

ER유체의 역학적 특성이 반능동 현가시스템에 미치는 영향

박우철† · 김옥삼* · 김일겸** · 조남철***

(원고접수일 : 2003년 11월 17일, 심사완료일 : 2003년 12월 19일)

Influence of Bingham Characteristics for ER Fluid on Semi-Active Suspension System

Woo-Cheul Park† · Ok-Sam Kim* · Il-Gum Kim** · Nam-Cheol Cho***

Abstract : The electro-rheological fluids for semi-active suspension system are a class of colloidal dispersion which exhibit large reversible changes in their rheological behavior when they are subjected to external electrical fields. This paper presents Bingham properties of ER fluids subjected to temperature variations. In addition, an appropriate size of the ER damper for a passenger car is proposed to investigate the effects of Bingham characteristics on the damping performance. The filed-dependent damping forces are evaluated according to the temperature variation and sedimentation ratio.

Key words : Electro-Rheological fluids(전기유동유체:ER유체), Sedimentation(침전), Damping force (댐핑력), ER damper(ER 댐퍼), Bingham property(빙헴특성), Electric field(전기장), Yield stress(항복응력)

1. 서 론

ER유체를 응용장치에 적용할 때 ER유체의 가장 큰 특징은, 전기장 부하에 의한 역상-고상으로 변화가 매우 빠르고 가역적이라는 점이다. 이러한 ER유체의 고유 특성을 이용한 응용 장치는 1980년대 후반부터 세계 각국에서 본격적으로 연구되었다. 독일 Bosch사의 K. H. Hagele¹⁾ 등은 다단 원통형 전극으로 구성된 ER댐퍼를 제작·실험한 결과, 최대 5kV/mm 전기장 부하시 300N정

도의 댐핑력을 얻었다. 일본의 S. Morishita²⁾도 같은 형식의 ER가변댐퍼를 제작하였고 실험적으로 연속가변댐퍼의 가능성을 제시하였다. N. K. Petek³⁾ 등은 실제 자동차의 ER댐퍼를 장착한 현가장치 시스템을 구성한 후, 차체의 피치(pitch), 히브(heave) 그리고 롤(roll)운동이 고려된 스카이훅 제어 알고리즘을 통해 현가장치의 성능 향상을 도모하였다.

한편, 국내에서도 전기장 부하에 따라 댐핑력을 연속적으로 가변할 수 있는 ER댐퍼의 기초 성능

† 책임저자(삼척대학교 자동차공학과), E-mail : wchpark@cheok.ac.kr, T : 033)550-6392

* 여수대학교 기계공학과

** 삼척대학교 기계공학과, 시간강사

*** 안산공과대학 기계과

시험을 수행한 결과가 있다^{1~5)}. 이와 같이 ER유체를 다양한 산업분야의 응용장치에 적용하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔지만, ER유체를 유압 시스템에 적용하여 위치제어를 수행할 때 요구되는 유체의 압축성과 비열, 알맞은 점도와 윤활 특성, 열 발생 등에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 전도성 입자로 메틸 셀룰로오즈 입자를 사용하여 ER유체(ITMC25)를 자체 제작하였다. 조성한 ER유체의 온도 의존성과 침전 현상을 살펴보고, 이러한 ER유체의 역학적 특성변화가 ER유체를 응용한 ER댐퍼의 댐핑력에 미치는 여러 가지 기계적 특성에 대한 영향을 규명하고자 한다.

2. ER유체의 거동

2.1 ER유체의 일반적 거동

ER유체는 전기장 무부하시 비전도성 용매 중에 분산된 입자가 자유로이 운동을 하는 뉴토니안(Newtonian)유체의 거동을 나타내지만, 전기장을 부과하면 입자가 대전되어 체인형 구조를 형성하여 항복응력을 갖는 빙햄(Bingham) 유체의 거동을 보여준다. 이러한 기둥 모양의 클러스터 구조는 전기장 방향으로 형성되며, 인자들의 결합력에 의하여 외부 전단력에 대해 전기장 부하시 ER유체는 저항을 갖게 되며, 유체의 유동성을 제한한다. ER유체는 부하되는 전기장의 크기에 따라 유체의 항복응력이 증가하는 특성을 보이며, 그 거동은 매우 복잡하지만 ER유체의 항복응력 τ_y 는 전기장 E 에 지수적 비례관계가 성립되어 다음식과 같이 빙햄거동을 한다.

$$\tau = \tau_y(E) + \eta \dot{\gamma}, \quad \tau_y(E) = aE^\beta \quad (1)$$

여기서 τ 는 유체의 전단응력, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도 비율이며 η 는 유체의 점도를 나타낸다. τ_y 는 유체의 항복응력을 표현하는 것으로 전기장(E)의 증가와 더불어 지수 함수적으로 증가한다. 여기서

a 와 β 는 ER유체의 용매 종류, 입자 종류, 입자 중량비와 용매의 점성 등 ER유체의 조성조건에 영향을 받는 ER유체의 고유 상수이다.

2.2 ER유체의 온도에 따른 빙햄특성

온도 변화에 따른 ER유체의 동적 항복응력의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. ER유체의 항복응력은 유체에 유동이 발생하는 순간 전단력을 의미하는데, 유체 유동은 매우 짧은 시간에 시작되며, 복잡한 거동을 하기 때문에 항복응력을 정확히 측정하는 것은 어려운 문제이다. 따라서 많은 연구자^{3~4)}들은 전단 속도비에 대한 전단력의 값을 직선보간 하여 전단속도비의 값이 영(zero)인 부근에서의 절편값을 항복응력으로 고려하여 Fig. 1(a)와 같이 동적 항복응력으로 사용하였다.

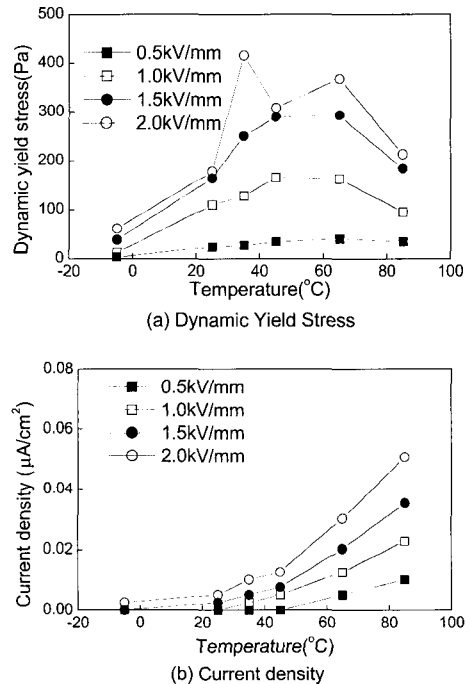


Fig. 1 Bingham property with temperature

따라서 본 연구에서도 이 값을 항복응력으로 하였다. (a)그림에 도시된 바와 같이 ITMC25의 ER유체는 65°C까지는 온도 증가와 함께 항복응력이

증가하지만, 85°C에서 전단력 감소를 나타내고 있다. 이것은 온도상승으로 인하여 입자 내 전하 이동이 활발해지고 분극화시키는데 많은 에너지가 요구되어 결합력이 감소하기 때문인 것으로 생각된다. 2.0kV/mm의 전기장에 대한 항복응력의 변화 중 35°C에서 큰 변화를 나타내고 있는데, 이는 선형화 과정에서 발생하는 문제점으로 추측된다. ER효과를 나타내는데 소요동력을 예측할 수 있는 전류밀도의 변화를 Fig. 1의 (b)에 나타내었다. 전류밀도 변화가 온도 변화에 따라 크게 변하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 메틸 셀룰로이드 입자가 전도성이 높고 분자들의 결합력이 약하여 외부의 전기장 부하에 의한 전하나 이온의 이동이 쉽게 일어나고, 외부의 에너지 변화에 쉽게 반응하기 때문인 것으로 생각된다.

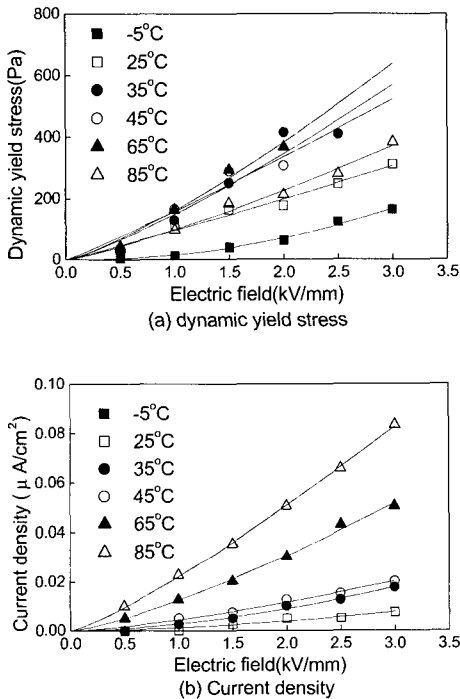


Fig. 2 Bingham properties vs. electric field

각각의 온도에서 전기장 증가에 따른 동적 항복응력과 전류밀도의 변화는 Fig. 2와 같다. 그럼에 나타난 바와 같이 동적 항복응력은 전기장에 대하여 지수함수로 증가한다. ER유체의 온도가 -5°C

인 경우가 전기장 증가에 따른 항복응력의 변화가 가장 작게 나타난다. ER유체의 온도가 높을수록 전기장 증가에 따른 동적 항복응력의 변화는 크게 유발한다.

2.3 ER유체의 침전특성

ER유체는 용매와 입자간 밀도 차이에 의하여 침전현상이 발생한다. 이러한 침전영향을 고려하기 위하여 ITMC25의 ER유체와 상용화된 ER유체(TPAI 3565, Bayer)의 침전현상 결과를 비교하였다. 비교를 위해 ER유체의 시간에 따른 침전률을 계산하였다. 시간 경과에 대한 침전 용적의 변화를 처음 용적에 대한 비율로 표시하면 침전정도를 비교할 수 있는데, 이를 침전률(sedimentation ratio)로 하고, 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{침전률}(\%) = \frac{\text{나중용적} - \text{처음용적}}{\text{처음용적}} \times 100(\%) \quad (2)$$

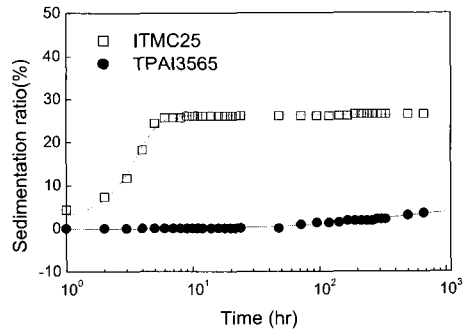


Fig. 3 Sedimentation ratio vs. time

230cc로 부피를 일정하게 하여 메스실린더에 담아 ER유체의 시간 경과에 따른 입자 용적의 높이 변화를 측정하였고 침전률로 환산하였다. ER유체 자체의 침전현상과 침전현상이 응용장치에 미치는 영향을 비교하기 위하여 응용장치의 하나인 ER멤퍼에 채워지는 유량을 일정하게 하였다. ER유체 침전률을 시간 경과에 대하여 살펴보면 Fig. 3과 같다. ITMC25 ER유체는 입자와 용매의 밀도차이 때문에 6시간 이내에 급격한 침전을 일으키며, 그 이상의 시간에서는 서서히 침전하고

있다. ITMC25의 침전물은 800시간 경과 후 28%의 침전을 나타내고 있다. 그러나 상용 ER유체인 TPAI3565는 자체 조성한 ER유체에 비하여 급격한 침전률 변화가 없으며, 시간이 경과함에 따라 서서히 증가하고 있다. 따라서 향후 ER유체를 개발하는 과정에서는 침전현상이 적게 발생하도록 입자와 용매의 밀도차를 조절하여야 할 것이다.

3. ER 댐퍼의 설계 및 제작

3.1 ER 댐퍼의 설계

ER유체의 역학적 특성 변화가 반응동 현가시스템에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 ER유체를 사용하는 ER댐퍼를 Fig. 4와 같이 설계하였다.

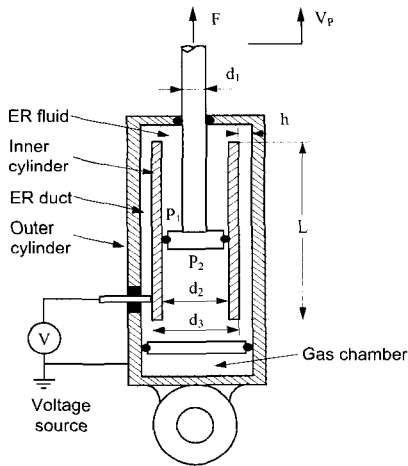


Fig. 4 Schematic diagram of the ER damper

댐핑력의 크기는 소형 승용차용 댐퍼를 기준으로 하였으며, ER댐퍼의 행정거리(strock)는 92mm, 그리고 바깥쪽 실린더의 외경은 60mm이다. ER댐퍼의 성능은 피스톤 및 피스톤 로드 직경, 전극의 너비, 길이, 전극 간격 및 체크밸브 등의 조건에 영향을 받는다. 제안된 ER댐퍼에서는 전극 형태를 실린더형으로 하였는데, 이는 평판형에 비하여 댐퍼 내부에 장착이 용이하고, 전기장의 작용 단적이 넓어져 성능을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. ER댐퍼에 전기장을 부과하기 위한 전극부의 크기는 길이 190mm, 안쪽 실린더의 외경

38.5mm로 하였다. 이를 평판으로 환산하면 $22,969\text{mm}^2$ 이며 전극 간격은 0.75mm로 된다. 아래측 챔버 끝에 가스실을 두어 잔류 공기에 의한 유압 변동현상이나 열팽창의 변화에 대하여 보상되도록 하였으며, 댐퍼 내부의 가스 충전은 외부에 설치된 질소 가스탱크에서 레귤레이터를 통하여 압력 조절기를 거쳐 체크밸브가 내장된 가스 주입구로 일정한 압력을 주입하도록 하였다.

3.2 작동원리 및 실험방법

작동 원리는, 압축 시 피스톤이 이동됨에 따라 압축된 ER유체는 안쪽 실린더와 바깥쪽 실린더 사이에 형성된 원형 덕트를 통하여 이동하게 되어 있다. 이때 양면에 (-)전원과 (+)전원을 부하시키면 전기장이 형성되어 흐르던 ER유체는 항복응력을 갖게 되고 이로 인하여 흐름에 저항하게 되어 댐핑력을 조절한다. 실험방법으로는 ER유체의 온도 변화에 따른 ER댐퍼의 댐핑력 성능 변화를 고찰하기 위하여 ER 댐퍼 내의 온도를 25°C, 35°C, 45°C로 변화시켰다. 여기서 ER댐퍼 내의 온도를 최대 45°C로 정한 것은 예비실험으로 장시간 ER댐퍼를 가동시켰을 때 댐퍼 내의 유체온도가 45°C이상 상승하지 않았기 때문이다. 가진진폭(exciting amplitude) $\pm 20\text{mm}$, 가진 주파수 1.89Hz의 가진 입력을 댐퍼에 작동시켰다. 또한 ER댐퍼 가스 챔버의 초기 가스압력은 10bar로 하였다. 한편, ER댐퍼가 인장(rebound) 운동을 할 경우를 (+)로, 압축(jounce) 운동일때를 (-) 댐핑력으로 표현하였다.

4. ER댐퍼의 성능 실험 및 결과

4.1 온도변화에 따른 댐퍼성능

Fig. 5는 ITMC25 ER유체를 사용하였을 때의 댐퍼 내의 온도증가에 따른 댐핑력을 보인다. 전기장 무부하시에는 댐퍼 내의 유체 온도 증가에 따라 점성이 감소하여 댐핑력이 작아짐을 알 수 있다. 그러나 5kV/mm의 전기장 부하시 댐핑력이 ER유체의 온도 상승에 따라 의존하는데, 이것

은 ER유체의 온도상승과 더불어 항복응력이 증가하기 때문으로 여겨진다.

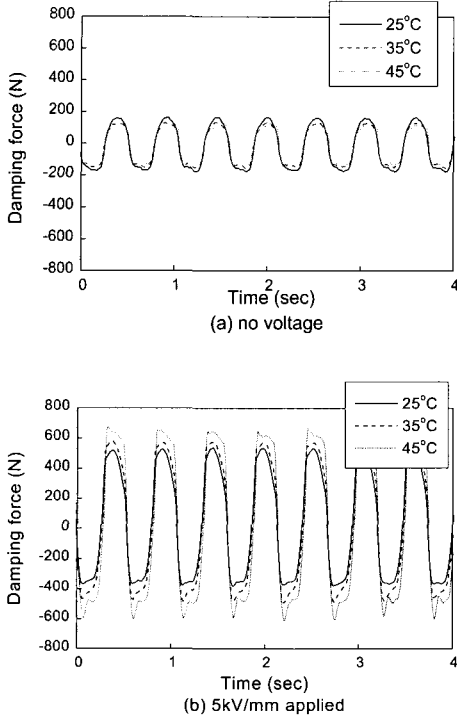


Fig. 5 Time-history of damping force with different temperature

Fig. 6은 유체 온도가 25°C, 45°C인 경우에 대하여 피스톤 속도에 따른 ER댐퍼의 댐핑력 변화를 도시한 것이다. 피스톤 속도의 증가는 가진 진폭을 ±20mm로 고정시키고 가진 주파수를 증가시켜 얻었다. Fig. 6 (a)는 ER유체의 온도가 25°C인 경우 전기장 무부하시 피스톤 증가에 따라 댐퍼의 댐핑력도 증가하는 것을 보인다. 이는 피스톤 속도증가에 따라 유체 유동저항으로 인하여 댐핑력이 증가하기 때문이다. 또한 전기장 5kV/mm의 경우가 무부하시의 경우보다 댐핑력이 2배 정도 증가된다. 그 결과 ER댐퍼는 피스톤 속도와는 무관하게 전기장의 제어로 댐핑력이 조절 가능하다. Fig. 6 (b)는 댐퍼내의 온도가 45°C인 경우로 전기장 무부하시에는 댐핑력이 25°C에 비해 더 작다. 그러나 전기장 부하시의 댐핑력은 보다 큰

댐핑력이 발생된다. 이유는 유체의 온도 증가에 따라 댐핑력을 발생시키는 ER유체의 항복응력이 증가하기 때문으로 여겨진다.

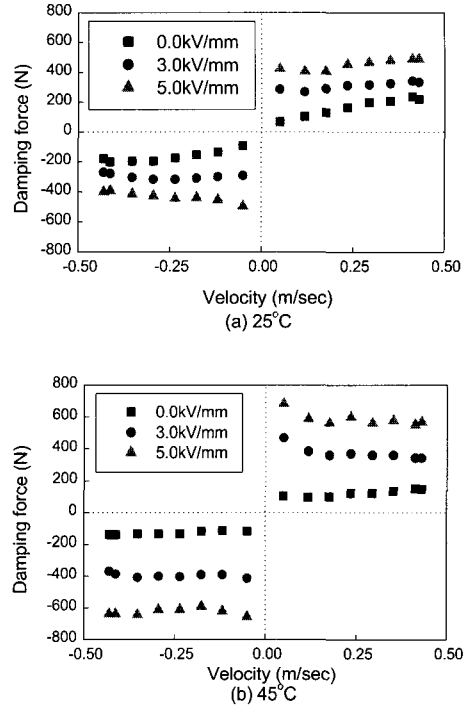


Fig. 6 Damping force vs. piston velocity with different temperature

4.2 침전형상에 따른 ER댐퍼의 성능변화

현재 ER댐퍼를 실제 자동차에 장착할 경우 가장 문제가 될 수 있는 요소 중에 하나는, 장시간 사용할 때 발생하는 ER유체의 침전 문제이다. 장시간 ER댐퍼를 작동시키지 않았을 때 발생하는 침전이 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 시험 방법으로는 ER유체를 봉입한 후 침전시간을 늘려 가면서 댐핑력을 측정하였다. 침전시간 설정은 2.2절의 침전현상 실험을 토대로 침전현상이 급격히 일어나는 부분과 일정 시간 진행된 뒤, 시간 경과에 따른 댐핑력의 변화를 고찰하였다. 가진 진폭±20mm, 가진 주파수1.4Hz로 설정하여 ER댐퍼를 가진하였으며, 전기장은 0, 3, 5kV/mm로 증가시켰다.

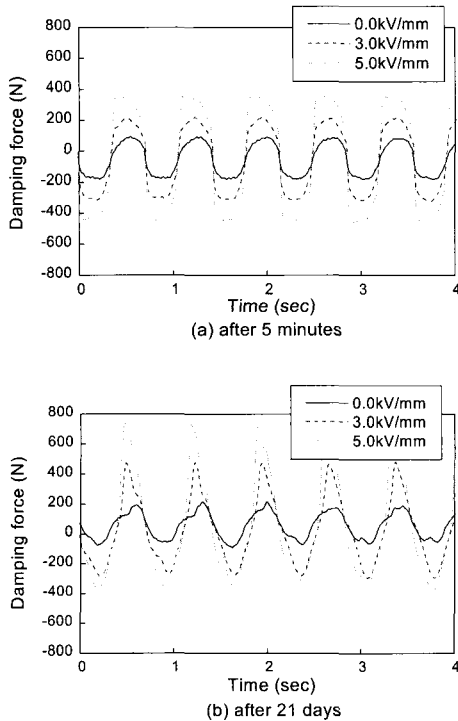


Fig. 7 Time history of damping force due to sedimentation

Fig. 7은 ITMC25를 사용하였을 경우 침전시간 증가에 따른 댐핑력 변화를 시간영역에서 전기장 증가에 따라 나타낸 것이다. (a)그림은 ER유체를 봉입한 후 5분 후에 측정된 시험 결과로서, 전기장 증가에 따라 댐핑력이 변화된다. 이러한 경향은 21일이 경과한 후의 결과인 Fig. 7 (b)에서도 관찰되었다. 이것은 ER댐퍼 내 ER유체 입자는 중력에 의하여 상부 챔버보다 하부 챔버에 더 많이 침전되며, 하부 챔버에 쌓인 입자는 장시간 침전으로 큰 클러스터 덩어리를 형성하여 ER유체의 입자 증량비가 낮아질 것으로 판단된다.

ITMC25의 침전시간에 따른 댐핑력 변화를 각각의 전기장 별로 표시한 것이 Fig. 8이다. Fig. 8 (a)에서 전기장 무부하시, 인장 운동에서 댐핑력은 10일째인 경우에서 최대가 되었고 점차 댐핑력의 크기는 비슷하게 유지되었다. Fig. 8의 (b)에서와 같이 압축 운동에서도 마찬가지로 10일째인 경우 최대가 된 후 시간이 증가할수록 약간씩 감소되었다.

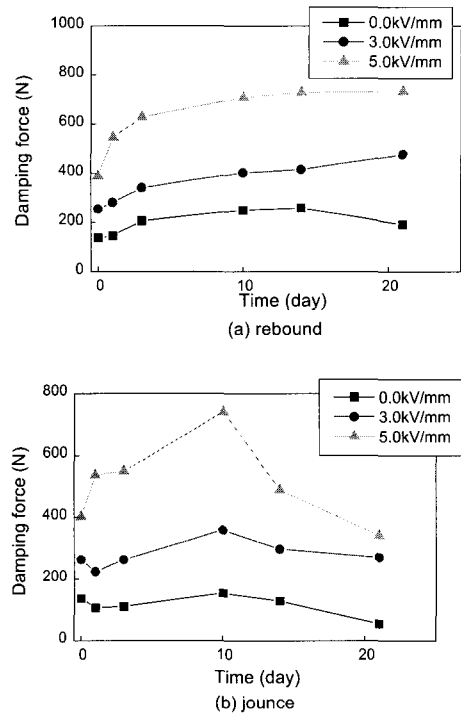


Fig. 8 Sedimentation effect on damping force

4. 결 론

ER유체의 역학적 특성 변화에 따른 ER댐퍼의 성능 변화를 고찰하기 위하여 온도 의존성과 침전 현상에 대하여 실험한 결과를 제시하였다.

첫째, ER유체를 -5°C , 25°C , 35°C 와 45°C , 65°C , 85°C 로 변화시켰을 때, 온도가 높을수록 같은 크기의 전기장에 대한 항복응력과 전류밀도가 증가함을 알 수 있다.

둘째, 댐핑력의 온도의존성을 실험한 결과, 전기장 무부하시는 온도증가에 따라 점성계수의 저하와 댐핑력 감소가 나타났다.

셋째, 전기장 부하시에는 온도가 상승함에 따라 활성화된 극전하 현상에 기인하여 댐핑력이 증가하는 현상을 보여주었다.

마지막으로 ER유체의 침전에 따른 댐핑력 실험 결과, 침전물이 증가함에 따라 인장일 경우 댐핑력이 증가하여 일정하게 유지되며, 압축일 경우는 댐핑력이 증가하다 10일이 경과한 후 감소하는 양상을 나타냈다.

본 연구는 삼척대학교 교내연구비 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 관계자 분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] K. H. Hagele, K. Engelsdorf, M. Mettner, M. Panther, Q. N. Tran and E. Rubel, "Continuously Adjustable Shock Absorbers for Rapid-Acting Ride Control System(RCS)", SAE Technical Paper Series 905125
- [2] S. Morishita, J. Mitsui, Y. Kuroda, "Control-lable Shock Absorber as an Application of Electro-Rheological Fluid", J. J.S.M.E. Vol. 56, No. 524, pp. 78-84, 1990 (in japanes)
- [3] N. K. Petek, D. J. Romstadt, M. B. Lizell and T. R. Weyenberg, "Demonstration of an Automotive Semi-Active Suspension Using Electro-rheological Fluid", SAE Technical Paper Series 950586, 1995
- [4] K. S. Kim, S. B. Choi, C. C. Cheong, M. S. Suh, M. S. Yeo, I. S. Han and Y. J. Jang, "A Semi-Active Suspension System Featuring Electro-Rheological Fluid-Based Dampers", Proceedings of the 6th Asia-Pacific Vibration Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 852-857, 1995
- [5] 최승복, 정재천, 최용빈, 허승진, 서문석, "ER 유체를 이용한 반능동식 가변댐퍼의 성능해석", 한국자동차공학회논문집, 제1권, 1호, pp. 90-100, 1993

저 자 소 개



박우철 (朴佑哲)

1987년 인하대학교 기계공학과 졸업.
1997년 인하대학교 대학원 박사.
1997년~현재 삼척대학교 기계자동차공학부 부교수



김옥삼 (金鈺三)

1991년 인하대학교 대학원 박사.
1992년 여수대학교 기계공학과 교수.
1996년 일본 동경대학 Post-doc.
2002년 Univ. of Georgia 초빙교수.



김일겸 (金一謙)

1988년 인하대학교 기계공학과 졸업.
2000년 인하대학교 대학원 박사.
2003년 삼척대학교 기계공학과 시간강사.



조남철 (趙南喆)

1995년 인하대학교 대학원 박사.
1996년~현재 안산공과대학 기계과 부교수.