

충격파 차단을 위한 ER Insert 의 기초 연구

° 김정엽*, 정재민**, 김재환**, 최승복**, 김정수***

A Study of the ER Insert for Reducing the Shock Wave

Jung-Yeob Kim , Jae-Min Jung , Jae-Hwan Kim , Seung-Bok Choi , Kyung-Su Kim

Abstract

The underwater explosion which has the high energy brings about the shock wave and the pulsating gas bubble. In general, structural vibration from the shock wave is more serious than the pulsating gas bubble. This shock wave may damage the important fragile structures and equipment in ship. This paper demonstrates that the shock wave propagating the structure can be reduced by ER inserts. The wave transmission of ER inserted beam is theoretically derived using Mead & Markus model, and the theoretical results are composed with the finite element analysis results. To experimentally verify the ER insert, ER insert in an aluminum plate is made and two piezoceramic disks are used as transmitter and receiver. Details of the experiment are addressed.

1. 서론

수중폭발은 높은 에너지를 갖는 현상으로서, 물속을 음속으로 전파해 가는 충격파를 발생시키고, 폭발 주변에는 맥동 가스거품을 생성시킨다. 이 때 충격파나 맥동 가스거품이 접수 구조물에 도달하면 구조물의 외압으로 작용하게 되는데, 충격파는 광대역 주파수 특성을 갖는 충격하중으로 작용하여 고차모드의 동적 천이 구조거동을 일으키게 되며, 맥동 가스거품은 일정 주파수를 갖는 반복하중으로 작용하여 저차 조화진동 모드의 구조거동을 일으켜서 선박과 같은 세장비가 큰 구조물은 휘핑(Whipping)을 일으키게 된다. 일반적으로

맥동 가스거품보다 충격파가 훨씬 큰 모멘텀을 구조에 전달하며 따라서 치명적 구조파괴나 기기 및 장비의 기능에 지장을 주게 된다.⁽¹⁾ 이와 같은 충격파를 능동적으로 차단 및 감쇄를 시킨다면 경제적인 이득은 물론 함정의 불필요한 중량을 획기적으로 감소시켜 전투능력을 크게 향상시킬 수 있다.

지능 구조물은 주위의 환경의 변화를 감지하여 이에 대처하는 거동을 하는 구조물로써 감지기와 작동기 그리고 적절한 제어가 구조물과 통합화된 시스템이다. 지능 재료는 압전재료, 형상기억합금, 자기변형재료, EAP(Electro-active polymer), 전기 유동유체(Electro-rheological fluid)⁽²⁾ 등으로 나눌 수 있으며, 이러한 지능재료는 구조물에 적절히 장착되어 외부신호에 따른 제어가 가능하다. 따라서 지능 구조물을 사용하여 수중폭발로 인한 선체 구조물의 충격파 전달을 차단 또는 감쇄할 수 있다.

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과

*** 인하대학교 선박해양공학과

본 연구에서는 전기유동유체를 구조물 내에 일정부분 삽입했을 때 충격파의 차단효과를 이론적으로 살피고, 시뮬레이션 및 실험과 비교하여 보고자 한다.

2. ER Insert 빔 모델

ER 유체에 전기장을 인가하게 되면 실리콘 오일과 같은 비전도성 유체안에 전도성 입자들이 체인을 형성하게 되어 마치 고무와 같은 점탄성(viscoelastic) 재질로 변하게 된다. 즉, 복소전단강성계수(complex shear modulus)를 갖는 유체가 되며, 이러한 ER 유체를 빔안에 삽입하게 되면 점탄성층을 형성하여 양쪽 탄성층의 면에 전단력을 가하게 된다. 세 개의 층이 표면에서 수직방향으로의 전단변형과 길이, 회전방향으로의 관성이 없으며 샌드위치 빔 전체가 오직 굽힘과 거동만을 일으킨다고 가정하면 다음과 같은 점탄성 샌드위치 빔의 모델(Mead & Markus model)을 얻어낼 수 있다.⁽³⁾

$$\frac{\partial^6 w}{\partial x^6} - g(1+Y)\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\bar{m}}{EI}\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} - g\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}\right) = \frac{1}{EI}\left(\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} - gP(x,t)\right)$$

$$\bar{EI} = \frac{1}{12}L_y(E_1h_1^3 + E_3h_3^3)$$

$$\bar{m} = L_y(\rho_1h_1 + \rho_2h_2 + \rho_3h_3)$$

$$g = \frac{G_2^*}{h_2}\left(\frac{1}{E_1h_1} + \frac{1}{E_3h_3}\right)$$

$$G_2^* = G_2 + iG_2' = G_2(1+i\beta)$$

$$Y = \frac{d^2L_y}{EI}\left(\frac{1}{E_1h_1} + \frac{1}{E_3h_3}\right)^{-1}$$

$$d = h_2 + \frac{1}{2}(h_1 + h_3) \quad (1)$$

여기서, E_1, E_3 는 양 바깥쪽 탄성층의 영률이고, ρ_1, ρ_2, ρ_3 는 각 층의 밀도이며, G_2^* 는 점탄성의 복소전단강성계수이다. h_1, h_2, h_3 역시 각 층의 두께를 나타내고 β 는 감쇠계수(loss factor), L_y 는 빔의 너비, d 는 양쪽 층의 각 중심간의 거리이며, w 와 p 는 각각 수직변위와 하중을 나타낸다.

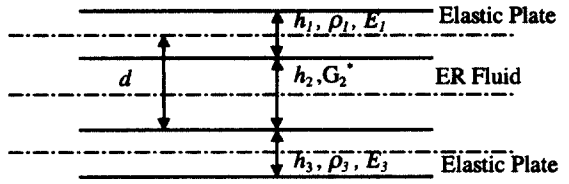


Fig 1. Cross section of ER sandwich beam

3. ER Insert 빔의 굽힘파동 전파

알루미늄과 같은 탄성체 빔 안에 ER 유체를 채워넣게 되면 파동전파 해석 시 ER Insert 부분은 점탄성 샌드위치 빔으로써 Mead & Markus model을 사용하여 해석하고, 양쪽의 탄성빔은 오일러베르누이 빔 모델로 가정하여 해석하게 된다. 중요한 것은 ER Insert 부분이 시작하는 위치와 끝나는 위치에서 경계조건을 얼마나 정확히 가정하는가에 따라 파동 전파의 정확한 수행이 가능하다. 다음은 각각 탄성체 빔과 ER 샌드위치 빔의 자유단에서의 수직변위의 일반해이다.

$$w(x,t) = \left(a_p^- e^{ikx} + a_N^- e^{kx} + a_p^+ e^{-ikx} + a_N^+ e^{-kx} \right) e^{i\omega t} \quad (2)$$

$$w(x,t) = \sum_{j=1}^3 \left(b_j^+ e^{-ik_j x} + b_j^- e^{+ik_j x} \right) e^{i\omega t} \quad (3)$$

(2) 식에서, $a_p^-, a_N^-, a_p^+, a_N^+$ 는 탄성체 빔의 각각 양과 음의 방향으로 전파하는 전파성 파동과 비전파성 파동의 진폭을 나타내고 (3) 식에서, b_j^+, b_j^- 는 ER 샌드위치 빔에서의 각각 양과 음의 방향으로 전파되는 파동의 진폭을 나타낸다. 각 식의 파동수(Wave number) k 는 지배방정식으로부터 유도

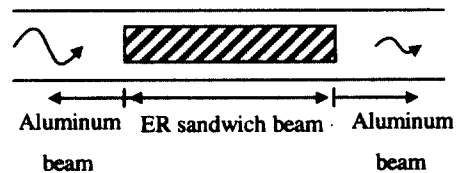


Fig. 2 ER Insert Beam

되며 (2) 식의 k_j 는 복소수형태이다. 따라서 ER 샌드위치 빔에서 파동감쇠가 일어난다.

각각 수직변위를 행렬로 표시하면, 다음과 같게 된다.

$$W_{EB} = [1 \ 1]a^+ + [1 \ 1]a^- \quad (4)$$

$$W_{ER} = [1 \ 1 \ 1]b^+ + [1 \ 1 \ 1]b^- \quad (5)$$

$$\text{단, } a^+ = \begin{bmatrix} a_p^+ \\ a_N^+ \end{bmatrix}, a^- = \begin{bmatrix} a_p^- \\ a_N^- \end{bmatrix}, b^+ = \begin{bmatrix} b_1^+ \\ b_2^+ \\ b_3^+ \end{bmatrix}, b^- = \begin{bmatrix} b_1^- \\ b_2^- \\ b_3^- \end{bmatrix}$$

Fig. 3은 ER Insert 빔의 각 불연속면의 파동 산란을 나타낸다. 우선, 불연속 면에서는 수직, 수평변위, 기울기, 전단력과 모멘트가 같으므로 경계조건은 다음과 같다.

$$\left\{ \begin{array}{l} w|_{a,1} = w|_{b,1}, \quad w|_{b,2} = w|_{c,2} \\ \frac{\partial w}{\partial x}|_{a,1} = \frac{\partial w}{\partial x}|_{b,1}, \quad \frac{\partial w}{\partial x}|_{b,2} = \frac{\partial w}{\partial x}|_{c,2} \\ u_x|_{a,1} = u_x|_{b,1}, \quad u_x|_{b,2} = u_x|_{c,2} \end{array} \right\} \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M|_{a,1} = M|_{b,1}, \quad M|_{b,2} = M|_{c,2} \\ Q|_{a,1} = Q|_{b,1}, \quad Q|_{b,2} = Q|_{c,2} \end{array} \right\} \quad (7)$$

여기서, $M = \frac{1}{EI} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$, $Q = -\frac{1}{EI} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3}$ 이다.

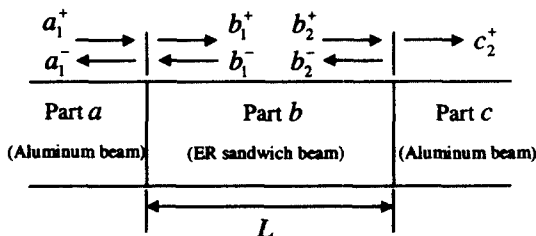


Fig.3 Wave scattering in ER Insert Beam

위의 경계조건으로부터 $a_1^+ = [1 \ 0]^T$ 일 경우, ER Insert를 투과한 굽힘파의 진폭 c_2^+ 를 도출할 수 있다. 즉, 단위 입사 굽힘파에 대한 투과 진폭인 전달계수(Transmission coefficient)를 구할 수 있으며 이러한 전달계수는 ER 유체에 인가하는 전기장과 입사 굽힘파의 주파수, ER Insert의 길이의 함수로 표현된다. 아래의 Fig. 4는 전기장과 ER Insert 길이를 변화시킬때 가진 주파수에 대한 전달계수이다.

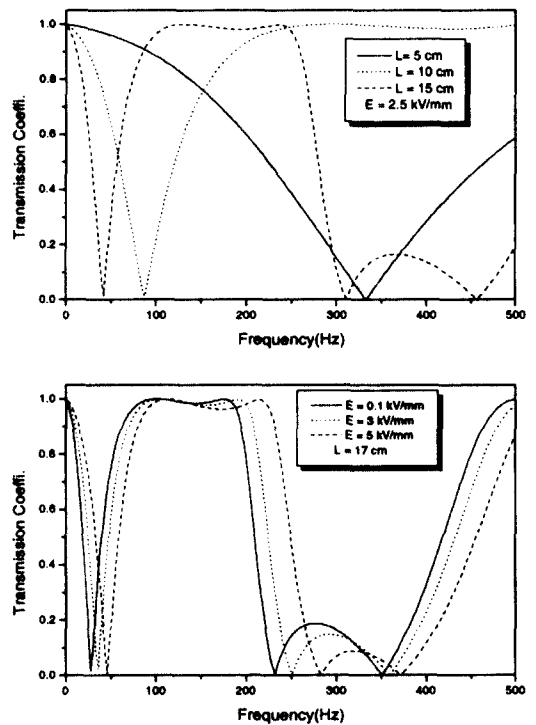


Fig. 4 Transmission coefficient according to variable electricfield and length of ER Insert

위의 그래프에서 알 수 있듯이 충격파가 구조물을 타고 굽힘파로 전파될 때 가진 주파수의 대역에 따라 적절한 전기장을 ER Insert에 인가함으로써 굽힘파를 차단, 또는 감소시킬 수 있다.

4. 유한요소해석

Mead & Markus 모델을 이용한 전달계수의 이론치의 타당성을 입증하기 위해 상용유한요소해석 프로그램인 ANSYS5.5 를 이용하여 ER Insert 의 굽힘파에 대한 전달계수를 구한 후 이론치와 비교하였다. Fig. 6 은 ER Insert 의 구간이 30 mm 일 경우 3kV/mm 의 전기장을 인가했을 시 가진 주파수에 대한 전달계수를 이론치와 FEM 해석치를 비교한 것이다. FEM 의 결과가 이론치와 완전히 일치하지는 않으나 경향은 비슷한 것을 알 수 있다. ER Insert 빔의 각 치수와 물성치는 Table. 1 과 같고, 알루미늄 빔에서의 감쇠는 무시하였다.

Table. 1 Specification of ER Insert Beam

Specification	Value
$h_1 = h_2$ (mm)	1
h_2 (mm)	3
$\rho_1 = \rho_2$ (kg/m ³)	2700
ρ_2 (kg/m ³)	1060
$E_1 = E_2$ (Gpa)	72.7
$\nu_1 = \nu_2$	0.34
L (mm)	30

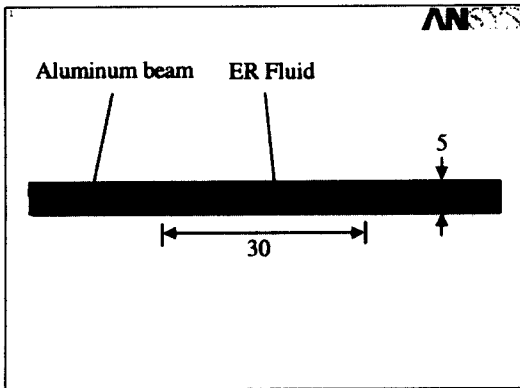


Fig. 5 FEM model of ER Insert Beam

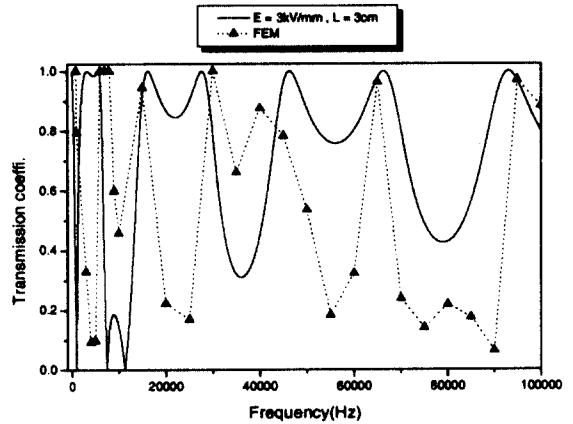


Fig. 6 Comparison of theoretical solution with FEM

5. ER Insert 의 충격파 차단 실험

ER insert 의 충격파 차단 효과를 측정 위하여 다음과 같은 실험을 구성하였다.(Fig. 7) 본 실험에서는 경계면에서 반사가 없는 충격파 전파 환경 조건을 만족시키기 위하여 두께가 1mm 이고 1200x900 인 알루미늄 판재에 2 개의 압전소자 (Morgan, PZT-4D)를 중심선에서 거리가 500 mm 가 되도록 부착시켜, 각각 송신과 수신 역할을 하도록 하였다. 한 원판형(Disk type) 압전소자에 펄스파를 보내면 파동이 다른 압전소자에 도달하여 신호가 수신되며 또한 알루미늄 판재의 각 모서리로부터 반사된 반사파가 이어서 검출되게 된다. 따라서 유효한 신호는 펄스파를 보낸 후 처음으로 잡히는 신호이다.(Fig. 9) 압전 트랜스듀서에서 신호를 주고 받을 때 가장 먼저 해야 할 것이 트랜스듀서의 공진주파수이다. 우선 시스템의 공진주파수를 해석을 위해 임피던스 해석기(HP, 4192A Impedance Analyzer)를 이용하여 임피던스를 측정하여, 공진주파수가 약 97 kHz 임을 확인하였다(Fig.8).

충격파 실험에 앞서 압전 트랜스듀서의 성능을

알아보기 위해, Fig. 7의 실험장치로부터 PC에서 펄스파를 생성하여 DSP 보드와 고전압 증폭기를 거쳐 20 Volt로 증폭 후 압전 송신기(Transmitter)에 보낸다. 압전 송신기가 진동하여 평판에 파동이 발생하면 이 파동은 사방으로 전파되며 압전 수신기(Receiver)에 일차 신호가 감지된다. 감지된 신호는 다시 DSP 보드를 거쳐 컴퓨터에 나타나게 된다. 따라서 보낸 신호와 감지된 신호를 비교함으로써 압전 송신-수신기의 감도를 알 수 있다. 압전 송신기에서 20 Volt, 100 kHz로 5개의 펄스파를(0.5e-4 초) 주었을 때 응답을 Fig. 9에 나타내었다. 이론적으로 두께 1mm의 알루미늄 판에서 100kHz의 굽힘파가 500mm 떨어진 다른 한쪽 압전 소자까지 도달하는데 91.4 μ sec가 소요되며 이는 Fig. 9의 A점에 해당한다. 또한 굽힘파가 모서리에서 반사되어 다시 압전 감지기에 도달하는데 소요되는 시간은 189 μ sec이며 이는 Fig. 9의 B점에 해당한다. 따라서 이론치와 실험치가 잘 맞는 것을 알 수 있고 점 A와 점 B사이에서의 압전 수신기의 응답신호는 알루미늄 판재를 무한 평판이라고 가정했을 때의 응답과 같다고 볼 수 있다. Fig. 10은 충격파의 주파수를 변화 시켜 가면서 압전 수신기에서의 출력 전압과 송신기의 입력 전압과의 비율을 나타낸 것이다. 여기서 Burst 5,7,9는 펄스의 개수를 말한다. 공진 주파수 밖의 범위에서는 펄스갯수에 따른 변화가 거의 없으나 공진 주파수대역에는 펄스갯수에 따라 전압비가 커짐을 알 수 있다. 여기서 펄스갯수를 무한정 늘릴 수 없으므로 어느정도 안정된 응답을 주는 7개를 기준으로 잡았다.

다음으로 ER이 삽입된 알루미늄 판재에서의 위와 같은 실험을 수행하였다. Fig. 11에서 ER Insert부분을 압전 송신기를 중심으로 부채꼴 모양으로 한 이유는 압전 송신기가 원형이므로 전파되는 파동에 따른 반사를 줄이기 위해서이다. ER Insert의 단면 폭과 두께는 각각 60mm와 1mm이다. ER이 삽입되어 압전 수신기의 감도가 떨어진 것

을 알 수 있다.(Fig. 14)

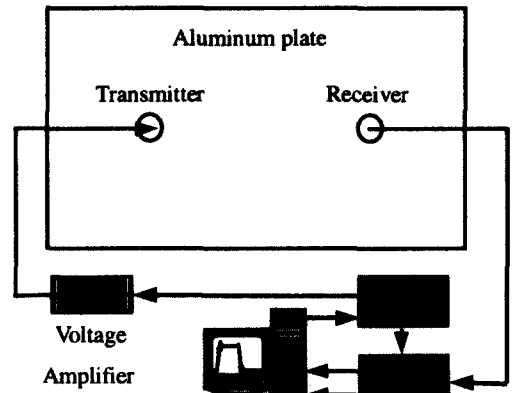


Fig. 7 Experimental setup for shock wave transmission

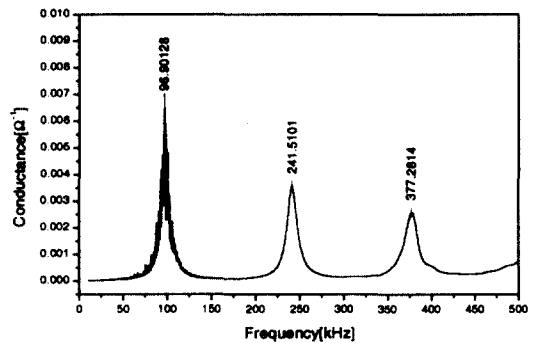


Fig. 8 Conductance of aluminum plate with PZT actuator and sensor

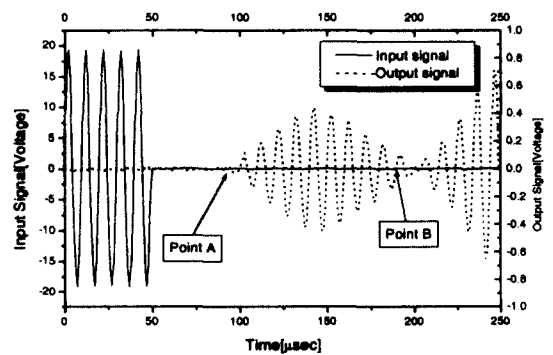


Fig. 9 PZT sensing from shock wave in aluminum plate

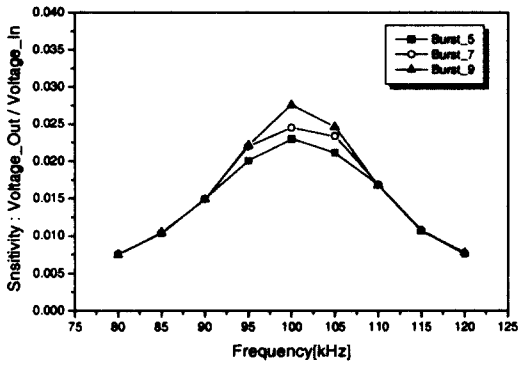


Fig. 10 Sensitivity of PZT sensing in aluminum plate

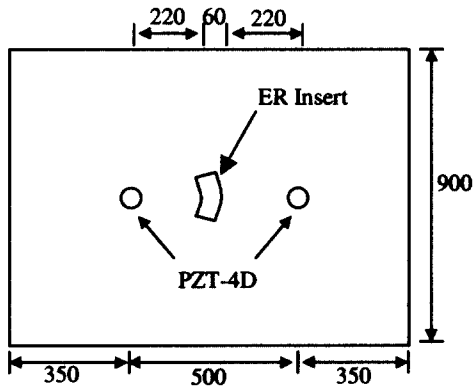


Fig. 11 ER Insert aluminum plate embodied PZT actuator, PZT sensor



Fig. 12 Photograph of ER Insert aluminum plate

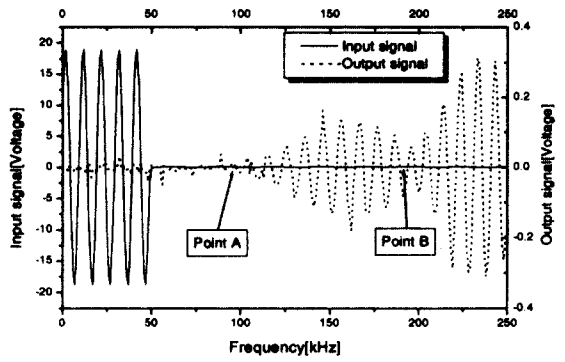


Fig. 13 PZT sensing from shock wave in ER Insert

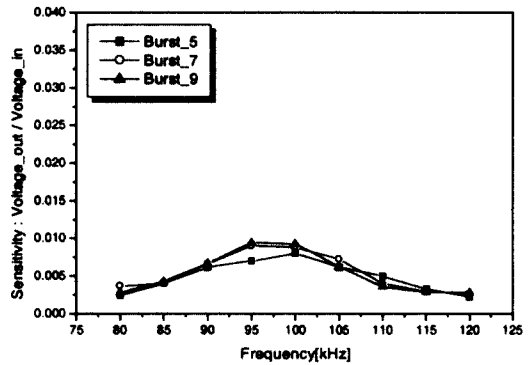


Fig. 14 Sensitivity of PZT sensing in ER Insert

6. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 지능구조물을 이용한 구조물의 내충격 설계의 기초적 연구로써 ER Insert의 이론적 해석과 유한요소해석 그리고 실험적 검증에 위한 충격파차단 성능실험장치에 대한 연구를 수행하였다. ER 유체가 알루미늄 빔 안에 삽입되어 있을 때 충격파의 전달계수를 Mead & Markus model로써 도출하였고, 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS의 결과와 비교하였다. 또한 무한 평판 가정하에서 압전 송신기와 수신기를 이용한 파동전

달 측정의 환경을 수립하였다. 앞으로 ER Insert 판재에서의 전기장 부하 시 충격파의 차단 효과에 대한 실험을 수행할 예정이며 이론해석 및 유한요소 해석의 타당성을 본 실험을 통하여 검증할 계획이다. 이렇게 하여 ER Insert 지능구조물에 대한 기본모델이 수립되면 실제 합성의 충격파를 적용한 연구를 할 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-304-005-3)지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- (1) 김정수, 정정훈, 정배훈, 최중효, "수중폭발하중을 받는 수중구조물의 유체-구조 상호작용 해석", 대한조선학회 '98 추계학술대회 논문집, 390-394, 1998.11.
- (2) M.V. Gandhi and B.S. Thompson, "Smart Materials and Structure", Chapman & Hall, USA, 1992.
- (3) D J Mead and S Markus, "The Forced Vibration of a Three-Layer, Damped Sandwich Beam with Arbitrary Boundary Conditions", Journal of Sound and Vibration, 10, 163-175, 1969.
- (4) N. R. Harland, B.R. Mace and R.W. Jones, "Control of Structure-Borne Noise Transmission using Electro-Rheological Fluid Insert", 5th International Congress on Sound and Vibration, South Australia, Decber 1997.
- (5) B.R. Mace, "Wave Reflection and Transmission in Beams", Journal of Sound and Vibration, 97(2), 237-246, 1984.