

## MR Insert의 충격저감 성능 연구

°강병우\*, 김재환\*\*, 최승복\*\*, 김경수\*\*\*

### A Study on MR Insert for Shock Wave Attenuation

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

#### ABSTRACT

This paper presents the experimental study for the reduction of transmitted shock waves in smart structures incorporating MR insert. MR fluid is filled within the two aluminum layers and two piezoceramic disks are embedded on the host plate as a transmitter and a receiver of the shock wave. Pulse wave generated by the transmitter is transmitted to the receiver through the MR insert and the plate. By applying magnetic field to the MR insert, the amplitude of the transmitted shock wave is reduced remarkably. The attenuation performance is tested by changing the applied magnetic field on MR inserts in two ways: by changing angle of permanent rubber magnet from 90° to 5° with 5° decrements, by using electromagnet in which magnetic field is controllable. The propagating wave speed of MR insert is also investigated.

**Keywords:** MR Insert, shock wave attenuation, wave propagation control in smart structures

#### 1. 서론

현존하는 거의 모든 구조물은 진동을 전파하는 매개체로 작용하며 때로는 원하지 않는 진동으로 인한 구조물의 성능 저하 및 파손을 야기하기도 한다. 이는 수중 구조물인 경우에 더욱 중요시 다루어야 할 문제이다. 수중 폭발에 의해 발생하는 파동(Explosion-Generated Water Waves)은 고온, 고압의 가스 거품(gas bubble)과 높은 에너지를 갖는 압축성 유동을 발생시켜 접수 구조물에 구면파(spherical wave) 형태의 외압으로 작용하는 충격파(shock wave)로 전파되어 고차 모드의 과도 응답(transient response)을 유도하게 된다<sup>(1)</sup>. 이러한 충격

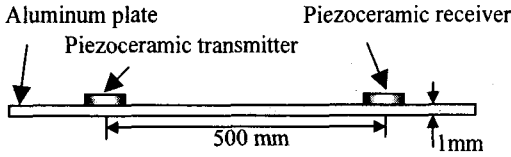
하중은 일반적인 동적 하중보다 큰 모멘텀을 발생시켜 선체 구조물 또는 탑재 장비에 치명적 손실을 입히게 된다. 실제 수중 폭발에 의한 함정의 전투 불능 원인은 선체 자체의 손상보다는 탑재장비의 손상에 기인한다고 알려져 있다<sup>(2)</sup>. 1980년대 중반 이후 함정 및 탑재장비의 진동 및 충격 저감 시스템에 대한 관심이 더욱 높아지면서 이러한 충격 응답을 해석하는 연구가 진행되어 왔다. 그러나 여전히 내충격 설계 및 해석에 국한되어 있으며 이 또한 선진 기술 수준에 많이 못 미치는 실정이다.

최근 이러한 충격 응답을 지능 재료(smart material)를 이용한 능동 구조물로 저감시키기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 그 예로 전기유변유체(Electro-rheological fluid; ERF)를 이용한 ER Insert의 충격과 차단 성능에 관한 연구도 수

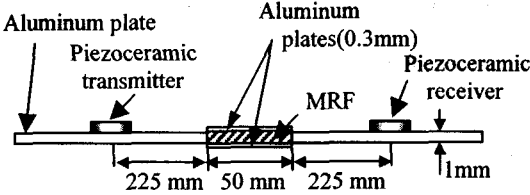
\* 인하대학교 기계공학과 대학원

\*\* 인하대학교 기계공학과

\*\*\* 인하대학교 선박해양공학과



(a) without MR Insert



(b) with MR Insert

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

행되었다<sup>(3)</sup>.

본 연구에서는 수중 폭발에 의한 충격 응답의 능동적 저감을 위하여 지능 재료의 일종인 자기유변유체(Magneto-rheological fluid; MRF)를 적용한 능동 구조물을 구현하고 수중 폭발에 의한 충격파의 저감 효과를 실험을 통하여 입증하고자 한다. 이러한 능동 지능 구조물을 향후 잠수체에 적용함으로써 비접촉 수중 폭발에 의한 탑재 장비의 충격 손상 방지에 의한 전투 생존성 및 민첩성의 향상을 기대할 수 있다.

## 2. MR 유체의 일반적 특성

1940년대 말 Rabinow가 자기장에 따라 유체의 역학적 거동이 변하는 MR 유체를 발견한 이래로 MR 유체는 지능 재료로서 오늘날 속업쇼버, 클러치, 마운트 등 여러 분야에 적용되고 있다. 이러한 유체의 역학적 거동 변화는 인가된 자기장에 따라 생성되는 입자의 체인 구조에 의해 발생되는데 전단 응력이 항복 전단 응력보다 큰 경우 식(1)과

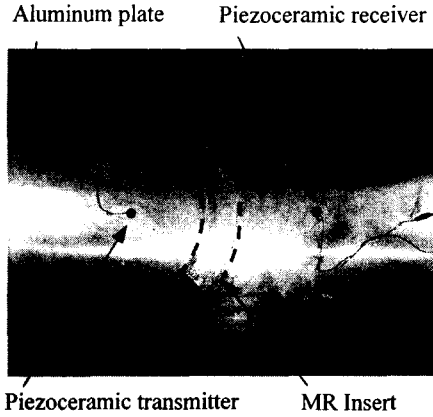


Fig.2 Photograph of the aluminum plate with MR Insert

같이 자장에 따른 가변 항복 전단 응력을 갖는 빙햄 모델로 설명될 수 있다.

$$\tau = \tau_y(H) + \eta \dot{\gamma}, \quad \tau \geq \tau_y \quad (1)$$

여기서  $\tau$ 는 전단 응력,  $H$ 는 자장,  $\eta$ 는 유체의 점성 계수이며  $\dot{\gamma}$ 은 전단 속도이다. 본 연구의 MR Insert와 같이 흐름이 없고 전단 응력이 항복 전단 응력 하에 있는 유체는 식(2)와 같이 점탄성 거동을 보인다<sup>(4)</sup>.

$$\tau = G^* \gamma, \quad \tau \leq \tau_y \quad (2)$$

여기서  $G^*$ 는 복소 전단 강성 계수이며 이는 식(3)과 같이 에너지 저장 능력을 나타내는 탄성 성분인  $G'$  (storage modulus)와 에너지 감쇠를 나타내는 점성 성분인  $G''$  (loss modulus)로 표현된다.

$$G^* = G' + jG'' \quad (3)$$

## 3. 실험 장치의 구성 및 실험 방법

### 3.1 Aluminum Plate 및 MR Insert의 제작

충격파 저감 성능을 실험적으로 구현하기 위하여 Fig.1과 같이 MR Insert가 없는 경우(a) 및 MR Insert가 적용된 경우(b)의 알루미늄 플레이트를 각

각 제작하였다. 알루미늄 플레이트의 크기는 1200 mm×900mm, 두께는 1mm이며 지름 25mm, 두께 1mm의 압전 송·수신기(PZT-4D)를 플레이트 상단에 부착하였다. MR Insert는 Fig.1 (b)와 같이 두께가 0.3mm인 알루미늄 플레이트 두 장 사이에 MR 유체를 주입한 것으로 Fig.2와, 같이 폭 50mm의 반호형 슬릿에 중심각 90°, 두께 1mm, 폭 50mm의 크기로 제작되었다. 사용된 MR유체는 Lord사의 MRF-132LD이며 밀도는 약 3055kg/m<sup>3</sup>이다.

### 3.2 압전 송·수신기의 감도 측정

다음으로 MR Insert 가 없는 상태의 알루미늄 플레이트로 압전 소자의 감도 측정을 위하여 Fig.3 과 같은 실험 장치를 구성하였다. On-board FFT 에서 발생시킨 5 개의 sine 펄스 함수를 D/A 를 거쳐 전압증폭기에서 20Volt 로 증폭한 후 압전 송신기(piezoceramic transmitter)에 인가하면 사방으로 전파되는 파동이 발생하고 압전 수신기 (piezoceramic receiver)에서 이를 감지하게 된다. 이때 송신기 인가 전압을 수신기 발생 전압으로 나누어 준 값이 압전 수신기의 감도가 된다. 마찬가지로 MR Insert 가 적용된 플레이트에서 같은 실험

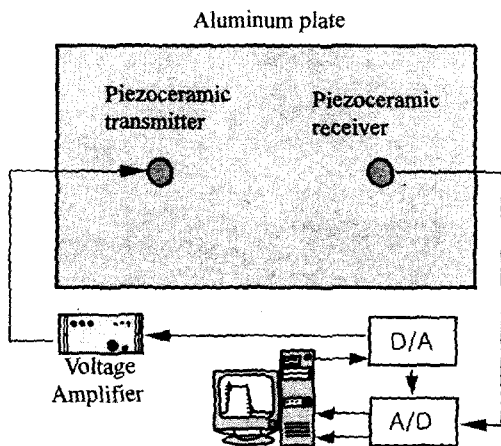


Fig.3 Schematic diagram of experimental setup for shock wave propagation test

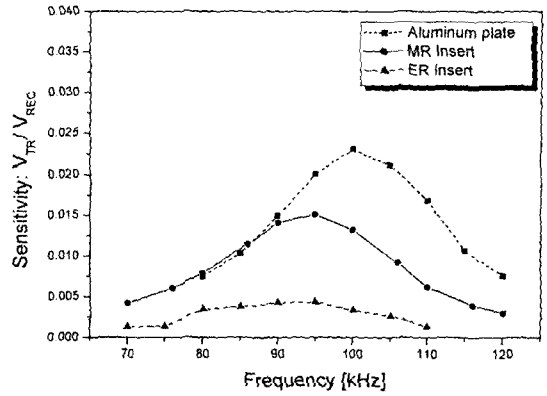


Fig.4 Sensitivity comparison of piezoelectric receiver on the aluminum plate, MR Insert and ER Insert

을 수행하면 MR Insert 의 유·무 및 주파수 대역에 따른 감도를 구할 수 있으며 ER Insert 가 적용된 경우의 감도와 함께 비교해보면 Fig.4 와 같다. 이로부터 최대 감도가 공진 주파수 부근에서 발생함과 시스템의 댐핑 특성이 높아지고 강성 특성이 감소할수록 최대 감도는 저주파 대역 쪽으로 이동함을 알 수 있다.

### 3.3 MR Insert 의 충격파 저감 성능 측정

#### 3.3.1 영구 자석을 이용한 충격파 저감

MR Insert 가 적용된 알루미늄 플레이트에서의 충격파 저감 성능을 알아 보기 위하여 먼저 중심각 90°인 MR Insert 에 Fig.5 과 같이 Insert 와 동일



Fig.5 Photograph of the MR Insert with the magnetic field induced by permanent magnet (MFR=90°)

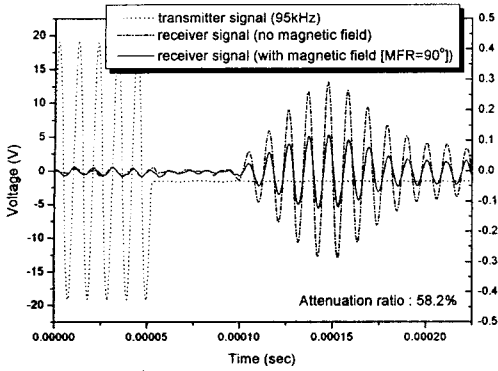


Fig.6 Shock wave attenuation under the applied permanent magnetic field (MFR=90°)

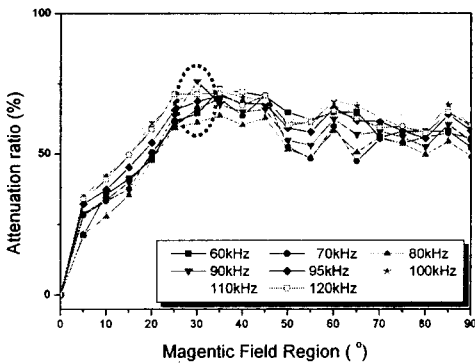


Fig.7 Attenuation ratio vs. magnetic field region with respect to the shock wave frequency

한 크기의 영구 고무자석으로 자장을 인가하면 Insert 내에 나열되는 체인 구조에 의하여 충격파의 저감 효과를 얻을 수 있으며 자장 인가 전과 인가 후 압전 송·수신기의 신호 크기를 비교하여 충격 저감비를 구하면 약 52.8%로 이를 도시하면 Fig.6 과 같다. 따라서 60kHz~120kHz 대역에서 MR Insert 에 인가되는 자장 영역(magnetic field region; MFR)을 90°부터 5°씩 감소시켜가며 같은 실험을 수행하면 Fig.7 과 같이 자장 영역 및 주파수간의 충격저감율로부터 충격저감 효과가 증가하다가 정체되기 시작하는 유효 자장 영역(점선부근)을 결정할 수 있다. 결과로부터 유효 자장 영역이 30°

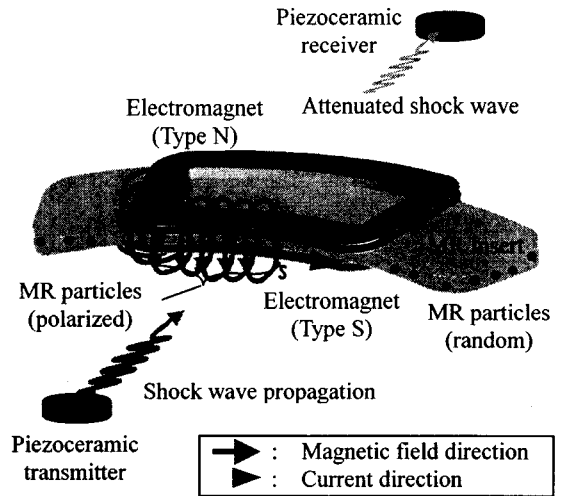


Fig.8 Schematic diagram of shock wave attenuation using MR Insert



Fig.9 Photograph of the aluminum plate with electromagnet embedded in MR Insert

임을 알 수 있으며 이때 최대 충격저감율은 90kHz 에서 약 75.8%로 가장 높았고 95kHz 에서는 68.8%로 나타났다. 최대 충격저감율이 발생하는 주파수 대역이 초기 공진주파수인 97kHz(Fig.)에서 90kHz 로 감소된 원인은 영구 자석에 의한 전체 시스템의 질량 증가 및 인가된 자장에 의한 MR 유체의 물성 변화에 의한 것으로 판단된다.

### 3.3.2 전자석을 이용한 충격파 저감

실제 충격파에 노출된 구조물 또는 탑재 장비가 파동에 대한 능동적 대처 능력을 갖기 위해서

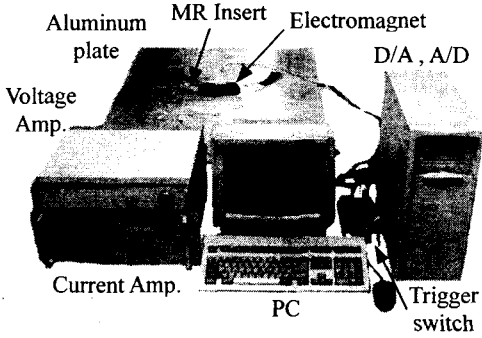


Fig.10 Photograph of shock wave attenuation test system

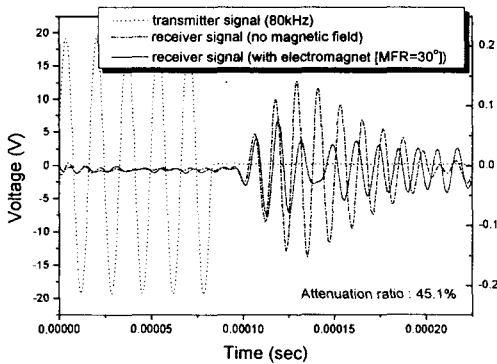


Fig.11 Shock wave attenuation under the applied field electromagnetic field (MFR=30°)

는 MR Insert 에 가해지는 자장의 제어가 가능하여야 한다. Fig.8 과 같이 압전 송신기에서 발생한 충격파가 알루미늄 플레이트를 타고 압전 수신기까지 전파될 때 MR Insert 의 상단 및 하단에 유효 자장 영역을 커버하도록 중심각 30°인 전자석을 장착하면 인가된 자장을 따라 MR 입자가 도열되고 알루미늄 플레이트에 수직한 체인이 형성되어 전단 응력의 증가에 의한 충격저감 효과를 얻을 수 있다. 코일의 방향이 서로 반대가 되도록 두 가지 타입의 전자석(Type N, Type S)을 제작하여 MR Insert 상·하에 맞대어 놓으면 결과적으로 한 방향의 자장을 형성시킬 수 있다. 자장에 의한 MR Insert 의 충격저감 성능을 알아보기 위하여 Fig.10 과 같은 실험 장치를 구성하였다. 사용된

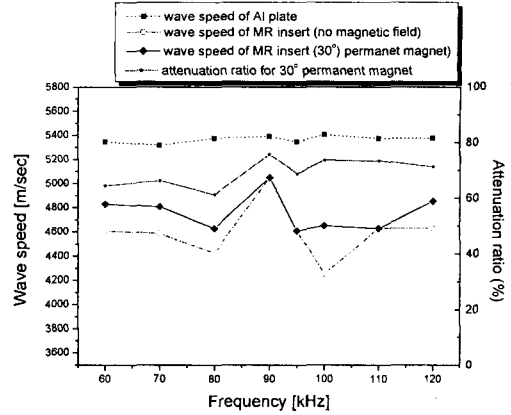


Fig.12 Shock wave speed of Al plate, MR insert with no magnetic field and with magnetic field with respect to the frequency

코일의 단면 지름은 0.8mm, 감긴 회수는 110 번이며 두 개의 전자석을 직렬 회로로 구성하여 5A의 전류를 입력하였다. 그 결과로 Fig.11 과 같이 80kHz 에서 약 45.1%의 충격저감 효과를 얻을 수 있었다.

### 3.4 MR Insert를 지나는 파동 속도 계산

지금까지 얻은 실험 데이터로부터 MR Insert를 지나는 충격파의 속도 계산이 가능하다. 즉, 알루미늄 플레이트에서의 압전 송·수신기 사이의 시간 차이( $t_{d\_PL}$ ) 및 거리( $l_{TR}$ )를 통하여 플레이트에서의 충격파 전파 속도( $C_{PL}$ )를 구하고 MR Insert가 있는 플레이트에서 마찬가지로 송·수신기 사이의 시간 지연 값( $t_{d\_MRPL}$ )과 MR Insert의 폭( $l_{MRI}$ ) 등으로부터 파동이 MR Insert 영역을 지날 때 걸리는 전파 시간( $t_{MRI}$ )과 전파 속도( $C_{MRI}$ )를 계산할 수 있으며 이는 식(4)-(6)과 같다.

$$C_{PL} = t_{d\_PL} / l_{TR} \quad (4)$$

$$t_{MRI} = t_{d\_MRPL} - (l_{TR} - l_{MRI}) / C_{PL} \quad (5)$$

$$\therefore C_{MRI} = l_{MRI} / t_{MRI} \quad (6)$$

이로부터  $C_{PL}$  및 자기장 무부하 상태와 유효

자장 영역  $30^\circ$ 를 갖는 경우의  $C_{MRI}$ 를 구해보면 Fig. 12와 같다. 여기서 자장의 인가 후에 충격파 전파 속도가 증가함을 알 수 있는데 이는 MR유체의 점성이 증가되었기 때문이며 이를 다시 자장 영역  $30^\circ$ 에서의 충격저감율과 함께 도시하여 비교해보면 주파수 대역에 대하여 비슷한 변화 양상을 보임을 알 수 있다. 실제로 여기서 구한 파동 속도는 유체 자체만이 아니라 유체가 채워진 알루미늄 플레이트까지 고려된 것이어서 상당히 높게 계산된 값을 미루어 생각할 수 있다.

#### 4. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 MR Insert의 충격저감 성능을 실험적으로 고찰하였다. 알루미늄 플레이트에서 압전 송·수신기를 이용한 감도 측정을 통하여 충격파의 전파 특성을 검증하였고 제작된 MR Insert의 유효 자장 영역을 찾아내어 최적의 충격저감 효과를 구현하였다. 아울러 유효 자장 영역에 맞는 전자석을 제작하여 제어 가능한 자장 하에서의 충격저감 성능도 확인하였다. 또한 실험 결과로부터 MR Insert를 지나는 충격파의 속도를 계산하고 충격저감율과 비교해본 결과 자장 인가 시의 MR 유체는 대체로 점성이 높아지기 때문에 전파 속도 및 충격저감 효과가 증가한다는 것도 입증되었다.

향후 이렇게 계산된 충격파 전파 속도를 이용하여 MR Insert 자체의  $G'$  및  $G''$  값과 MR 유체 자체의  $G'$ ,  $G''$  값에 접근하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- (1) B. L. Mehaute and S. Wang, "Water Waves Generated by Underwater Explosion", World Scientific, 1996.
- (2) 정정훈, "함정 탑재 장비의 내충격 성능 평가", 한국소음진동공학회지, Vol.8, No.1, pp21-28, 1998.
- (3) J. H. Kim, J. Y. Kim, S. B. Choi and K. S. Kim, "Smart Structures for Shock Wave Attenuation using ER Inserts", SPIE's 8<sup>th</sup> Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Vol. 4327, March 2001, USA.
- (4) M. R. Jolly, J. W. Bender and J. D. Carlson, "Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol.10, pp.5-13, 1999.
- (5) J. D. Ferry, "Viscoelastic properties of polymers", 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, INC., USA, 1970.