

충격파 저감을 위한 ER 지능구조물 ER Smart Structures for Shock Wave Reduction

김재환[†] · 김지선^{*} · 최승복^{**} · 김경수^{***}
Jaehwan Kim, Ji-Seon Kim, Seung-Bok Choi and Kung-Su Kim

(2003년 3월 25일 접수 : 2003년 8월 20일 심사완료)

Key Words : ER Fluids(ER 유체), ER Smart Structure(ER 지능구조물), Shock Wave Reduction(충격파 저감)

ABSTRACT

Shock wave reduction in electrorheological(ER) smart structures is studied. ER insert is a composite structure comprising two elastic outer layers between which is sandwiched layer of ER fluid. When a voltage is applied across the outer layers, the shear modulus and the loss factor of the ER fluid are enabled, and thus the dynamic properties of the composite structure is altered. For the shock wave reduction in a hull mount of a submerged structure, ER inserts are made on the hull mount structure. To investigate the ER insert shape, many types of ER insert pattern are considered. Modal test of ER insert structures is performed to obtain the mode shapes, natural frequencies and the acceleration transmissibility. The acceleration transmissibility is reduced at such a frequency region when an electric field is applied. It is observed that the natural frequencies and mode shapes can be tunable by applying electric field. The ER-inserted hull mount is installed in an integrated system and the overall performance of shock wave reduction is tested. The possibility of shock wave reduction in the hull mount is demonstrated.

1. 서 론

구조물에서 발생하는 진동은 일반적으로 파동의 전파에 의한 현상으로 볼 수 있는데 이러한 진동은 대체적으로 구조물의 성능을 저하시키거나 파괴하는 원인이 되기도 한다. 특히, 수중 폭발에 의하여 발생하는 파동은 고온, 고압의 맥동 가스 거품과 높은 에너지를 갖는 압축성 유동을 발생시켜 선체 구조물 또는 탑재장비에 치명적인 손실을 입히게 된다. 수중폭발

의 피해를 줄이기 위해서 1980년대 중반 이후 함정 및 탑재장비 마운트의 내충격 설계 및 해석에 의해 수동적인 대처 방안을 많이 택하여 왔으나 지능재료를 이용한 국내의 충격시험 경험 및 설계 기술이 미비한 실정이다.^(1, 2)

지능구조물은 주위의 환경의 변화를 감지하여 이에 대처하는 거동을 하는 구조물로서 감지기와 작동기 그리고 적절한 제어가 구조물과 통합화된 시스템이다. 지능재료는 외부의 변화에 대하여 적응하여 변형을 할 수 있는 재료로서 압전재료, 형상기억합금, 자기변형재료, EAP(electro-active polymer), 전기유동 유체(electrorheological fluid) 등으로 나눌 수 있다.⁽³⁾ 이러한 지능재료는 구조물에 제어기와 함께 통합되어 외부 환경의 변화에 따라 적응할 수 있다.

따라서 지능 구조물 기술을 이용한다면 구조물에 전달되는 충격파를 저감할 수 있다. 본 논문은 ER지

[†] 책임저자, 정회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : jaehwan@inha.ac.kr
Tel : (032)872-7925, Fax : (032) 868-1716
^{*} 정회원, 인하대학교 대학원 기계공학과
^{**} 정회원, 인하대학교 기계공학과
^{***} 인하대학교 선박해양공학과

능구조물을 이용하여 충격파를 저감하는 기술을 실험적으로 연구한 것으로, 충격하중으로부터 전파되는 응력파의 영향을 차단할 수 있는 지능구조물을 연구하였다. 구체적으로 보면, hull 마운트(mount)에 전달되는 진동을 ER 유체를 적용한 ER 인서트(insert)를 이용하여 저감할 수 있는지를 실험을 통하여 검증하였다. ER 인서트에 대한 이론적인 연구는 이미 있었으나⁽⁴⁾ 실험적인 연구는 없었다. 본 연구는 개념 증명 단계의 연구로서, 향후 선체 및 수중구조물의 hull 마운트에서 능동적인 진동저감 기술로도 발전할 수 있다.

수 있는 지능구조물 개념을 넣어서 내충격 시스템화한다면 효과적으로 충격파를 줄일 수 있다.

본 연구에서는 hull 마운트에 ER 인서트를 설치하여 충격파의 저감을 실험하였다. Hull 마운트는 관재로 된 지지구조물로서 경량의 장비를 hull 구조물에 장착하는 것이다. ER 인서트는 구조물에 ER 유체를 삽입한 것으로서 전기장이 인가됨에 따라 ER 유체가 전단변형에 대한 저항이 달라져서 구조물을 타고 흐르는 탄성파를 저감하게 된다. 따라서, ER 인서트가

2. ER 지능구조물

2.1 내충격 시스템

함정이나 잠수함과 같은 구조물에는 여러가지 장비들이 탑재되게 된다. 이러한 장비들을 설치하는 마운트 시스템에는 deck 마운트와 hull 마운트가 있다. (Fig.1) Deck 마운트는 주로 수중폭발로 인한 가속도의 영향을 받게 되고, hull 마운트는 구조물을 타고 흐르는 충격파의 영향을 받게 된다. Deck 마운트는 주로 대형 장비의 탑재에 쓰이고, hull 마운트는 hull 구조물에 가벼운 각종 장비를 설치하는 마운트로서, 이런 구조물에 외압이 발생하게 되면 치명적인 구조파괴나 탑재 장비의 기능 손실을 일으키게 된다. 따라서, 이러한 마운트에 충격을 감지하여 능동 저감할

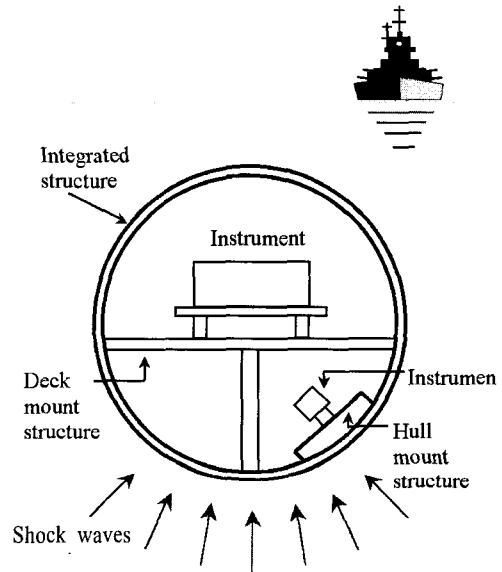


Fig. 1 Photograph of mount system

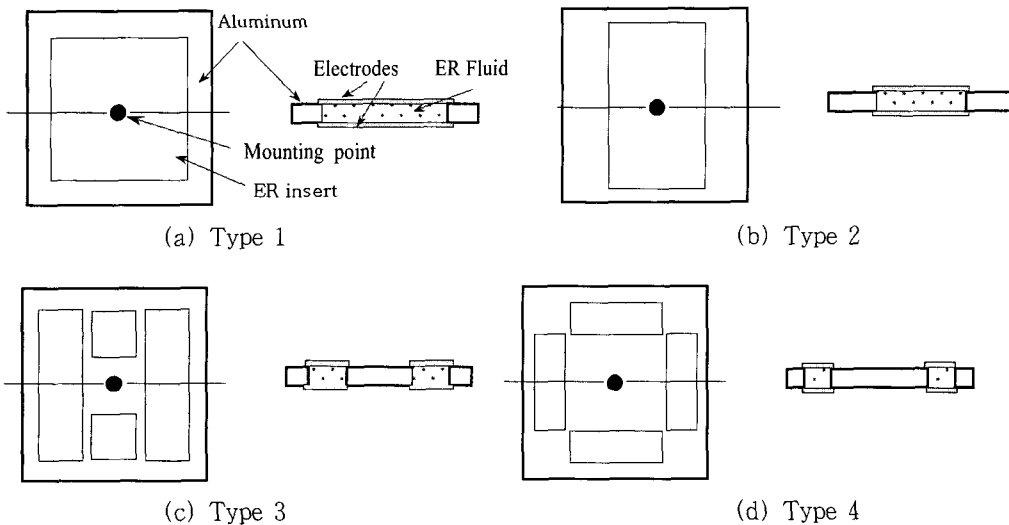


Fig. 2 Types of ER insert

장착된 hull 마운트를 hull 구조물에 설치하여 충격과 저감을 실험하였다. 알루미늄판재로 만든 hull 구조물은 수중 물수체나 선체 구조물을 나타낸다. 일반적으로, hull 구조물은 탄성체 이므로 탄성 공진모드를 가지고 있어 이에 따른 거시적 거동이 발생한다. 뿐만 아니라 수중 폭발로 인한 충격과는 고주파의 미시적인 거동을 일으키게 된다.

2.2 ER 인서트

ER 인서트는 판구조물 내에 ER 유체를 삽입한 것으로서, 양 전극에 전기장을 가하면 ER 유체에 전도성 입자의 체인 형성으로 인해 ER 유체의 점탄성 성질이 변화되어 탄성파를 저감한다. 이러한 ER 인서트를 hull 마운트에 어떻게 배치하는 가는 충격과 저감 성능에 매우 중요한 영향을 미친다. 이것을 연구하기 위하여, ER 인서트의 형상을 Fig. 2와 같이 4가지로 제작하였다. Type 1은 hull 마운트 구조물 정사각형 면의 대부분을 ER 인서트로 채운 것이고 Type 2는 직사각형 형태로 ER 인서트를 넣어서 중횡방향으로 다른 모드를 갖게 한 것이다. Type 3과 4는 ER 인서트를 각 변을 향하여 나란히 설치한 것으로 각 변에서 전파되는 탄성파를 잡고자 하였다. Hull 마운트에서 ER 인서트가 설치된 판재의 중앙에 탑재장비가 고정되는 것으로 간주하고 중앙점에서 주파수 응답특성을 구하였다. 현재까지 ER 인서트의 여러 형상에 대한 진동 또는 충격에 대한 연구가 없었다. 판의 외곽크기는 140 mm × 140 mm이며, 두께는 1.5 mm이다.

기본 알루미늄 판에 여러 모양의 ER 인서트를 삽

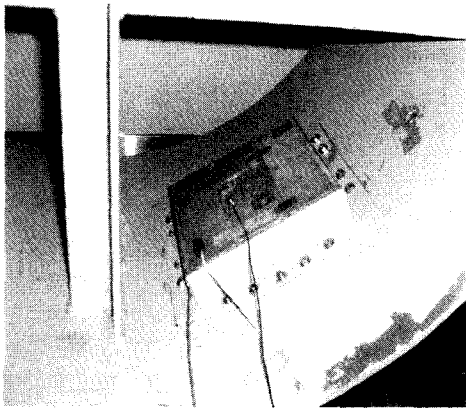


Fig. 3 Photograph of the ER-inserted structure

입하였다. ER 유체는 두개의 평판사이에 채워져 있으며 기본 판재를 절연 시킨 뒤 유실을 방지하기 위해서 기본 판재와 위 아래 두개의 전극판을 Epoxy로 접착 시켰다. 전극판은 ER 유체를 가둘 뿐 아니라 전기장을 인가하기 위한 전극역할을 한다. 알루미늄 판의 ER 유체가 삽입되는 면적과 위치에 변화를 주어 진동 저감의 성능을 비교하고자 하였다. ER 유체는 특수화학 처리한 스타치 입자와 실리콘 오일을 사용하였다. Fig. 2는 ER 인서트 형태의 개략도를 나타내고, Fig. 3은 ER 인서트가 설치된 hull 마운트의 사진을 나타낸다. 각각의 ER 인서트 형태에 대하여 진동특성을 평가하고, 전체 시스템에서 전달특성을 평가하였다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 통합 시스템

제작된 ER hull 마운트를 장착하여 통합시스템에 설치하였다. 통합시스템은 수중 폭발에 의한 것을 고려하여 잠수함의 hull 구조 모형을 축소하여 제작하였다. Fig. 4는 통합시스템을 나타내고 있다. 제작된 전체 hull 구조물은 $\phi 600 \times 400$ mm의 외곽크기에 두께는 5 mm 크기의 원통 알루미늄으로 되어있으며 무게는 16 kg이다. 구조물의 내부에는 deck용 ER 마운트와 ER hull 마운트가 설치 되어있다. ER 마운트는 deck 부분에 설치되어 가속도로 인한 장비의 손상을 막도록 구성되었으며 ER 인서트는 hull부분에 설치되어 구조물의 손상을 방지하도록 구성되었다. Fig. 4와 같은 통합 구조물을 제작하여 hull 마운트 구조물에 ER 인서트를 Fig. 2와 같이 여러 형태로 제작하여 설치하였다. 통합 구조물은 로프로 매달아 고정하였으며 외부의 진동 및 충격과 전달을 묘사하여 가진기로 통합 구조물 하부를 가진 하였다. 외부 가진이 통합 구조물에 가해지게 되면 진동이 발생되고 이 진동은 선체 구조물 내부의 시스템에 영향을 주게 된다. 가진은 구조물의 정중앙 아래부분에서 하였다.

가진주파수는 0에서 최고 800 Hz까지 잡았는데, 실험하는 시스템에서 전파되는 탄성파의 속도는 실제 크기의 함정이나 구조물일 경우의 약 1/3이므로, 실제 시스템에서는 약 2.4 kHz의 가진 효과를 가지게 된다. 이 주파수 영역은 수중폭발에 의한 전달 파동의 주파수 영역에서도 낮은 영역에 속한다.

3.2 ER 인서트 구조물

다양한 형태의 ER 인서트의 고유특성을 알아보기 위하여 먼저 모드해석을 수행하였다. 선체 구조물에 ER 인서트를 Fig.2와 같은 여러 형태로 제작하여 설치하였다. 가진 입력은 2채널 주파수 분석기(HP 35665A)의 근원 신호를 앰프를 거쳐 가진기에 입력하여 랜덤 가진을 하였다. 주파수 응답을 얻기 위해 랜덤 가진 입력과 출력은 각각 가속도계를 이용하여 측정하였으며, 입력 측정부위는 hull 구조물의 정 중

양 아래에 가진이 입력되는 부위의 가속도를 측정하였다. ER 인서트가 장착된 hull 마운트 구조물의 모드해석을 위하여 hull 마운트 상부판의 81개 지점에서 가속도를 측정하였다. 0 kV/mm, 1 kV/mm, 2 kV/mm의 전기장을 ER 인서트에 가하여 그에 따른 주파수 응답을 얻었고, 가진 가속도 신호와 ER 인서트의 가속도 신호의 주파수 응답 함수는 주파수 분석기를 이용하여 측정하였다. 이러한 응답함수로부터 STAR modal software⁽⁵⁾를 이용하여 고유 주파수 및 모드 형상을 추출하였다. 선체 구조물의 ER 인서트에 인가된 전기장의 크기와 여러 ER 인서트 종류에 따라 측정된 주파수 응답함수로부터 ER 인서트 구조물의 공진주파수를 추출하였다.

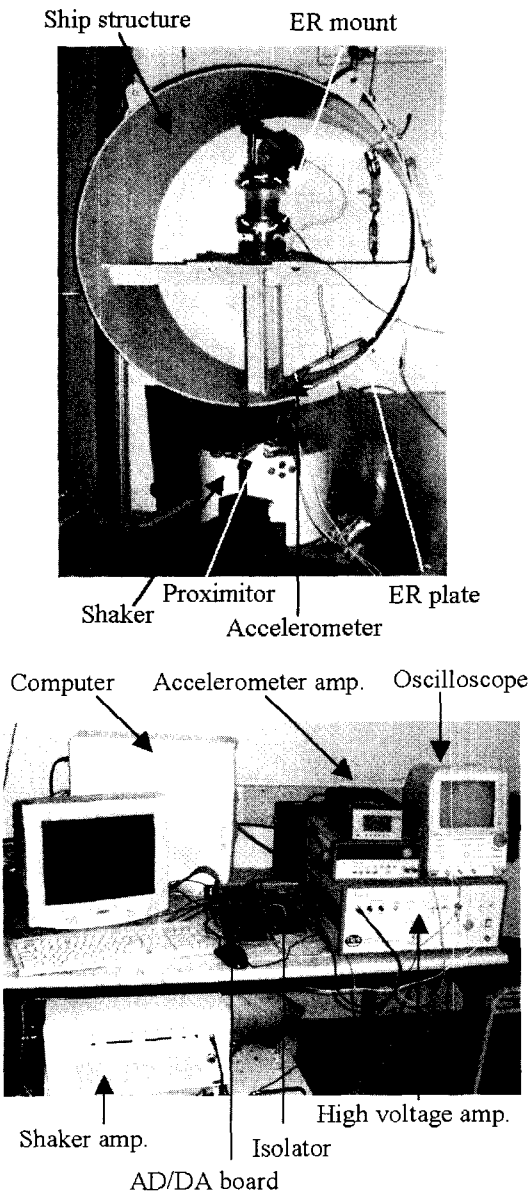


Fig. 4 Photograph of integrated system

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 ER 인서트의 응답 특성

Fig.5는 Type 1에 대한 주파수응답이며, Fig.6(a), Fig.6(b), Fig.6(b)은 0 kV/mm, 1 kV/mm 및 2 kV/mm의 일정한 전기장 인가에 따른 모드 형상이다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 ER 인서트에 전기장을 부하였을 때 0~300 Hz, 550~800 Hz 사이의 모드는 전기장에 따라 감쇄의 증가로 인하여 진동이 감소하였으며 300~400 Hz 사이의 모드는 과도감쇄 현상으로 인하여 오히려 증가하는 결과가 나왔다. 또한 400~550 Hz 사이의 모드는 공진 주파수가 전기장에 따라 증가하는 결과를 나타내었다. 이는 ER 인서트에 함유되어 있는 ER 유체가 구조물의 강성과 감쇄를 전기장에 따라 변화시켜 시스템의 공진주파수를 이동

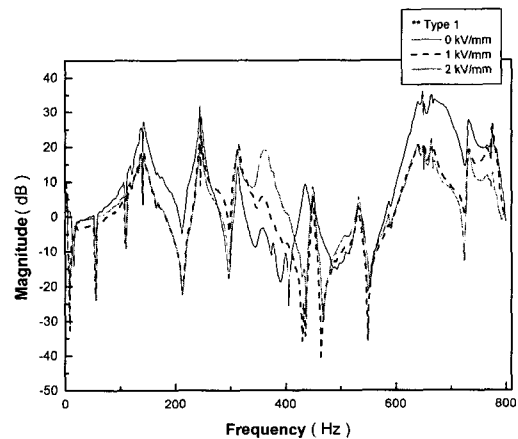


Fig. 5 Frequency response[Type 1]

시킨 것이다. Fig. 6에서 200 Hz 대역의 모드는 전기장을 가함에 따라 진폭이 감소함을 볼 수 있으며 주파수응답의 효과가 크게 나타났던 600 Hz 이상의 부

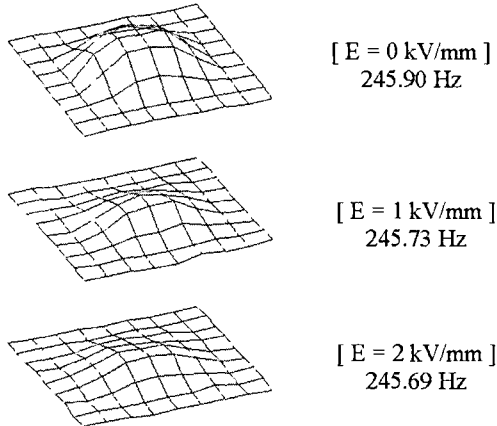


Fig. 6(a) Mode shapes near 200 Hz [Type 1]

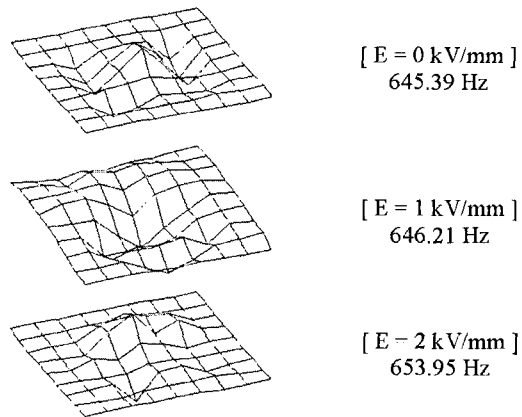


Fig. 6(b) Mode shapes near 600 Hz [Type 1]

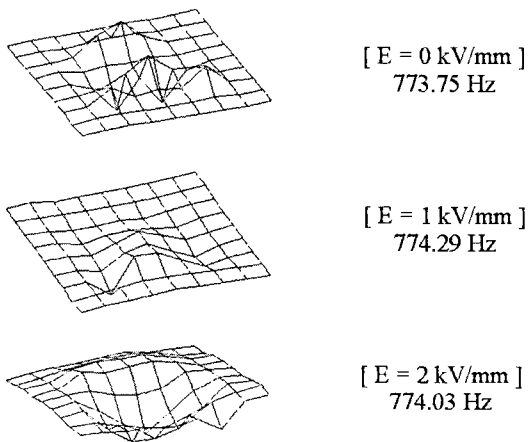


Fig. 6(c) Mode shapes near 700 Hz [Type 1]

근의 모드 형상은 전기장에 따라 모드의 형상에 변화가 있었다. 이 변화는 ER 인서트에 의한 국부적인 모드현상의 변화로서 전기장에 따라 조정이 가능함을 보여준다.

Fig. 7은 Type 2의 주파수응답의 한 예이며 Fig. 8은 일정한 전기장인가에 따른 모드 형상을 나타내었다. Fig. 7에서 ER 인서트 구조물에 전기장을 부하였을 때 0~300 Hz 사이의 모드는 전기장에 따라 감쇄의 증가로 인하여 진동이 감소하였으며 300~500 Hz 사이의 모드는 과도 감쇄 현상으로 인하여 오히려 증가하는 결과가 나왔다. 500~550 Hz의 공진 모드에서는 진동의 감소 효과가 나타난다. 또한 550~800 Hz 사이의 모드는 공진 주파수가 전기장에 따라 증가하는 결과를 나타내었다. 이는 ER 인서트 구조물에 함유되어 있는 ER 유체가 구조물의 강성과 감쇄를 전기장에 따라 변화시켜 시스템의 공진주파수를 이동시킨 것이다. Fig. 8(c)의 모드형상은 1 kV/mm의 전기장을 가한 경우 459 Hz에서의 모드 형상이다. 전기장의 효과로 0 kV/mm, 2 kV/mm에서는 나타나지 않았던 새로운 모드가 나타났다.

Fig. 9는 Type 3의 주파수응답이며 Fig. 10은 일정한 전기장 인가에 따른 모드 형상을 나타내었다. ER 인서트 구조물에 전기장을 부하였을 때 0~300 Hz 사이의 모드에서는 변화를 볼 수 없었고 300~600 Hz 사이의 모드에서는 전기장에 따라 감쇄의 증가로 인하여 진동이 감소하였다. (Fig. 9) 600~700 Hz에서는 모드의 변화가 거의 없지만 700~800 Hz의 모드에서도 300~600 Hz에서와 마찬가지로 감쇄의 증가로 인하여 진동이 감소하였다. 이는 ER 인서트 구조물에

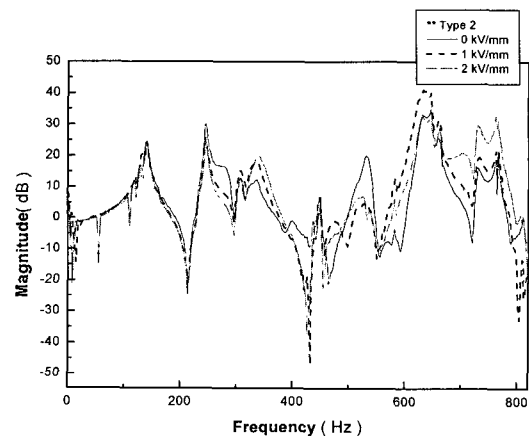


Fig. 7 Frequency response [Type 2]

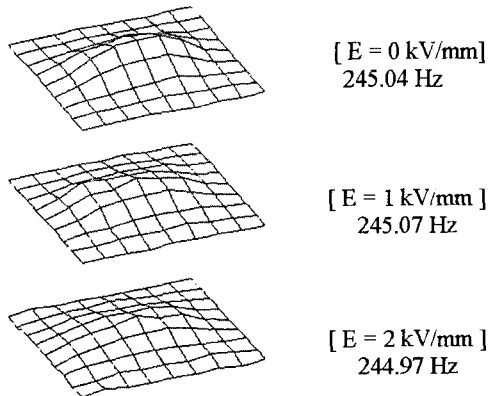


Fig. 8(a) Mode shapes near 200 Hz [Type 2]

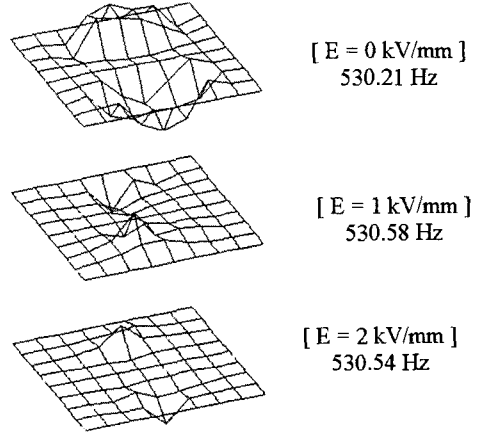


Fig. 10(a) Mode shapes near 500 Hz [Type 3]

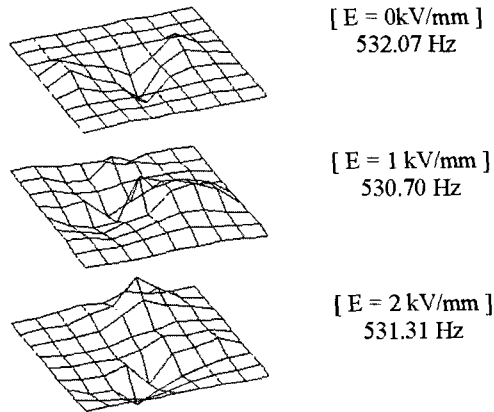


Fig. 8(b) Mode shapes near 530 Hz [Type 2]

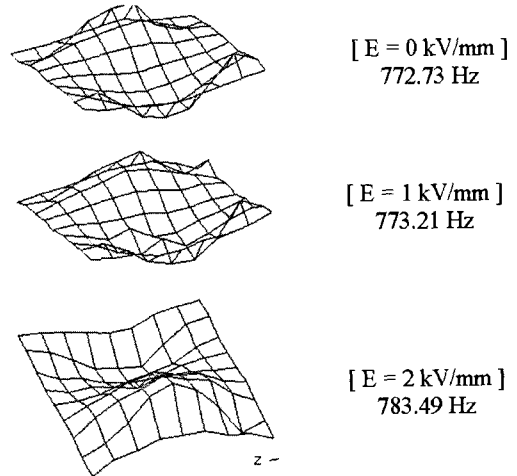


Fig. 10(b) Mode shapes near 700 Hz [Type 3]

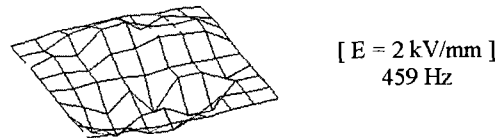
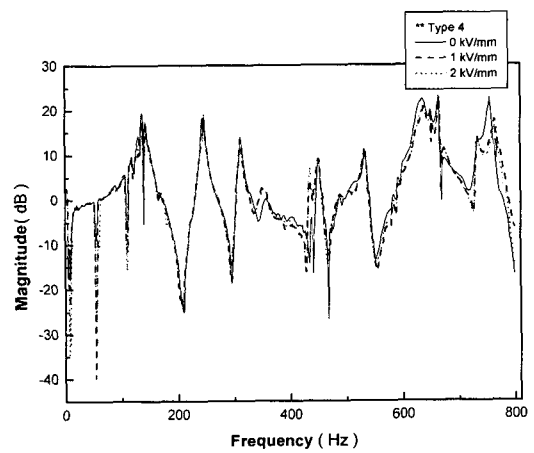
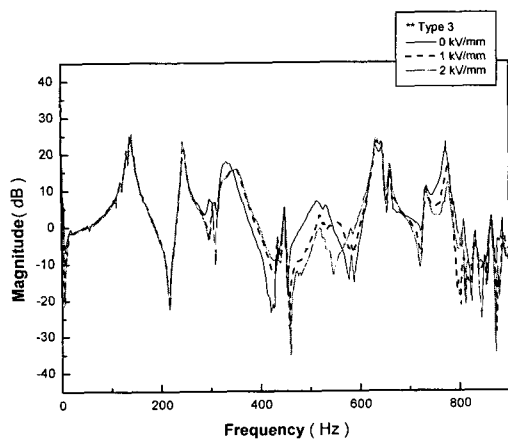


Fig. 8(c) Mode shapes near 459 Hz [Type 2]



함유 되어 있는 ER 유체가 구조물의 강성과 감쇄를 전기장에 따라 변화시켜 시스템의 공진주파수를 이동시킨 것이다. Fig. 10의 모드 형상에서는 전기장의 효과로 나타나지 않았던 새로운 모드가 나타났다.

Fig. 11은 Type 4의 ER 인서트 구조물의 주파수 응답이며 Fig. 12는 일정한 전기장 인가에 따른 모드 형상을 나타내었다. ER 인서트 구조물의 경우 전체적으로 전기장에 따른 변화가 크지 않고 600 Hz 이상에서 약간의 진동 감소현상을 보이고 있다. Fig. 12의 경우 비슷한 모드형상을 나타내었다.

위와 같이 구조물의 여러 ER 인서트 구조물 종류에 따른 실험을 통하여 진동 저감의 효과를 분석한 결과, 주파수 범위를 0~800 Hz까지 측정 한 결과 Fig. 2의 Type 1, 2와 같은 형상보다는 Type 3, 4와 같이 ER 유체가 고르게 나누어진 형상일수록 진동저감효과가 높게 나타나는 것을 볼 수 있었으며, 주파수 대역에 따라 감쇄 효과도 크게 나타났다. 결과적으로 ER 유체의 삽입량이 많을수록 진동 저감의 효과도 공히 크게 나타났다. 그 이유는 전기장 인가 시, ER 유체의 점성이 대체로 높아지기 때문이다.

효과적인 ER 인서트 구조물의 형상은 관점에 따라 약간의 차이가 있지만 전체 주파수응답을 기준으로 본다면 Type 3이 가장 좋았다. 주파수응답에 있어서 과도 감쇄의 영역이 없었으며 300 Hz 이후부터는 꾸준히 진동 저감을 살펴 볼 수 있었다. Type별 효과로는 Type 1의 경우 600 Hz 이후에는 높은 진동저감효과를, Type 2의 경우 500~550 Hz에서 진동저감효과를 보였다.

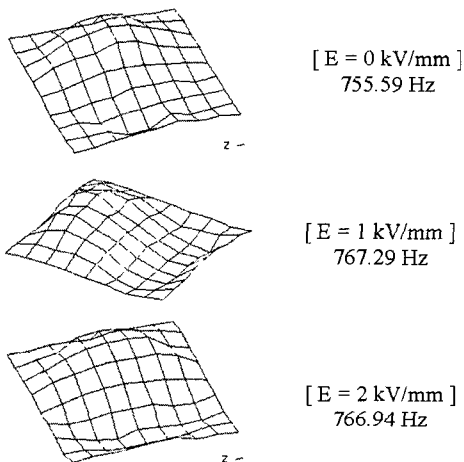
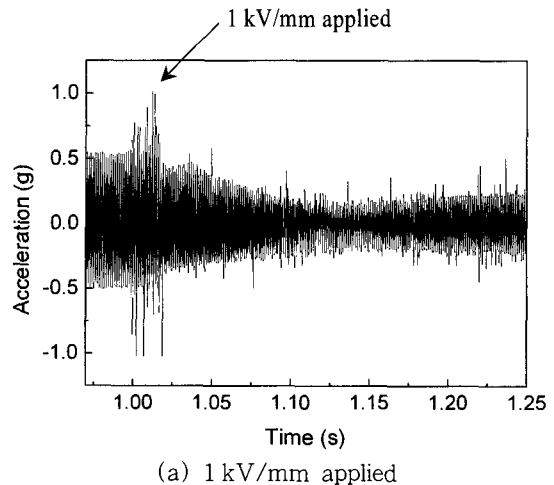


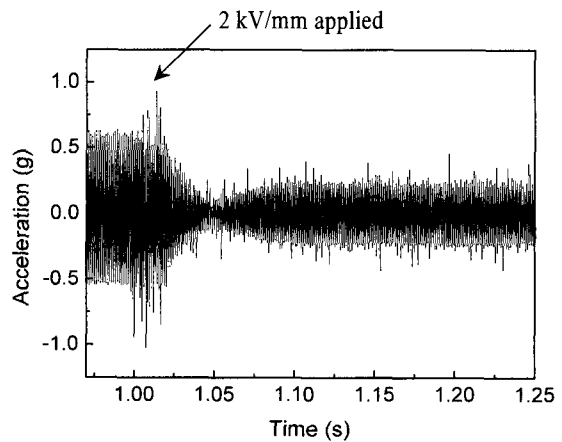
Fig. 12 Mode shapes near 700 Hz [Type 4]

4.2 통합시스템의 응답 특성

수중 물수체의 마운트 시스템에서의 충격과저감을 실험하기 위하여 Fig. 4와 같은 실험장치를 구성하였다. 원통 형태로 제작된 hull 구조물에 Type 3의 ER 인서트 hull 마운트가 설치되어 있고 가진을 발생시키기 위한 가진기가 설치되어 있으며 컴퓨터에 장착되어 있는 DA보드를 이용하여 ER 인서트에 전기장을 인가하였다. AD/DA보드를 통해 신호를 주고 받을 때 역전류로부터 장치들을 보호하기 위해 신호절연기를 거쳐서 신호를 처리하였다. 오실로스코프를 이용하여 실시간으로 여러 신호를 모니터링 하면서 실험을 수행하였다. 다양한 가진 형태와 전기장 부하에 따른 응답특성을 살펴보았다.



(a) 1 kV/mm applied



(b) 2 kV/mm applied

Fig. 13 Time response of ER insert structure

(1) 조화 가진

조화 가진에 대한 시스템의 응답특성을 살펴보기 위해 AD/DA보드가 장착된 컴퓨터를 이용하여 가진 변위를 일정하게 발생시킨 다음, ER hull 마운트 정 중앙 위에서 변위, 가속도 전달 특성을 살펴보았다. 이때 측정된 데이터는 AD보드를 통해 컴퓨터에 저장

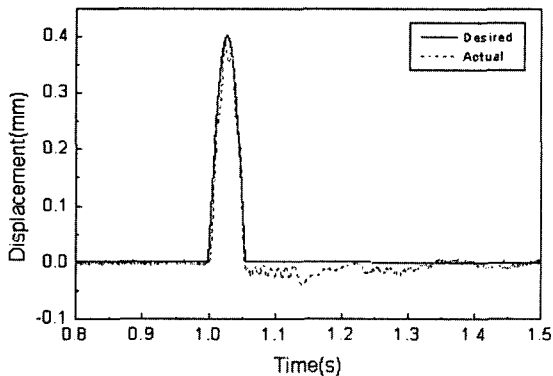
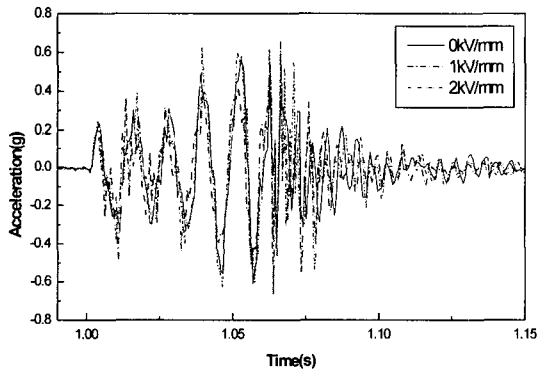
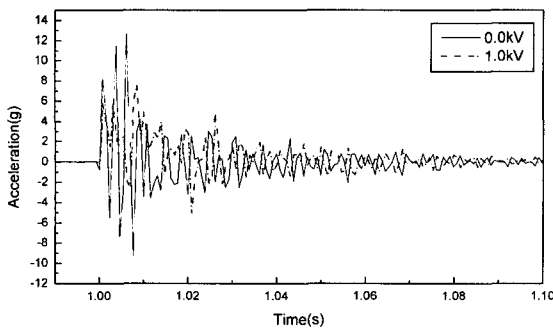


Fig. 14 Half-sine excitation



ER plate acceleration

Fig. 15 Response of ER plate with half-sine excitation



Input displacement

Fig. 16 Response of ER plate with impact test

하였다. 측정된 응답특성은 주파수 분석기를 이용하여 800 Hz까지의 주파수영역에 대한 응답특성을 살펴 보았다. Fig. 13은 780 Hz로 가진 할 때 가속도 응답 특성을 시간영역에서 도시한 것이다. 1초에서 전기장을 각각 1, 2 kV/mm를 인가하였을 경우 시간응답특성을 보여주고 있다. 1 kV/mm인가 시 가속도가 0.5 g에서 0.25 g로 감소함을 알 수 있으며 2 kV/mm인가 시 가속도가 0.1 g로 급격히 줄었다가 서서히 다시 0.25 g로 늘어남을 볼 수 있다.

(2) 반정현 가진(Half-sine Excitation)

제작된 통합 구조물에 대한 충격응답특성을 살펴보기 위해 가진기를 통해 충격파형의 가진을 인가하였다. 이때 충격파형은 반정현 함수 형태로 인가하였다. 반주기 형태의 변위 함수를 발생시키기 위해 가진기에 변위센서를 설치하여 피드백 제어를 통해 반주기 형태의 가진 입력을 구현하였다.(Fig. 14) 이때 가진기 제어를 위해 사용된 제어기는 PID제어 기를 이용하여 가진기를 제어하였다. 반정현 파형이 입력되었을 경우 실제합정에 장착된 장비를 나타내는 ER hull 마운트에서는 정 중앙 위치에서의 가속도를 살펴보았다.

ER 인서트 구조물의 반정현 함수형태로의 가진 입력 시 발생하는 응답특성을 살펴보았다.(Fig. 15) 1 kV/mm를 인가하였을 경우 전기장 무부 하시 보다 최대 값이 약간 낮아 진 것을 볼 수 있다. 그러나 그 효과는 미미하다. 그 이유는 반정현 가진에 의한 가진의 크기가 작기 때문에 ER 인서트에 의한 충격 저감 효과를 보기에 어려웠다.

(3) 충격 가진

제작된 통합 구조물에 대한 충격응답특성을 살펴보기 위해 통합시스템의 구조물 측면에 충격햄머를 설치하여 가진을 하였다. 충격햄머의 무게는 0.2 kg, 스윙암의 길이 45 cm 그리고 낙하높이는 40 cm이다. ER hull 마운트에 충격 가진 입력 시 발생하는 응답특성을 전기장에 따라 살펴보았다.(Fig. 16) 전기장은 각각 0, 1 kV/mm를 인가하였으며 이에 따른 가속도 응답특성을 살펴보았다. 전기장을 인가함으로써 충격 가속도의 최대값이 약 5 g정도 줄어든 것을 볼 수 있다. 이로서 충격과 저감에 ER 인서트가 효과를 발휘할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 수중 폭발 등에 의해 접수구조물에

전달되는 충격하중을 능동적으로 차단 또는 감쇠할 수 있는 지능 구조물에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 통합시스템의 hull 마운트에서 응력파를 차단하기 위해 ER지능구조물시스템을 구성하였고, 축소 모형의 통합시스템을 설계 제작하였다.

Hull 마운트의 진동이나 충격을 저감시키는 ER 인서트의 다양한 형태를 제시하고 이들을 설계 제작하였다. 모드 실험을 통하여 공진주파수와 모드형상을 구하여 ER 인서트 구조물의 특성을 파악하였다. 그 결과, ER 유체가 고르게 나누어진 형상일수록 진동저감효과가 높게 나타났으며, 주파수 대역에 따라 감쇄 효과도 크게 나타났다. 다양한 형태의 ER 인서트 구조물의 공통 점으로는 ER 유체의 삽입량이 많을수록 진동 저감의 효과가 높게 나타났다. 그리고 전기장에 따라 새로운 모드현상이 나타남을 알 수 있었다.

ER 인서트 구조물의 hull 마운트가 장착된 통합시스템에 대하여 충격 실험을 수행하였다. 조화 가진할 때 전기장을 인가함에 따라 가속도 시간 응답특성에서 빠른 시간에 진동이 줄어들었다.

반정현 가진 실험에서 전기장에 따른 가속도 응답 특성은 1 kV/mm를 인가 하였을 경우 전기장 무부하시 보다 최대값이 낮아 진 것을 볼 수 있었고, 충격 햄머 실험에서는 최대 가속도가 약 5g 줄어든 것을 확인하였다.

본 연구에서는 ER 지능구조물의 진동과 충격과 저감 가능성을 실험을 통하여 입증하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) 정정훈, 1998, "합정 탑재장비의 내충격 성능 평가," 한국소음진동공학회논문집, 제 8 권 제 1 호, pp. 21~28.
- (2) 김경수, 정정훈, 정배훈, 최중효, 1998, "수중폭발하중을 받는 수중구조물의 유체-구조 상호작용 해석," 대한조선학회 추계학술대회논문집, pp. 390~394.
- (3) Gandhi, M. V. and Thompson, B. S., 1992, Smart Materials and Structures, Chapman & Hall.
- (4) Harland, N. R., Mace, B. R. and Jones, R.W., 2001, "Wave Propagation, Reflection and Transmission in Tunable Fluid-filled Beams," J. Sound & Vib., Vol. 241, No. 5, pp. 735~754.
- (5) The STAR System, 1990, Theory and Application, Structural Measurement Systems.