

반응동 점성감쇠를 이용한 유체댐퍼 개발에 관한 연구

전 중 균* · 김 현 식*

A Study on the Development of a Hydraulic Damper using Semi-Active Viscous Damping

Chong K. Chun* and Hyun S. Kim*

요약 본 논문에서는 교량 및 건축구조물, 각종 기계부품의 진동문제를 보완하기 위한 방법으로 MR 유체를 이용한 댐퍼를 연구하였다. MR 유체의 특성을 이용한 댐퍼를 모델링하여, 설계도면을 기초로 MR 댐퍼를 제작하였다. 만능재료 시험기를 이용하여 주파수와 진류 및 변위를 단계적으로 변화시켜가며 성능실험을 반복적으로 수행하였다. 실험을 통하여 주파수, 진류 및 변위에 따라 댐핑 효과가 다르게 나타남을 확인할 수 있었다.

Abstract In this paper, hydraulic damper was studied to solve vibration problems of bridge, structures and several mechanic parts using magnetic fluid. The damper was modeled using Magneto Rheological fluid and MR damper was manufactured on the basis of design drawing. To investigate the efficacy of magneto rheological phenomenon, experiments were performed on the several design parameters using Universal Testing Machine(UTM). Damping efficacy were examined by frequencies, displacement and electric currents through experiments.

Key Words : Semi-active viscous damping, Magneto rheological fluid hysteresis curve

1. 서 론

구조 경량화와 제품의 고성능화 추세, 그리고 진동에 대한 규제가 더욱 가속화됨에 따라 진동문제는 항공/우주분야 뿐만 아니라 산업용 기계, 토목 구조에 이르기까지 그 적용범위가 대폭 확산되고 있다. 이러한 진동문제는 생산라인에 있어서 불량률을 증가시키고 있으며, 구조물들의 수명을 단축시키는 등 경제적 손실 및 자연환경의 파괴를 유발시키고 있다. 최근에 와서는 진동문제를 최대한 억제하는 방법이 많이 연구되고 있으며, ER(Electro Rheological) 및 MR(Magneto Rheological) 유체를 이용한 방진 장치의 개발과 제어기 구현이 용이해져 미국과 유럽을 중심으로 가변형 댐퍼가 연구되고 있다. MR 댐퍼는 비교적 복잡하고 비용이 많이 소요되는 단점이 있는 능동제어를 보완함과 동시에 진동 문제를 최대한 해결하는 반응동식 진동제어로 연구되고 있다. 자기장에 대해 점성이 변하는 MR유체를 이용한 댐퍼는

기계적 마찰과 에너지 소모가 적으며 빠른 응답속도를 가지고 있기 때문에 자동차 현가 장치 등의 저주파 진동 뿐만 아니라 엔진 마운트나 방진 테이블 등의 고주파 진동에도 효과적인 감쇠를 보일 수 있다. 이러한 MR유체 관련 기술은 화학, 기계, 항공 우주뿐만 아니라 군수 산업에 이르기까지 그 적용 범위는 매우 광범위하고 낮은 원가로도 고부가가치 창출이 가능해 경제적 영향도 상당히 크다. 따라서 본 연구에서는 MR 유체를 이용한 댐퍼를 개발하여 진동차단 효과를 정성적, 정량적, 동적, 정적특성을 분석하여 성능을 평가하였다.

2. 제작 및 실험

2.1. MR 유체의 정의 및 특성

MR유체는[1,2] 외부 자장에 의해 유체가 가지는 항복 응력을 변화시킬 수 있는 기능성유체로 알려져 있다. 일정한 용매에 높은 투자율을 가지며 직경 1~수십 μmm 의 철분말을 분산시킨 용액으로서 MR 유체는 작용하는 자기장이 없을 때에는 뉴턴 유체의 특징을 보이며 자기

*신moon대학교 기계공학과

본 논문은 유니슨산업(주) 기술연구소와 공동 개발하였으며 그 핵심내용은 MR유체의 특성을 이용한 가변댐퍼를 개발하는 것이다. 이는 각종 기계, 토목 구조물에 적용 가능한 신제품 개발기술이다. (E-mail: ckchun@omega.sunmoon.ac.kr)

장이 작용할 때는 항복 응력이 증가하는 Bingham 유체의 특성을 나타낸다. Bingham 유체는 다음의 식(1)과 같이 점성 μ 와 전단 변형률 속도인 γ 에 의해 생기는 응력과 자기장(H)에 대한 함수 형태로 나타낸다.

$$\tau = \tau(H) + \mu\gamma \quad (1)$$

MR 유체에 자기장이 작용할 때 항복 응력이 증가하는 것은 유체가 자기 극성을 가지게 되어 Figure 1과 같이 각각의 입자들이 이방성 구조의 쇠사슬 형태로 나열된다. 이러한 원리에 의해서 MR 유체는 자기장의 유무에 따라 항복 응력이 변화되며 이 특성을 이용할 경우 댐핑 계수가 변하는 가변댐퍼의 제작이 가능하다[3].

MR 유체는 작용하는 자기장에 대한 반응속도가 빠른 특징을 가지고 있으며 자기장의 변화에 대한 응답시간이 보통 수 msec로 알려져 있다. 그러므로 실시간 제어가 가능하며 기계시스템과 전자 제어 상호간의 융합이 용이하며 생산 및 장치의 동작 시에 첨가될 수 있는 불순물의 영향이 적고 독성이 없어 어느 환경에서나 안전한 장점이 있다. MR 유체의 항복 응력이 변화하는 메커니즘은 ER 유체와 아주 유사하고 자장과 전장이라는 점이 다를 뿐이다. 특히, 발생하는 항복 응력의 크기에 관해서는 MR 유체가 20~50배 정도이고 고전압을 이용할 필요가 없는 점으로 MR 유체의 적용가능성이 높게 평가되는 근거로 알려져 있으며 기본 점도는 ER 유체의 경우가 폭넓게 설정 가능한 것으로 알려져 있다[10].

2.2. MR(Magneto Rheological) 댐퍼 제작

MR 또는 ER 댐퍼는 일종의 제어 가능한 댐핑 성능을 갖는 가변 점성 댐퍼로서, 외부의 에너지를 이용하여 바이패스를 통과하는 유체의 특성을 조정함으로써 댐핑력의 크기를 조절할 수 있는 댐퍼이다[4-7]. 최근에 능동 또는 반 능동 제어에 대한 연구가 활발해지는 추세와 더불어 인위적인 특성을 얻을 수 있는 댐퍼로서 활용되고 있다. 댐퍼의 제작에 앞서 기존에 시판되고 있는 MR 유

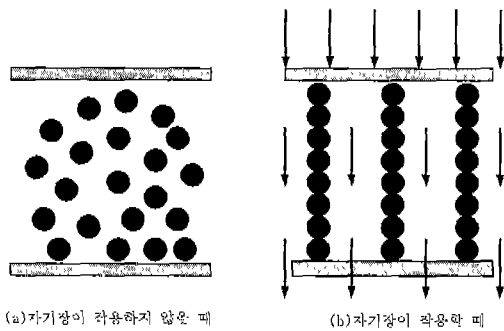


Figure 1. MR 유체의 역학적 특성.

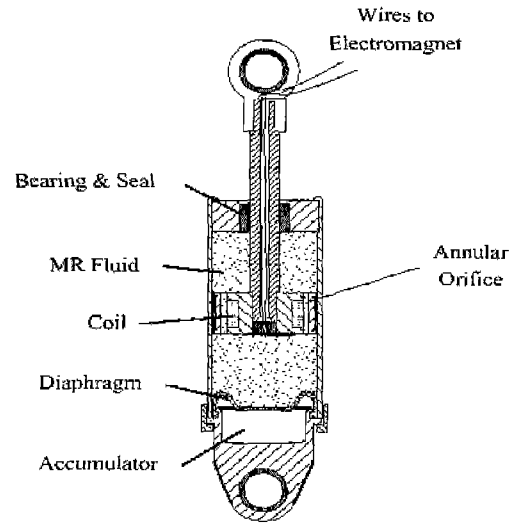


Figure 2. LORD사의 MR 댐퍼 제품.

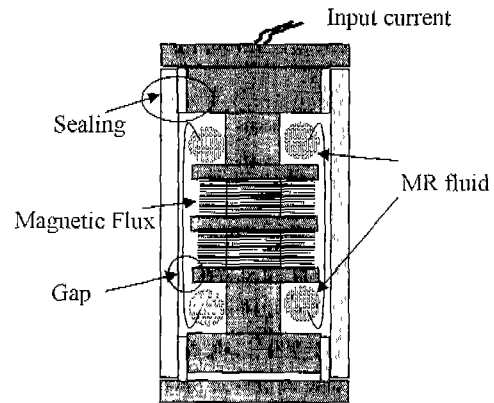


Figure 3. 댐퍼의 개념도.

체를 이용한 댐퍼를 조사해 본 결과 미국의 LORD사에서 제품을 생산하고 있었다. Figure 2는 미국 Lord사의 댐퍼 형상이다. 댐퍼의 작동원리를 분석한 결과 wire를 통해 전류가 흐르게 되면 MR 유체의 항복 응력이 증가되면서 댐퍼로서의 성능을 발휘하게 되고 하단부에 장착된 Accumulator에 의해 댐핑력 저하의 원인을 제공하는 기포발생이부를 억제시키고 있음을 알 수 있었다[8].

설계 제작된 MR 댐퍼의 개념도는 Figure 3과 같다. 댐퍼로서 요구되는 기계적 파워를 W_m 이라고 하고 제어 가능한 힘의 비를 λ 라고 할 때, 최소한의 활성화 유체 부피는 식 (2)와 같이 계산될 수 있다. 여기서 λ 는 전류를 가하지 않은 단순한 점성댐퍼의 기능을 할 때와 전류를 가하여 댐핑력이 커졌을 때의 힘의 비로서 설계시 중요한 요소이다. 활성화된 유체의 부피는 $V=L*W*g$ 이다

Table 1. 제작된 MR 댐퍼의 사양

Items	Specification
Piston diameter	50 mm
Activated fluid volume	1.25 cc
Total fluid volume	130.7 cc
Wire diameter	0.8 mm
Number of Turns	300
Resistance	1.6 Ω

Table 2. 사용된 MR 유체의 특성(MRF-336AG)

Items	Specification
Specific heat(@25°C)	0.68 J/g °C
Density	3.45 g/cm ³
Viscosity in Pa. sec 10 ⁻¹	8.5
Shear stress(@ 1 tesla)	57 kPa

로 피스톤헤드와 외벽 사이의 간격, g 는 식 (4)와 같이 계산되어 진다.

$$V = k \left(\frac{\pi}{4} \right) \lambda W_m \tag{2}$$

식 (2)에 의하여 최소의 활성 유체의 부피는 1.25 cc 이상이어야 되고 식 (4)에 의해 피스톤 헤드와 실린더와의 간격이 약 0.4 mm가 되어야 한다.

$$w g^2 = \frac{12}{c} \lambda Q \tag{3}$$

$$g = \left(\frac{\pi}{4} \right) \lambda S \tag{4}$$

위의 설계조건을 고려하여 제작된 MR 댐퍼의 사양은 Table 1과 같으며, 실험에 사용된 MR 유체는 Lord사에서 개발한 제품으로써 Table 2에 유체의 특성을 나타내었다[8].

Figure 4를 보면 알 수 있듯이 지그, 하우징, 내부 실린더, 로드, 코일, 몸체부분으로 나누어지는데 실린더 부분 가운데에 에나멜선을 감아서 전류를 흘려 주었을 때, 자력이 발생하도록 제작하였으며 몸통 외부에 있는 2개의 구멍으로 MR유체를 주입할 수 있도록 하였다. Figure 5는 제작된 댐퍼의 형상을 나타내고 있다.

2.4. 실험

제작된 댐퍼를 가지고 Figure 6과 같이 25 Ton 용량의 반응재료시험기에 장착하여 성능실험을 수행하였다. 외부에서 Power supply를 이용하여 댐퍼에 전류를 공급해

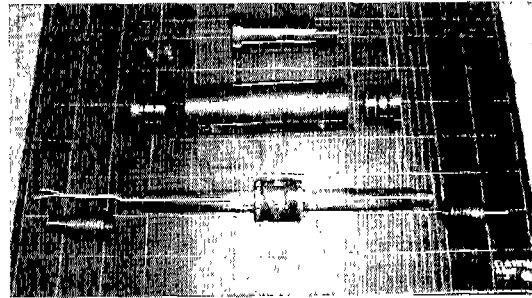


Figure 4. 제작된 댐퍼의 부품 형상.

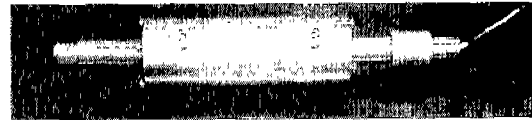


Figure 5. 조립된 댐퍼의 형상.

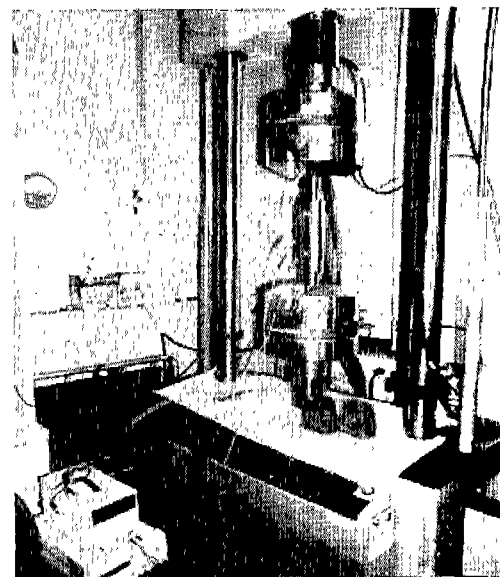
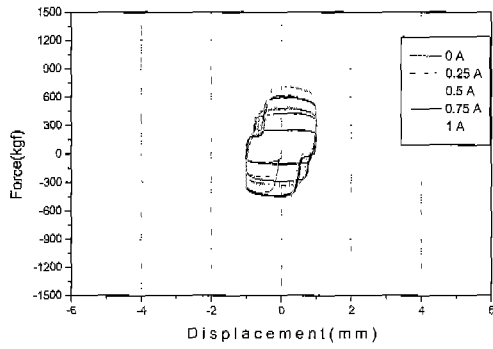


Figure 6. 댐퍼의 성능 실험.

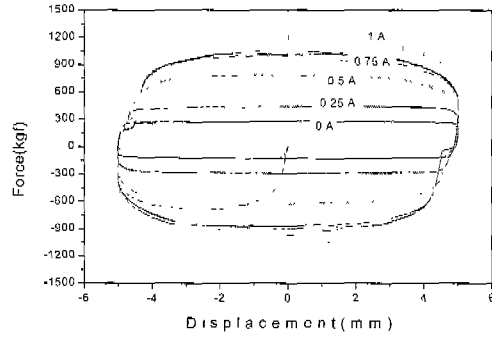
주고 전류의 범위에 따른 댐퍼의 성능을 실험하였다. 실험을 위한 댐퍼의 성능실험 주요 변수로 주파수, 변위, 전류로 설정하였다[9]. 주파수는 0.5 Hz, 1 Hz, 2 Hz로 설정하였으며, 변위는 ±1 mm, ±2 mm, ±3 mm, ±5 mm, ±10 mm로 그리고 입력 전류는 0A, 0.25A, 0.5A, 0.75A, 1A로 설정하였으며 주파수에 따라서 싸이클 당 데이터의 샘플링 개수가 1200개가 되도록 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

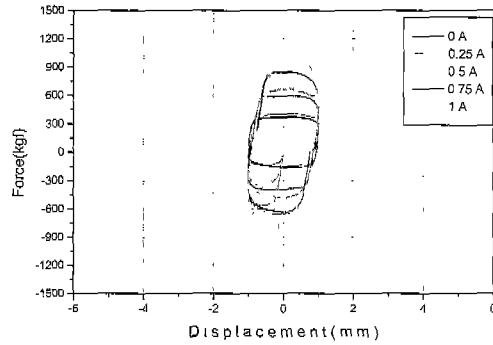
Figure 7은 입력 주파수와 전류, 댐퍼의 최대 변위를 바꿔 가면서 실험한 결과를 나타낸다. 그림을 보면 주파



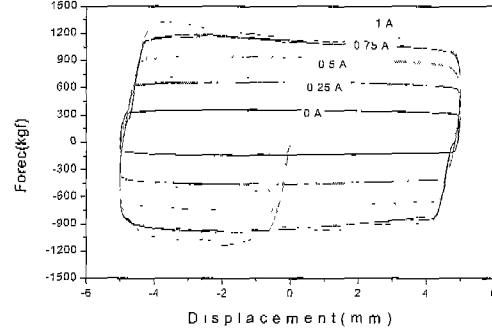
(a) 주파수 0.5 Hz - 변위 ±1 mm



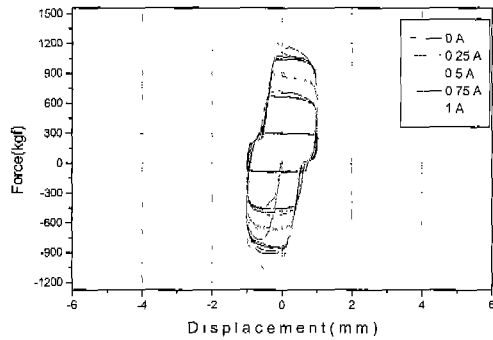
(b) 주파수 0.5 Hz - 변위 +5 mm



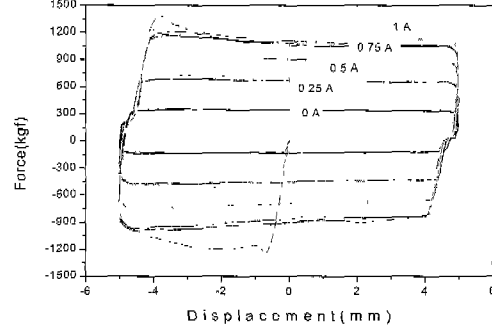
(c) 주파수 1 Hz - 변위 ±1 mm



(d) 주파수 1 Hz - 변위 ±5 mm



(e) 주파수 2 Hz - 변위 ±1 mm



(f) 주파수 2 Hz - 변위 ±5 mm

Figure 7. 전류 제어에 따른 댐퍼의 Hysteresis 곡선.

수가 0.5 Hz일 때 같은 변위에서 입력 입력전류가 0A에서 1A로 증가할수록 댐퍼의 압축하중과 인장하중이 증가하는 현상을 보였으며, 유연한 형태의 Hysteresis 곡선이 나타났다. 1 Hz와 2 Hz에서도 0.5 Hz와 마찬가지로 결과를 얻을 수 있었는데, 이는 제작된 댐퍼가 입력 전압에 대해 에너지 소산의 양이 변화하는 가변 댐퍼로서의 성능을 발휘하는 것으로 판단된다. Figure 8은 변위를 ±2 mm, 입력전류를 0.25A로 고정하고 주파수를 변화시켰을 경우의 실험결과를 나타내고 있으며 주파수가 빨라질수록 댐퍼에 인가되는 하중이 증가하는 것을 알 수

있다. Figure 9는 주파수를 1 Hz, 입력 전압을 0.5A로 고정하고 변위를 변화시켰을 경우의 실험결과로서 댐퍼의 상·하 변위가 증가할수록 하중이 증가하는 것을 알 수 있었다. 같은 전류에서 최대 스트로크나 주파수를 증가시켰을 때 MR 댐퍼는 일반 유압댐퍼와 같이 속도가 증가함에 따라 최대 하중이 커진다. 이는 일반 뉴턴 유체의 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 전압을 변화시켰을 경우의 하중 변화는 Bingham 유체의 특성에 의한 것이며 주파수와 변위를 증가시켰을 때보다 발생하는 하중 변화량이 증가함을 알 수 있다. 실험을 진

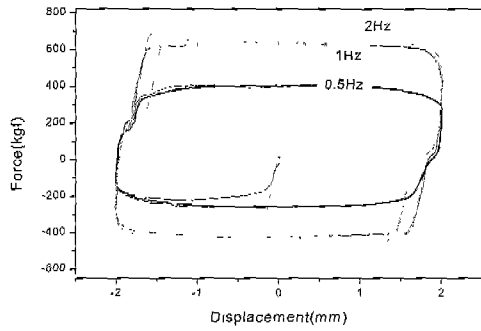


Figure 8. 주파수 제어에 따른 댐퍼의 Hysteresis 곡선 (전류 0.25A).

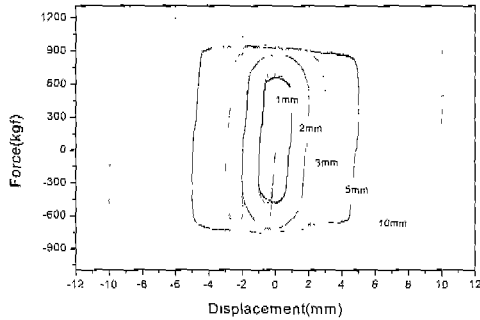


Figure 9. 변위 제어에 따른 댐퍼의 Hysteresis 곡선 (1 Hz, 0.5A).

행하면서 상대적으로 고속인 2 Hz, 변위 5 mm 이상인 경우에는 Hysteresis 곡선이 유연하지 못한 형태로 나타난 것을 알 수 있는데, 이는 입력 전류가 클수록 큰 하중이 작용하게 되는데 제작된 댐퍼의 경우 내부의 자성 유체의 양이 적어 한계 하중에 달한 것으로 판단된다. 댐퍼의 한계 하중을 극복하기 위해서는 댐퍼의 크기 및 유체의 용량을 조절하고 내부 설계를 변경한다면 필요하중에 대하여 적절한 성능을 발휘 할 것으로 판단된다. Hysteresis 곡선이 상하 양쪽 끝 부분에서 약 0.5 mm 변위만큼의 찌그러짐이 발생하였는데, 이는 댐퍼내에 자성유체 주입 시 발생한 기포로 인하여 내부에 미세한 공간이 발생한 것으로 추정된다. 연구 결과에서 볼 수 있듯이 댐퍼의 입력전류를 높이거나 실린더 내부에 설치된 에나멜선의 저항값을 높여 교량이나 구조물의 크기에 맞도록 생산하고 적용시킨다면 불량률 증가나 구조물 수명저하 및 붕괴, 자연환경 파손 등의 진동 문제를 충분히 방지할 수 있을 것이라 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 항복 응력이 자장의 크기에 따라 변화

하는 특성을 지닌 MR 유체를 이용하여 반응동 제어 성능을 발휘하는 가변 유압댐퍼를 제작하여 댐퍼의 성능 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 주파수, 변위의 제어시 댐핑력의 증가는 뉴턴 유체의 특성에 의한 것이며, 전류 제어시 댐핑력의 증가는 bingham 유체의 특성을 나타내고 있다. 주파수와 변위 제어시보다 전류 제어시 댐핑력의 하중 분포가 폭 넓게 나타났으며, 이는 제작된 댐퍼가 일반 유체를 이용한 댐퍼보다 뛰어난 가변 댐퍼로서의 성능을 발휘하는 것으로 판단된다.
- 2) 댐퍼의 특성을 결정하는 전류는 댐퍼 내의 감긴 코일의 회전수와 두께 변화를 통하여 변화를 줄 수가 있으며, 필요한 용량을 만족하기 위하여 최적화된 설계 변수와 치수산정이 요구된다.
- 3) MR 유체 주입시 공기투입 여부를 최소화 할 수 있는 설계가 필요하며 MR 유체의 온도 변화 특성에 대한 검토가 필요하다.

5. 향후 연구계획

본 연구에서는 MR 댐퍼의 시제품을 제작, 성능 실험을 수행하여 MR 유체의 댐퍼 적용 가능성을 확인하였다. 국내의 MR 유체를 이용한 연구는 활발히 진행중이지만 아직 실험 연구단계에 이르고 있는 실정이다. 본 연구에서 얻은 실험결과를 근간으로 하여 최적화된 치수산정과 설계 변수를 도출하여 향후 실제 현장에서 이용할 수 있는 MR 댐퍼 개발에 도움이 되었으면 한다. 현재 MR 유체를 이용한 댐퍼에 관한 연구는 자동차 분야의 려가 장치나 군수 산업 분야의 전차포동 많은 적용 대상이 나타나고 있으며, 나아가서 건축 구조물에까지 활용될 수 있으리라 판단된다. 특히, 본 연구에서 사용된 MR 유체가 전량 수입되고 있어 발생하는 경제적인 문제가 MR 유체의 국산화로 해결된다면 MR 유체를 이용한 댐퍼개발에 대한 연구가 더욱 활성화 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 신문대학교 공조기술 연구센터 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

[1] M. R. Jolly, J. W. Bender, and J. D. Carlson,

- "Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids," SPIE Vol. 3327, pp. 262-275, 1998.
- [2] T. Marksmeier, E. L. Wang, and F. Gordaninejad, "An electro-rheological grease(ERG) shock absorber," SPIE Vol. 3327, pp. 242-250, 1998.
- [3] Y. Okada and H. Harada, "Regenerative control of active vibration damper and suspension systems," Proc. of the 35th Conf. on Decision and Control, pp. 4715-4720, 1996.
- [4] A. H. Falah, W. Clark, and P. Phule, "Modeling of magnetorheological fluid damper with parallel plate behavior," SPIE Vol. 3327, pp. 276-283, 1998.
- [5] G. M. Kamath, N. M. Wereley, and M. R. Jolly, "Analysis and Testing of a Model-scale Magnetorheological Fluid Lag Mode Damper," 53 rd Annual Forum of the American Helicopter Society, pp. 1325-1335, 1997.
- [6] S. P. Chang and N. Makris, "Response of isolated structures equipped with controllable fluid dampers," SPIE Vol. 3329, pp. 428-438, 1998.
- [7] C. IL Park and D. Y. Jeon, "ON/OFF Vibration Control Considering The Time Delay of The MR Damper," 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 566-572, 1997.
- [8] Catalog of MR fluid, 1998, LORD Co.
- [9] J. K. Jeoung, H. Choi, and D. H. Kim, "A Study on the Parameter Estimation of the Nonlinear models describing MR damper," 한국소음진동공학회 추계 학술대회 논문집, pp. 902-907, 1999.
- [10] Young Kong Ahn, 2000, "A Modeling of a Variable-damping Mount Using MR Fluid," 한국 소음진동 공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1338-1343.