

고주파 영역에서의 MR 유체 특성연구 Material Characterization of MR Fluids at High Frequencies

박경미*·김재환**·최승복**·김경수***

Kyoung-Mi Park, Jae-Hwan Kim, Seung-Bok Choi and Kyung-Su Kim

Key Words : MR(Magnetorheological) fluids, complex shear modulus(복소전단계수), high frequency material characteristics(고주파수 물성).

ABSTRACT

MR(Magnetorheological) fluid composed of fine iron powders dispersed in silicon oil is utilized to many smart structures and devices because of its significant rheological property change by the application of an external magnetic field. When we deal with the shock wave attenuation of warship structures, we should be able to characterize the high frequency behavior of MR fluids. So far, however, many efforts have been focused on the material characterization of MR fluids at low frequencies below 100Hz. In this paper, the MR fluid property characterization at high frequency region is performed. An experimental setup based on wave transmission technique is made and the storage modulus as well as the loss modulus of MR fluids are found from the measured data of speed sound and attenuation. Details of the experiment are addressed and the obtained storage and loss moduli are addressed at 50kHz~100kHz.

1. 서론

고주파수의 충격파는 구조물에 치명적인 파괴를 유발시키거나 탑재장비에 악영향을 끼친다. 이러한 충격파를 감쇄 시키기 위해 지능 재료를 이용한 구조물의 연구가 이루어지고있다. 지능재료에는 압전재료, 자기변형재료, 형상기억합금(SMA), EAP(electro-active polymer), ER (Electro-rheological)유체, MR(Magnetorheological) 유체 등이 있으며, 이 중에서도 작동원리가 단순하며, 빠른 응답속도를 가지는 면에서 MR 유체는 ER 유체와 비슷한 유변학적 거동을 보인다. 하지만 MR 유체는 ER 유체에 비해 점성이나 항복전단응력 등의 물성에 있어서 매우 뛰어나고, 때문에 댐퍼나 마운트, 클러치와 같은 제어장치에 상용화되고있다.

1940년대 후반에 Jacob Rabinow 에 의해 연구된 MR 유체는 실리콘 오일에 미세한 철가루가 퍼져있는 형태로 자기장을 가함에 따라 점성유체에서 고체의 형태로 바뀌는 점탄성거동을 한다.⁽¹⁾ 이 유체를 구조물에 적용한다면, MR 유체의 전단변형의 원리를 주로 이용하기 때문에 이 유체의 정확한 복소전단계수를 아는 것은 구조물의 거동을 해석하는데 중요한 역할을 하지만 점탄성 재료의 복소전단계수를 구하는 것은 매우 어려운 일이다.

현재까지 저주파수에서는 MR 유체의 점탄성 특

성에 관한 연구는 있었지만, 대부분의 경우 100Hz를 넘는 고주파수에 관한 연구는 아직 수행되지 않았고,⁽²⁾ 이들 연구의 관심사는 제어장치에 상용하기 위한 연구가 중심이었으므로 응력, 변형률, 점도 그리고 전단비와 같은 물성들을 주로 다루었다.^(1,3) 또한 butyle 고무와 같은 점탄성재료에서 고주파수 영역에서의 역학적 특성을 파동의 전파를 이용한 연구도 있고, 이러한 실험이나 시뮬레이션에서는 투과계수와 반사계수를 이용하여 복소전단계수나 손실계수 등을 찾는 연구를 하였다.⁽⁴⁾

대부분의 점탄성재료는 유변학적 거동에 따른 항복점을 기준으로 pre-yield 영역과 post-yield 영역으로 나눈다. MR 유체 또한 pre-yield 영역에서 체인구조가 형성되어 선형적이고 탄성적인 거동을 보이고, post-yield 영역에서는 비선형의 점성 거동을 보인다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 파동의 전파를 이용하여 pre-yield 영역에서 고주파수의 MR 유체 특성을 연구하고자 한다. 주파수를 50kHz 부터 100kHz 까지 변화시키면서, 자기장과 입사각에 따라 MR 유체를 통과한 파동이 완전히 전파되는 조건을 시뮬레이션으로 얻고, 실험을 통해 저장탄성률과 손실탄성률을 구하고자 한다.

2. 실험원리

2.1 MR 유체의 점탄성 성질

MR 유체의 유변학적인 거동은 인가된 자기장에 따라 형성되는 입자의 체인구조에 의해 발생되며,

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과

E-mail : jaehwan@inha.ac.kr

Tel : (032) 872-7925, Fax : (032) 868-1716

*** 인하대학교 선박해양공학과

점탄성재료의 특성인 식 (1)과 같은 점탄성 거동을 보인다.

$$\tau = G^* \gamma \quad (1)$$

여기서, $G^* = G' + jG''$ 는 복소전단강성계수이다. 저장탄성률 G' 는 재료의 강성을 의미하며, 에너지 저장 능력을 나타내는 계수이다.

$$G' = \frac{C_L^2 \rho}{3} \quad (2)$$

여기서, C_L 은 종방향의 파동 속도이다.

손실탄성률 G'' 는 에너지의 감쇠 의미하는 손실 계수를 나타낸다.⁽¹⁰⁾ 저장탄성률(G')과 이론적인 투과계수(T)를 이용하여 (3)식으로부터 감쇠계수 α 를 구한다.

$$\alpha = \frac{\log(TA_1 / A_0)}{t} \quad (3)$$

여기서, T 는 투과계수이고, A_1 은 MR의 층이 있을 때 받은 신호의 최대 크기, A_0 은 MR의 층이 없을 때 받은 신호의 최대 크기이다.

$$G'' = G' \tan \phi = G' \tan\left(\frac{\alpha}{k}\right) \quad (4)$$

여기서, $k = \omega / c_l$ 은 파동 수(wave number)이다.

2.2 Layered media 에서 파동의 전파

파동의 전파를 이용하여 점탄성 재료의 고주파수 물성을 구할 때, 측정된 파동의 음속(speed of sound)과 파동감쇠는 중요한 요소이다. Fig.1은 파동의 전파특성을 이용하여 MR 유체의 음속과 감쇠특성을 측정하는 원리를 나타내고 있다. A점의 압전소자에 의해 보내진 펄스파가 유체를 지나 두께가 t 인 MR 유체 층을 통과하여 B점의 가속도계에 의하여 감지된다. 펄스파가 MR 유체 층에 수직으로 입사되고, 이 때, MR 유체의 파동속도 c 는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$c = \frac{c_w}{1 - \Delta t c_w \cos \theta_0 / t} \quad (5)$$

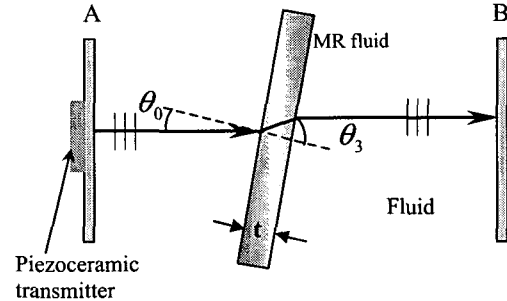


Fig. 1 Geometric relation between the Piezoceramic transmitter and sample

여기서, c_w 는 실리콘 오일의 파동속도이고, Δt 는 위 그림의 B점에서 감지된 신호의 시간차이를 의미하며, MR 유체의 층 없이 실리콘 오일만 채워 있을 때와 MR 유체 층이 존재할 때의 시간차이를 식 (5)에 대입하여 MR 유체의 파동속도를 구한다. 여기서 구한 파동속도를 이용하여 투과도가 높은 영역과 손실탄성률을 구하기 위해 (5)식에 대입하여 투과계수를 구한다. 투과계수(T)는 주파수와 입사각의 함수이고 Characteristic impedance의 형태를 사용하여 (6)식으로 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{(Z + Z_w)(Z_w - Z) \exp(-\phi) + (Z + Z_w)(Z - Z_w)}{(Z_w + Z)(Z_w + Z_w) \exp(-\phi) + (Z_w - Z)(Z - Z_w)} \quad (6)$$

여기서, Z_w 는 실리콘오일의 Characteristic impedance 이고, Z 는 MR 유체의 Characteristic impedance 이다. 또한 ϕ 은 입사각과 파동수의 함수로 MR 유체 층을 통과한 평면파의 위상을 의미한다.

본 실험은 펄스파를 사용했을 때, 50kHz~100kHz 사이의 주파수 영역에서는 입사각의 이동이 매우 작아 위상속도와 군속도가 거의 같기 때문에 군속도를 측정하는 방법을 사용하였다. 또한, MR layer 자체를 회전시킴으로써 입사각 θ_0 를 변화시키는 것과 같은 효과를 주었다. 만약 MR 유체의 파동속도가 유체의 파동속도보다 빠르다면, 표본으로 투과되는 각 θ_2 가 90°되는 임계각($\theta_0 = \theta_{cr}$)을 고려해야 하고, 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\theta_{cr} = \sin^{-1}(c / c_w) \quad (7)$$

3. 실험장치의 구성

3.1 실험장치 구성

(1) MR 유체 챔버 제작

고주파수 영역에서 파동의 속도를 측정하여 MR 유체의 특성을 얻기 위하여 Fig.2 과 같이 응력과 전파방향의 길이가 103mm 이고, 송신부와 수신부에 62 mm×38 mm× 0.3mm 크기의 알루미늄을 사용하여 MR 유체 챔버를 제작하였다. MR 유체로 고주파수의 종파를 보내기 위해 송신부에 원판형압전소자(PZT-4D)를 붙였다.

(2) MR 유체 layered 챔버 및 전자석⁽⁸⁾

MR 유체(Lord 사의 MRF-132LD)층을 만들기 위해 두께가 0.3mm 인 투명셀로판을 이용하여 50 mm×40 mm×10 mm 의 챔버를 만들고, MR 에 자기장을 가하기 위해 단면지름이 0.8mm 인 코일로 110 번 감긴 전자석 두개를 직렬로 구성하여 4A 의 전류를 입력하여 자기장을 인가해주었다. (Fig.3)

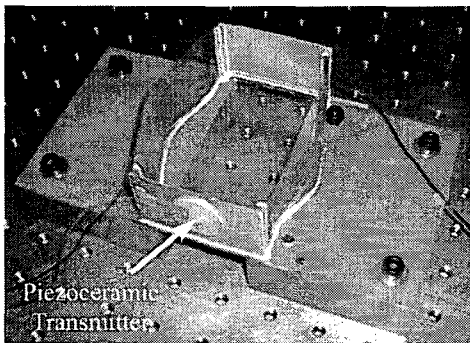


Fig. 2 Photograph of MR Fluid Chamber

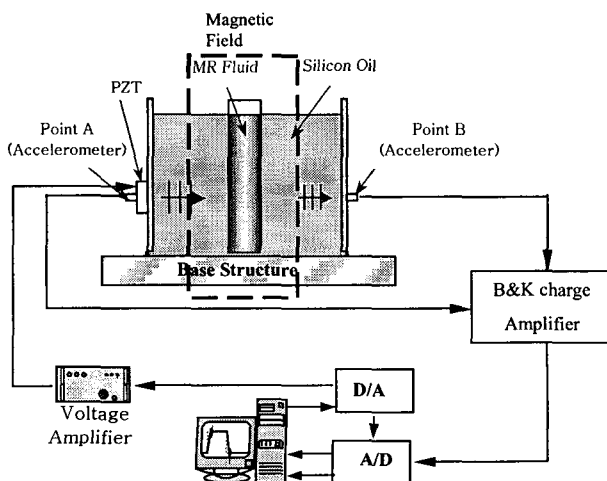


Fig. 3 Experimental Setup

3.2 Layer 막의 영향

MR 유체 layer 를 넣기 전, 투명셀로판 이용한 layer 로 인한 영향을 고려하기 위해 아래와 같은 실험장치에서 Fig.2 의 챔버에 실리콘 오일(30cs)만 채웠을 경우와 실리콘 오일을 layer 에 넣은 후, 이 layer 를 챔버에 넣었을 경우의 감도를 비교하였다.

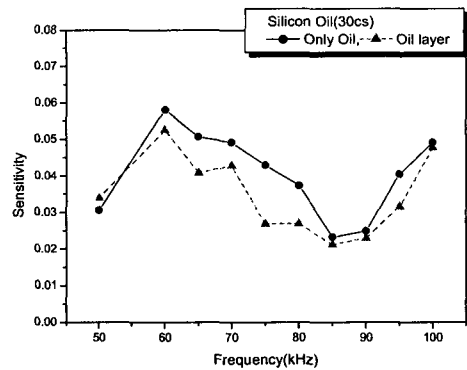


Fig 4. Without layer vs With layer

Fig. 4 에서, layer 가 있을 때는 layer 가 없을 때에 비해 감도가 전체적으로 낮아서 일치하지는 않지만, 60kHz 에서는 높고 85kHz 주위에서 낮아지는 경향은 비슷하다.

4. MR 유체의 물성 측정 실험

감도가 높은 주파수인 60kHz(Fig.4)로 5 개의 펄스파를 압전송신기를 통해 20Volt 로 가진 후, MR layer 를 통과한 파동이 수신부에 도달하는데 걸리는 시간차이를 측정하여 MR 유체의 파동속도를 구하고, 이로부터 저장탄성률을 구하였다.

4.1 자기장의 영향

전자석에 전류를 0A~5A 로 흘렸을 때 4, 5A 에서 자기장이 효과적으로 형성되므로 입사각이 0° 일 때, 0A 와 4A 에서 MR 의 특성을 실험하였다. 4A 의 전류를 가했을 때, 약 5%의 감소효과와 1 μs 정도로 미소하게 시간이 지연됨을 알 수 있다(Fig. 5).

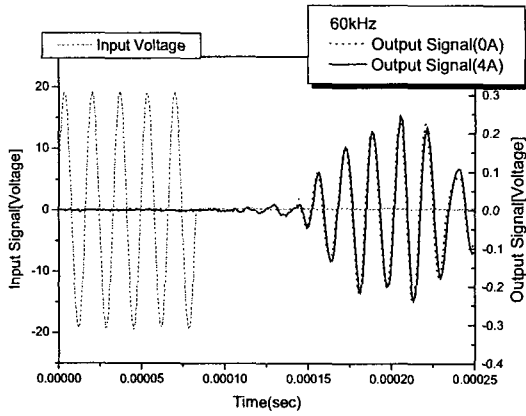
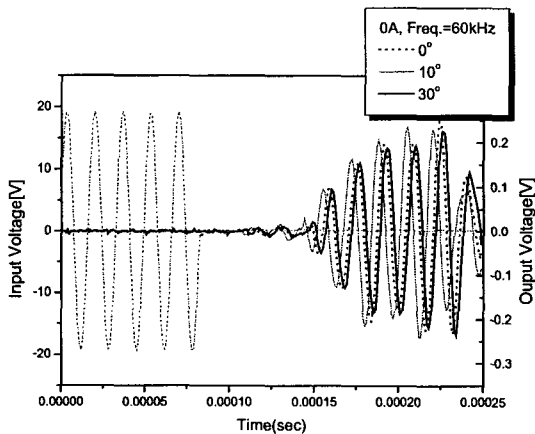
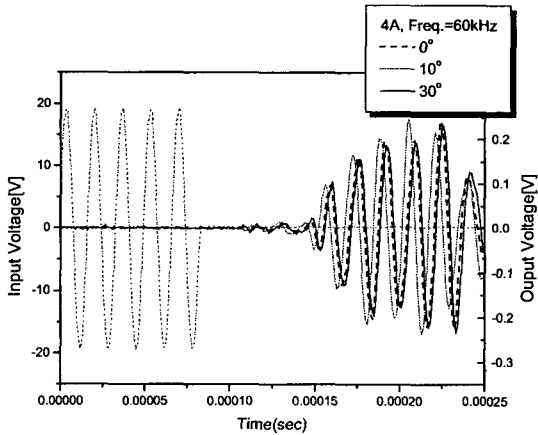


Fig. 5 Transmitted and received signals of MR chamber with magnetic field(0°)



(a)



(b)

Fig. 6 Transmitted and received signals of MR chamber with incidence angle

4.2 입사각의 영향

MR 유체가 들어있는 작은 챔버를 회전시킴으로써 입사각을 0°, 10°, 30°의 세가지 조건을 만들어 실험하였다. Fig. 5는 실험장치(Fig. 3)의 B 점에 신호가 최초로 감지되는 시간을 측정하여 얻은 그래프이다. 입사각이 10°, 30°의 경우에도 Fig. 5의 입사각이 0°일 때와 유사하게 자기장에 따른 큰 감소효과는 보이지 않았다. 또한 전류를 4A로 보내주었을 때와 않을 때를 비교하기 위해 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 10°일 때 신호의 응답이 크게 나왔는데, 이것은 이 영역에서 투과계수가 높은 구간으로 사료된다. Fig. 6으로부터 0°일 때, 밀도가 약 3055kg/m³인 MR 유체의 파동속도의 평균값을 약 1008 m/s로 얻었고, 밀도가 약 840kg/m³인 실리콘 오일(30cs)은 파동속도가 980m/s 이므로 입사각이 약 $\theta_{cr} = 41.397^\circ$ 로 존재한다.

Fig. 7은 입사각이 0~90°이고 주파수 영역이 10~100kHz 일 때, 투과계수와 반사계수를 구하여, 반사계수가 0, 즉, 입사파가 모두 투과되는 조건을 구한 시뮬레이션 결과이다.^(6,7) 주파수가 50~90kHz이고, 입사각이 10°~30°, 50°~70°부근에서 투과계수가 1에 가까우므로 MR 유체 층을 거쳐 도달한 입사파가 전부 투과됨을 보여준다. 따라서 시뮬레이션으로 구한 투과계수를 식(3)에 대입하여 손실탄성률을 구한다.

4.3 점탄성계수

Fig. 8은 MR 유체의 저장탄성률을 나타낸 것으로 자기장을 인가함에 따라 입사각이 0°일 때, 저장탄성률이 감소하는 경향을 보였으나 10°와 30°에서는 다소 증가했고, 입사각이 0°일 때, 모든 주파수영역에 걸쳐 가장 큰 값을 보였다. 또한 주파수가 증가함에 따라 저장탄성계수의 값이 조금 증가하는 경향을 보였다. Fig. 9는 앞에서 구한 저장탄성계수와 투과계수로부터 감쇠계수를 구하여 손실탄성계를 나타낸 것이다. 여기서 손실탄성계수는 자기장을 인가함에 따른 차이는 미소하게 나타났고, 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 손실탄성계수는 저장탄성계수와 반대의 개념이므로 Fig. 8의 저장탄성계수와 반대로 입사각이 30°일 때, 가장 높게 나타났고, 0°와 10°의 경우에는 거의 변화가 없었다.

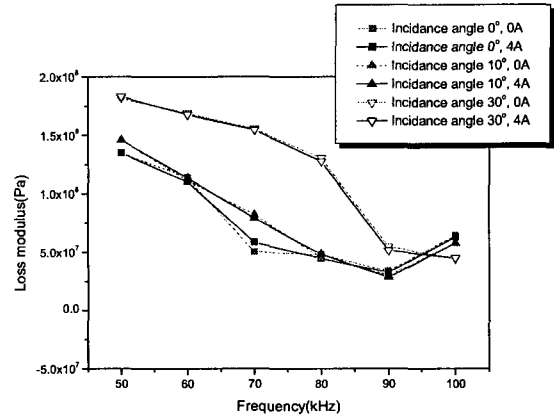
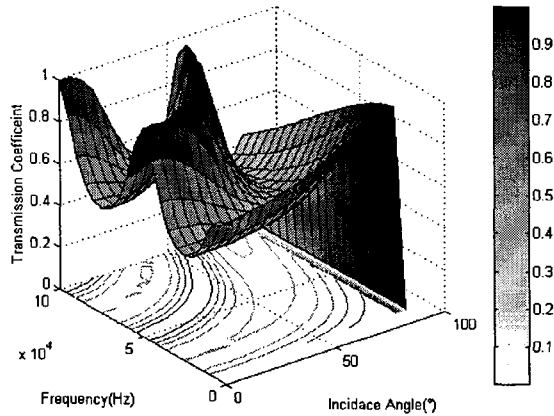


Fig. 9 Loss modulus of MR fluid

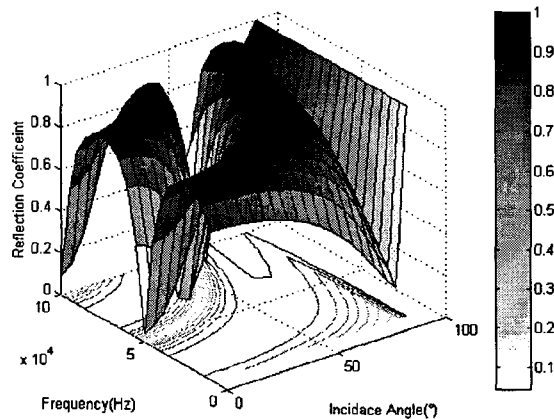


Fig. 7 Reflection and Transmission Coefficient (Silicon Oil - MR fluid - Silicon Oil)

5. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 자기장과 입사각, 주파수에 따라 지능재료인 MR 유체의 유변학적 고주파 물성을 실험적으로 고찰하였다. MR 유체 층이 하나의 layer 를 이루어 파동이 여러 layer 에 걸쳐 전파되는 모델의 시뮬레이션으로 투과계수를 구하였다. 고주파수에서의 MR 유체 물성을 구하기 위해, MR 유체 층을 지나는 파동의 전파를 통한 파동의 속도로부터 저장탄성률을 구하였고, 시뮬레이션으로부터 구한 투과계수를 이용하여 감쇠계수를 구한 후, 손실탄성률을 구하였다.

이 연구로부터 MR 유체 뿐만 아니라 고주파에서의 구하기 어려운 점탄성 재료들의 특성을 구할 수 있을 것이다. 앞으로 본 연구에서 구한 저장탄성률과 손실탄성률을 시뮬레이션에 적용하여 타당성을 입증하고, 본 실험에서는 파동속도를 실수값으로 가정했지만 시뮬레이션을 통해 실제의 복소 파동속도를 구할 계획이다.

후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-1999-00257)지원으로 수행되었음.

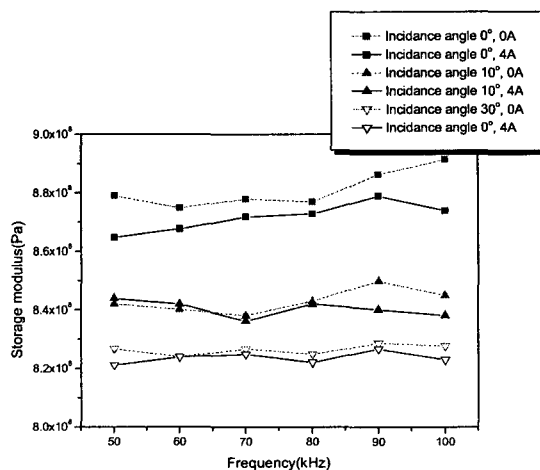


Fig. 8 Storage modulus of MR fluid

참고문헌

- (1) Jolly, M. R., Bender, J. W. and Carlson, J. D., 1999, Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.10, No. 1, pp.5~13
- (2) Li, W. H., Chen, G. and Yeo, S. H., 1999, Viscoelastic properties of MR fluids, *Smart Mater. Struct.*, Vol. 8, pp.460~468
- (3) Vekas, L., Rasa, M. and Bica, D., 2000, Physical Properties of Magnetic Fluids and Nanoparticles from Magnetic and Magneto-rheological Measurements, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 231, pp.247~254
- (4) Meglio, A. D. and Wang, L. S., 2000, A variational method for identificaion of viscoelastic parameters from experimental data, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 108, No. 6, pp.2746~2753
- (5) Weiss, K. D., Carlson, J. D., Nixon, D.A., 1994, Viscoelastic Properties of Magneto- and Electro-Rheological Fluids, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, pp.772-775.
- (6) Brekhovskikh, L. M. and Godin, O.A., 1990, *Acoustics of Layered Media I*, Springer-Verlag
- (7) Achenbach, J.D., 1990, *Wave propagation in elastic solids*, Elsevier Science
- (8) 강병우, 김재환, 최승복, 김경수, 2001, MR Insert 를 이용한 구조물의 응력과 저감, 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 4 호, pp.71~77
- (9) 김정엽, 정재민, 김재환, 최승복, 김경수, 2000, 충격과 차단을 위한 ER Insert 의 기초연구, 한국소음진동공학회논문집, pp.612~618
- (10) Wu, J., 1996, Determination of velocity and attenuation of shear waves using ultrasonic spectroscopy, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 99, No. 5, pp.2871~2875