

<논 문>

## MR Insert를 이용한 구조물의 응력파 저감 Stress Wave Reduction of Structures Using MR Inserts

강 병 우\* · 김 재 환\*\* · 최 승 복\*\* · 김 경 수\*\*\*

Byung-Woo Kang, Jae-Hwan Kim, Seung-Bok Choi and Kyung-Su Kim

(2001년 5월 21일 접수 : 2001년 6월 18일 심사완료)

**Key Words** : MR Insert(MR 인서트), Shock Wave Attenuation(충격파감쇠), Stress Wave Reduction(응력파 저감), Smart Structures(지능 구조물)

### ABSTRACT

In this paper, stress wave propagation characteristics of MR(Magneto-rheological) inserts are experimentally investigated. Generally, stress waves of structures such as warships or submarines are induced by shock waves from underwater explosion. Their fatal effects on the shipboard equipments or structures damage the performance of warships. But, such a problem can be solved by controlling the stress waves propagating through structures by means of MR inserts. MR insert consists of two aluminum layers and MR fluid filled in between. Two piezoceramic disks are embedded on the host plate as a transmitter and a receiver of stress waves. Pulse waves are generated by the transmitter and they reach to the receiver through the MR insert. Permanent magnet and magnetic coil are used to produce magnetic field at the MR insert. In the presence of magnetic field, MR particles are arranged in chains parallel to the magnetic field such that the transmitted stress waves are reduced. Attenuation of stress waves is experimentally investigated.

### 기호 설명

$\tau$  : 전단응력  
 $\tau_y$  : 항복전단응력  
 $\gamma$  : 전단율  
 $G^*$  : 복소전단강성계수  
 $G'$  : 저장 탄성률  
 $G''$  : 손실 탄성률  
 $K$  : 압전계수  
 $K_p$  : 압전 계수-얇은 디스크인 경우

\* 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정회원, 인하대학교 공과대학 기계공학과

E-mail : jaehwan@inha.ac.kr

Tel : (032) 860-7326, Fax : (02) 868-1716

\*\*\* 인하대학교 공과대학 선박해양공학과

### 1. 서론

구조물에서 발생하는 진동은 일반적으로 파동의 전파에 의한 현상으로 볼 수 있는데 이러한 진동은 대체로 구조물의 성능을 저하시키거나 파괴하는 원인이 되기도 한다. 특히 수중 폭발에 의하여 발생하는 파동은 고온, 고압의 맥동 가스 거품(pulsating gas bubbles)과 높은 에너지를 갖는 압축성 유동을 발생시켜 접수 구조물에 구면파(spherical wave) 형태의 외압으로 작용하는 충격파(shock wave)로 전파되는데<sup>(1)</sup> 이는 구조물에 응력파(stress wave)를 유발하여 선체 구조물 또는 탑재 장비에 치명적 손실을 입히게 된다.<sup>(2)</sup>

일반적으로 이러한 피해를 줄이기 위해서 1980년대 중반 이후 함정 및 탑재 장비의 내충격 설계 및 해석에 의한 수동적인 대처 방법을 많이 택하여 왔으나,

아직까지는 국내의 충격시험 경험 및 설계기술이 미미한 실정이다.<sup>(2)</sup> 이러한 응력과 전파 응답을 지능 재료(smart materials)를 이용한 능동 구조물로 저감시키기 위한 기초 연구가 이루어지고 있으며, 그 예로 전기유변 유체(electro-rheological fluid)를 이용한 ER insert의 충격과 차단 성능에 관한 연구를 들 수 있다.<sup>(3)</sup> ER유체와 비슷한 역학적 거동을 보이는 MR 유체는 기본 점성, 밀도, 항복전단응력 등이 ER유체에 비하여 수~수백배 크며 댐퍼, 마운트, 브레이크 등에 상용화 된바 있다.

본 연구에서는 지능 재료의 일종인 MR유체를 적용한 MR insert를 이용한 능동 구조물을 구현하여 충격파의 전파로 인해 구조물에서 발생하는 응력과 전파 특성을 규명하고 저감 효과를 실험적 방법을 통하여 입증하고자 한다. 이러한 연구를 통하여 향후 ER/MR 구조물에 대한 구조음향 해석 기법과 연계한 응력파의 차단 및 감쇄 시스템 설계 및 성능해석이 가능하리라 판단된다.

## 2. MR 유체의 일반적 특성

1940년대 말 Rabinow가 부하되는 자기장의 강도에 따라 항복응력 및 가점성 등 유체의 역학적 거동이 변하는 MR 유체를 발견한 이래로 MR 유체는 지능 재료로서 오늘날 축압쇼버, 클러치, 마운트 등 여러 분야에 적용되고 있다.<sup>(4)</sup> 낮은 투자율(permeability)의 용매에 상자성(paramagnetic) 입자가 분산된 MR 유체의 역학적 거동 변화는 인가된 자기장에 따라 생성되는 입자의 체인 구조에 의해 발생된다. 본 연구의 MR insert와 같이 흐름이 없고 전단 응력이 항복 전단 응력 하에 있는 유체는 식 (1)과 같이 점탄성 거동을 보인다.<sup>(4)</sup>

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

여기서  $G^*$ 는 복소 전단 강성 계수이며 이는 식 (2)와 같이 에너지 저장 능력을 나타내는 탄성 성분인  $G'$  (storage modulus)와 에너지 감쇠를 나타내는 점성 성분인  $G''$  (loss modulus)로 표현된다.

$$G^* = G' + jG'' \quad (2)$$

## 3. 실험 장치의 구성 및 실험 방법

### 3.1 Aluminum Plate 및 MR Insert의 제작

실제 구조물에서의 응력파 전파를 실험적으로 구현

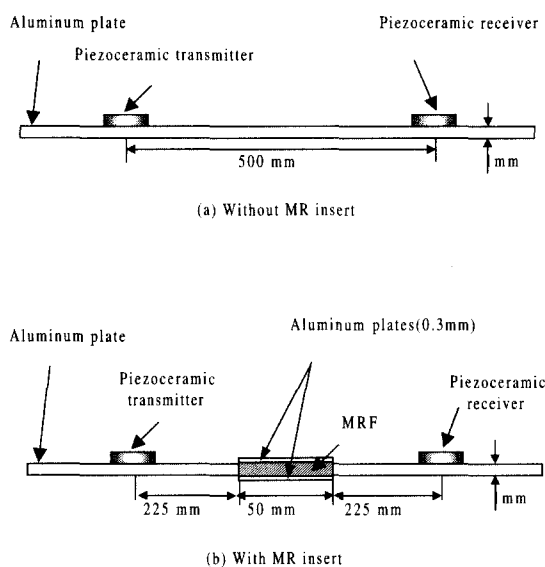


Fig. 1 Cross-section of the plate without and with MR Insert

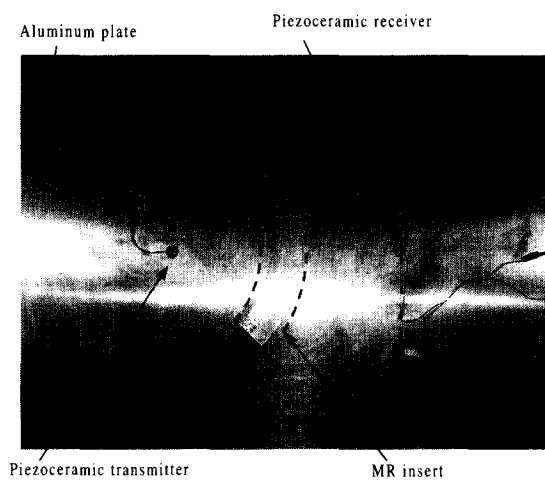


Fig. 2 Photograph of the aluminum plate with MR insert

하기 위하여 Fig. 1(a)와 같이 1200 mm×900 mm×1 mm 크기의 알루미늄 판을 제작하고, 응력파의 발생 및 검출을 위하여 지름 25 mm, 두께 1 mm의 압전 송수신기(PZT-4D)를 알루미늄 판 상단에 500 mm의 거리를 두고 부착하였다. 또한 같은 방식으로 Fig. 1(b)와 같이 MR insert가 삽입된 알루미늄 판을 제작하여 MR insert에 의한 응력파 전파 특성을 MR insert가 없는 경우와 비교할 수 있도록 하였다. MR insert는 두께가 0.3 mm인 알루미늄 판 두 장 사이에 MR 유체를 주입한 것으로 Fig. 2와 같이 폭 50 mm

의 반호형 슬릿에 중심각 90°, 두께 1 mm, 폭 50 mm의 크기로 제작되었다. 슬릿을 만드는 이유는 압전 가진기에서 발생하는 신호가 압전 감지기에서 감지될 때 알루미늄 판의 경계로부터 반사되는 반사파의 영향을 최소화시키기 위한 것으로 MR insert를 직접 지나는 신호가 먼저 감지되고, 알루미늄 판의 경계에서 반사되어 오는 반사파 및 반사되어 슬릿을 돌아오는 신호는 늦게 감지 되도록 하며 무한 판재의 자유단 경계 조건으로 생각하여 반사파의 영향을 거의 없다고 가정할 수 있다. 사용된 MR유체는 Lord사의 MRF-132LD이며 밀도는 약 3055 kg/m<sup>3</sup>이다.

### 3.2 압전 송·수신기의 감도 측정

먼저 MR insert가 없는 상태의 알루미늄 판에서 응력과 전파 특성을 통한 압전 소자의 감도 측정을 위하여 Fig. 3과 같은 실험 장치를 구성하였다. On-board FFT에서 발생시킨 5개의 정현파 펄스 함수를 D/A를 거쳐 전압증폭기에서 20 Volt로 증폭한 후 압전 송신기에 인가하면 사방으로 전파되는 파동이 발생하고 압전 수신기에서 이를 감지하게 된다. 이때 수신기 발생 전압을 송신기 인가 전압으로 나누어 준 값이 압전 수신기의 감도가 된다. Fig. 4는 송신된 신호와 수신된 신호를 같이 나타낸 것으로서, 100 kHz에서 0.023의 감도를 보이고 있다. 압전 송신기의 감도가 낮은 이유는 전기적 에너지가 송신기에서 진동 에너지로 바뀌고 구조물을 타고 전파된 진동 에너지는 또다시 압전 수신기에서 전기적 에너지

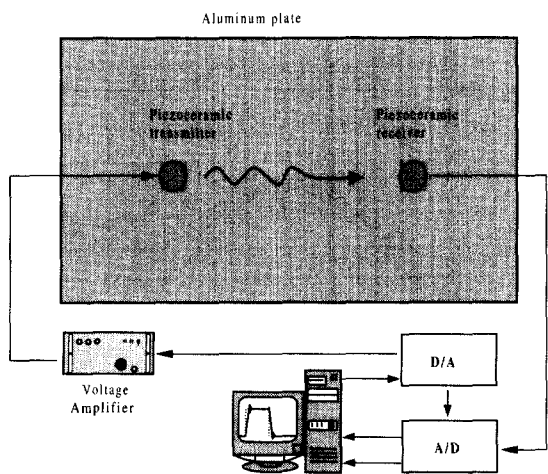


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup for stress wave propagation test (without MR insert)

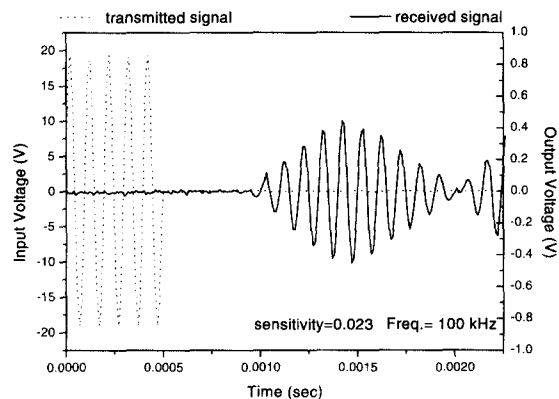


Fig. 4 Transmitted and received signals in aluminum plate

로 바뀌기 때문이다. 압전 재료의 연성계수는 전기적 에너지와 기계적 에너지의 변환을 나타낸다.<sup>(5)</sup>

$$K^2 = \frac{\text{mechanical energy stored}}{\text{electrical energy applied}} \quad \text{또는}$$

$$K^2 = \frac{\text{electrical energy stored}}{\text{mechanical energy applied}} \quad (3)$$

예를 들어 PZT-4D의  $K_p$ 가 0.57인데<sup>(5)</sup> PZT-4D 디스크를 송·수신기에 사용하고 에너지 손실이 전혀 없다고 하면 이론적인 감도는  $(0.57)^2 \times (0.57)^2 = 0.1056$ 이 된다. 실제의 감도가 0.023으로 낮아진 주된 이유는 디스크형 압전 송·수신기와 알루미늄 판 사이의 접착층의 감쇄효과에 의한 에너지 흡수에 따른 것으로 판단된다.

다음으로, MR insert가 적용된 알루미늄 판에서 자

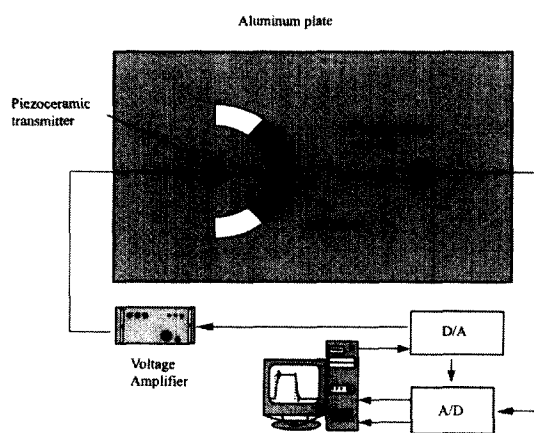


Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup for stress wave propagation test (with MR insert)

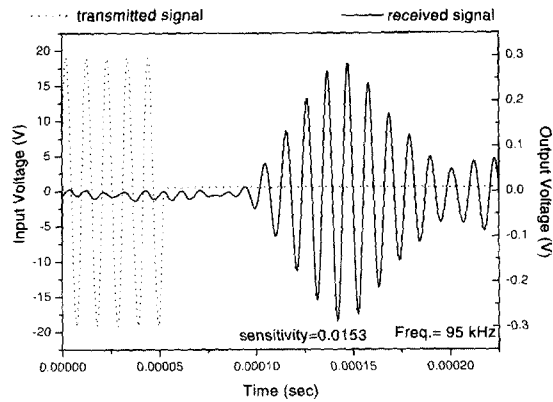


Fig. 6 Transmitted and received signals in MR inserted plate

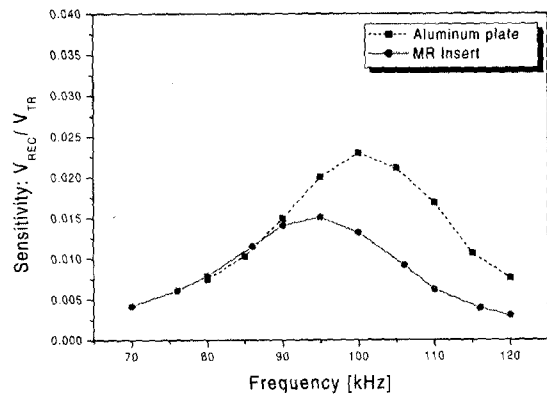


Fig. 7 Sensitivity comparison of piezoelectric receiver on the aluminum plate, MR insert

기장을 인가하지 않은 상태에서 같은 실험을 수행하였다(Fig. 5). 그 결과 95 kHz에서 최대 0.0153의 감도를 갖는 것을 알 수 있다(Fig. 6). Fig. 7은 Fig. 3과 Fig. 5의 각 경우의 주파수 대역에 따른 감도를 구하여 비교한 것이다. MR insert가 구조물에 들어갔을 때 강성이 낮아짐에 따라 최대감도의 위치는 낮은 주파수로 이동되었고, MR insert의 상대적으로 높은 감쇄에 따라 감도가 감소하였음을 알 수 있다.

### 3.3 MR Insert의 응력과 저감 성능 측정

#### (1) 영구 자석을 이용한 응력과 저감

MR insert가 적용된 알루미늄 판에서의 응력과 저감 성능을 알아보기 위하여 영구 자석과 전자석 코일을 이용하여 자기장을 인가하였다. 먼저 중심각이 90°인 MR insert에 Fig. 8과 같이 MR insert와 동일한 크기의 두께 5 mm인 영구 고부자석 2개를 insert 상,

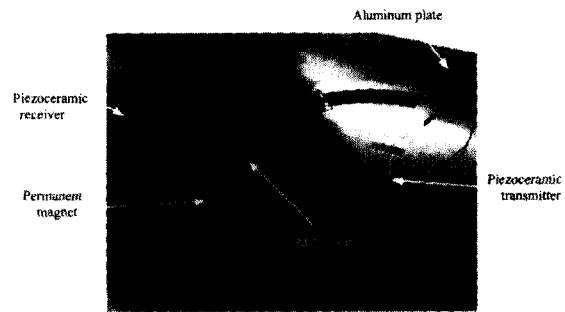


Fig. 8 Photograph of the MR insert with the magnetic field induced by permanent magnet (MFR=90°)

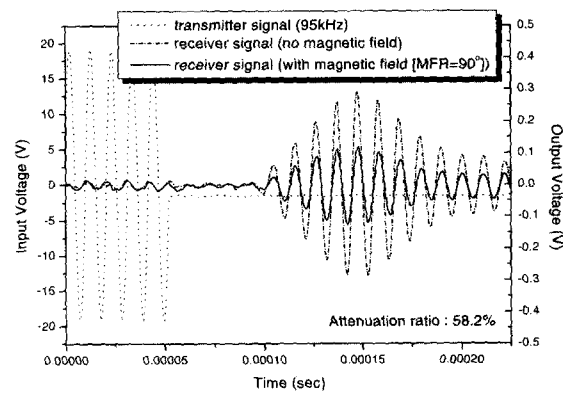


Fig. 9 Shock wave attenuation under the applied permanent magnetic field (MFR=90°)

하에 부착하여 자기장을 인가하였다. Fig. 9는 송신기 신호와 영구자석 유무에 따른 수신기의 신호를 나타낸 것이다. MR insert layer내에 나열되는 체인 구조

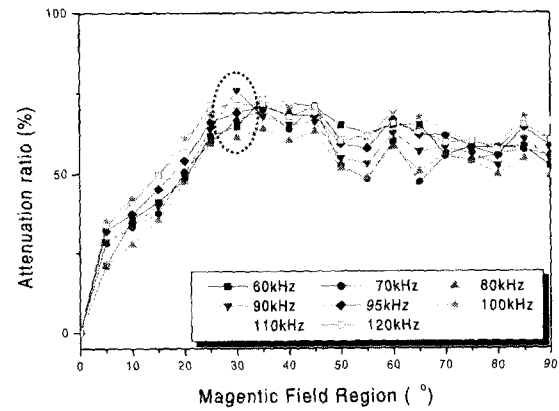


Fig. 10 Attenuation ratio vs. magnetic field region with respect to the shock wave frequency

에 의하여 응력과 저감 효과를 얻었으며 자기장 인가 전과 인가 후 압전 송·수신기의 신호 크기를 비교하여 응력과 저감비를 구하면 약 58.2 %가 된다. 또한 인가해야 될 자기장 영역의 크기를 조사하기 위하여 60 kHz~120 kHz 대역에서 MR insert에 인가되는 자기장 영역(magnetic field region: MFR)을 90 °부터 5 °씩 감소시켜가며 같은 실험을 수행하였다. Fig. 10은 자기장 영역 및 주파수간의 응력과 저감 특성을 나타내며, 이로부터 응력과 저감 효과가 증가하다가 일정해지기 시작하는 유효 자기장 영역(점선부근)을 결정할 수 있다. Fig. 10의 결과로부터 유효 자기장 영역이 30 °임을 알 수 있으며, 이때 최대 응력과 저감율은 90 kHz에서 약 75.8 %로 가장 높았고, 95 kHz에서는 68.8 %로 나타났다.

(2) 전자석을 이용한 응력과 저감

충격파에 노출된 구조물 또는 탑재 장비가 파동에 대한 능동적 대처 능력을 갖기 위해서는 MR insert에 가해지는 자기장의 제어가 가능하여야 한다. Fig. 11과 같이 압전 송신기에서 발생한 응력파가 알루미늄 판을 타고 압전 수신기까지 전파될 때 MR insert의 상단 및 하단에 유효 자기장 영역의 자기장을 인가할 수 있도록 중심각 30 °인 전자석을 장착하였다. 코일의 방향이 서로 반대가 되도록 두 가지 타입의 전자석(Type N, Type S)을 제작하여 MR insert 상·하에 맞대어 설치하여 결과적으로 한 방향의 자기장을 형성시키도록 하였다. 자기장에 의한 MR insert의 응력과 저감 성능을 알아보기 위하여 Fig.

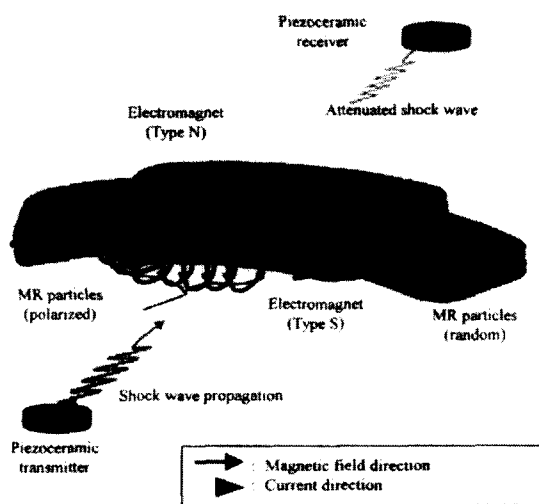


Fig. 11 Schematic diagram of shock wave attenuation using MR insert

13과 같은 실험 장치를 구성하였다. 사용된 코일의 단면 지름은 0.8 mm, 감긴 회수는 110번이며 두 개의 전자석을 직렬 회로로 구성하여 5 A의 전류를 입력하였다. 그 결과 Fig. 14와 같이 유효 자기장 영역이 30 °일 때 95 kHz에서 약 24.8 %의 응력과 저감 효과를 얻을 수 있었다. 또한 판 상·하단에 각각 두 개의 전자석을 사용하여 자기장을 인가하면 95 kHz



Fig. 12 Photograph of the aluminum plate with electromagnet embedded in MR insert

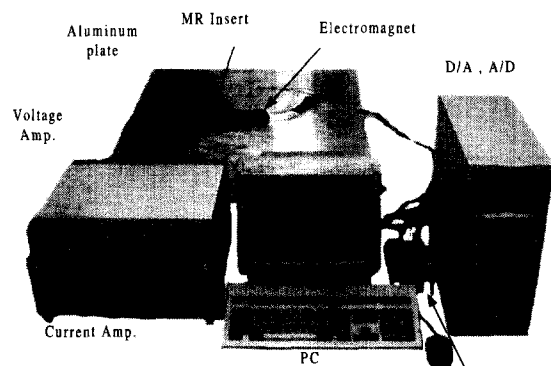


Fig. 13 Photograph of shock wave attenuation test system

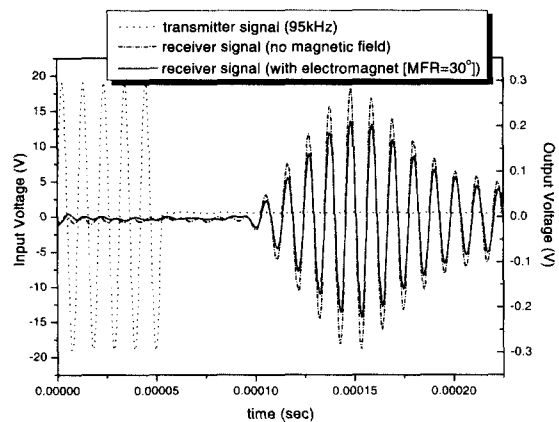


Fig. 14 Shock wave attenuation under the applied electromagnetic field (MFR=30 °)

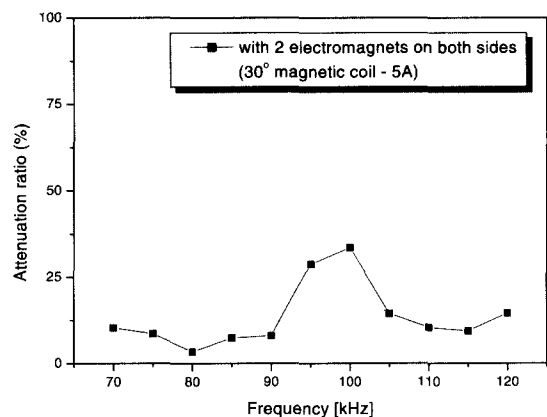


Fig. 15 Attenuation ratio under the applied magnetic field using two magnetic coils on both sides (MFR = 30°)

에서 28.7 %의 응력과 저감 효과를 얻을 수 있었고, 이 경우 100 kHz에서 최대 33.5 %의 저감비를 얻을 수 있었다. Fig. 15는 주파수에 따른 응력과 저감 효과를 나타낸 것으로서, 95~100 kHz 부근에서 감쇠효과가 큰 stop band를 나타내고 있다. 다시 말해서 특정 주파수 대역의 응력파를 차단할 수 있다.

#### 4. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 MR insert를 적용한 지능 구조물을 구현하여 구조물에 전파되는 응력파의 저감 성능을 실험적으로 고찰하였다. 압전 송·수신기를 이용한 감도 측정을 통하여 응력파의 전파 특성을 검증하였고 제작된 MR insert의 유효 자기장 영역을 찾아내어 최적의 응력파 전파의 저감 효과를 보였다. 아울러 유효 자기장 영역에 자기장을 부가할 수 있는 전자석을 제작하여 제어 가능한 자기장 하에서의 응력파 전파 저감 성능도 확인하였다. 그 결과, MR insert를 지나는 응력파의 저감률이 자기장을 인가했을 때 증가했는데, 그 이유는 자기장 인가 시의 MR유체는 대체로 점성이 높아지기 때문에 응력파 저감 효과가 증

가하였다.

향후 응력과 전파 속도를 이용하여 MR insert 자체의 전단탄성계수를 구하는 연구가 수행되어야 할 것이며, 이를 통하여 MR 유체의 이론적 해석에 접근하여 고주파수 영역에서 MR 유체 거동의 특성을 밝힐 수 있을 것이다.

#### 후 기

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

#### 참 고 문 헌

- (1) Mehaute, B. L., and Wang, S., 1996, Water Waves Generated by Underwater Explosion, World Scientific.
- (2) 정정훈, 1998, "함정 탑재 장비의 내충격 성능 평가", 한국소음진동공학회지, Vol. 8, No. 1, pp. 21~28.
- (3) Kim, J. H., Kim J. Y., Choi S. B., and Kim K. S., 2001, "Smart Structures for Shock Wave Attenuation using ER Inserts", SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Vol. 4327, USA.
- (4) 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.
- (5) Morgan Matroc Limited, Piezoelectric Ceramics Data Book.
- (6) Ferry, J. D., 1970, Viscoelastic Properties of Polymers, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, INC., USA.