

인산화 전분 ER 유체의 댐퍼 내구 특성

이철희[†] · 장민규 · 손정우 · 한영민 · 최승복

인하대학교 기계공학부

Durability of Phosphorated Starch Based Electrorheological Fluids in Damper Application

Chul-Hee Lee[†], Min-Gyu Jang, Jung Woo Sohn, Young-Min Han and Seung-Bok Choi

School of Mechanical Engineering, Inha University

(Received January 20, 2009; Revised March 20, 2009; Accepted April 2, 2009)

Abstract – In this work, durability characteristics of electrorheological (ER) fluid for damper application are experimentally investigated. ER fluid is prepared by using phosphorated starch particles and silicone oil. The field-dependent Bingham characteristics and response time for the proposed ER fluids are experimentally obtained. Experimental apparatus of durability test for ER fluid is established with cylindrical ER cylinder for mid-sized passenger vehicle. In order to evaluate the durability characteristics of ER fluid as a function of time, damping force and temperature variations are measured until one million cycles. After durability test, Bingham characteristics and response time of ER fluid are measured and compared to the initial properties. Microscopic pictures of ER fluid are taken to validate the changes of properties. The results indicate that the ER fluid can be commercially utilized in vehicle damper system with its durability performance. Moreover, the understanding of durability characteristics is essential to predict the service life of ER fluid as well as to design its applications.

Key words – durability characteristics(내구력 특성), electrorheological fluid(ER 유체), bingham characteristics(빙햄 특성), ER damper(ER 댐퍼), damping force(댐핑력)

1. 서 론

Electrorheological (ER) 유체는 지능 재료의 하나로써 이를 이용한 속업소버, 엔진 마운트, 클리치 및 브레이크와 같은 다양한 공학 어플리케이션 연구가 진행되고 있다[1-4]. 일반적으로 ER유체는 전기장 비인가 시 비전도성 용매에 분산된 입자들이 자유로운 운동을 하는 뉴토니언 (Newtonian) 유체의 움직임을 보이지만, 수 kV/mm의 전기장이 인가될 경우, 자유로운 운동을 하던 입자들이 대전되어 전극과 전극 사이에 체인형상의 구조를 형성하여 마치 고체와 같이 항복응력을 갖는 빙햄(Bingham) 유체의 움직임을 보인다. 이러한

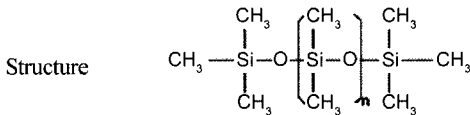
ER유체를 이용한 어플리케이션의 상용화 하기 위하여 내구 특성 연구는 반드시 해야 한다. 그러나 ER유체 및 ER디바이스의 내구특성 연구는 드물게 행해지고 있다[5-8].

따라서 본 연구에서는 자동차 댐퍼를 위한 ER유체의 내구 특성을 실험적으로 확인하는 것을 목표로 한다. 인산화 전분 ER 유체를 이용하여 전기장에 따른 빙햄 특성 실험을 한다. 다음으로 원통모양의 ER댐퍼의 설계 및 제작을 하며 실제 운전 조건에 맞는 내구력 실험장치를 구축한다. 측정 장치는 실험이 진행되는 동안 댐퍼 실내 온도 및 댐핑력이 모니터링 할 수 있게 설계한다. 실험 결과를 통하여 실험 전, 후의 ER유체의 빙햄 특성을 비교한다. 또한 실험 전후 ER유체의 파티클을 마이크로 사진을 통하여 비교한다.

[†]주저자 · 책임저자 : chulhee@inha.ac.kr

Table 1. Material properties of silicone oil

Name	KF-96-30CS
Kinematic viscosity 25°C(mm ² /s)	30
Specific gravity 25°C	0.955
Volatile matter content 150°C/24 h%	under 1.5
Refractive index 25°C	1.401
Ignition Point (°C)	over 260



2. Electrorheological (ER) 유체

ER(Electro-Rheo-logical) 유체는 일반적으로 전기장 비인가시에 비전도성 용매에 분산된 입자들이 자유로운 운동을 하는 뉴토니언 (Newtonian) 유체의 거동을 따르지만, 수 kV/mm의 전기장이 두 전극 사이에 형성될 경우, 자유로운 운동을 하던 입자들이 대전되어 전극과 전극 사이에 체인 형상의 구조를 형성함으로써 마치 고체와 같이 항복응력을 갖는 빙햄(Bingham) 유체의 거동을 나타내는 유체들을 총칭한다.

본 연구에서는 오르토인산과 요소 혼합물을 이용한 에스터화 과정을 통하여 전분 입자 구성체인 아밀로오스 그룹내의 하이드록시기(-OH)를 인산기(phosphate)로 치환시킨 ER입자를 이용한다. 준비된 인산화 전분과 실리콘 오일(Shin-Etsu, KF-96-30CS)을 3:7의 부피 비율로 섞어 100°C 이상의 중탕에서 교반시켜 ER 유체를 조성한다. 아래 Table 1은 사용된 실리콘오일의 물성치 이다.

인산화 전분을 이용한 ER유체는 입자 자체의 분극화로 인해 높은 전기유변효과를 나타내므로, 온도나 외부 환경에 장애요인 없이 작동 할 수 있다.

Fig. 1는 전기장 무 부하 시와 부하 시에 대한 ER유체의 현미경 사진을 도시한 것이다. 먼저 Fig. 1(a)는 전기장 무 부하 시에 대한 사진 촬영을 나타낸 것으로, 비전도성 용매에 분산되어 있는 입자들이 자유로운 운동을 하고 있으며, 따라서 등방성(isotropic)의 역학적 특성을 가짐을 확인할 수 있다. 그러나, Fig. 1(b)에서 확인할 수 있는 바와 같이 전기장이 인가된 경우에는

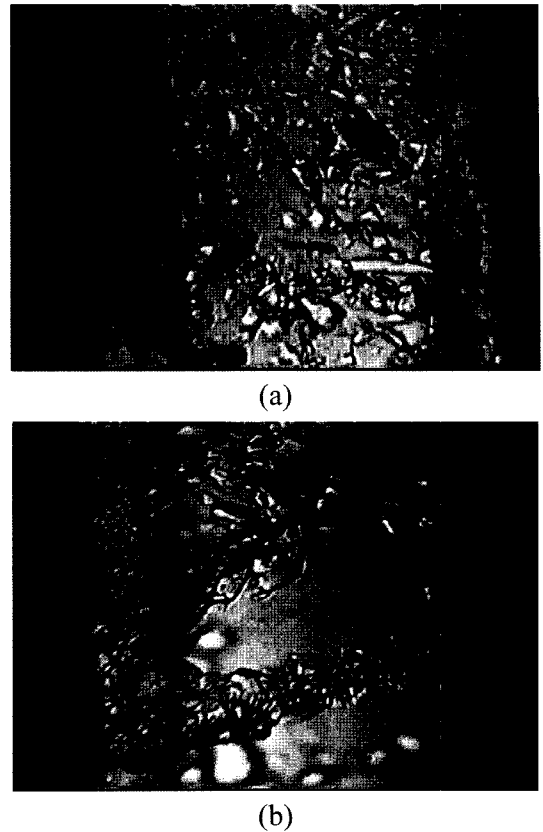


Fig. 1. Photomicrograph of an ER chain structure: (a) without electric field, (b) with electric field.

자유로운 운동을 하던 입자들이 두 전극 사이에 체인 구조를 형성하여 이방성(anisotropic)의 역학적 특성을 가짐을 확인할 수 있다. 이러한 체인 구조는 인가되는 전기장의 방향과 평행하게 형성되며, 체인을 이루고 있는 입자들 간의 결합력에 의해 외부에서 가해지는 전단력에 저항하는 힘 또는 유체의 유동을 제한할 수 있는 힘을 갖게 된다.

ER 유체에 전기장을 인가하였을 때의 항복 응력은 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다[9].

$$\tau_y(E) = \alpha E^\beta \tag{1}$$

여기서, E (kV/mm)는 전극에 부하된 전기장이고, α, β 는 ER 유체의 항복응력을 결정하는 고유 특성 값으로 Bingham 특성 실험 장치를 사용하여 구할 수 있다. 본 논문에서 사용된 ER 유체의 항복 응력을 Fig. 2에 나타내었다. 신뢰도 있는 결과를 얻기 위해 실험을 수행하는 동안 항온장치(thermal bath)를 이용하여 25의 일정한 온도를 유지하였다. 본 연구에서 사

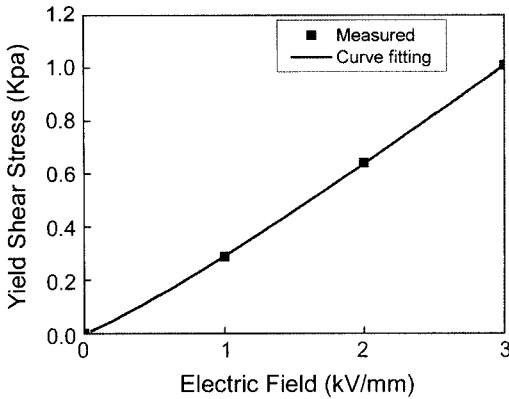


Fig. 2. Field dependent yield stress of starch-based ER fluid.

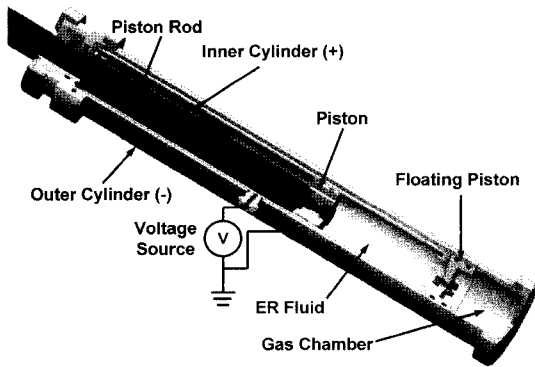


Fig. 3. Schematic configuration of the proposed ER damper.

용된 인산화 전분ER 유체의 경우 α 는 290.61, β 는 1.1351의 값을 가진다.

3. Electrorheological (ER) 댐퍼

본 논문에서는 ER 유체가 가지고 있는 항복응력을 이용한 실린더형 ER 댐퍼를 제안하고 모델링 하였으며, 그 구조를 Fig. 3에 도시하였다[6].

ER 댐퍼는 크게 내측실린더와 외측실린더, 가스 챔버(gas chamber) 및 부동피스톤(floating piston)으로 구분할 수 있다. 내·외측실린더 사이에는 ER 유체가 유동하도록 원형의 덕트(duct)가 구성되어 있으며 내측 실린더에는 (+)전원이 연결되고 외측실린더는 (-)전원이 연결되어 ER 유체에 전기장을 인가하는 두 전극 관으로써 작동하게 된다. 내측실린더는 외측 실린더와 절연되어 있어 외측실린더로 고전압이 흐르는 것을 방지한다. 피스톤을 중심으로 위쪽을 상부 챔버, 아래쪽

을 하부 챔버로 정의하였고, 이 두 챔버에 ER 유체가 가득 채워지게 된다. 노면에 의한 가진으로 피스톤이 상하운동을 하게 되며, 이에 따라 ER 유체는 내·외측 실린더 사이의 덕트(duct) 사이를 통과하며 인가되는 전압에 대한 ER 효과를 나타낼 수 있도록 되어있다. 댐퍼의 하부에는 부동피스톤을 이용한 가스 챔버가 있으며, 가스 챔버는 댐퍼 내부의 급격한 압력변화를 흡수하고, 피스톤의 운동에 따른 피스톤로드의 부피변화, 열팽창에 따른 ER 유체의 부피변화 등을 수용하기 위한 축압기(accumulator)로 작동하게 된다. 플러그를 통해 내측 실린더에 고전압이 인가되면 덕트 사이에 전기장이 형성되며, 덕트 사이를 유동하던 유체는 순간적으로 뉴토니언 유동에서 비뉴턴 유동으로 전환하게 된다. 이때 인가되는 전기장의 크기에 따라 원형 덕트 사이를 유동하는 ER 유체의 항복응력도 변하게 되며, 이로 인하여 유체 유동저항도 변하게 된다. 이것은 피스톤 상·하부 챔버의 압력차를 변화시키며, 이로 인하여 피스톤의 상하 운동에 저항하는 방향의 댐핑력이 변화한다. 결과적으로 ER 댐퍼는 전기장을 부하하지 않을 때는 속도에 따른 유체 점성으로 인한 유체 댐핑력만을 발생시키게 되나, 전기장을 부하할 때는 ER 유체의 항복 응력으로 인한 댐핑력이 가해지므로 더 큰 댐핑력을 발생시키게 된다. 따라서 ER 댐퍼는 기존의 수동 댐퍼와는 달리 전기장에 따라 연속적으로 제어 가능한 댐핑력을 발생시킬 수 있다.

ER 댐퍼의 모델링을 위해 ER 유체는 비압축성 유체로 가정하였고, 댐퍼와 가스 챔버(gas chamber)를 이어주는 유압관의 길이는 짧고 직경이 크므로 이로 인한 유체저항은 무시하였다. 따라서, ER 유체의 유동을 두 평판 사이의 유동으로 가정한 유체저항(R_c)과 가스 챔버의 가스압력에 의한 컴플라이언스(compliance, C_g)는 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_c = \frac{12\eta L}{dh^3} \tag{2}$$

$$C_g = \frac{V_0}{P_0\kappa}$$

여기서, η 는 전기장 무 부하 시 ER 유체의 점성계수, L 은 내측 전극의 길이, b 는 내측 전극의 바깥 원 둘레, h 는 전극 간극을 나타낸다. 또한 V_0 , P_0 는 초기 작동점에서 가스 챔버의 부피와 압력을 나타내며, κ 는 비열비(specific heat ratio)로 정적 비열과 정압 비열의 비를 나타낸다. ER 유체의 항복응력 κ 변화에 따른

멤퍼 내의 압력 강하는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$P_{ER} = \frac{cL}{h} \tau_v(E) = \frac{cL}{h} \alpha E^\beta \quad (3)$$

c 는 유체의 속도와 관계된 계수이며, 일반적으로 2에서 3사이의 값이 사용된다. 또한 ER 멤퍼의 동적 지배 방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F = k_e x_p + C_e \dot{x}_p + F_{ER},$$

$$k_e = \frac{A_r^2}{C_g}, C_e = (A_p - A_r)^2 R_e \quad (4)$$

$$F_{ER} = (A_p - A_r) P_{ER} \text{sgn}(\dot{x}_p)$$

$$= (A_p - A_r) \frac{cL}{h} \alpha E^\beta \text{sgn}(\dot{x}_p) \quad (5)$$

여기서, x_p, \dot{x}_p 는 피스톤의 가진 변위와 가진 속도를 나타내고, A_p, A_r 은 피스톤과 피스톤 로드 면적을 나타낸다. 본 연구에서 제안된 모델을 근거로 ER 멤퍼를 제작하였으며, 그 사양을 Table 2에 나타내었다. 설계된 ER 멤퍼의 간극은 0.88 mm, 전극의 길이는 292.4 mm이며, 멤퍼 내부에 장착하기 용이하게 하기 위해 내부전극을 실린더형으로 제작하였다.

4. 실험

설계된 ER멤퍼의 내구 성능을 평가하기 위하여 실제와 흡사한 내구성 실험 전용 장비를 개발하였다. Fig. 4에서와 같이 캠이 장착된 전기모터가 ER멤퍼의 피스톤 로드를 움직이는데 이는 자동차 현가장치의 왕복운동을 실행하게 된다.

Table 2. Design parameters of the ER dampers

Parameter	Value
Electrode Gap (h)	0.88 mm
Electrode Length (L)	253 mm
Piston Head Area (A_p)	1335.76 mm ²
Piston Rod Area (A_r)	380.13 mm ²
Maximum Stroke	164 mm
Electrode Width	148.03 mm
Initial Volume of Gas Chamber (V_0)	73.14e ⁻⁶ m ³

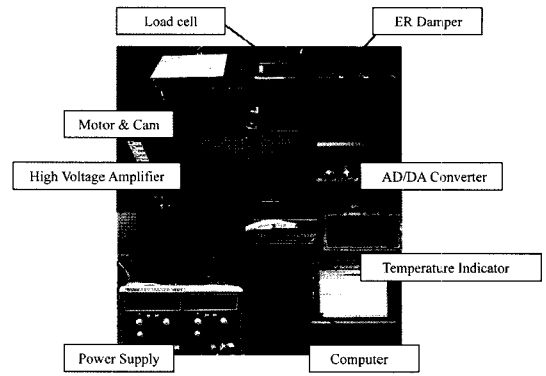


Fig. 4. Experimental apparatus for durability test.

Table 3. Experimental conditions of durability tests

Particle	Starch Phosphate
Base Carrier	Silicone Oil
Damper Type	Front Suspension, Mid-sized Vehicle
Number of Test	1.4 Hz, one Million cycles
Applied Voltage	0~2.5 K/mm, Step: 0.5 kV/mm
Pressure	Ambient air
Temperature	Room temperature (23°C)
Relative Humidity	46%

입력 신호는 고 전압 증폭기와 연결된 컴퓨터로부터 나오며 D/A 컨버터를 통하여 발생된 고전압은 멤퍼의 내부 실린더에 가해진다. 본 연구에서의 운동 스트로크 및 진동수는 ±30 mm, 1.4 Hz이다. 이 값들은 차체의 고유 진동수 때문에 발생하는 진동폭 및 진동수이다. 발생하는 멤퍼력은 캠과 피스톤 로드 사이에 설치된 로드셀에 의하여 측정된다. 또한 멤퍼 내부의 온도는 온도계를 이용하여 측정한다. 내구력 테스트 장비를 설계, 제작한 다음 캠 시스템의 선형운동을 제어할 수 있고 센서로부터 나오는 신호들을 모니터링 할 수 있는 컴퓨터 프로그램이 개발되었다.

ER멤퍼는 내구력 성능 평가장치의 파트로 제시되었다. ER멤퍼는 공진 주파수의 운동 조건에서 200시간 이상을 통과해야만 한다. 본 연구의 내구성 실험은 200시간 동작하는 것과 같은 100만 사이클을 실행하였다. 0~10만 사이클까지는 매 1만 사이클 단위로 전기장을 인가하였고, 10만~100만 사이클까지는 매 10만 사이클 단위로 전기장을 인가하여 ER멤퍼의 멤퍼력과 그 때의 ER 멤퍼 내의 온도변화를 측정하였다. 또한 ER 멤퍼에 인가되는 전압은 0.0~2.5 kV까지 0.5 kV단

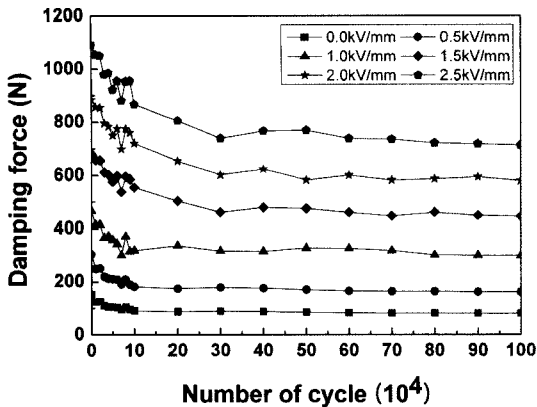


Fig. 5. Field-dependent damping force of the ER damper.

위로 증가시켜서 각각 20초 동안 측정을 하였다. 실험에 있어서 환경적 오차 요인을 줄이기 위하여 실험실의 환경을 46% RH and 23°C로 유지하여 실험을 실행하였으며 Table 3에 나타내었다.

5. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 100만 사이클 구동하는 동안 다른 강도의 전기장을 가해주었다. Fig. 5는 전기장의 변화에 종속적인 댐핑력을 보여준다. 실험결과에 나타낸 바와 같이 내구성 실험 전 전기장 무 부하 시 최대 150 N의 댐핑력이 발생되었으나, 2.5 kV/mm의 전기장 부하 시 1090 N의 댐핑력이 발생되어 940 N의 댐핑력 변화가 발생되었다. 실험결과에서 알 수 있듯이 전기장 부하에 따라 댐핑력의 크기가 전기장 무 부하 시에 비하여 크게 증가됨을 확인할 수 있으며, 전기장만의 변화로 댐핑력을 연속적이고 폭 넓게 제어할 수 있음을 알 수 있다. 실험결과에서 보이는 것과 같이 발생하는 댐핑력은 처음 10만 사이클까지 급격하게 떨어지는 것을 볼 수 있으며 100만 사이클까지 눈에 띄게 변화량이 없는 안정상태 값을 보인다. 안정상태에서의 최대 댐핑력은 1.5 kV/mm, 2.5 kv/mm일 때 각각 514.9 N 와 776.6 N 이다.

측정된 ER댐퍼의 내부 온도는 Fig. 6에서와 같이 측정 되었다. 이 결과에서와 같이 10만 사이클 이후 42°C까지 올라간 후 100만 사이클까지 큰 변화 없이 유지된다.

Fig. 7(a) 는 처음 조성된 starch계열의 ER 유체의 사진으로 흰색을 띄고 있으나, Fig. 7(b)에 나타난 100만 사이클 후의 사진을 보면 입자들의 색이 회색으

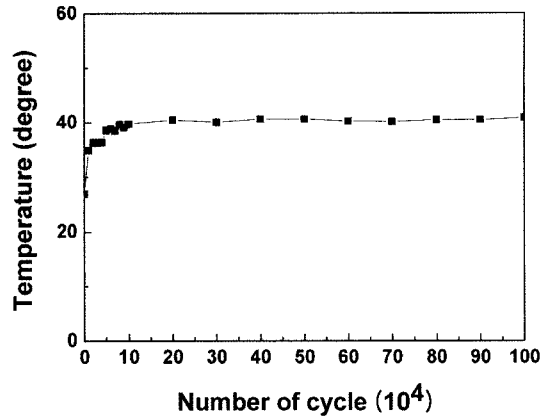
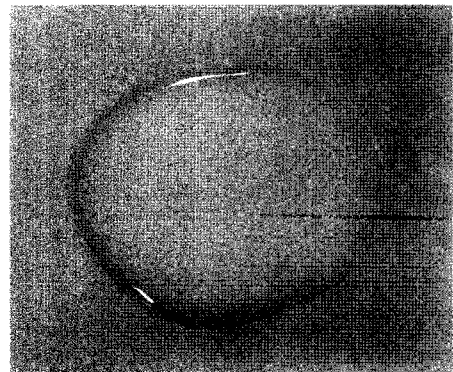
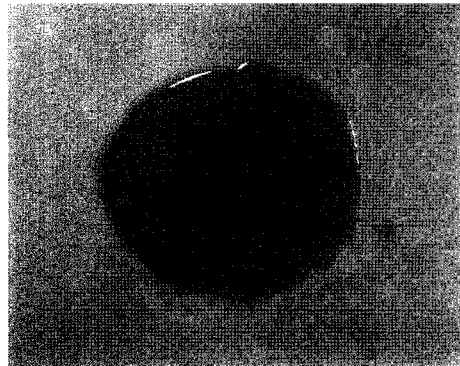


Fig. 6. Temperature variation of the ER damper.



(a)



(b)

Fig. 7. Photograph of starch-based ER fluid: (a) before, (b) after.

로 변색되었음을 알 수 있다. 이는 실험장치의 사용시간이 증가함에 따라 피스톤과 접하는 부분의 유체 온도가 국부적으로 높게 상승하여 열로 인한 변색이 발생한 것으로 보인다. ER유체의 항복 응력의 변화는

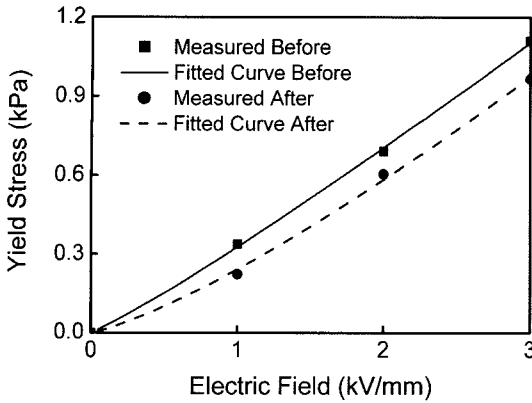


Fig. 8. Change of Bingham characteristics.

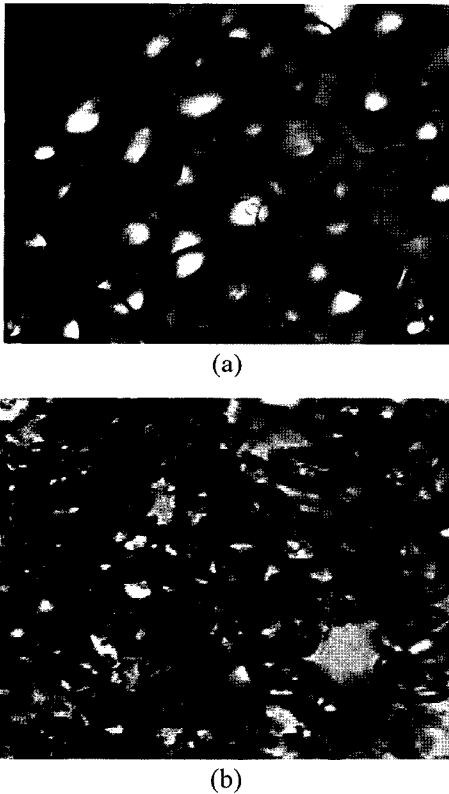


Fig. 9. Microphotograph of the starch-based ER fluid: (a) before, (b) after.

Fig. 8과 같이 측정되었다. 100만 사이클 운전 전후의 항복 응력을 비교해보면 실험 후 항복응력이 약간 줄어든 것을 알 수 있다.

이는 Fig. 9에서 보는 것과 같이 댐퍼 운전 중에 ER파티클이 작은 파편으로 부서지기 때문이다. 전기장이 가해진 상태에서 ER파티클이 작아짐에 따라 파티

클간에 끌어당기는 힘이 작아진다. 그러나 10만 사이클 이후에는 ER댐퍼의 성능은 100만 사이클이 될 때까지 유지된다. 이는 ER 입자의 크기는 용융장치 내 피스톤헤드와 내부 전극 사이의 간격보다 작게 분쇄되지 않을 것으로 보여, 일정한 크기를 유지할 것으로 생각된다. 따라서, ER 댐퍼의 댐핑력이 지속적으로 감소하지는 않을 것이라 판단된다. 이를 통해 ER댐퍼는 전체 수명 사이클 동안 성능변화 없이 사용할 수 있다고 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 자동차 댐퍼 어플리케이션을 위하여 ER유체의 내구성을 실험적으로 측정하였다. 중형의 승용차에 맞는 상용 패시브 오일 댐퍼의 댐핑력과 크기를 기반으로 ER댐퍼가 제작되었으며 실험실에서 제작한 인산화 전분 ER유체를 사용하였다. 그리고 실제 운전 조건을 만족하는 전동기와 캠 시스템을 이용한 내구성 실험 장치를 개발하였다. 결과적으로 100만 사이클의 내구 실험이 수행되었다. 전기장에 종속적인 댐핑력의 변화는 ER댐퍼의 내부 온도 변화와 더불어 매 10만 사이클마다 측정되었다. 그리고 ER유체의 내구 실험 전후 빙행 특성 및 마이크로 사진도 평가되었다. 본 연구에서 얻은 결과를 통하여 ER유체가 상용적으로 자동차 댐퍼에 사용될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

1. Petek, N. K., "An Electronically Controlled Shock Absorber Using Electro-Rheological Fluid," *SAE Technical Paper Series 920275*, 1992.
2. Morishita, S. and Mitsui, J., "An Electronically Controlled Engine Mount Using Electro-Rheological," *SAE Technical Paper Series 920290*, 1992.
3. Carlson, D. and Duclos, T. G., "ER Fluids Clutches and Brakes-Fluid Property and Mechanical Considerations," *Proceedings of the 2nd International Conference on ER Fluids*, pp. 353-367, 1990.
4. Ahn, B. G., "The Effect of Compressing ER Electrode on Electrorheological Properties of Anhydrous

- ER Fluids,” *J. of the KSTLE*, Vol. 18, No. 1, pp. 16-23, 2002.
5. Choi, S. B. and Choi, W. Y., “Position Control of a Cylinder Using a Hydraulic Bridge Circuit with ER Valves,” *ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*, Vol. 122, No. 1, pp. 202-209, 2000.
 6. Choi, S. B., Han, Y. M., Song, H. J., Sohn, J. W., and Choi, H. J., “Field Test on Vibration Control of Vehicle Suspension Systems Featuring ER Shock Absorbers,” *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 18, No. 12, pp. 1169-1174, 2007.
 7. Sung, K. G., Han, Y. M. Lim, K. H., and Choi, S. B., “Discrete-time Fuzzy Sliding Mode Control for a Vehicle Suspension System Featuring An Electrorheological Fluid Damper,” *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, No. 3, pp. 798-808, 2007.
 8. Choi, U. S., “Electrical and Rheological Behavior of the Anhydrous ER Fluids Based on Chitosan Derivatives as the Dispersion Phases,” *KSTLE International Journal*, Vol. 5, No. 2, pp. 49-51, 2004.
 9. Choi, S. B., Choi, Y. T., Chang, E. R., Han, S. J., and Kim, C. S., “Control Characteristics of a Continuously Variable ER Damper,” *Mechatronics*, Vol. 8, pp. 143-161, 1998.