

## ER유체의 겔보기 점도특성 평가에 관한 연구

안영공 · Shin Morishita · 양보석\*

요코하마국립대학 생산공학과, \*부경대학교 기계자동차공학부

### Evaluation of Apparent Viscosity Properties for Electro-Rheological Fluid

Young Kong Ahn, Shin Morishita and Bo-Suk Yang\*

*Department of Mechanical Engineering, Yokohama National University*

*\*School of Mechanical & Automotive Engineering, Pukyong National University*

**Abstract**—Electro-Rheological (ER) fluid is a class of functional fluid whose apparent viscosity can be varied by the applied electric field strength. The ER fluid is classified into two types; one is a dispersive fluid and the other is a homogeneous. Dispersive ER fluid is a colloidal suspension of fine semiconducting particles in a dielectric liquid and liquid crystal (LC) is classed as homogeneous type ER fluid. LC has been originally developed for some electronic display devices. Various mechanical components applying ER fluid have been developed, and the their performance typically depends on the characteristics of ER fluid which have generally been evaluated by a rotational viscometer. However, the ER fluid introduced into various mechanical components undergoes not only simple shear flow but press flow or oscillating flow. For the evaluation of ER fluid, the authors developed an reciprocating type viscometer. The amplitude is controlled on 5 mm at the frequency from 50 to 1000 Hz. In the present paper, the performance of several types of ER fluid is evaluated by the reciprocating type viscometer and compared with those evaluated by a rotational viscometer.

**Key words**—Electro-Rheological fluid (ER fluid), liquid crystal, ER effect, electric field strength, rotational viscometer, reciprocating type viscometer.

#### 1. 서 론

일반적으로 오일 감쇠기(oil damper)에 이용되는 유체의 점성은 어떤 온도에서나 일정한 값을 갖는 것으로 가정되어 왔다. 기름의 점성이 주위환경에 따라 변화하지 않는다는 종래의 가정은 ER유체에서는 실현 불가능하게 되었다. ER유체는 부가되는 전장(electric field strength)에 의해 점성이 변화하는 특성을 가지는 유체[1]로 알려져 트라이볼로지, 감쇠기[2], 클러치[3] 등에 대한 응용연구가 활발하게 이루어지고 있다. ER유체는 감쇠기에 사용하는 유체로서의 큰 가능성을 가지고 있는 것으로 믿어져 왔고[4], 분산계와 균일계의 ER유체로 분류되어진다. 분산계의 ER유체는 기계장

치의 높은 성능을 약속하는 기계적 감쇠요소로서 산업 분야에 응용되고 있기 때문에, 화학분야는 물론 기계 분야의 연구자에게도 주목되고 있다. 이 분산계 ER유체는 시간이 경과함에 따라 분산된 입자들이 침전 및 서로 분리되는 치명적인 단점을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 한편 균일계 ER유체로는 침전이 발생하지 않는 것으로 알려져 있는 액정(liquid crystal)이 이에 해당된다. 액정은 전자스크린에 사용하기 위한 용도로 개발되어져 왔다. 액정은 상(phase)에 의해 특성이 결정되는 유기체(organic)이고, 결정체(crystalline solid)이면서 등방성(isotropic)인 유체상태[5]의 특유한 중간적인 상을 갖는다. 액정의 분자배향은 부가하는 전장에 의해 제어가능하고, 이 배향성(orientation)의 특

성으로 인해 광학적인 이방성을 가지며 일반적으로 컴퓨터 혹은 텔레비전의 스크린에 사용되어져 왔다. 액정을 윤활유로 사용할 때 마찰력이 저하한다는 특유의 현상을 유발시키는 것도 분자의 배향성에 의한 것이며, 이러한 특성에 관한 연구는 여러 연구자[6, 7]에 의해 수행되어 왔다. 또 다른 특징은 부가되는 전기 혹은 자기장에 의해 겔보기 점성이 크게 변하는 것이다[8,9]. 이상의 특성들을 갖는 ER유체의 평가는 단지 한 방향으로만 전단흐름(shear flow)이 발생하는 회전식점도계(rotational type viscometer)에 의해 일반적으로 수행되어 왔다.

한편 ER유체는 왕복식 전단을 일으키는 기계요소, 특히 진동을 제어하는 장치에 응용되므로 회전식 점도계에 의해 평가된 ER유체의 효과는 이러한 실제 기계요소에서 발생하는 현상과는 큰 차이가 있다. 따라서 본 연구는 진동제어 장치에 응용된 ER유체의 특성을 보다 정확히 평가하기 위해 회전식 및 왕복식 점도계를 설계, 제작하고, 이를 이용하여 분산계 및 균일계 ER유체에 대해 ER효과를 실험적으로 평가하였다.

## 2. ER유체

### 2-1. 분산계 ER유체

분산계 ER유체는 절연유체(dielectric liquid)의 내부에 반 전도체(semiconducting)의 미세한 입자들로 구성된 콜로이드부유물(colloidal suspension)이다[10]. 이 특유의 부유물에 대해서는 처음으로 1949년에 보고되었다[1]. 이때, ER유체의 특성과 기계적 요소에 대한 몇 가지 응용 예도 보고되었고, 이 ER유체는 기계공학 분야에서는 Winslow 유체라 불리기도 한다. 반 전도체 입자들은 수십 나노미터(nanometer)에서 10 마이크로미터(micron meter) 크기이내의 것으로 실리카 겔(silica gel), 셀룰로오스(cellulose), 탄화 알루미늄, 전분(corn starch grain)의 입자들이 유체 내부에 분산되어 있다. 유체내부에 부가된 전장은 분산의 유동학적 구조를 변화시키는 작용을 하여 유체가 이동할 때 저항을 증가시키는 역할을 하는 것처럼 보인다. 사실 전극 내부에 입자들로 구성된 사슬이 많이 발견되고, 이것들에 의해 유체유동(flow mode)에 대한 저항과 전극의 전단모멘트(shear moment)의 저항이 증가되는 기본 유동형태에 대하여 Fig. 1에 나타내었다. 전장을 ER유체에 부가했을 때 유체내부에 분산된 미립자가 유전

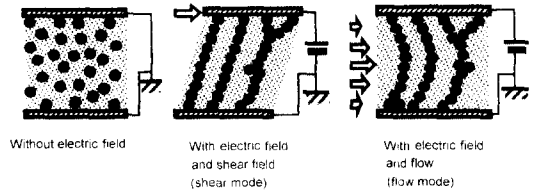


Fig. 1. Mechanism of dispersive ER effect.

분극을 일으키고, 이때 전기 이중층이 형성되어 그 내부에 전하의 분극이 발생한다. 이 분극된 전하의 정전기력에 의해 전하방향에 입자의 사슬을 형성한다는 것이 가장 유력한 메커니즘으로 알려져 있으나, 상세한 부분은 아직 밝혀지지 않은 점이 많다. 이 ER유체의 저항이 증가하는 현상은 겔보기 점성이 증가하는 것과 밀접한 관계가 있다. 전장이 부가되지 않은 상태의 유체는 뉴턴유체와 유사한 특성을 가지고 있고, 전장이 부가되었을 때는 Bingham유체의 브델로서 그 특성이 설명된다.

### 2-2. 균일계 ER유체(liquid crystal)

전자스크린에 사용하기 위한 용도로 개발된 균일계 ER유체로서의 액정은 최근 윤활유 및 반 능동제어(semi-active control)의 액츄에이터로서 연구 개발되고 있다. 액정은 분자의 장축배열(long-range order)에 의해 그 특성이 결정되는 유기적 유체이다[11]. 액정은 농도의 범위에 의한 lyotropic액정과 온도 범위에 의해 thermotropic액정으로 분류되고, 또한 고분자(high molecular-weight) 및 저분자(low molecular-weight)에 의한 분류도 있다. 보다 좋은 분류로서는 자배향의 구조로 구별하는 것으로 4가지의 전형적인 분자구조의 상, 즉 nematic, smectic, cholesteric 및 discotic상이 있으며, Fig. 2에 나타내었다. 액정은 액체가 가지고 있는 등방성의 상과 그 특이한 분자구조에 의해 어떤 방향성, 즉 광학적 및 전기적 이방성(anisotropy)이 나타나며, 이 분자의 방향성은 외부로부터의 전기장 및 자기장에 의해 제어가 가능하다. Nematic상 액정의 분자는 일반적으로 긴 원통형의 타원체 상이고, 그 장축(major axis)은 부가된 전기장이나 자기장에 의해 어떤 방향으로 향하도록 하는 것이 가능하다. 타원체의 장축에 평행한 방향의 단위벡터를 배향벡터(director)라 하고, 외부로부터 전장을 부가하였을 때 액정의 절연 이방성(dielectric anisotropy)은 매우 중요한 특성 중의 하나이다. 이 절연 이방성은 분자의 장축에 수직한

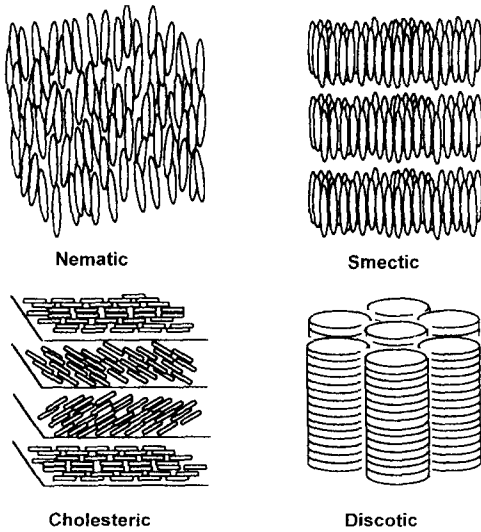


Fig. 2. Molecular model of liquid crystals.

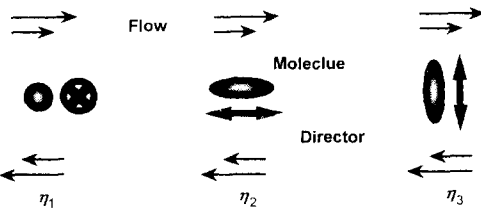


Fig. 3. The viscosity coefficients of nematic liquid crystal.

절연상수(dielectric constant)축에서 평행한 상수 값을 공제하는 것으로 정의된다. Nematic액정의 점성은 이방적(anisotropic)인 3가지의 점성특성을 가지고 있고, 이 점성특성은 Miesowicz점성으로 불리운다. Fig. 3에 3가지 전형적인 액정분자의 배향을 전단흐름(shear flow)에 대하여 나타내었다[12]. 여기서  $\eta_1$ 의 배향벡터는 전단면에 수직이고,  $\eta_2$ 는 흐름방향에 평행하며, 그리고  $\eta_3$ 는 속도의 변화율에 평행하다. Miesowicz점성의 크기는  $\eta_2 < \eta_1 < \eta_3$ 의 순으로 변한다. 즉 전기장에 의해 분자의 배향벡터가 제어될 때, 점성은  $\eta_2$ 에서  $\eta_3$ 까지 변화할 수 있음을 의미한다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3-1. 회전식 점도계

전장에 반응하는 ER유체의 점도는 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 종래의 단일 전단흐름(uniform shear field)의 회전식 점도계에 의해 일반적으로 측정되었다. 동

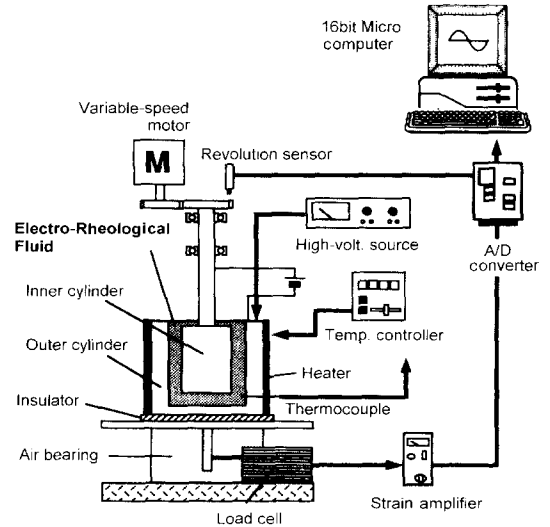


Fig. 4. Rotational type viscometer.

(copper)으로 만들어진 동심의 두 원통 사이에 시험 ER유체를 채우고 내부원통을 회전시켜 외부원통에 전달되는 토크(torque)를 측정하고, 그 출력을 A/D변환기를 통하여 컴퓨터에 입력되어 점도를 계산한다. 두 원통은 전극으로서 직류전장을 부가하는 요소이고, 전장, 전단속도(shear rate) 및 온도를 변수로 하여 점도를 측정한다. 내부원통의 직경과 높이는 각각 50 mm, 길이가 50 mm, 내부와 외부원통 사이의 간격은 0.5 mm이다. 내부원통의 최대 회전수는 120 rpm이고, 외부원통은 마찰력을 동반하는 오차를 최소화 하기위해 공기 베어링(air bearing)으로 지지하였다. 외부원통의 주위에 전기 히터가 감겨져 있고, 외부원통의 밑부분에 설치된 열전대(thermocouple)로부터 측정된 온도를 시판용 온도제어기를 이용하여 PID제어로 온도제어를 하였다. 온도는 상온에서 약 90°C까지 측정이 가능하다.

#### 3-2. 왕복식 점도계

왕복흐름(oscillatory flow)의 상태에서 ER유체의 효과를 측정하기위한 왕복식 점도계를 Fig. 5에 나타내었다. 내부 사각판 A와 외부 사각판 B는 각각 음과 양의 전극으로 이용되고, 그 사이의 간격은 0.5 mm이며 그 내부에 시험유체가 채워져 있다. 판 A는 판 스프링에 의해 상부의 지지 부재에 매달려 있고, 4 mm의 간격을 두로 평행하게 설치된 판 B의 중앙에 삽입하였다. 판 B는 가진기의 상부에 접촉되어 있고, 주파수 혹은 진폭을 변수로 하여 판 B를 가진하였을 때

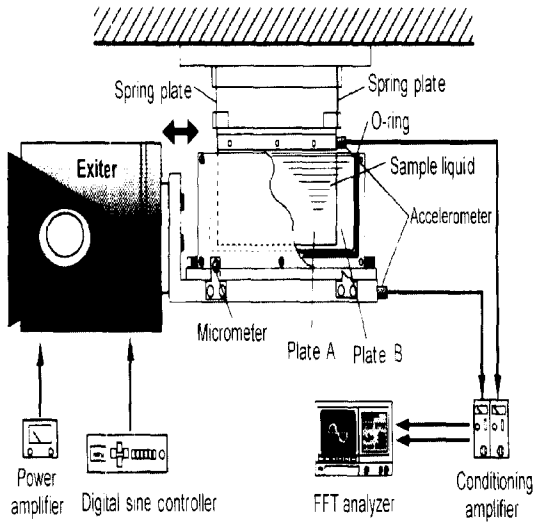


Fig. 5. Reciprocating type viscometer.

전단응력은 시험 유체를 통하여 판 A에 전달된다. 판 A 및 B에 설치된 가속도 센서에 의해 그 가속도가 측정되어 FFT Analyzer에 입력되어 상대응답이 구해진다. 두개의 판 스프링을 가진 판 A의 폭은 100 mm, 높이는 55 mm, 두께가 3 mm이고, 고유진동수는 11 Hz로 측정되었다. 본 실험에서는 가진기의 능력에 의해 가진 주파수는 60 Hz에서 1 kHz까지로 하고, 진폭은 5 mm로 가진하였다. 온도제어는 회전식 점도계의 경우와 동일한 방식으로 하였다.

3-3. 시험유체

분산계 ER유체로서는 광유(mineral oil) 내부에 평균직경 1 μm의 실리카 파우더(silica power)를 분산시킨 유체를 사용하였다. 전장을 부가하지 않았을 때, ER유체의 점도는 40°C에서 40 mPa·s이다. 한편 균일계 ER유체로서 사용한 액정은 주 성분이 biphenyl계이고, 저분자 액정계에 속하는 thermotropic액정과 혼합으로 이루어져 있다. Clearing point(61°C)와 melting point(-20°C) 사이의 온도범위에서 nematic상이 나타나는 컴퓨터 스크린에 사용되는 액정이다. 이 액정의 점도는 40°C에서 17 mPa·s이고, 절연이방성(dielectric anisotropy)은 20°C에서 13.8이다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 겔보기 점도의 변화

40°C에서 직류전압을 이용한 회전식 점도계에 의해 측정된 분산계 ER유체와 액정의 특성 변화를 Fig. 6~Fig. 9에 각각 나타내었다. Fig. 6에서 분산계 ER유체는 부가된 전장의 증가에 의해 저 전단속도에서 지수 함수적으로 겔보기 점도가 상승하는 현상을 보이고, 0 V/mm의 전장에 비해 3000 V/mm에서는 약 20배의 ER효과가 일어났다. Fig. 6을 전단속도에 대한 전단응력으로 표시하면 Fig. 7과 같고, 전단속도가 0인 점에서의 전단응력은 항복응력에 대한 값으로 간주할 수 있으며, 이런 유체의 특성은 Bingham유체의 모델로 설명된다. 분산계 ER유체는 전장의 증가에 따라 항복응력이 상승하고 있는 것을 알 수 있다.

한편 Fig. 8에서 균일계 ER유체는 전장을 증가시킴

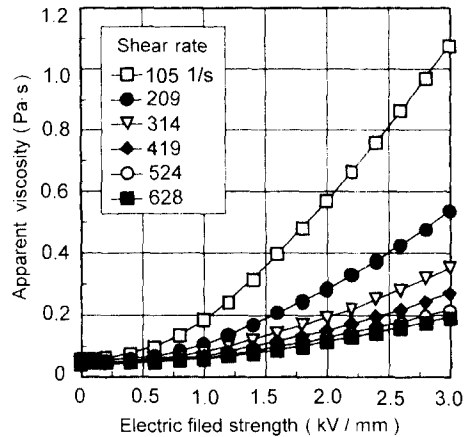


Fig. 6. Apparent viscosity of dispersive ER fluid.

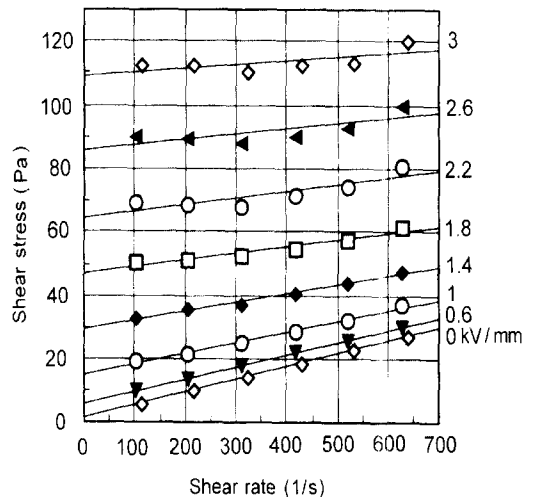


Fig. 7. Shear stress of dispersive ER fluid.

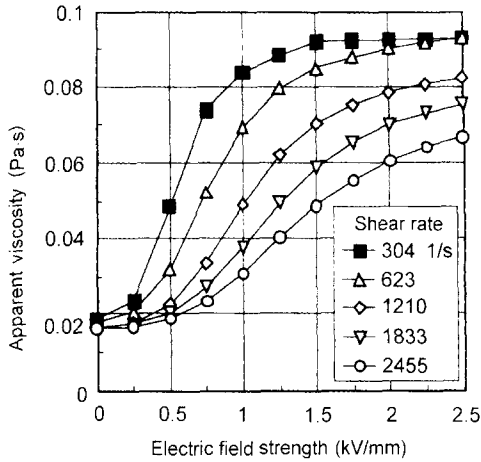


Fig. 8. Apparent viscosity of homogeneous ER fluid.

에 따라 수 백 V/mm에서 부터 점도가 상승하기 시작하여 그 후 점도가 급격하게 상승하다가 어느 일정한 전장에 도달하면 점도 증가율이 완만하게 된다. 또한 어느 높은 전장에 달하면 전단속도에 관계없이 점도는 일정한 최대의 값을 갖는다. 이 현상은 대부분의 액정분자의 배향벡터가 일정방향으로 향하고 있기 때문으로 생각된다. 한편, 분산계 ER유체의 특성과 마찬가지로 저 전단속도의 경우에 점도의 변화 기울기가 크고, 높은 전단속도에서는 그 기울기가 작으므로 어느 일정한 점도를 유지하기 위해서는 높은 전압이 요구된다.

Fig. 8을 전단속도에 대한 전단응력으로 표시하면 Fig. 9와 같다. 이 성분들의 기울기가 뉴턴유체의 점도와 유사함을 나타낸다. 전장을 부가하지 않은 상태

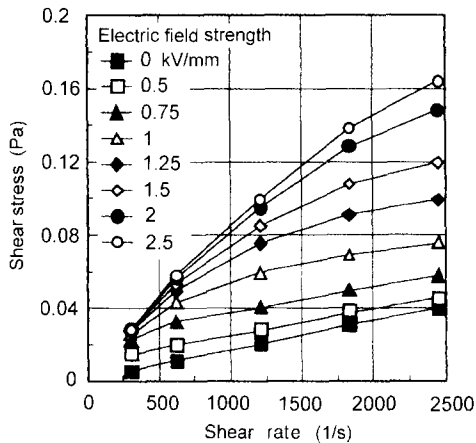


Fig. 9. Shear stress of homogeneous ER fluid.

와 높은 전압을 부가했을 경우, 점도효과가 포화된 상태의 뉴턴점도의 특성을 가지고, 그 밖의 경우는 의사소성(pseudoplastic)유체의 성질을 가지고 있는 것을 알 수가 있다.

4-2. 왕복식 점도계에 의한 평가

분산계 및 균일계ER유체의 전장에 대한 ER효과를 왕복식 점도계를 이용하여 측정된 결과를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 이 결과는 판 A와 B사이의 가속도의 진폭비에 따른 응답비율의 변화를 전장에 대해 나타낸다. 판 A의 고유진동수  $\omega_n$ 에 대한 가진진동

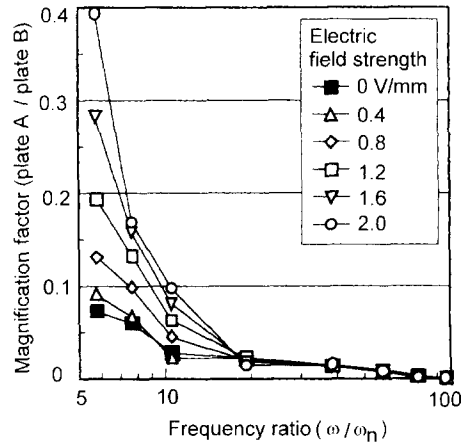


Fig. 10. ER effect by a reciprocating type viscometer for dispersive ER fluid.

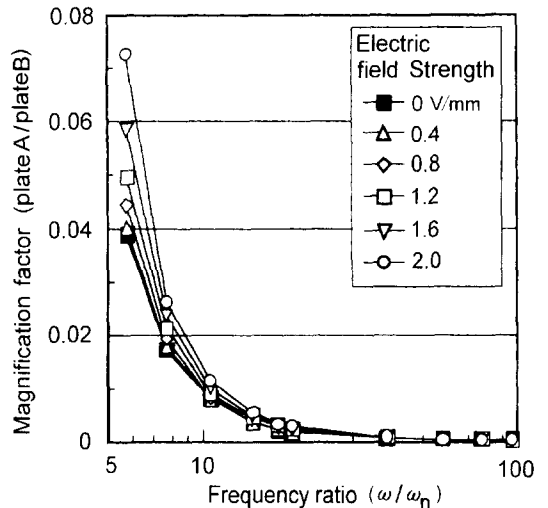


Fig. 11. ER effect by a reciprocating type viscometer for homogeneous ER fluid.

수  $\omega$ 의 진동수비가 증가하면 지수함수적으로 걸보기 점도가 저하하는 것을 두 결과로부터 알 수가 있고, 특히 진동수비가 20이상이면 ER효과는 사라진다. 회전식 점도계에 의한 분산계 및 균일계 ER유체의 전장에 대한 측정결과를 전단속도에 대해 걸보기 점도를 나타내면, 두 ER유체는 전단속도가 증가함에 따라 감소하게 된다[13]. 왕복식 점도계에 의한 결과는 회전식 점도계로부터 측정된 결과와는 비교할 수 없는 왕복식 점도계 자체의 고유응답을 가지고 있으므로, 그 응답을 고려할 필요가 있다.

### 4-3. ER유체의 등가모델

감쇠비수로 ER효과를 평가하기 위하여 ER유체내부에 있는 판 A를 모델화하면, Fig. 12와 같은 1자유도계의 등가모델이 된다. 여기서 m은 판 A의 질량, k는 판 스프링 계수, c는 ER유체의 감쇠계수를 의미한다. Fig. 13은 뉴턴유체(혹은 base oil)와 전장을 부

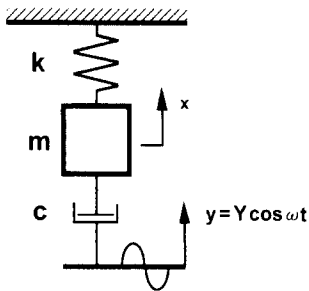


Fig. 12. Equivalent model.

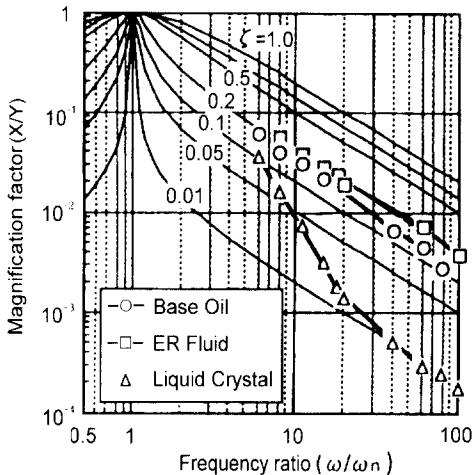


Fig. 13. Rheological properties of ER fluid without electric field.

가하지 않은 상태의 분산계 및 균일계 ER유체점성에 대한 등가감쇠(equivalent damping) 값을 여러 감쇠비에 대한 이론적인 응답선도 위에 나타내었다. 뉴턴유체나 분산계 ER유체는 주파수에 대해 선형 감쇠특성을 나타낸다. 균일계 ER유체의 경우는 특이하게 진동수비가 높아짐에 따라 그 자체의 감쇠비가 1/10배 정도 저하하는 독특한 특성을 가진다. 이 현상은 본 연구에서는 확실히 밝혀지지 않았으나, 액정 자체의 유동학적 동특성에 관련하는 것으로 보여진다. 이러한 액정의 특성은 저주파수에서는 높은 감쇠가, 그리고 고주파수에서는 낮은 감쇠가 요구되는 유체마운트(fluid mount)나 동흡진기(tuned absorber)에 응용하면 좋은 효과를 얻을 수 있을 것으로 보여진다. 또한 윤활유로서 이용할 경우, 고주파수 영역에서 마찰력을 한층 감소시킬 수 있을 것이다.

## 5. 결 론

ER유체의 특성을 평가하기 위해 왕복식 및 회전식 점도계를 설계, 제작하였고, 이 두 점도계를 이용하여 분산계 ER유체와 균일계인 액정의 ER효과를 실험적으로 조사한 결론은 다음과 같다.

1. 왕복식 전단을 일으키는 각종 기계요소 중 특히 진동을 제어하는 감쇠기 등의 장치에 ER유체를 이용하기 위해서는 회전식 점도계가 아닌 왕복식 점도계에 의한 ER유체의 동특성 평가가 필요하다.
2. 전장을 가하지 않은 분산계 ER유체는 감쇠를 선형적으로 모델화 하는 것이 가능하고, 균일계 ER유체인 액정은 높은 주파수에서 그 자체가 가지고 있는 감쇠가 낮아지는 특성이 있다.

## 참 고 문 헌

1. Winslow, W. M., "Induced Fibrillation of Suspensions," Journal of Applied Physics, Vol. 20, December, pp. 1137-1140, 1949.
2. Nikolajsen, J. L. and Hoque, M. S., "An Electroviscous Damper for Rotor Applications," Transactions of ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 112, No. 3, pp. 440-443, 1990.
3. 이규한, 심현해, 김창호, 임윤철 "전기유변성 클러치의 동력전달 메커니즘 제3보: ER클러치 성능에 관한 실험적 고찰," 한국윤활학회지, 제13권, 제4호, pp. 1-

- 9, 1997.
4. Morishita, S. and Ura, T., "ER Fluid Applications to Vibration Control Devices and an Adaptive Neuro-Net Controller," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 4, No. 3, pp. 366-372, 1993.
  5. Okano, L. and Kobayashi, S., "Liquid Crystals," *Baifukan*, 1985.
  6. Cognard, J., "Lubrication with Liquid Crystals," *Proceedings of American Chemical Society Symposium on Tribology and Liquid Crystalline State*, No.441, pp 1-47, 1990.
  7. Fischer, T. E., Bhattacharya, S., Salher, R., Lauer, J.L., and Ahn, Y., "Lubrication by a Smectic Liquid Crystals," *Tribology Transactions*, Vol. 31, No. 4, pp.442-448, 1988.
  8. Honda, T., Kurosawa, K. and Sasada, T., "Electroviscous Effect in Liquid Crystals," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 18, No. 5, pp.1015-1018, 1979.
  9. Morishita, S., Nakano, K. and Kimura, Y., "Electroviscous Effect of Nematic Liquid Crystals," *Tribology International*, Vol. 26, No. 6, pp. 399-403, 1993.
  10. Jordan, T. C. and Shaw, M. T., "Electrorheology," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 24, No. 5, pp. 849-878, 1989.
  11. de Gennes, P. G., "The Physics of Liquid Crystals," Oxford University Press, London, 1975.
  12. Benicewicz, B. C., Johnson J. F. and Shaw, M. T., "Viscosity Behavior of Liquid Crystals," *Molecular Crystals and Liquid Crystal*, Vol. 65, pp. 111-132, 1981.
  13. Ahn, Y. K., "Controllable Squeeze Film Damper Using Electro-Rheological Fluid," Ph.D. Thesis, Yokohama National University, pp. 32-54, 1996.