup>에 의한 관계식  $c_f = \frac{2u_r^2}{U^2} = 0.0577 Re_\tau^{-1/5}$ 을 이용하여  $x = 1m$  일 때 주어진 파동의 전파 속도에서 저항 감소가 기대되는 유속의 범위 및 유동벽면의 최적 두께 범위를 Fig. 11과 같이 도시할 수 있다. 도시된 것처럼, 전파 속도가 빨라지면 유동벽면의 유효 두께가 줄어든다. 대체로 여기에서 예측되는 두께의 범위는 수 mm로서 실효성 있는 수치이며 저항 감소가 일어졌던 실험 조건<sup>(2,3)</sup>과 매우 유사하다.

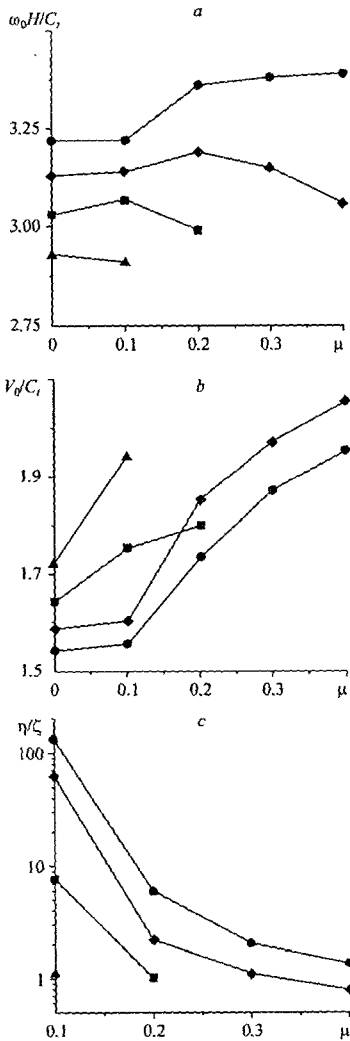


Fig. 10 Influence of viscous losses on the resonant frequency (a), wave velocity (b), and ratio for deformation components (c) for the main oscillation mode at  $\sigma = 0.5$  (●), 0.45 (◆), 0.4 (■), 0.35(▲)



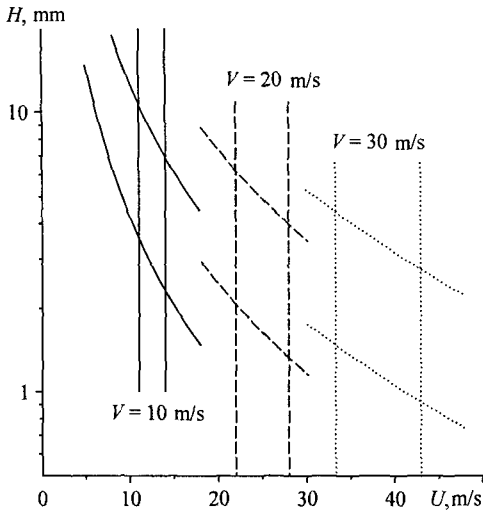


Fig. 11 Prediction for skin friction reduction by a compliant coating

#### 4. 결론

점탄성 재질로 구성된 유동벽면에서의 2차원 변형파의 파동 해석을 통하여 재질의 압축성 및 점성 손실이 파동의 전파속도, 파장 및 감쇠거리에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 연구는 유동벽면의 각 점이 바로 그 지점에서의 외부가진력에만 반응하여 변형한다는 기존의 국소 변형 모델을 보완한 것으로서, 보다 일반적인 경우에 있어서의 유동벽면의 1차 공진 주파수 및 파동의 전파속도를 예측하는 기준을 마련하였다. 본 연구의 결과 유동벽면 표면에서의 변형 진폭이 최대가 되는 조건은 유동벽면의 두께가 변형파 파장의 3배가 될 때임을 밝혔고, 이를 토대로 주어진 점탄성 물성치 조건으로부터 계산되는 파동 전파속도에서 최적의 저항 저감효과를 얻을 수 있는 유속의 범위를 예측할 수 있었다.

#### 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의한 연구결과를 정리한 것으로 위 기관의 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Kramer, M. O., 1957, "Boundary Layer Stabilization by Distributed Damping," *J. Aero. Sci.*, Vol. 24, No. 6, pp. 459~460.
- (2) Kulik, V. M., Poguda, I. S. and Semenov, B. N., 1991 "Experimental Investigation of One-layer Viscoelastic Coating Action on Turbulent Friction and Wall Pressure Pulsations," *Recent Developments in Turbulence Management (ed. K.-S. Choi)*, Kluwer, pp. 263~289.
- (3) Choi, K.-S., Yang, X., Clayton, B. R., Glover, E. J., Atlar, M., Semenov, B. N. and Kulik, V. M., 1997, "Turbulent Drag Reduction Using Compliant Surfaces," *Proc. Roy. Soc. London A*, Vol. 453, pp. 2229~2240.
- (4) Kulik, V. M., Rodyakin, S. V., Suh, S.-B., Lee, I. and Chun, H. H., 2005, "The Response of Compliant Coating to Non-stationary Disturbances," *Physics of Fluids*, Vol. 17, No. 8, pp. 088104 1~4.
- (5) Semenov, B. N., 1991, "On Conditions of Modelling and Choice of Viscoelastic Coatings for Drag Reduction," *Recent Developments in Turbulence Management*, Kluwer, pp. 241~262.
- (6) Kulik, V. M., Rodyakin, S. V., Lee, I. and Chun, H. H., 2005, "Deformation of a Viscoelastic Coating Under the Action of Convective Pressure Fluctuations," *Experiments in Fluids*, Vol. 38, No. 5, pp. 648~655.
- (7) Landau, L. D. and Lifschitz, E. M., 1986, "Theory of Elasticity," 3rd ed., Pergamon Press, Oxford, pp. 87~90.
- (8) Gad-el-Hak, M., Blackwelder, R. F. and Riley, J. J., 1984, "On the Interaction of Compliant Coatings with Boundary Layer Flows," *J. Fluid Mech.*, Vol. 140, pp. 257~280.
- (9) Lee, T., Fisher, M. and Schwarz, W. H., 1995, "Investigation of the Effects of a Compliant Surface on Boundary-layer Stability," *J. Fluid Mech.*, Vol. 288, pp. 37~58.
- (10) Fox, R. W. and McDonald, A. T., 1985, "Introduction to Fluid Mechanics," 3rd ed., John Wiley & Sons, pp. 447~449.