

ER유체를 이용한 충격절연 댐퍼의 특성 연구

⁰송현정*, 최승복**, 김재환**, 김경수***

Field-Dependent Characteristics of ER Shock Damper

Hyun-Jeong Song, Seung-Bok Choi, Jae-Hwan Kim and Kyung-Su Kim

ABSTRACT

This paper presents field-dependent dynamic characteristics of a shock damper featuring an electro-rheological(ER) damper. A cylindrical type of the shock damper is designed and manufactured on the basis of the field-dependent Bingham model. The damping force is then measured with respect to the piston velocity at various electric fields. The measured damping force is incorporated with the 1DOF shock system to analyze the shock isolation performance.

Keywords: ER(electro-rheological) fluid, ER shock damper, shock isolation, dynamic characteristic

1. 서론

수중 폭발에 의한 충격파는 선체에 치명적인 충격하중으로 작용하여 선체의 구조파괴나 탑재장비의 기능 손실을 유발하게 된다. 실제로 전시에 선체의 파괴나 손상으로 인한 전투력 상실 보다는 선박 내에 장착되어 있는 주요 탑재장비의 손실로 인한 전투력 상실이 더 크게 작용함을 의미한다. 이러한 충격파에 대한 내 충격성을 고려한 주요 탑재 장비의 지지 구조물 설계시 충분한 안정성을 고려하여 과잉설계를 유발하게 되고 이는 경제적 손실 뿐 아니라 선박의 중량증가로 인한 성능저하를 유발하게 된다. 더욱이 기존 충격

절연 시스템은 특정한 충격하중 대역과 크기에 대해서만 절연성능을 보이고 있어 보다 더 넓은 영역에서 충격하중 절연성능을 가지는 댐퍼의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 요구조건에 부응하여 탑재장비의 진동 및 충격에 대해 보다 좋은 절연성능을 가지는 댐퍼에 대한 연구와 개발이 진행되고 있다. 최근에는 ER 유체(electro-rheological fluid), 형상기억합금(shape memory alloy), 자외재료(Terfenol material)등의 지능재료(smart material)를 이용한 새로운 형태의 댐퍼에 대한 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁻³⁾ 이중 ER 유체는 부하 되는 전기장의 크기에 따라 역학적 특성이 변하는 유체를 말하며 비전도성의 용매에 전도성의 입자를 분산시킨 현탁액이다.⁽⁴⁾ 전기장에 따른 ER 유체의 유변 특성을 이용하여 외부 하중조건에 따라 부하 되는 전기장의 크기만을 조절하여 연속적인 댐핑력 제어

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과

*** 인하대학교 선박해양공학과

가 가능하다.^(5,6)

본 논문에서는 이러한 원리를 이용하여 구조가 간단하고 ER 유체를 통해 연속적으로 댐핑력을 발생시킬 수 있는 충격 감쇠기를 제안하였고 제작된 감쇠기의 전기장 부하에 따른 충격절연 특성을 고찰하였다.

2. ER 충격 댐퍼의 모델링 및 제작

본 연구에서 제안된 ER충격댐퍼의 구조는 Fig. 1과 같다. 그림에서와 같이 피스톤은 두께가 로드와 고정되어 실린더 내부를 왕복운동을 하게 된다. 실린더 내부에 있는 코일 스프링은 탑재장비의 자세 유지 및 충격하중 이후에 다시 복원력을 발생시키는 역할을 한다. 실린더 형태의 전극은 실린더 내부에 고정되어 있으며 피스톤이 움직일 때 전극사이로 유동이 발생하게 된다. 전기장 무부하 시에는 전극간극사이로 유동하게 되는 유동저항으로 인한 댐핑력을 발생시키게 되고 전기장 부하시에는 실린더 내부에 있는 전극 사이에서 발생하는 ER효과로 인해 상부 챔버와 하부 챔버에 압력차가 발생하게 되어 이로 인한 댐핑력이 발생하게 된다.

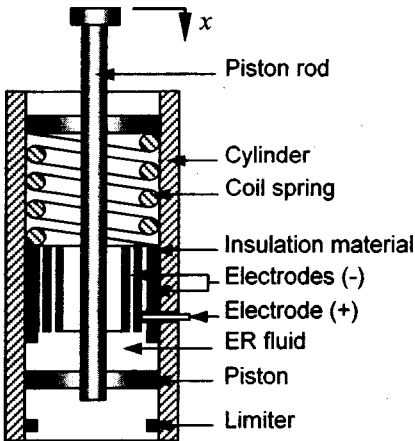


Fig. 1 Configuration of the proposed ER shock damper

ER충격댐퍼의 해석을 위한 가정으로 ER유체는 비 압축성으로 가정하였고 ER유체의 전기장 증가에 따른 항복응력 모델은 빙햄모델을 사용하였으며 ER유체의 유동에 따른 열역학적 거동은 고려하지 않았다.

ER 충격댐퍼 거동시 발생하는 댐핑력은 다음과 같다. 첫째, 실린더 형태의 전극사이로 ER 유체가 유동할 때의 유동저항은 유체의 점성에 의해 발생되며 아래와 같다.

$$R_e = \frac{12\eta L}{bh^3} \quad (1)$$

여기서, η 는 전기장 무 부하시 ER 유체의 점성계수, L 은 실린더형 전극의 길이, b 는 실린더형 전극의 두께, h 는 유동이 일어나는 전극 사이의 간격을 나타낸다. 이때 유동저항으로 인해 상부 챔버와 하부 챔버 사이에서 발생하는 압력강하는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_R = R_e (A_p - A_r) \cdot \dot{x} \quad (2)$$

A_p 는 피스톤의 단면적, A_r 은 피스톤 로드와 단면적을 나타내고 R_e 는 전기장 무부하시 발생하는 ER 유체의 유동 저항이다. 유동저항으로 인해 발생하는 댐핑력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_R = \Delta P_R (A_p - A_r) = R_e (A_p - A_r)^2 \cdot \dot{x} \quad (3)$$

둘째, 전기장 부하시 ER 유체의 전단력 증가에 따른 상부챔버와 하부챔버 사이에서 발생하는 압력강하는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\Delta P_{ER} = 2 \frac{L}{h} \alpha E^\beta \quad (4)$$

여기서, α 와 β 는 입자의 종류, 입자 중량비, 용매의 종류, 입자의 수분함유량, 작동온도 등 ER 유체의 조성 조건 및 사용 조건에 따라 달라지는 ER 유체의 고유 값으로 빙햄(Bingham)특성실험을

통하여 얻어지며 E (kV/mm)는 이때 인가되는 전기장을 나타낸다. ΔP_{ER} 은 전기장 부하시 원형 덕트 사이로 유동이 발생할 때 필요한 최소한의 압력으로 해석 할 수 있다. 본 연구에서의 ER 충격댐퍼는 전극이 실린더 중간에 고정되어 이를 기준으로 상부챔버와 하부챔버 사이를 통해 유동이 발생된다. 이 유동은 ER 유체의 거동 중에서 유동 모드에 해당되고 ER 유체의 빙햄특성 실험을 수행하여 유동모드에서의 항복응력을 도출하였다. 이때 사용된 ER 유체는 실험실에서 직접 조성된 I3S35 ER 유체가 사용되었다. 실험조건으로 전기장은 0-3kV/mm 까지 인가하였으며, ER 유체의 온도는 30°C로 하여 실험을 수행하였다. Fig. 2에 유동 모드시 I3S35 ER 유체의 빙햄특성 실험결과를 도시하였다. 이때 전기장의 함수로 표시되는 α 와 β 는 각각 190.5, 1.874이다. 이때 전기장 부하시 ER 효과에 의한 댐핑력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_{ER} = \Delta P_{ER} \cdot (A_p - A_r) = 2 \frac{L}{h} \alpha E^\beta (A_p - A_r) \text{sgn}(\dot{x}) \quad (5)$$

셋째, 실린더 내부에 장착되어 있는 코일스프링에 의한 댐핑력은 다음과 같다.

$$F_{cs} = k_c \cdot x \quad (6)$$

여기서 k_c 는 코일스프링의 강성을 나타내는 스프

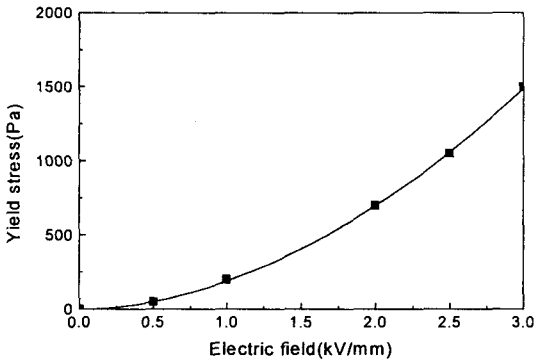


Fig. 2 Bingham characteristic of the I3S35 ER fluid

링상수 값이다.

위 결과로부터 ER 충격댐퍼에서 발생하는 전체 댐핑력은 ER 유체유동시 발생하는 유체점성에 의한 댐핑력, ER 효과에 의한 댐핑력 그리고 코일스프링에 의한 댐핑력으로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_T = F_R + F_{ER} + F_{cs} = R_c (A_p - A_r)^2 \cdot \dot{x} + 2 \frac{L}{h} \alpha E^\beta (A_p - A_r) \text{sgn}(\dot{x}) + k_c \cdot x \quad (6)$$

제안된 ER 충격댐퍼의 수학적 모델링을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 후, 이를 토대로 ER 충격댐퍼를 설계, 제작하였다. 이때의 설계 변수들은 Table 1에 나타내었다. 그리고 본 연구에서 제작된 ER 충격댐퍼의 사진이 Fig. 3에 도시 되었다.

Table 1 Specification of the proposed ER shock damper

Specification	Variable	Value(unit)
Piston Area	A_p	63.6e-4m ²
Piston Rod Area	A_r	4.52e-4m ²
Electrode Length	L	0.050m
Electrode Gap Size	h	0.001m
Coil Spring Stiffness	k_c	3900N/m

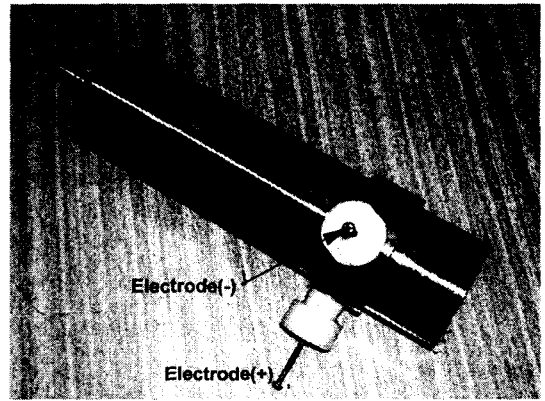


Fig. 3 Photograph of the ER shock damper

3. ER 충격 댐퍼의 성능시험

3.1 실험장치의 구성 및 방법

제한된 ER 충격댐퍼의 동적특성을 고찰하기 위한 실험장치의 개략도가 Fig. 4 에 도시 되었다. 전자식가진기에 의하여 일정한 진폭으로 ER 충격댐퍼를 가진 시키면서 비접촉 변위센서를 통해 가진 변위를 측정하였고 이때 발생하는 댐핑력은 상부 지그에 고정되어 있는 로드셀을 통해 측정하였다. 실험시 AD/DA 보드를 통하여 가진 변위를 일정하게 가진기에 입력하였으며 ER 충격댐퍼에 고전압 앰프를 통해 일정한 전기장을 인가하였고 센서들로부터 얻어지는 신호들을 입력, 저장하였다. 실험시 ER 유체의 절연 파괴를 고려하여 전기장은 2kV/mm 로 제한 하여 전기장 부하시 발생하는 댐핑력을 얻었다. 이때의 사인파형을 갖는 가진 변위는 $\pm 1\text{mm}$ 이고 가진 주파수는 40Hz 까지 하여 전기장 부하에 따른 댐핑력 변화를 고찰하였다.

3.2 성능고찰

Fig. 5 는 ER 충격댐퍼에 전기장 크기를 각각 0, 0.5, 1, 2kV/mm 인가시 댐핑력 변화를 시간영역에서 도시한 것이다. 이때의 가진 주파수는 25Hz 이다. 그림에서 보듯이 2kV/mm 의 전기장 인가시 전기장 무부하시 보다 약 160N 정도의 댐핑력이 증가하는

것을 알 수 있고 댐핑력이 양쪽 방향으로 거의 유사하게 대칭적으로 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 6 은 가진 주파수에 따른 댐핑력을 실험적으로 얻은 값을 나타내고 있다. 전기장 인가에 따라 댐핑력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 실험은 비교적 높은 주파수인 40Hz 까지 수행되었다. 실험이 수행된 주파수 영역에서의 최대 댐핑력은 10Hz 부근에서 발생되고 이때의 증가량은 200N 가량 된다. Fig. 7 은 ER 충격댐퍼의 모델링으로부터 얻어진 시뮬레이션 결과로서 실험결과와 매우 유사한 경향을 보임을 알 수 있고 이로부터 제한된 동적모델의 타당성을 확인할 수 있다.

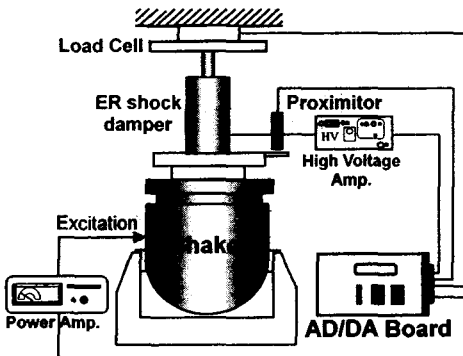


Fig. 4 Experimental apparatus for the ER shock damper test

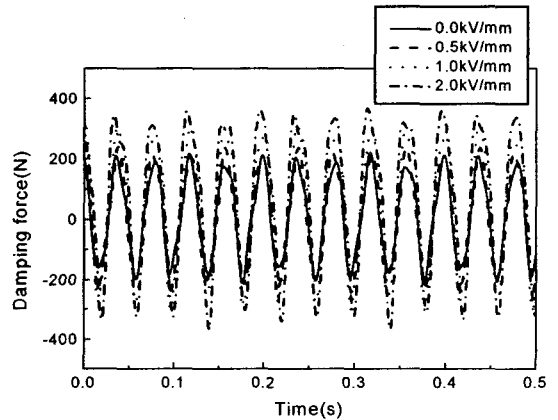


Fig. 5 Field-dependent damping force at excitation frequency 25Hz

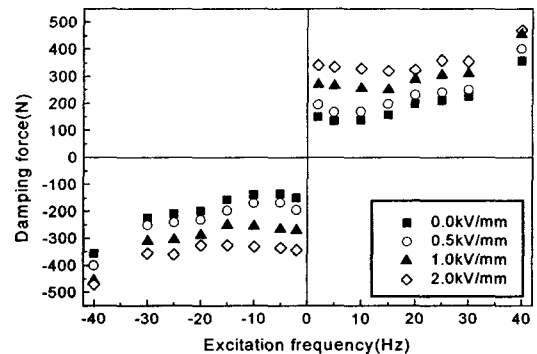


Fig. 6 Damping force vs. excitation frequency(measured)

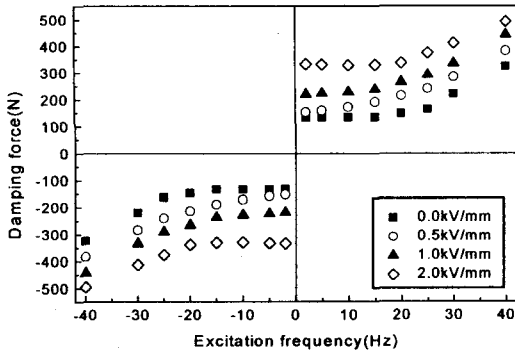


Fig. 7 Damping force vs. excitation frequency (simulated)

4. 충격절연 시스템

4.1 충격절연 시스템의 모델

충격절연 시스템은 충격절연 장치 위에 장비가 장착되어 있는 형태로 1 자유도로 모델링을 하였다. Fig. 8은 ER 충격댐퍼를 장착한 충격절연 시스템의 역학적 모델을 도시한 것이다. 이로부터 시스템의 지배방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$M\ddot{x} + C(\dot{x} - \dot{y}) + K(x - y) = -F_{ER} \quad (7)$$

여기서 $C = R_c(A_p - A_r)^2$, $K = k_c$, F_{ER} 은 전기장 부하시 ER 효과에 의해 발생하는 댐핑력이다. 이때 가진 조건은 반정현함수 (half-sine function)의 형태로 입력되었고 다음과 같다.

$$y = \begin{cases} \sin(2\pi t / \tau), & t < \frac{\tau}{2} \\ 0, & t > \frac{\tau}{2} \end{cases} \quad (8)$$

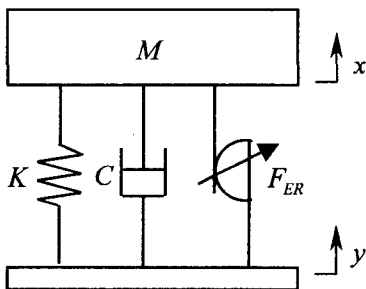


Fig. 8 Mechanical model of the shock isolation system

4.2 제어기 설계

제어기를 통한 충격절연 성능을 살펴보고자 충격절연시스템에 장착되어 있는 ER 충격댐퍼에 스카이훅(skyhook)제어기를 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 충격 절연 성능을 살펴보았다. 반응동형작동기의 제어에 많이 사용되는 스카이훅 제어기는 Karnopp에 의해 제안되었으며, 시스템 상부 공간상에 설정된 절대 고정 변위와 시스템 사이에 가상의 댐퍼를 설치하고 이때 발생하는 가상 댐퍼의 댐핑력을 요구 댐핑력으로 사용한다.⁽⁷⁾ 요구 댐핑력은 질량의 수직 운동을 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U = C_{sky} \cdot \dot{x} \quad (9)$$

여기서 C_{sky} 는 제어 게인 값을 나타내며 물리적으로는 댐핑계수를 나타낸다. ER 충격댐퍼는 반응동형 작동기 이므로 다음과 같은 반응동 구속조건을 만족해야 한다.

$$U = \begin{cases} U & \text{for } U(\dot{x} - \dot{y}) > 0 \\ 0 & \text{for } U(\dot{x} - \dot{y}) \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

이로부터 요구 댐핑력을 얻기 위해 필요한 제어전기장은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E = \left(\frac{h \cdot U}{2\alpha L(A_p - A_r)} \right)^{1/\beta} \quad (11)$$

4.3 충격절연 성능

1 자유도 충격절연 시스템을 구성한 후 ER 충격댐퍼를 장착하였을 경우 충격절연 성능을 살펴보기 위해 진폭 1mm 반정현함수 형태의 가진을 주어 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 수행시 ER 충격댐퍼에 인가되는 전기장은 절연 파괴를 고려하여 2kV/mm로 제한하였다. Fig. 9는 이경우의 장비(M)에서 응답특성을 보이고 있다. 스카이훅제어기를 통해 제어를 수행한 경우 변위가 넓은 주기영역에서 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig. 10 은 장비의 가속도 응답특성을 보여주고 있다. 이 또한 제어를 수행하였을 경우 좋은 충격절연 성능을 보이는 것을 알 수 있고 이는 외부의 충격에 대해 장비의 손상을 효과적으로 저감 시킬 수 있음을 의미한다.

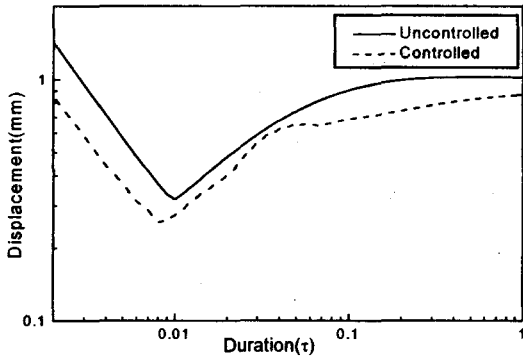


Fig. 9 Displacement of the equipment for duration

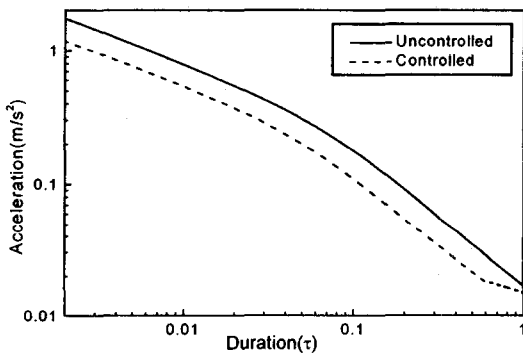


Fig. 10 Acceleration of the equipment for duration

5. 결론

본 연구에서는 충격절연을 위한 ER 충격댐퍼를 제안하였다. 제안된 ER 충격댐퍼는 전기장 부하에 따라 연속적으로 댐핑력을 발생 시킬 수 있으며 기존 충격절연 시스템에서 채용하고 있는 가스캠버를 배제한 설계를 하여 제작하였다. 그리고 이에 대한 동적모델링을 수행하여 모델에 대한 타당성을 확인하였고 전기장 부하에 따른 댐핑력 변화를 확인하였다. 이러한 ER 충격댐퍼의 동특성을 기초로 1 자유도 시스템을 구축하여 ER 충격댐퍼

를 제어하기 위한 제어기를 설계하였으며 충격과형에 대한 응답 특성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 우수한 충격절연 성능을 보이는 것을 확인하였다. 앞으로 각종 충격과형에 대한 충격절연 시스템의 응답특성 실험에 관한 연구와 충격과형에 대한 외부 불확실성과 보다 좋은 가속도 차단 성능을 갖는 제어기에 관한 연구가 수행 될 예정이다.

후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-304-005-3) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Taylor, D. P., "Development and Testing of an Controlled Shock and Vibration Damper Having an Electrorheological Fluid Medium," 67th Shock and Vibration Symposium, 1996, pp. 437-446.
- (2) Mohamed, N. A., Ariffin, A. K. and Ng, W. B., "Optimization of the Orifice Flow in Shock Absorber Using Shape Memory Alloy Wire," Proc. Of SPIE Vol. 3989, Damping and Isolation, 2000, pp.204-212
- (3) Yangla, J. J. and Kuchinski, M., "Smart Ships That Brace For Shock," 65th Shock and Vibration Symposium, 1994, pp.219-232.
- (4) Jordan, T. C. and Shaw, M. T., "Electrorheology," IEEE Transactions on Electrical Insulation 24, 1998, pp.849-879.
- (5) Petek, N. K., "An Electronically Controlled Shock Absorber as an Application of Electrorheological Fluid," SAE Technical Paper Series, 1992, No. 920275.
- (6) Choi, S. B., Choi, Y. T., Chang, E. G., Han, S. J. and Kim, C. S., 1998, "Control Characteristics of a Continuously Variable ER Damper," Mechatronics, Vol. 8, pp.143-161.
- (7) Karnopp, D. and Crosby, M. J., 1974, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 96(2), pp.619-626.