

# ER유체의 기계적 내구성 및 ER댐퍼의 성능고찰 Mechanical Durability of ER Fluids and Performance Investigation of ER Dampers

박우철(인하대 대학원), 최승복, 정재천(인하대 기계공학과), 서문석, 강윤수, 여문수(국방과학연구소)  
W.C.Park(Inha Univ. Graduate school), S.B.Choi, C.C.Cheong(Inha Univ.), S.M.Suh, Y.S. Kang, M.S.Yeo(A.D.D.)

## ABSTRACT

This paper presents durability characteristics of electrorheological(ER) fluids which undergo a reversible phase change depending upon the imposition of electric fields. The field-dependent Bingham properties are subjected to be altered from long time use of the ER fluid. The level of the changed properties depends upon employed device and test conditions. A piston-rod system which has same mechanism as ER dampers is adopted in this study and tested by increasing operation cycle up to 1 million. Bingham properties of initial and used ER fluids are tested and compared. In addition, these ER fluids are applied to ER damper in order to evaluate damping force performance.

**Key Words :** ER(electrorheological) Fluid(ER유체), Dynamic yield stress(동적 항복응력), Mechanical durability(기계적 내구성), Shear rate(전단속도비), current density(전류밀도)

### 1. 서론

ER유체에 전기장을 부하하면, 유체 중에 분산된 입자가 유도 분극을 일으켜 양쪽의 전극을 향하여 전기장과 평행한 섬유상 구조의 고리를 형성함으로써 유체의 이동이나 외부에서 가해지는 전단력에 대하여 저항을 하게 된다. ER유체는 부하되는 전기장에 의하여 항복응력과 가점성이 변하며, 그 반응은 매우 빠르고 전기장 부하에 대하여 가역적인 반응을 나타내며, 부하되는 전기장의 크기에 따라 연속적이고 국부적으로 제어할 수 있는 특성을 갖고 있다. 또한, 전기장만을 유체에 부하하면 되므로 부가적인 운동장치가 필요 없어 응용장치 설계의 단순화를 가져올 수 있으며, 상변화에 요구되는 전기장은 높지만, 전류는 매우 낮으므로 소비 전력이 낮은 장점을 갖고 있다<sup>1)</sup>.

개발 초기에는 ER효과 메커니즘 현상의 이해 부족과 열악한 전기 제어 기술의 문제로 인하여 많은 성과를 얻지 못하였으나, 전기 공학, 전자 공학 그리고 제어 기술의 발달과 더불어 고전압의 전기장을 발생시킬 수 있는 장치와 소재들이 개발됨에 따라 여러 선진국에서 우수한 ER유체와 ER유체의 특성을 이용한 현가장치, 제진대, 엔진 마운트 등 제어가 가능한 가변감쇠기구 및 지능 구조물에 대한 응용 연구가 자동차 산업 및 군수 산업을 비롯한 많은 분야에서 활발히 진행되고 있다<sup>2),3),4)</sup>. 그러나, 이러한 유체를 사용하여 자동차의 현가장치, 엔진 마운트, 제진대 등의 응용장치에 적용하기에는 미세적인 메커니즘의 규명, ER유체의 전기장

강도에 대한 관계성, 응용시 유체의 안정성 및 마모와 피로 현상의 규명, 침전 현상 등 여러 가지 해결해야 할 문제점들이 많다.

ER유체는 유압 기기에 사용되는 일반적인 오일류의 작동유와는 달리 비전도성의 용매와 전도성의 입자로 구성되어 있어, 반복적으로 장시간 사용하였을 경우에는 ER유체의 조성에 사용된 입자들에 의해 응용 장치의 작동부는 마멸 등의 문제를 일으킬 수 있다. 또한, 응용 장치의 작동부에 의해 ER유체 입자들의 모양과 크기도 변형될 것이며, 장시간 사용에 의해 용매 자체의 점도와 극성도 변화되어 ER유체의 역학적 특성도 변화될 것으로 예측된다. 그러나, 이러한 ER유체의 지속적인 사용에 따른 ER유체의 성질 변화와 전극 재료의 변화에 대하여 보고된 예는 아직 없다.

따라서 본 연구에서는 ER댐퍼와 동일한 구조를 갖는 기계적 내구성 실험 장치를 사용하여 장시간 사용에 따른 ER유체의 특성 변화를 고찰하여, ER유체의 사용 수명에 대한 평가 자료를 제시하고자 하며, 나아가서 이것이 ER댐퍼에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

### 2. 실험장치 및 실험방법

ER유체의 장시간 사용에 따른 입자의 변형과 용매의 변화에 따른 ER유체의 역학적 특성의 변화를 예측할 수 있는 내구성을 관찰하기 위하여 Fig.1과 같은 실험 장치를 제작하였다. 실험 장치의 구성을 살펴보면 우선, ER유체가 담겨져 있는 ER벨브는 ER댐퍼와 유사한 내부 구조를 갖도록 설계 제작하였으나, 제작과 실험의

편의성을 위하여 가스실은 설치하지 않았으며, 양 로드형의 피스톤을 설치하여 채워져 있는 ER유체의 유동을 일으키도록 하였다. 내부의 피스톤 운동은 기본적인 크랭크 구동방식을 채택하여 DC모터에 의한 회전운동을 피스톤의 직선 운동으로 전환시켰다. 응용 장치의 운동부에 의한 영향뿐 만 아니라 반복적인 전기장 부하에 의한 영향도 살펴보기 위하여 고전압 공급장치를 이용하여 내부 실린더와 외부 실린더 사이에 형성되는 유로에 전기장을 형성할 수 있도록 하였다.

ER유체가 담겨지는 ER밸브는 피스톤, 안쪽 실린더, 바깥 실린더, 안쪽 실린더 홀더 및 전극으로 구성되어 있다. 내측에 설치된 피스톤은  $\pm 25\text{mm}$ 의 왕복 행정운동을 하며, 안쪽 실린더의 내경은  $32\text{mm}$ 이다. 전극부를 형성하는 안쪽 실린더의 외경은  $38.5\text{mm}$ 로 하고, 바깥쪽 실린더의 내경을  $40.5\text{mm}$ 로 하여 전기장이 형성되는 간극을  $1\text{mm}$ 가 되도록 하였다. 그리고 안쪽 실린더의 양쪽 끝단에  $5\text{mm}$ 의 구멍을 원주 방향으로 12개 가공하여 원활한 ER유체의 유동이 이루어지도록 제작하였다.

ER유체에 부하되는 내구성 실험을 위한 기계적 반복 사이클은 피스톤을  $1.4\text{Hz}$ 의 주기로 1만 사이클 미만에서는 1,000, 2,000, 4,000과 같이 2,000사이클씩 증가시켰으며, 1만 사이클에서 10만 사이클까지는 2만 사이클씩, 10만 사이클에서 100만 사이클까지는 20만 사이클씩 증가시켰다. 또한, ER유체의 응용장치와 사용 조건을 유사하게 하기 위하여 전기장을 부하하였는데, 전기장 부하 횟수는 지정된 기계적 반복 사이클의 10%로 일정하게 하였으며,  $1.4\text{Hz}$ 의 주기를 갖는 on-off 형태의 전기장을 ER유체에 부하하였다.

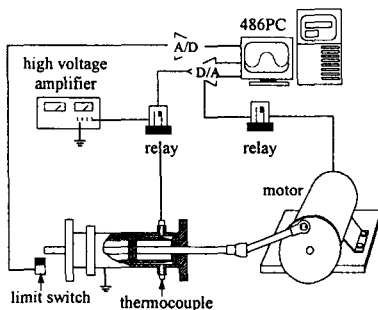


Fig.1 Schematic diagram of the experimental apparatus for the mechanical durability test

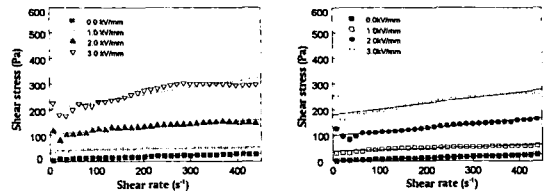
매회 지정된 사이클 이후에 ER유체를 수거하여 ER유체의 빙헴특성변화 및 전류밀도 변화를 관찰하였다. 또한, 지정된 피로 사이클 사용 후 ER유체를 현미경 관찰을 통하여 입자의 모양 및 클러스터의 구조 변화도 관찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

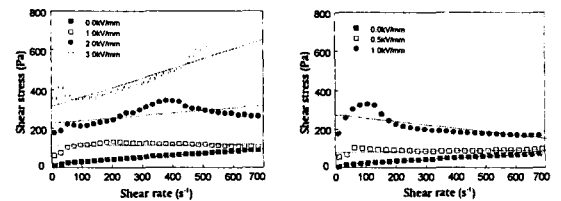
#### 3.1 빙헴 성질 변화

아라빅 검계 ER유체인 ITA30을 기계적 내구성 실험용 ER밸브에 넣어 지속적인 반복 운동과 반복적인 전기장을 부하한 후 수거하여 전기장 부하에 따른 빙헴 특성실험을 한 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 ITA30 ER유체를 ER밸브 안에 채운 후 100만 번의 피스톤 왕복 운동을 하였을 경우, 빙헴 특성실험에서의 전기장 부하에 따른 전단력의 변화는 거의 나타나지 않는다.

M.C.계 ER 유체인 ITMC25를 기계적 내구성 실험용 ER 밸브에 넣어 지속적인 반복 운동과 반복적인 전기장을 부하한 후 수거하여 전기장 부하에 따른 빙헴 특성실험을 한 결과를 Fig.3에 도시하였다. ER 밸브 안에 ER 유체를 채운 후 100만번의 기계적인 운동을 부하한 ER 유체는  $0.5\text{kV/mm}$ 의 낮은 전기장을 부하하여도 약  $80\text{Pa}$  정도의 항복응력을 나타내며,  $1\text{kV/mm}$ 의 전기장을 부하한 경우에는 유동이 시작되는 부근에서 약  $200\text{Pa}$ 의 높은 전단력을 나타낸 후,  $100\text{s}^{-1}$ 의 전단속도비 이후에는 전단력이 감소하고 있다. ITMC25 ER 유체는 기계적 반복운동에 의하여 전기장 부하에 의한 항복응력이 크게 증가하고 있다.



(a) before the test (b) after 1,000,000 cycle  
Fig.2 Shear stress vs. shear rate(ITA30)



(a) before the test (b) after 1,000,000 cycle  
Fig.3 Shear stress vs. shear rate(ITMC25)

ITA30 ER유체의 기계적 내구성을 관찰하기 위하여 ER밸브 안에 ER유체를 채운 후 피스톤의 직선 운동을 반복시켰을 경우, 각각의 사이클 증가에 따른 ER유체의 전기장에 대한 동적 항복응력의 변화를 Fig.4(a)에 도시하였다. 그림에 나타난 바와 같이 사이클 증가에 따른 ITA30 ER유체의 동적 항복응력 변화는 거의 나타나지 않고 있다. 따라서 조성한 직후의 아라빅 검계 ER유체는 전기장 부하에 따른 동적 항복응력의 증가는 작지만, 사용 시간 증가에 따른 동적 항복응력의 변화

가 생기지 않아 사용 기간에 대한 특성은 양호하다고 할 수 있다. Fig.4(b)에는 ITA30 ER유체의 기계적 내구성 실험 후 빙햄특성실험에서 전기장 부하에 의하여 ER효과를 나타내는데 소요되는 전류 밀도를 도시하였다. 6만번과 8만번의 반복 사이클 실험 후 수거한 ER유체에서 전류밀도의 변화가 크게 나타나는데, 이는 Fig.4(a)의 동적 항복응력과 비교하면, 전류밀도가 낮은 사이클에서는 동적 항복응력의 크기가 작고, 전류밀도가 높은 사이클에서는 동적 항복응력도 크게 나타나고 있어 입자 중량비의 변화에 의하여 동적 항복응력과 전류밀도의 변화가 생긴 것이다.

ITMC25 ER유체의 기계적 내구성 실험에 의한 동적 항복응력의 변화를 Fig.5(a)에 나타내었다. 4만 사이클 이전에는 기계적 사이클 증가에 따른 동적항복응력의 변화가 거의 나타나지 않으나 6만 사이클 이후에는 사이클 증가에 따라 동적 항복응력의 크기가 증가하고 있다. 또한, 사이클 증가에 따른 동적 항복응력의 크기 변화는 부하하는 전기장의 세기가 클수록 크게 나타나고 있는데, 이것은 Fig.3에 나타난 바와 같이 부하하는 전기장의 세기가 증가하고, 기계적 반복 사이클이 증가할수록 유동 초기의 낮은 전단속도비 영역에서 높은 전단력이 나타나, 동적 항복응력의 변화가 더욱 크게 나타난다. ITMC25 ER유체는 부하하는 기계적 반복 사이클이 증가할수록 오히려 ER유체의 가장 큰 특징인 동적 항복응력이 증가하는 경향을 나타내고 있어 ER유체의 사용 시간에 따른 사용 수명을 평가하기 위해서는 100만 사이클 이상의 기계적 반복 사이클에 대한 실험을 수행하여야 할 것이다.

ER유체에 지속적이고 반복적인 유동을 발생시키면, 기계적 내구성 실험장치의 ER밸브 내에서의 운동부에 의한 입자들의 마찰 현상과 반복적이고 지속적인 유체의 유동에 의한 입자들간의 반복적인 충돌과 마찰 현상에 의하여 입자들 표면에서 정전기 현상이 발생하며, 정전기 효과에 의하여 입자들의 전하나 이온의 이동에 의한 분극 현상이 발생할 것이다. 반복적이고 지속적인 분극 현상에 의하여 입자의 분자구조는 전자나 이온의 이동에 의한 재배열을 할 것이며, 또한, 주기적으로 부하하는 높은 전기장에 의하여 분극의 정도는 더욱 커지게 될 것이다. 따라서 사이클이 증가함에 따라 ITMC25 ER유체는 분자구조의 변화를 일으켜 항복응력이 증가하게 된다. Fig.5(b)에 나타난 바와 같이 기계적 반복 사이클이 증가함에 따라 전류밀도 역시 증가하고 있는데 이는 입자 내의 분자 구조 변화에 의하여 전하나 이온의 이동에 많은 에너지가 요구되고 있기 때문이다.

사이클 증가에 따른 동적 항복응력의 변화가 ITA30 ER유체에서는 나타나지 않고 ITMC25의 ER유체에서만

나타나는 것은 등근 모양의 아라빅 검 입자보다는 긴 막대 모양의 M.C. 입자에서 분자 구조변화가 용이하게 발생되기 때문이다.

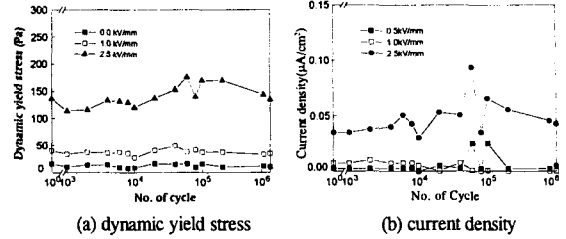


Fig.4 The mechanical durability of ITA30

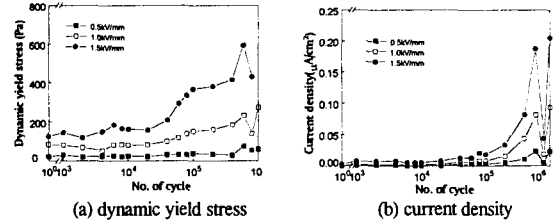


Fig.5 The mechanical durability of ITMC25

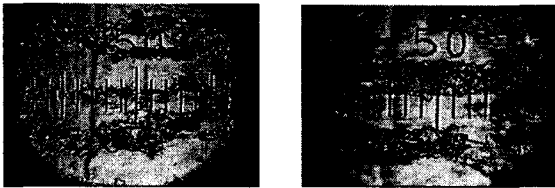
### 3.2 클러스터 형상 변화

Fig.6(a)는 기계적 내구성 실험을 하기 이전의 ITA30 ER유체 입자의 현미경 관찰 사진을 나타낸 것이다. 기계적 내구성 실험을 수행하기 이전의 입자들은 거의 같은 크기로 나타나고 있으며, 구형의 형상을 하고 있다. 유체에 3kV/mm의 전기장을 부하하면 양쪽의 전극을 향하여 전기장의 방향과 평행하게 클러스터들이 형성되어 있으며, 클러스터를 형성한 입자들이 거의 같은 크기임을 알 수 있다. 또한, 입자들이 어느 한쪽의 전극에 편중되어 분포되어 있지 않고, 관측 영역 내에 있는 입자들 모두 클러스터를 형성하고 있다.

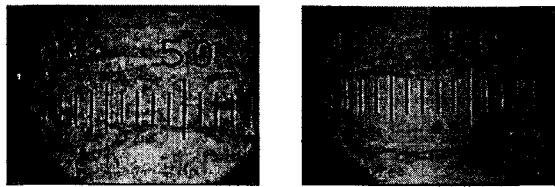
100만번의 피스톤 왕복 운동을 가하면서, 10만번의 전기장을 부하한 ITA30 ER유체를 수거하여 현미경 관찰한 사진을 Fig.6(b)에 나타내었다. 기계적 내구성 실험을 수행하기 이전의 경우에 비하여 전체적으로 입자의 크기가 작아졌으며, 입자의 형태는 타원형의 모양으로 나타나고 있다. 100만번 사이클의 왕복 운동을 부하한 유체 입자에 3kV/mm의 전기장을 부하하였을 때의 클러스터 형태는 양쪽 전극에 더욱 많은 입자들이 모여 있으며, 큰 입자들 사이에 매우 많은 작은 입자들이 붙어 클러스터를 형성하고 있다. 이는 입자들이 부서져, 전기장 부하에 대한 유도 분극의 형태가 변하고, 반복적인 전기장 부하에 의하여 입자들의 분극화에 의한 입자들간의 결합력이 변하기 때문이다.

ITMC25 ER유체의 기계적 내구성 실험을 하기 이전의 M.C.입자들은 긴 막대 모양을 하고 있으며, 그 크기도 매우 불규칙적으로 나타나고 있다. 이러한 M.C.입자에 3kV/mm의 전기장을 부하하면, Fig. 7(a)에

나타난 바와 같이 전극의 중앙 부위에서는 입자들의 길이 방향이 전기장의 방향과 평행하게 놓여 클러스터를 형성하고 있으나, 양쪽의 전극부에 많은 입자들이 분포하고 있다. 또한, 전극 근처의 클러스터에서는 입자들이 길이 방향뿐 만 아니라 서로 엮혀 클러스터를 형성하고 있다. 100만번의 피스톤 왕복운동과 10만번의 전기장을 부하한 ITMC25 ER유체의 입자는 Fig.7(b)에 나타난 것과 같이 입자의 크기가 매우 작아졌고, 긴 막대 모양의 형태를 한 입자의 분포보다는 타원 형태를 한 입자들이 많이 나타나고 있다. 100만번 사이클 이후의 입자에 3kV/mm의 전기장을 부하한 경우에는 매우 작은 입자들이 양쪽의 전극에 몰려 나타나고 있으나, 전극의 중앙에는 이전의 왕복 사이클 경우에서와 유사하게 입자들이 길이 방향으로 놓여 클러스터를 형성하고 있다. 그러나 클러스터를 형성하는 체인의 발달 수가 늘어난 것을 확인할 수 있다.



(a) before the test (b) after 1,000,000 cycle  
Fig.6 The cluster of ITA30

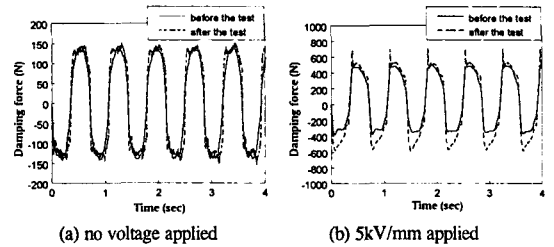


(a) before the test (b) after 1,000,000 cycle  
Fig.7 The cluster of ITMC25

### 3.3 ER댐퍼 성능변화

ER 유체의 내구성이 ER 댐퍼에 미치는 영향을 고찰하고자 장시간 사용한 ER 유체를 ER 댐퍼에 봉입한 후, 전기장 증가에 따른 성능 변화를 고찰하였다. ER 댐퍼에 채워지는 ER 유체는 ITA30의 ER 유체를 사용하였다. ER 댐퍼의 가진진폭은  $\pm 20\text{mm}$ , 가진주파수는  $1.4\text{Hz}$ 로 설정하였다. 실험에 사용된 ER 댐퍼의 안쪽 실린더의 외경은  $38.5\text{mm}$ 이며, 바깥쪽 실린더의 내경은  $40\text{mm}$ 로 하여, ER 유체가 유동할 수 있고, 전기장을 부하할 수 있는 간극은  $0.75\text{mm}$ 가 되게 하였다. 기계적 내구성 실험을 하기 이전의 ER 유체를 ER 댐퍼에 봉입하여 댐핑력을 측정한 결과와 60만 번의 반복운동을 부하한 ER 유체를 ER 댐퍼에 봉입한 후 측정한 댐핑력을 Fig.8에 나타내었다. 전기장 무부하시 댐핑력의 크기는 거의 변화없이 나타나지만,  $5\text{kV/mm}$ 의 전기장을

부하한 경우, 기계적 내구성 실험을 하기 이전의 ER 유체에 비하여 60만 번의 반복 운동을 부하한 ER 유체의 경우에 댐핑력이 약간 크게 나타나고 있다. 이는 Fig.4의 (a)에 나타난 바와 같이 기계적 반복 사이클이 증가함에 따라 ER 유체의 역학적 특성이 변하여 전기장 부하시 동적항복응력이 증가하게 되기 때문에 ER 댐퍼에서도 높은 댐핑력을 나타낸다.



(a) no voltage applied (b) 5kV/mm applied  
Fig.8 Damping force with initial and used ER fluids

## 4. 결론

본 연구에서는 ER댐퍼와 동일한 구조를 갖는 기계적 내구성 실험 장치를 제작하여 장시간 사용에 따른 ER 유체의 특성 변화를 고찰하고, ER댐퍼에 미치는 영향을 고찰하였다. 기계적인 반복운동에 대한 ITA30 ER유체의 역학적 특성변화는 거의 나타나지 않았으나, ITMC25 ER유체는 반복 사이클이 증가함에 따라 항복 응력과 전류밀도의 크기가 증가하였다. 장시간 사용한 ER유체를 댐퍼에 사용하였을 경우, 전기장 무부하시의 ER댐퍼의 댐핑력의 크기는 변화되지 않았으나, 전기장 부하시의 댐핑력은 증가하였다.

## 참고 문헌

1. W. H. Winslow, "Induced Fibration Suspensions", J. Applied Physics, Vol.20, pp.1137-1140, 1949
2. J. E. Stangroom, "Basic Observation on Electro-Rheological Fluids," Proc. of the 5th Int Cof. on Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and Associated technology, edited by W. A. Bulough, World Scientific, Singapore, pp. 29~36,1996
3. N. K. Petek, D. J. Romstadt, M. B. Lizell and T. R. Weyenberg, "Demonstration of an Automotive Semi-Active Suspension Using Electrorheological 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.