유연벽면 점탄성 소재의 광대역 동특성 계측 기법

바셀 서우디*, 안드레이 보이코**, 전호환*, 이인원†***

부산대학교 조선해양공학과*

Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences**

부산대학교 첨단조선공학연구센터***

Measurement Method of Broadband Dynamic Characteristics of Viscoelastic Material for Compliant Coating

Basel M. Seoudi*, Andrey V. Boiko**, Ho Hwan Chun* and Inwon Lee†***

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University*

Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences**

ASERC (Advanced Ship Engineering Research Center), Pusan National University*

Abstract

An improved method to measure the dynamic viscoelastic properties of elastomers is proposed. The method is based on the analysis of forced oscillation of a cylindrical sample loaded with inertial mass. No special equipment or instrumentation other than the ordinary vibration measurement apparatus is required. Typical measurement of the viscoelastic properties of a silicone rubber Silastic® S2 were measured over the wide frequency range from 10 Hz to 3 kHz under the action of wide region of deformation from $10^{-4}\%$ to 5%. It was shown that modulus of elasticity and loss tangent fall on the single curves when the ratio of load mass to sample mass changed from 1 to 20.

※Keywords: Compliant coating(유연벽면), Viscoelastic material(점탄성 물질), Dynamic characteristics(동특성), Modulus of elasticity(탄성계수), Loss tangent(손실계수)

1. 서론

고무를 비롯한 점탄성체는 진동저감이나 소음차

단 등의 목적으로 널리 사용된다 (Ferry 1980). 탄성계수 (modulus of elasticity) 및 손실계수 (loss tangent) 는 물질의 특성을 대표하는 물성치로서 제진구 및 흡차음재의 설계에 있어서 매우 중요하며 많은 실험적 측정 사례들이 보고된 바 있다. (Kim et al. 1999, Park et al. 2007).

접수일: 2007 년 10 월 8 일, 승인일: 2007 년 12 월 17 일

†교신저자: inwon@pusan.ac.kr, 051-510-2764

마찰저항 저항기법은 유동제어기법을 사용하여 저항의 주 발생요인인 난류구조를 제거·약화시키는 전략을 사용하는데 그 기법에 따라 공기공동 형성 (Jang and Kim 1999), 리블렛 (Koo et al. 2004), 미소기포 주입 (Kim et al. 2003), 폴리머 수용액 주입 (Kim et al. 2003), 국부냉각가열 (Yoon and Chun 2005) 등의 기법이 시도된 바 있다. 유연벽면 (compliant coating) 기술은 점탄성 재료를 이용하여 난류경계층 구조의 에너지를 흡수 혹은 감소시켜 저항을 저감하는 기술인데, 점탄성 동특성은 유연벽면의 저항저감 효과를 크게 좌우하는 것으로 보고되고 있다 (Lee et al. 2005, Bandyopadhyay et al. 2005, Kulik et al. 2006).

점탄성 동특성을 측정하는 실험적 기법은 강제진동법, 감쇠진동법 및 충격진동법이 있고, 강제진동법에는 비공진법과 공진법이 있다. 공진법은 시편의 공진주파수 부근에서 특성치를 얻는 방법으로 정확도가 높으나 주파수 대역이 국한된다. 유연벽면은 광대역 연속적 주파수 특성을 보이는 난류경계층의 변동압력과 상호작용하므로 전 주파수 대역에서 측정이 가능한 비공진법이 적합하다. 비공진법에 기초한 점탄성 동특성 측정 사례 역시 다수 보고된 바 있으나 (Woo et al. 2002, Ahn and Kim 1994, Chen and Rakes 1989, Smith et al. 1983) 대부분 가진력이 가해지는 축 방향의 변형만을 고려한 1 차원 모델에 기반하고 있다. 1 차원 모델에 기반한다면 점탄성층의 두께 대 크기의 비가 아주 크지 않을 경우 측면 변형을 무시할 수 없으므로 측정된 물성치를 형상계수 (Form factor) 에 의한 보정을 가해야 한다. 하지만 동적 변형과 관련된 형상계수는 정하중 형상계수와는 달리 구하기 매우 어렵다.

본 연구에서는 종래의 비공진 강제진동법을 보완하여 2 차원 파동 방정식의 수치해석과 연계된 새로운 실험적 기법을 제시하고자 한다. 본 방법은 광대역 임의 주파수에서 점탄성 물성치의 측정이 가능하며 일반적인 진동계측에 사용되는 표준장비를 이용하여 고안되었다. 실리콘 RTV 를 이용한 측정결과 10~3,000Hz 에 이르는 광대역에서 연속적인 탄성계수와 손실계수의 분포를 얻을 수

있었다.

$$\vec{\xi} = \zeta(r, z)\hat{e}_z + \eta(r, z)\hat{e}_r \quad (1)$$

2. 2 차원 탄성변형 모델

2.1 지배방정식 및 경계조건

Fig. 1 에 도시된 원통형의 점탄성 재료 시편을 생각하자. 이 시편의 직경은 R , 높이는 H , 질량은 m 이며 탄성계수 E , 손실계수 μ 그리고 포와송 비 σ 인 점탄성 재료로 구성되어 있다. 이 시료의 아랫면은 진동판에 윗면은 부하질량 M 에 부착되어 있다. 시료 밑면의 진동판이 진폭 a 및 주파수 ω 으로 진동할 때 윗면의 부하질량은 진폭 Za , 주파수 ω 및 위상차 θ 로 진동하게 된다. 시료 내부에서의 2 차원 진동변위는 다음과 같이 표현할 수 있다.

등방성 재료에 대한 이차원 탄성파동의 지배방정식은 다음과 같다(Landau and Lifschitz 1986).

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

$C_t^2 = \frac{E(1+i\mu)}{2\rho(1+\sigma)}$, $C_l^2 = \frac{E(1+i\mu)(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}$ 로 주어지는 횡파 및 종파의 전파속도이고 $\rho = \frac{m}{\pi R^2 H}$ 인 재료 밀도이다. 본 실험과 같이 조화진동 가진의 경우에 위의 지배방정식은 아래 식처럼 정리된다.

Fig. 1 Schematic diagram of sample

$$C_1^2 \left(r \frac{\partial \eta}{\partial r} - \eta + r^2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial r^2} + r^2 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial r \partial z} \right) + C_1^2 r^2 \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \zeta}{\partial r \partial z} \right) + r^2 \omega^2 \eta = 0,$$

$$C_1^2 \left(r \frac{\partial^2 \eta}{\partial r \partial z} + \frac{\partial \eta}{\partial z} + r \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} \right) + C_1^2 \left(\frac{\partial \zeta}{\partial r} - \frac{\partial \eta}{\partial z} + r \frac{\partial^2 \zeta}{\partial r^2} - r \frac{\partial^2 \eta}{\partial r \partial z} \right) + r \omega^2 \zeta = 0.$$

경계조건은 다음과 같다.

$$\eta = 0 \quad \text{at } z = 0, H \quad (3)$$

$$\zeta = ae^{i\omega t} \quad \text{at } z = 0 \quad (4)$$

$$\zeta = Zae^{i(\omega t - \theta)} \quad \text{at } z = H \quad (5)$$

$$\sigma_{rz} = 0 \rightarrow \frac{\partial \eta}{\partial z} + \frac{\partial \zeta}{\partial r} = 0 \quad \text{at } r = R \quad (6)$$

$$\sigma_{rr} = 0 \rightarrow (1 - \sigma) \frac{\partial \eta}{\partial r} + \sigma \left(\frac{\partial \zeta}{\partial z} + \frac{\eta}{r} \right) = 0 \quad \text{at } r = R \quad (7)$$

탄성계수 E , 손실계수 μ 는 실험적으로 측정된 강제진동의 상대진폭 Z 및 위상차 θ 를 만족하기 위하여 위 식 (1)~(7) 을 풀어나가는 역문제 (inverse problem) 로 얻어진다. 이 문제의 해를 얻기 위하여 부하질량의 관성력에 의한 압력이 시편 내부의 응력과 같아져야 하는 호환조건이 적용된다.

$$MZ\omega^2 e^{i(\omega t - \theta)} = 2\pi \frac{E(1 + i\mu)(1 - \sigma)}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)} \int_0^R \frac{\partial \zeta}{\partial z}(H, r) r dr \quad (8)$$

2.2 수치해석과정

앞 절의 지배방정식의 수치해를 얻기 위하여 2 차원 파동방정식을 계산영역을 $N_z \times N_r$ 개의 격자점에서 pseudospectral 근사화기법 (Canuto 등)을 사용하여 이산화하였다. 격자점의 좌표는 (r_i, z_j) , $r_i = R \cos\left(\frac{j\pi}{N_r}\right)$, $z_j = \frac{H}{2} \left[\cos\left(\frac{j\pi}{N_r}\right) + 1 \right]$, $i = 0, \dots, N_r$, $j = 0, \dots, N_r$ 과 같다. 격자점에서의 변위 $\eta(r_i, z_j)$ 및 $\zeta(r_i, z_j)$ 를 행렬 $(\eta)_{i,j}$ 및 $(\zeta)_{i,j}$ 로 표시하자. r 및 z 방향 1 차편도함수의 이산치는 pseudo-spectral 근사화를 사용하면 각각 $\bar{D}_r = D_{N_r}/R$,

$\bar{D}_z = 2D_{N_z}/H$ 으로 주어지는데 Chebyshev spectral 미분행렬 D_N 은 다음 식으로 정의된다.

$$(D_N)_{00} = \frac{2N^2 + 1}{6}, (D_N)_{NN} = -(D_N)_{00},$$

$$(D_N)_{jj} = \frac{-x_j}{2(1 - x_j^2)}, j = 1, \dots, N-1,$$

$$(D_N)_{ij} = \frac{c_i (-1)^{i+j}}{c_j x_i - x_j}, i \neq j, i, j = 1, \dots, N-1,$$

$$x_k = \cos(k\pi/N), k = 0, 1, \dots, N$$

$$c_i = \begin{cases} 2 & i = 0 \text{ or } N \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

축대칭 원통형 시편에서는 수치해석 영역을 Fig. 1 에 표시된 것처럼 $r \in [0; R]$ 로 잡을 수 있다. 또한 이산 편도함수 $\bar{D}_r$ 및, $\bar{D}_z$ 는 다음으로 대체된다.

$$(\bar{\bar{D}}_r)_{ij} = (\bar{D}_r)_{ij} + (\bar{D}_r)_{ik}, i, j = 0 \dots (N+1)/2, k = N+1-j$$

$$(\tilde{\bar{D}}_r)_{ij} = (\bar{D}_r)_{ij} - (\bar{D}_r)_{ik}, i, j = 0 \dots (N+1)/2, k = N+1-j$$

또한 2 계 편도함수의 이산화 행렬은 다음과 같은 텐서 곱으로 표현된다(Trefethen 1990).

$$\bar{D}_r = \bar{\bar{D}}_r \otimes I_z, \tilde{D}_r = \tilde{\bar{D}}_r \otimes I_z,$$

$$D_z = I_r \otimes \bar{D}_z,$$

$$\bar{D}_{rr} = \bar{\bar{D}}_r^2 \otimes I_z, \tilde{D}_{rr} = \tilde{\bar{D}}_r^2 \otimes I_z,$$

$$D_{zz} = I_r \otimes \bar{D}_z^2,$$

$$\bar{D}_{rz} = \bar{\bar{D}}_r \otimes \bar{D}_z, \tilde{D}_{rz} = \tilde{\bar{D}}_r \otimes \bar{D}_z$$

이산화된 지배방정식의 최종 형태는 다음 행렬방정식으로 정리된다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \eta \\ \zeta \end{pmatrix} = 0.$$

$$A = C_\ell^2 (r^2 \tilde{D}_{rr} + r \tilde{D}_r - I_r \otimes I_z) + C_t^2 r^2 D_{zz} + r^2 \omega^2 \quad (9)$$

$$B = (C_\ell^2 - C_t^2) r^2 \bar{D}_{rz}$$

$$C = (C_\ell^2 - C_t^2) (r \tilde{D}_{rz} + D_z)$$

$$D = C_t^2 (r \bar{D}_{rr} + \bar{D}_r) + C_t^2 r D_{zz} + r \omega^2$$

경계조건을 적용하기 위하여 위 식의 좌변 및 우변의 해당되는 행을 교체하면 비제차방정식이 만들어지는데 이를 역행렬을 써서 변위 $\eta(r_i, z_j)$ 및 $\zeta(r_i, z_j)$ 을 구할 수 있다. 이렇게 구한 변위가 호환조건인 식 (8) 을 만족하게 되는 탄성계수 E , 손실계수 μ 를 Gauss-Newton 반복해법으로 구하게 된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 점탄성 시료 제작 및 측정장치

본 연구에서는 실리콘 RTV 의 일종인 Silastic S2 RTV (Dow Corning 사) 을 측정대상으로 선정하였다. 원래 이 물질은 부가중합형 고무로서 형틀을 만드는 데에 널리 쓰이는 소재로서, 알려진 경도 및 연신율 등의 물성을 감안하여 유연벽면의 소재로 선정되었다. PDMS (Polydimethylsiloxane) 고분자 수지와 경화제를 혼합하면 부가중합 반응이 일어나 고무 형태로 경화된다. 시편의 제조 과정에서 수지와 경화제를 혼합할 때 기포가 발생하지 않도록 특별히 주의하였으며 불가피하게 발생된 기포를 제거하기 위하여 혼합액을 일정 시간 동안 진공 건조기 내에 보관하였다.

시편의 강제진동을 측정하기 위한 실험 장치의 개략도를 Fig. 2 에 도시하였다. Fig. 3 에는 측정장치 및 시편의 사진을 나타내었다. 점탄성 시편을 가진하기 위하여 함수발생기 Agilent 33220A 에서 발생된 정현파 신호를 파워증폭기 (Brüel & Kjær Type 2721) 로 증폭하여 가진기 (Brüel & Kjær Type 4808) 를 구동한다. 시편의 아래면 진동판과 얹힌 부하질량의 가속도는 각각 기준가속도계 (Brüel & Kjær Type 4514-002, 감도 48.35mV/ms^{-2}) 및 소형 부하가속도계 (Brüel & Kjær Type 4514-002, 감도 10.72mV/ms^{-2}) 로 측정된다.

두 가속도계로 측정된 신호는 컨디셔닝 증폭기 (Brüel & Kjær Type 2693)를 거쳐 상대진폭 Z 및 위상차 θ 가 측정된다. 원하는 주파수 대역 내에서 가진주파수를 변화시키면서 주파수의 함수로서 측정된 마다 Z 및 θ 를 저장하는데

Fig. 2 Schematic diagram of measurement setup

Fig. 3 Photos of the measurement setup; (a) whole system, (b) various samples, (c) reference and load accelerometers, (d) close-up of a sample

전체 측정과정은 PC 및 LabVIEW S/W 를 이용하여 제어된다.

본 방법의 정확도는 가속도계의 상대적인 정확도에 따라 좌우된다. 점탄성 시료 측정에 앞서 두 가속도계를 진동판 아래 위에 장착하고 가진하였을 때의 상대진폭 및 위상차를 Fig. 4 에 도시하였다. 그림에 나타난 것처럼, 10~ 4,000Hz 의 주파수 대역에서 두 가속도계의 진폭차이는 $\pm 0.5\%$, 위상차는 $\pm 0.4^\circ$ 이하로서 충분히 신뢰할 수 있음을 알 수 있다.

3.2 점탄성 동특성 측정결과

본 연구에서는 동일한 재료를 사용, 직경 및 부하질량을 변화시킨 다양한 시편을 제작하였다. 이들 시편으로부터 측정된 탄성계수 및 손실계수가 서로 일치한다면 본래의 목적대로 형상계수 등의 영향을 받지 않는 순수한 점탄성 물성치를 추출했다고 볼 수 있다.

Fig. 5 는 부하질량 대 시편질량의 비 M/m 을 변화시킨 경우의 결과를 도시하고 있다. 여기에 사용된 시편은 높이 $H=10.05\text{mm}$, 직경 $D=10.00\text{mm}$ 인 원통 3 개를 정삼각형 배열로 진동판 및 부하질량 사이에 부착한 것이다. Fig. 5 (a) 를 보면 두 개의 공진주파수가 관측된다. 첫번째 공진은 질량비 M/m 이 변화함에 따라 그 주파수가 변하는데 이를 파라메트릭 공진이라 칭한다. 반면 두번째 공진은 M/m 에 따라 변화하지 않고 대략 1.5kHz 에 위치하는데 이를 자연공진이라 한다. 공진이 일어날 때마다 Fig. 5 (b) 의 위상차는 대략 180° 씩 증가하는데, 여기에서도 자연공진주파수가 질량비에 무관함을 알 수 있다. Fig. 5 (c) 에 도시된 탄성계수는 질량비가 바뀌어도 불구하고 거의 하나의 곡선에 수렴함을 보이고 있다. 다만 위상차가 $180^\circ \pm 10^\circ$ 정도에서 약간의 편차를 보이고 있는데, 이는 위상차 측정 및 정의의 불확

Fig. 4 Calibration of accelerometer amplifier channel: (a) sensitivity, (b) phase shift

Fig. 5 Results for various mass ratios M/m ; (a) relative vibration magnitudes Z , (b) phase lag θ , (c) calculated modulus of elasticity E , (d) calculated loss tangent μ

Table 1 Parameters of variable mass ratio experiment

No of samples	Height, H (mm)	Diameter, D (mm)	Load mass, M (g)	Sample mass, m (g)	Mass ratio, M/m
3	8.08	8.00	3.90	1.85	2.11
3	10.05	10.03	9.15	3.60	2.54
1	20.08	20.00	15.80	7.15	2.21
1	30.00	29.90	50.70	23.80	2.12
1	39.90	39.87	153.0	56.39	2.56

Fig. 6 Results for various sample sizes $D = H$; (a) relative vibration magnitudes Z , (b) phase lag θ , (c) calculated modulus of elasticity E , (d) calculated loss tangent μ

실성에 기인하는 것으로 판단된다. Fig. 5 (d) 에 도시된 손실계수 또한 탄성계수처럼 단일한 경향을 보이고 있으나 그 편차는 커짐을 알 수 있다.

질량비 M/m 을 고정하고 시편의 크기를 변화시킨 시편의 측정결과를 비교하였다. 이 때 사용된 시편들의 특성 인자를 Table 1 에 정리하였는데 시편의 직경 D 와 높이 H 는 서로 같게 유지하면서 직경을 5 배로 변화시켰다.

이 경우의 측정결과를 Fig. 6 에 도시하였다. 시편의 직경이 변화하므로 파라메트릭 공진주파수

뿐만 아니라 자연공진주파수도 변화함을 알 수 있다. 탄성 계수 (Fig. 6 (c)) 는 시편의 크기가 변화해도 비교적 일관된 경향을 보이는 데 반하여, 손실계수 (Fig. 6 (d)) 의 경우는 100Hz 이하의 저주파 대역에서 시편간의 편차가 커지고 있다.

이러한 현상은 Fig. 5 의 질량비 실험보다 Fig. 6 의 직경변화실험에서 더욱 두드러진다. 그 원인을 변형율 (strain) 의 크기와 관련하여 고찰해보자. 시편 밑면에서의 변형율은 다음과 같다.

$$\varepsilon(\%) = \frac{U_{\text{low}}}{k_{\text{low}}(2\pi f)^2 H} \times 100 \quad (10)$$

여기에서 k_{low} 는 가속도계의 감도이다.

본 실험에서 주파수 변화폭은 10~3,000Hz 이므로 그에 해당되는 변형율 변동폭은 대략 10^4 배가 된다. 본 실험에 사용된 가진기 및 가속도계의 동적 대역 (dynamic range)은 10^3 로서 변형율의 변동폭에 미치지 못한다. 주파수를 변화시키면서 가진할 때 가진기의 진폭을 일정 변형율 조건 ($U/f^2 = \text{일정}$)으로 주지 못하고 일정 속도 조건 ($U/f = \text{일정}$)을 적용하였다. 따라서 고주파 및 저주파에서의 변형율 크기가 실질적으로 차이가 나게 된다. 또한 식 (10) 에서 변형율은 시편의 높이에 의해서도 결정되므로 Fig. 6 과 같이 형상이 변화할 경우 시편 간, 주파수에 따른 변형율의 차이는 더욱 커질 것으로 예측된다. 이와 관련하여 Fig. 7 에 변형율 크기에 따른 비선형 효과를 도시하였다. Fig. 7 (a) 의 탄성계수는 $\varepsilon \approx 0.5\%$ 까지 변형율의 영향이 거의 나타나지 않는 선형적인 거동을 나타내는 데 비하여, Fig. 7 (b) 의 손실계수의 경우는 변형율의 영향을 다소 받고 있음을 알 수 있다. 따라서 손실계수 측정에 있어서는 변형율을 일정하게 유지하는 것이 중요하다.

4. 결론

점탄성 재료의 동특성을 2 차원 파동방정식의 수치해석과 연계된 실험적 기법으로 조사하였다. 본 연구를 통하여 광대역 주파수 (10~3,000Hz) 및 넓은 변형 영역 ($10^{-4} \sim 5\%$) 에서 탄성계수 및

Fig. 7 Influence of strain on the viscoelastic properties for the sample $H=D=10\text{mm}$; (a) modulus of elasticity, (b) loss tangent; Dotted line – boundary of linearity.

손실계수를 측정할 수 있는 새로운 기법이 제시되었다. 측정된 탄성계수는 부하질량 및 시편 형상의 변화에 무관한 일관된 경향을 보였다. 손실계수의 경우, 변형률에 의존하는 비선형 거동의 영향으로 시편 간의 편차가 상대적으로 크게 나타났으나 고정도 계측기의 사용으로 극복될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문의 내용은 한국학술진흥재단의 지역대학 우수과학자지원사업(R05-2004-000-12151-0)의 연구결과를 정리한 것으로, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Ahn, T.-K. and Kim, K.-J., 2002, "Sensitivity Analysis for Complex Modulus of Viscoelastic

Materials by Non-resonance Method," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 176, No. 4, pp. 543–561.

- Bandyopadhyay, P.R., Henoch, C., Hrubes, J. D., Semenov, D.N., Amirov, A.I., Kulik, V.M., Malyuga, A.G., Choi, K-S. and Escudier, M.P., 2005, "Experiments on the effects of aging on compliant coating drag reduction," *Physics of Fluids*, Vol. 17, No. 8, pp. 085104 1–9.
- Canuto, C., Hussaini, M.Y., Quarterony, A. and Zang, T.A., 1988, "Spectral Methods in Fluid Dynamics," *Springer Series in Computational Physics*, Springer, Berlin.
- Chen, C.P. and Lakes, R.S., 1989, "Apparatus for Determining the Viscoelastic Properties of Materials Over Ten Decades of Frequency and Time," *Journal of Rheology*, Vol. 33, No. 8, pp. 1231–1249.
- Jang, J. and Kim, H., 1999, "On the Reduction of a Ship Resistance by Attaching an Air Cavity to Its Flat Bottom," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 36, No. 2, pp. 1–8.
- Kim, D-S., Kim, H-T. and Kim, W-J., 2003, "Experimental Study of Friction Drag Reduction in Turbulent Flow with Microbubble Injection," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 40, No. 3, pp. 1–8.
- Kim S-S., Cho, D-S. and Lee, M-W., 1999, "Optimum Design of Viscoelastic Layered Beam to Minimize Flexural Vibration," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 36, No. 1, pp. 90–98.
- Kim, H-T., Kim, D-S. and Kim, W-J., 2003, "Experimental Study of Friction Drag Reduction in Turbulent Flow by Polymer Solution Injection," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 40, No. 3, pp. 9–15.
- Koo, B.G., Yoon, H.S. and Chun, H.H., 2004, "Turbulent Flow Analysis and Drag Reduction

- by Riblet Surfaces," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 4, pp. 59-67.
- Kulik, V.M., Jung, K.H., Chun, H.H. and Lee, I., 2006, "Analysis of Wave Decay Characteristics of Viscoelastic Compliant Coating," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 30, No. 12, pp. 1155-1163.
 - Landau, L.D. and Lifschitz, E.M., 1986, "Theory of Elasticity," 3rd ed., Pergamon Press, Oxford, England.
 - Lee, I., Chun, H.H. and Kim, J., 2005, "The response of compliant coating to unsteady pressure fluctuations," Proceedings of the 2005 Spring Annual Meeting of Korean Association of Ocean Science and Technology Societies, pp. 820-825
 - Park, H-I, Shon, J-G., Min, C-H. and Bae S-R., 2007, "An Experimental Study on the Measurement of Elastic and Damping Coefficients of a Composite Material," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 1, pp. 26-31.
 - Smith, G.M., Beirman, R.L. and Zitek, S.J., 1983, "Determination of Dynamic Properties of Elastomers over Broad Frequency Range," Experimental Mechanics, Vol. 23, No. 2, pp. 158-164.
 - Trefethen, L.N., 1990, "Approximation theory and numerical linear algebra," in: Mason, J. and Cox, M. (Eds.) Algorithms for Approximation II, Chapman and Hall, London, pp. 336-361.
 - Woo, C.S., Kim, W.D., Kim, K.S. and Kwon, J. D., 2002, "An Experimental Study on the Dynamic Characteristics of Rubber Isolator," Elastomer, Vol. 37, No. 3, pp. 183-191.
 - Yoon, H.S. and Chun, H.H., 2005, "Drag Reduction in Turbulent Channel Flow with

Periodically Arrayed Heating and Cooling Strips," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 6, pp. 608-618.

< 바셀 서우디 >

< 안드레이 보이코 >

< 전 호 환 >

< 이 인 원 >