

# 전기유동유체를 이용한 브레이크 시스템의 성능 고찰

김 기 우,\* 박 우 철,\* 최 승 복,\*\* 정 재 천\*\*

## Performance Investigation of a Brake System Featuring Electro-Rheological Fluids

G. W. Kim,\* W. C. Park,\* S. B. Choi\*\* and C. C. Cheong\*\*

### ABSTRACT

This study presents model synthesis and performance investigation of a new brake system using electro-rheological (ER) fluids. Field-dependent Bingham properties characterized by non-zero yield stresses of the ER fluids are experimentally distilled. These properties are then incorporated with the governing equation of the proposed brake system which features design simplicity, fast response and salient controllability. After analyzing system performance with respect to design parameters such as electrode gap and length, an appropriate size of the brake is designed and fabricated. Both simulation and experimental works are undertaken in order to determine the feasibility and efficiency of the proposed brake system. The system performances are justified by evaluating field-dependent braking torques as well as braking times.

**Key Words** : Electro-Rheological Fluid(전기 유동 유체), Brake System(브레이크 시스템), Yield Shear Stress(항복 전단 응력), Braking Torque(제동 토크), Braking Time(제동 시간)

### 1. 서 론

종전에는 자동차 산업에서 주로 사용되던 브레이크가 최근 공작, 운반, 설비, 사무 기계와 같은 각종 산업 기계에서 다양한 용도로 사용되고 있다.<sup>1)</sup> 즉 매우 신속한 단속(on-off) 운전이나 위치 제어시 모터의 반복 및 제동 능력에는 한계가 있으므로 브레이크와 같은 보조

장치가 요구된다. 또한 자동화 설비의 발전으로 수반되는 복잡한 회로의 오동작 및 안전성의 문제도 심각하게 대두되고 있다. 즉 부하 관성의 정지 및 비상시의 기계 정지를 위해 빠른 제동 장치가 필요하며 이외에도 변속, 정역회전시 토크의 적절한 조절이 요구된다. 이런 문제점의 해결 방안으로 작동력의 전달이 전기적으로 이루어져 원격 조작이 가능하며 센서 신호를 이용할 수

\* 인하 대학교 대학원 기계공학과  
 \*\* 인하 대학교 기계공학과(정회원)

있는 전기, 전자식 브레이크가 개발되어 사용되고 있다. 전기, 전자식 브레이크를 이런 다양한 용도에 사용하기 위해서는 토크의 용량은 큰 반면 소형, 경량이어야 하고 구조가 간단하여 취급이 간편하여야 한다. 또한 제동 토크(braking torque)의 설정이 용이하고 신속한 응답 속도를 요구하게 된다. 그렇지만 기존의 마그네틱 브레이크와 같은 전기, 전자식 브레이크 시스템을 개발하기 위한 일환으로 본 연구에서는 최근 첨단 지능 재료(smart materials)로 각광받고 있는 전기 유동유체(electro-rheological fluid; 이하 'ER유체'라고 명칭)의 가변 빙행(Bingham) 특성과 빠른 응답성을 이용하여 브레이크 시스템을 구성(이하 'ER브레이크'라고 명칭)하고 이 시스템의 고유 성능을 고찰하였다.

ER응용장치는 Winslow에 의해 처음으로 그 실용 가능성이 제시되었지만 ER효과에 대한 이론적 해석 및 응용 장치 제작과 관련된 기술상의 정체때문에 오랜 기간 동안 연구 성과는 미흡하였다. 그 후 1980년대를 들어 영국을 중심으로 연구가 다시 본격화 되면서 상당한 연구 성과의 진전이 있었으며 최근에는 ER 충격 완충기(shock absorber), ER 엔진 마운트(engine mount) 등 일부 응용 장치는 상품화 단계에 이르고 있다.<sup>(2,3,4)</sup> 또한 국내에서도 ER 유체의 조성 및 각종 응용 장치 개발에 대한 관심이 고조되고 있는 실정이다.<sup>(5,6,7)</sup> 그렇지만 ER클러치와 브레이크에 대한 연구는 잠재적인 가능성에 비해 상대적으로 취약하여 최근에 와서야 ER유체를 이용한 클러치 및 브레이크의 개발에 대한 연구가 부분적으로 수행되고 있다.<sup>(8,9,10)</sup> 영국의 Stevens등은 표준적인 실험 장치를 구성하여 ER유체의 가변 토크 특성을 점성 커플링(viscous couplings), 비틀림 댐퍼(torsional damper) 및 장력 제어(tension control) 등에 응용할 수 있는 가능성을 제시하였다. Carlson등은 ER 브레이크 및 클러치의 기초적인 형태를 제안하였고 Johnson등은 약 1000rpm까지 시험을 수행하여 실질적인 응용성을 강조하였다. 그러나 앞서 기술한 브레이크와 용도를 만족시킬 수준의 성능을 지닌 ER브레이크의 개발을 위해서는 우수한 ER유체의 개발, 온도 변화에 따른 시스템의 성능변화, 그리고 제동 시간(braking time)과 같은 기본 성능의 구체적인 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 이러한 목적을 달성하기 위해 우선 성능이 우수한 ER유체를 자체 조성하고 이 ER유체의 빙

행 특성을 점성계수와 전기장을 달리하여 고찰하였다. 그리고 전기장의 항복 전단 응력(yield shear stress) 특성을 ER브레이크 시스템 모델과 연계하여 시스템 성능을 분석한 후 전극 간격과 같은 알맞는 설계 변수를 설정하였으며 이를 근거로 새로운 기술적 차원의 ER브레이크를 제작하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 부하된 각 전기장하에서 회전 속도와 온도 변화에 의한 제동 토크 성능을 고찰하였다. 또한 향후 ER브레이크 시스템의 제어 알고리즘 연구에 중요한 기초적 자료 도출을 위해 제안된 ER브레이크 시스템의 제동 시간도 측정하였다.

## 2. ER 유체의 빙행 특성 고찰

본 연구에서 사용된 ER유체는 전도성 입자인 gum arabic과 용매인 실리콘 오일(30cs) 및 트랜스포머 오일(10cs)로 조성되었으며 이들을 각각 IGSD-3B 및 IGTD-1B로 명명하였다. 두 경우 모두 gum arabic 입자농도(무게비)는 30%로 하였으며, 입자의 크기는 입도 분석기로 분석하였고 구성비를 보면 Fig. 1과 같다. 그림에서 보는바와 같이 20~80 $\mu$ m크기의 입자가 주를 이루고 있다.

이와 같은 ER유체는 일반적으로 전기장 부하시 다음과 같이 표현되는 빙행 거동을 나타낸다.

$$\tau = \tau_y(E) + \eta \dot{\gamma} = \alpha E^x + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서,  $\tau$ 는 유체의 전단 응력(shear stress),  $\dot{\gamma}$ 는 전단 속도비(shear rate),  $\eta$ 는 전단 속도비에 영향을 받는 ER유체의 점성계수(viscosity coefficient)이며,

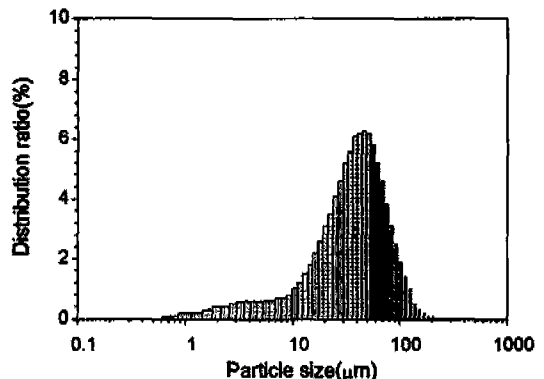


Fig. 1 Distribution of gum arabic particle sizes

$\tau_y(E)$ 는 항복 전단 응력을 나타낸다. 결국 전기장의 함수로서 제어가 가능한 항복 전단응력이 공학적인 측면에서 볼때 매우 중요한 설계 변수이며 이때 발생하는 전단응력의 변화는 ER브레이크와 같은 각종 응용 장치의 성능을 결정하는 가변 감쇠(damping) 특성으로 나타난다. 그러나 ER유체는 전기장을 부하하여 전단 응력의 발생을 용이하게 확인할 수 있는 반면 용매의 점성계수나 입자의 종류와 같은 실험 조건에 따라 항복 전단 응력을 나타내는 비례 상수  $\alpha$ 와 지수  $x$ 값이 변하는 불규칙적인 거동을 보여주기 때문에 응용 장치에 적용시 정확한 성능 해석이 곤란하다. 특히 항복(yield) 전 후의 초기 거동은 현재까지 완벽한 이론 해석이 미흡한 상태이다. 이것은 ER유체가 전기장 부하시 건조한 고체 표면에서 발생하는 "slip-stick" 마찰이나 연성 재료의 인장 시험(tensile test) 때 보여주는 역학적 거동과 유사하게 정적 항복 전단응력(static yield shear stress)과 동적 항복 전단응력(dynamic yield shear stress)이 존재하는 특성을 나타내기 때문이다. 즉 ER유체도 전단 속도비가 영일때 stick마찰 역할을 하는 정적 항복 전단응력이 나타난다.

지금까지 ER유체와 같은 비 뉴토니언(non-Newtonian) 유체의 정적 항복전단응력은 측정 방법 및 실험장치에 따라 다르게 측정되어 그 물리적 존재 여부 및 이론 정립에 관해 많은 논란이 있었다. Hartnett 등과 Bonnacaze 등에 의해 물리적으로 검증된 이후 정확한 측정 방법 및 이론적 예측에 관한 연구가 활발하게 전개되고 있다.<sup>(11,12)</sup> 따라서 본 연구에서는 ER브레이크의 기본적인 성능 시험에 앞서 자체 제작한 정적 미끄러짐형 점도측정기<sup>(13)</sup>(static sliding type viscometer)를 사용하여 응용 장치의 성능 및 제원을 결정하는 중요한 설계 변수인 정적 항복전단응력을 측정하여 시스템에 미치는 영향을 분석하였다. 사용된 ER유체의 빙행 특성을 보면 Fig. 2와 같이 전기장의 증가에 따라 항복 응력이 지수적으로 증가하는 것을 알수 있으며 이를 식(1)의 항복 전단응력식으로 나타내면 다음과 같다.

- i) IGTD-1B;  $\tau_y(E) = 0.016E^{2.4}$  (kPa)
- ii) IGSD-3B;  $\tau_y(E) = 0.026E^{2.1}$  (kPa) (2)

이 식으로 부터 자체조성한 ER유체의 정적 항복전단 응력은 3kV/mm부하시 점성계수가 상대적으로 높은

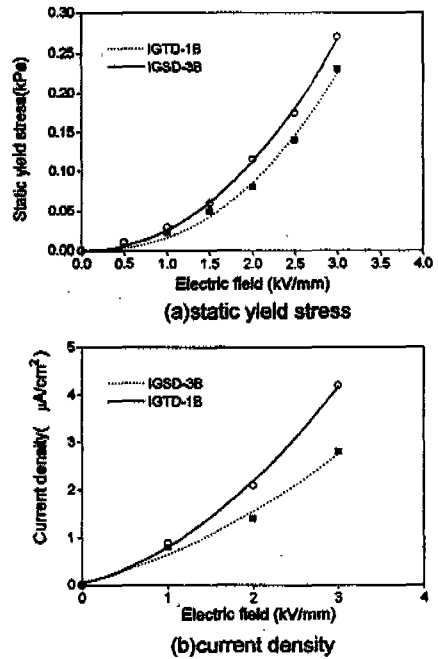


Fig. 2 Field-dependent Bingham properties of the ER fluids

IGSD-3B(30cs)에서 약 0.26kPa이며 IGTD-1B의 경우는 0.22kPa인것을 알 수 있다. 따라서 IGSD-3B ER유체를 사용한 ER브레이크의 제동 성능이 상대적으로 우수할 것으로 예상된다. 전류밀도(current density)는 항복 전단응력과 마찬가지로 전기장에 따라 지수적으로 증가함을 알 수 있으며 적은 전력소모를 요구하는 응용장치 개발에 적합한 수치로 판단된다. 또한 트랜스퍼머 오일을 사용한 IGTD-1B에서 보다 큰 전류밀도가 나타나 이 유체를 사용한 브레이크의 전력 소모가 다소 클 것으로 예상된다.

### 3. ER 브레이크의 모델 구성

제안된 ER브레이크는 Fig. 3과 같이 전극(electrode) 역할을 하는 외부 실린더와 관성에 의한 영향을 작게 하기 위해 속을 비운 내부 실린더로 구성되었다. 실린더의 재질은 알루미늄이며 ER유체로 채워질 실린더 간격(1mm)을 정확하게 유지하고 절연 및 밀봉(seal)을 위해 플라스틱 재질의 절연체 및 O-링을 회전축과 실린더 사이에 삽입하였다. 제작 형태는 실린더형

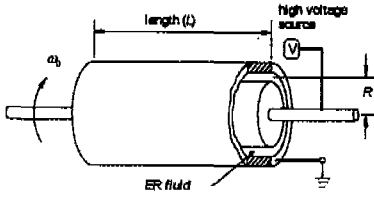


Fig. 3 Layout of the proposed ER brake

과 평판(flat plate)형이 가능하지만 가공 및 제작이 간단하고 3kV/mm 이상의 전기장 부하시 발생하는 단락(dielectric breakdown)현상을 고려하여 실린더형으로 제작하였다. ER유체와의 접촉면적을 크게하여 발생하는 토크를 증가시키기 위해, 전체 길이(L)를 증가시키면 전극의 평평도를 저하시켜 고속 회전시 높은 전기장 부하가 곤란하게 되는 주된 원인이 되며, 평균반경(R)를 증가시키면 판성이 증가되므로 알맞는 설계 변수를 결정해야 한다.

또한, 설계된 ER브레이크에서 발생하는 토크를 정확하게 예상할 수 있는 모델을 구성하기 위해서는 전기장에 의해 발생하는 토크 이외에 용매로 사용된 오일로 인해 발생하는 점성 토크도 고려해야 한다. 따라서 ER브레이크의 외부 실린더를 고정시키고 내부 실린더를 회전시킬 경우 용매가 뉴토니언 유체이며 비압축성 유체라고 가정하면 정상 상태(steady state)일때 점성 유체(viscous fluid)의 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식으로 부터 다음과 같은 유동(flow)의 속도 분포를 구할 수 있다.<sup>(14)</sup>

$$u_{\theta} = \frac{r_0 \omega_0}{(r_1^2/r_0^2 - 1)} \cdot \left( \frac{r_1^2}{r_0 r} - \frac{r}{r_0} \right) \quad (3)$$

여기서,  $u_{\theta}$ 는 원주 방향의 속도이며  $\omega_0$ 는 내부 실린더의 회전 속도,  $r_1$ 는 외부 실린더의 내부 반지름,  $r_0$ 는 내부 실린더의 외부반지름이며  $r$ 은 회전 중심에서 간격까지의 거리이다. 또한 전기장 강도를 크게 하기 위해 외부와 내부 실린더의 간격(gap)을 매우 작게 할 경우 ( $r_1 - r_0 \ll r_0$ ) 실린더 간격의 ER유체에서 발생하는 전기장 무부하시의 점성 토크( $T_{\mu}$ )는 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$T_{\mu} = 4\pi\mu \frac{r_1^2 r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} \omega_0 \cdot L \quad (4)$$

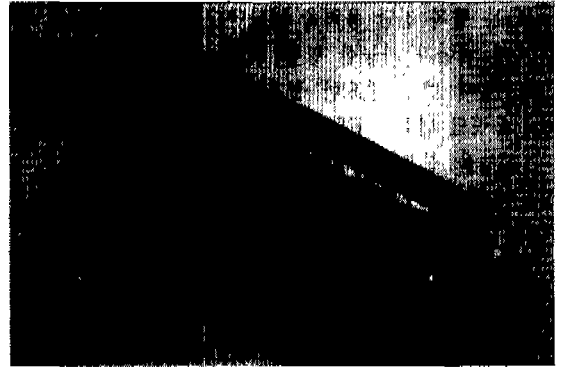


Fig. 4 Photograph of the proposed ER brake

여기서,  $\mu$ 는 용매의 점성 계수이다. 이 식으로부터 점성 토크는 실린더 사이의 간격( $r_1 - r_0$ )과 점성 계수, 회전 속도 등에 영향을 받는 사실을 알 수 있다.

한편 전기장 부하시 발생하는 토크( $T_{ER}$ )는 단위 면적당 발생하는 항복 전단응력을 전체 접촉 면적에 대하여 적분을 하고 평균반경을 곱하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{ER} = \int_0^L \tau_y(E) 2\pi R dL \cdot R = 2\pi R^2 \tau_y(E) L \quad (5)$$

따라서 전체 제동 토크( $T_t$ )는 회전 부분과의 접촉때문에 발생하는 마찰 토크를 고려하지 않을 경우 다음 식과 같이 두 토크의 합으로 표현된다.

$$T_t = T_{\mu} + T_{ER} \quad (6)$$

이 식으로부터 ER브레이크의 제동 토크 성능은 전체 길이, 실린더의 내외반지름 및 전극 간격과 같은 기하학적 설계 조건과 전기장에 의해 발생하는 ER유체의 정적항복전단응력 및 용매의 점성 계수에 의해 결정되는 것을 알 수 있으며 회전속도와의 선형적인 관계를 예상할 수 있다.

Fig. 4는 본 연구에서 제작한 실린더형 ER브레이크의 사진이다. 적용된 ER유체의 효과 및 각 설계 변수의 영향을 해석한 후 알맞은 제원을 설정하였다. 전체 길이는 210mm, 내부 실린더의 외부 반지름은 35mm, 그리고 외부 실린더의 내부 반지름은 36mm로 제작하였다.

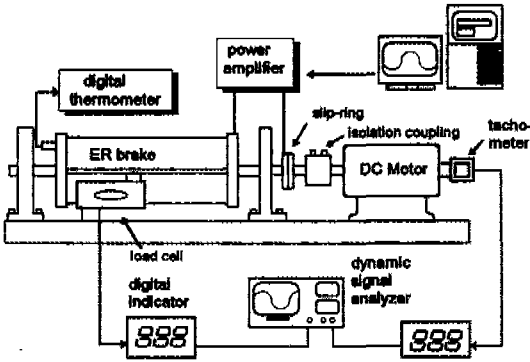


Fig. 5 Experimental apparatus for braking torque measurement

#### 4. ER 브레이크의 성능 시험 및 고찰

##### 4-1. 시험 장치 구성 및 방법

Fig. 5는 전기장에 따른 ER브레이크의 제동 토크 및 제동 시간을 측정하기 위한 시험 장치를 나타낸다. 토크 제공원으로 사용된 전동기는 일정한 회전 속도를 유지하면서 전압의 조절을 통해 0~1000rpm으로 변속이 가능한 정격 출력이 0.1kW인 DC전동기를 사용하였으며 회전 측에는 회전속도의 변화를 측정할 수 있도록 타코 미터(tachometer)를 부착하였다. ER브레이크 바깥 부분에는 전기장 부하시 제동력으로 나타나는 전달 토크의 변화를 측정하기 위해 정적인 토크 측정시 일반적으로 사용하는 로드 셀(load cell)을 설치하였고 로드 셀에서 발생된 전압 신호는 증폭과 보정 기능을 디지털 지시계(indicator)에서 제동력으로 표시되며 제동력에 비례하는 전압 신호(0~5V)로도 출력이 되어 동적 신호 분석기(dynamic signal analyzer)로 전송이 된다.

회전속도를 175rpm까지 25rpm간격으로 증가시키고 전기장을 0.5kV/mm간격으로 2.5kV/mm까지 증가시키면서 이때 발생하는 정상 상태의 제동력을 측정후 회전축 중심에서 로드셀을 설치한 위치까지의 거리(43mm)를 곱하여 제동 토크로 환산하는 시험 절차를 반복 수행하였다. 토크와 회전속도와의 관계를 도출하기 위해서 전기장을 0.5kV/mm간격으로 증가시키면서 제동 토크와 회전 속도를 동시에 측정하였다. 회전체에 정착된 브레이크는 고속 회전시 온도 상승에 의한 성능 변화를 반드시 고려해야 한다. 따라서 고속 회전시 발생하는 열에 의한 온도 변화를 측정하기 위해 디지털 온도계

(thermometer)를 사용하여 IGSD-3B유체를 400rpm에서 40분 동안 5분 간격으로 온도 측정을 수행하였다. 그러나 고속회전시 발생하는 전기장의 단락 현상 때문에 전기장 부하하 상태에서만 시험하였다.

브레이크는 운동체와 정지체와의 기계적 접촉에 의해 운동체를 감속하거나 정지 또는 정지 상태를 유지하는 기계 요소이므로 제동에 소요되는 시간이 매우 중요하다. 따라서 이런 기본 성능을 확인하기 위해 계단 파형의 전기장을 공급하면서 발생된 제동력에 의해 회전이 멈출때까지의 제동 시간을 측정하였다. 계단 파형의 전기장을 부하하기 위해 마이크로 컴퓨터에서 프로그램된 이산 신호를 D/A 변환기와 DC 전압 증폭기를 경유시켜 공급하였으며 전용 고전압 발생기도 병행하여 사용하였다. 전동기와 ER브레이크는 절연 커플링(isolation coupling)으로 연결하였으며 회전하는 내부 실린더에 전기장을 부하하기 위해 슬립링(slip-ring)을 부착하였다.

##### 4-2. 시험 결과 및 고찰

Fig. 6은 트랜스퍼머 오일로 구성된 IGTD-1B 유체를 사용했을 경우의 제동 토크를 나타낸다. 이 시험결

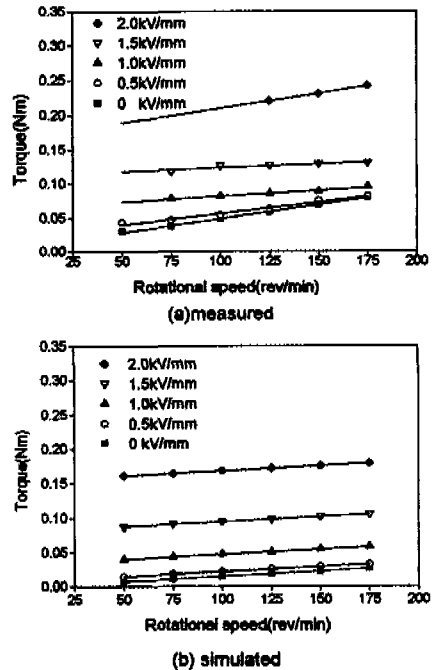


Fig. 6 Field-dependent braking torques with respect to the rotational speed(IGTD-1B)

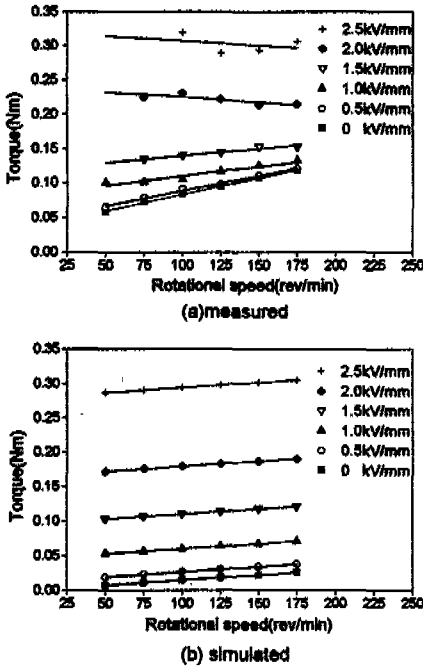


Fig. 7 Field-dependent braking torques with respect to the rotational speed (IGSD-3B)

과로부터 제동 토크가 회전 속도 및 전기장 변화에 의해 가역적으로 변하는 특성을 알 수 있으며 이는 식 (4)와 식 (5)에 의해 설명 될 수 있다. 따라서 이 사실로부터 ER브레이크는 기존 브레이크 시스템과는 달리 전기장 강도에 따라 임의적으로 요구되는 제동 토크를 발생시킬 수 있다는 중요한 장점을 확인할 수 있다. 측정 결과가 식 (6)을 이용하여 예상한 시뮬레이션 결과보다 약간 크게 나타났으며, 회전 속도가 증가할수록 그 차이가 현저하게 나타났다. 이와 같은 오차는 정량적으로 산출이 곤란하여 모델링에서 무시한 마찰 토크 때문으로 판단된다. 또한 이 ER유체를 사용했을 경우 전기장의 단락 현상이 자주 발생하여 2kV/mm 이상의 전기장에서는 제동 토크의 측정이 곤란하였다. Fig. 7은 실리콘 오일로 조성된 IGSD-3B유체를 사용했을 경우의 전기장 및 회전 속도에 따른 제동 토크를 나타낸다. 높은 항복 전단응력때문에 IGTD-1B를 사용한 경우보다 상대적으로 큰 제동 토크를 나타내었다. 또한 2kV/mm 이상의 전기장에서는 다소 불규칙한 제동 특성을 나타내었다. 이것은 전단 속도비를 나타내는 회전 속도에 의한 영향이 낮은 전기장보다 상대적으로 크게 작용하

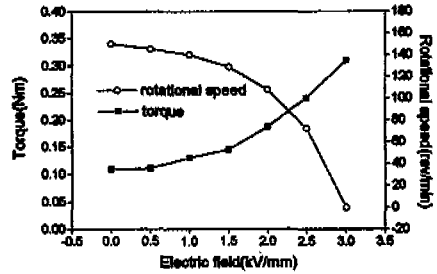


Fig. 8 Relationship between braking torque and the rotational speed (IGSD-3B)

기 때문이다.

Fig. 8은 전기장 변화에 따른 제동 토크와 회전 속도의 변화를 나타낸 것이다. 측정된 제동 토크는 전기장 증가시 항복 전단응력과 마찬가지로 지속적으로 증가하며, 회전 속도는 150rpm에서 제동 토크에 의해 회전이 멈출때까지 역 비례 관계로 감소하는 관계를 나타내었다. 이 결과는 전기장의 조절에 의해 제동 토크 뿐만 아니라 회전 속도의 제어도 가능하다는 것을 의미하며, ER브레이크 시스템의 제어 알고리즘 연구에 필수적인 기초 자료로 활용할 수 있다.

Fig. 9는 IGSD-3B유체를 사용한 브레이크를 장시간 사용했을 경우 온도에 따른 제동 토크의 변화를 나타낸다. 제안된 ER브레이크는 주어진 시험 조건 (400rpm)에서 시간(40분)이 경과하면서 약 10℃의 상승폭을 나타내었다. 또한 유체의 온도 상승시 용매의 점성계수가 점성을 유발하는 주요 원인인 상호 결합력의 감소 때문에 지속적으로 감소하여 점성계수에 영향을 받는 제동 토크도 0.25Nm의 약 10%에 해당하는 0.02Nm 정도 감소하는 사실을 알 수 있다. 온도의 강

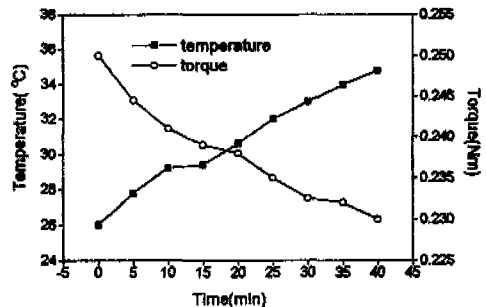


Fig. 9 Temperature-dependent braking torque with the IGSD-3B

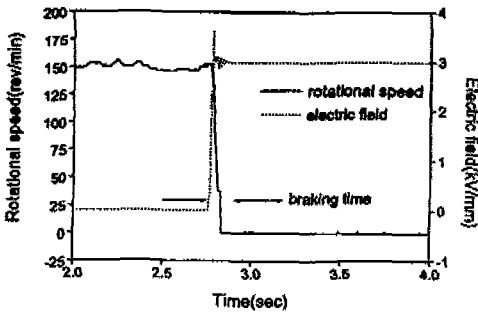


Fig. 10 Braking time with the IGSD-3B

하시 제동 토크도 다시 증가하므로 적절한 냉각 장치를 사용하면 항상 요구되는 출력을 도출할 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 10은 IGSD-3B유체를 사용한 브레이크를 150 rpm으로 회전 시킨 후 3kV/mm의 전기장을 부하하여 제동이 완료될 때까지의 시간을 측정하여 도시한 것이다. 또한 Fig. 11은 회전 속도 및 전기장을 변화시켜 얻은 제동 시간의 분포를 나타낸다. 회전 속도가 감소하고 전기장 강도가 증가할수록 제동 시간이 단축되는 경향을 나타내었으며 약 50~120msec의 수치를 나타내었다. 측정된 ER브레이크 시스템의 제동 시간은 전원 공급 장치의 지연 시간과 ER유체가 전기장 부하시 체인 형태의 클러스터(cluster)를 형성하여 전단응력이 발생할때 까지의 반응 시간이 포함된 수치이며 실리더 관성의 영향도 큰것으로 나타났다. 따라서 향상된 반응 시간을 지닌 ER유체의 개발과 함께 관성의 감소와 같은 제작 상의 개선이 이루어진다면 요구되는 제동 시간을 얻을 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서 제안한 ER브레이크의 성능을 이론 및 실험적으로 고찰한 결과 다음과 같은 중요한 결론을 도출할 수 있다. 먼저, 용매의 점성계수가 다른 두가지 ER유체를 사용하여 시험한 결과 예상대로 정적 항복 전단응력이 근소하게 높게 나타난 IGSD-3B(30cs)유체를 이용한 브레이크 시스템이 상대적으로 우수한 제동 성능을 나타내었다. 이것은 요구되는 ER응용 장치의 성능 해석을 위해서는 반드시 항복 전단응력과 같은 ER유체의 빙햄 특성 실험이 선행되어야 함을 의미한다. 그리고, 회전속도 및 전기장의 변화에 의한 제동 토크의 변

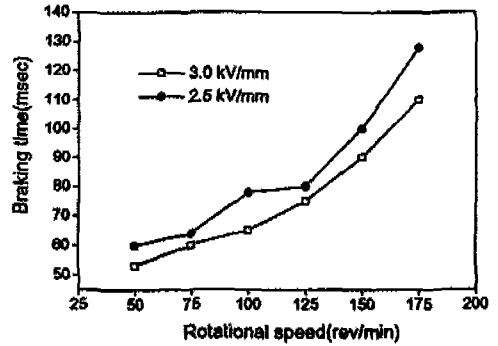


Fig. 11 Braking time variations with respect to the rotational speed (IGSD-3B)

동은 이론적으로 예상한 결과와 실험적으로 측정된 결과를 비교해 본 결과 약간의 오차가 발생하였지만 마찰 토크를 붙때 낮은 전기장에서는 비교적 양호하게 일치하였으며 회전 속도의 증가에 의해 선형적으로 증가하였다. 전기장 강도의 변화에 의해 발생하는 제동 토크의 변화는 항복 전단응력을 나타내는 식과 마찬가지로 지수적으로 변하는 비선형성을 나타내었으며 회전 속도와는 상호 의존적인 관계임을 알 수 있다. 또한 ER브레이크 시스템의 제동 토크와 같은 기초 성능이 온도와 같은 작동 조건에 따라 변동되며 항상 일정하게 요구되는 출력을 보장하지는 않지만 적절한 작동 조건내에서는 우수한 가변 제동 특성을 알 수 있으며 전기장에 의한 순간적 작동이라는 장점을 확인할 수 있다.

이와같은 연구 결과는 정밀도 및 실용성을 향상시킨 ER 브레이크 개발시 매우 중요한 기초 자료로 제공될 수 있으며 장력 제어와 같은 귀환 제어(feedback control)를 위한 시스템 구성시 반드시 필요한 핵심 연구의 일환으로 판단된다. 아울러 향후 더욱 향상된 성능을 보유한 우수한 ER유체의 조성과 ER 유체를 사용한 새로운 차원의 토크 전달 시스템등이 활발하게 연구되어야 할 것이다.

### 후 기

본 연구의 일부는 우덕 재단(友德 財團)연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. R.Limpert, Brake Design and Safety, Society of Automotive Engineers, Inc., 1992.
2. W.H.Winslow, "Induced Fibration Suspensions," J. Applied Physics, Vol.20, pp.1137-1140, 1949.
3. K.D.Weiss, J.D.Carlson and J.P.Coulter, "Material Aspects of Electro-Rheological System," J. of Intelligent material, systems and structures, Vol.4, pp.13-34, 1993.
4. M.V.Gandhi and B.S.Thompson, Smart Materials and Structures, Chapman & Hall, 1992.
5. 최승복, 정재천, 최용빈, 허승진, 서문석, "ER유체를 이용한 반응동식 가변댐퍼의 성능해석," 한국자동차공학회 논문집, 제1권 제1호, pp.90-100, 1993
6. 최영태, 김기선, 최승복, 정재천, 전영식 "전기유동유체를 이용한 엔진마운트의 모델구성과 성능해석," 한국자동차공학회 논문집, 제2권 제3호, pp.62-74, 1994.
7. 김기선, 정달도, 이효정, 최승복, 정재천, "전기유동유체를 이용한 실린더형 밸브의 성능 고찰," 한국정밀 공학회 논문집, 제11권 제4호, pp.148-157, 1994.
8. N.G.Stevens, J.L.Sproston and R.Stanway, "An Experimental Study of Electro-Rheological torque Transmission," Transactions of the ASME, Vol.110, pp.182-188, 1988.
9. D.Carlson, T.G.Duclos, "ER Fluids Clutches and Brakes-Fluid Property and Mechanical Considerations," Proceedings of the 2nd International Conference on ER Fluids, Edited by J.D.Carlson, et al, pp.353-367, 1990.
10. A.R.Johnson, W.A.Bullough, R.Firoozian, A.Hosseini-Sianaki, J.Makin and S.Xiao, "Testing on a high speed Electro-Rheological Clutch," Proceeding of the 3rd international Conference on ER fluids, Edited by R.Tao, pp.424-441, 1991.
11. J.P, Hartnett, R.Y.Z. Hu, "The Yield Stress-An Engineering Reality," J. of Rheology, Vol.33, pp.671, 1989.
12. R.T.Bonnecaze, J.F.Brady, "Yield Stress in Electro-rheological Fluids," J. of Rheology, Vol.36, pp.73-115, 1992.
13. 김기우, 박우철, 최승복, 정재천, 서문석, 여문수, 한인식, "ER유체의 정적 항복전단응력 측정," 한국유변학회 춘계학술 발표 논문집, pp.69-72, 1994.
14. F.M.White, Viscous Flow, McGraw-Hill, 1974.