

〈論 文〉

전기유변유체를 동작매체로 하는 실험용 토크 전달장치 제작 및 성능평가

김상국* · 정동운** · 최윤대***

(1994년 3월 7일 접수)

Construction and Evaluation of an Experimental Type Torque Converter by Adapting an Electrorheological Fluid as an Operating Medium

Sang-Guk Kim, Dong-Woon Jung and Youn-Dae Choi

Key Words : Electrorheological Fluid(전기유변유체), Torque Converter(토크 전달장치), Yield Stress(한계응력), Bingham Plastic Model(빙햄 플라스틱 모델), Viscosity(점도), Electric Field(전기장), Torque Meter(토크미터)

Abstract

In this work, an experimental type of torque converter has been constructed and its characteristics have been evaluated by adapting an electrorheological fluid(ERF) as an operating medium. The device was designed by using the equations which were proposed by Carlson et al. The correlation between the rheological behaviour of an ERF and mechanical parameters of the clutch has been investigated. The torque generated by an ERF in this device is sum of one due to the yield strength by polarizing dispersed particles in dielectric oil and one due to the viscous drag. The experimental results are presented in terms of torque and current density as a function of rotational speed at various electric field strength applied. Experimental results showed that the measured torque was rapidly increased with the increase of the electric field, generally being proportional to the rotational speed of the motor. The measured current was shown to be increased with the increased electric field. Also, the current was decreased with the increase of the rotational speed of the motor and reached plateau region after $f=5$ Hz.

1. 서 론

산업이 급속하게 발달함에 따라 자동차, 조선, 전자산업 등 제반분야에 사용될 엔진, 모터, 발전기 등과 같은 동력 발생장치의 수요가 급증하고 있다. 각종 산업기기 등에 장착되어 사용되는 동력

발생장치로부터 발생하는 회전 토크를 필요한 기계 요소에 전달하는 토크 전달장치는 매우 중요한 기계요소중의 하나임을 이에 대한 성능 개선이 이루어져야 한다. 기존의 토크 전달장치는 동력 발생장치로부터 발생된 동력을 클러치, 치차, 벨트 등과 같은 움직이는 부품을 포함하는 기계요소를 통하여 전달하였기 때문에 소음, 진동, 부품의 마모등에 취약하였다.

본 연구에서는 회전 토크를 전달하는데 있어서 움직이는 부품을 포함하지 않는 새로운 개념의 토

*한국에너지기술연구소 연구개발실

**원광대학교 화학과

***정회원, 육군 제3사관학교 기계공학과

크 전달장치를 제작하고 이의 성능을 평가하였다. 이 실험용 토크 전달장치는 전기유변유체를 동작매체로 하는 회전하는 디스크가 부착된 실린더형태로서, 인가한 외부 전기장의 세기에 따라 토크 전달장치 내의 유체의 점도를 변화시켜 동력 발생장치로부터 발생하는 회전 토크를 필요한 수동측 기계요소까지 전달할 수 있도록 하였다. 이와같이 인가된 전기장에 의하여 유체의 점성이 변하는 특성을 갖는 전기유변유체가 동력 전달장치에 응용될 경우 기존의 다른 형태의 동력 전달장치와 비교하여 볼 때 동력 전달이 신속하고, 부드럽게 이루어질 수 있다는 장점이 있다.

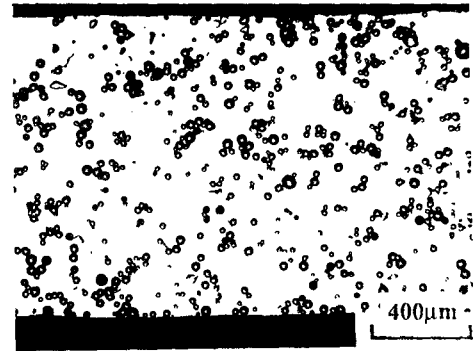
2. 전기유변유체

전기유변유체 (electrorheological fluid)는 분극성이 강한 미세입자 분말을 유전유체 속에 분산시켜 제조한 콜로이드로서 외부에서 전기장을 인가하면 유체의 점도가 급격히 증가하는 재료이다. 전기유변효과는 1940년대 말 Winslow⁽¹⁾에 의하여 최초로 연구되었으며 이 유체의 인가 전기장에 대한 10^{-3} 초 정도의 빠른 응답 특성과 유변효과의 가역성을 이용하여 공학분야 특히 동력 전달장치, 이동부품이 없는 벨브, 로보트 제어장치 및 스마트 재료 등 광범위한 분야에 응용될 수 있다고 보고되고 있다.⁽²⁾

일반적으로 전기유변 효과는 외부 전기장이 인가되면 콜로이드내에 분산된 분극성이 강한 입자분말 주위에 불균일한 전기장이 형성됨으로서 분말 입자는 분극화 되고 이에 따라 입자는 전기쌍극자를 가지게 되며 이들 쌍극자들 사이에 상호 인력이 발생하여 분산된 입자분말이 전기장 방향으로 사슬과 같은 구조를 형성하며 정렬하게 된다.⁽³⁾

Fig. 1은 전기장 인가에 의하여 입자분말이 사슬 구조를 형성함을 시각적으로 보이기 위하여 직경이 $27\ \mu\text{m}$ 인 작은 유리구슬 분말 표면에 약간의 수분을 흡수시킨 다음 silicone oil에 이 분말을 분산시켜 제조한 콜로이드 용액을 전극이 부착된 슬라이드 글라스 위에 위치시킨 후 약 $2\ \text{kV/mm}$ 의 전기장을 인가하면서 미세입자 분말들이 전극사이에서 사슬구조를 형성하기 전 후의 모습을 관찰한 사진이다.

이러한 유변유체에 전단응력이 가해지면 형성된 사슬구조가 파괴되지만 전기장이 유지되는 한 사슬구조가 다시 형성된다. 가해지는 전단응력이 작을



(a) $E=0$



(b) $E=2\ \text{kV/mm}$

Fig. 1 Effect of DC electric field on the structure formation of an ER fluid. ER fluid is $27\ \mu\text{m}$ glass beads in silicone oil

수록 더 많은 입자가 사슬구조를 형성하고 응력이 가해지지 않을 경우 형성된 사슬의 수는 최대치에 이른다. 정지상태에서 이 유체의 초기흐름을 유도하기 위해서는 보다 더 큰 전단응력이 요구되기 때문에 유변학적으로는 Bingham 플라스틱처럼 거동한다. 전기유변유체를 이용한 클러치, 엔진마운트 및 브레이크 등의 제작기술은 Carlson and Duclos,⁽⁴⁾ Colvin and Carlson,⁽⁵⁾ Bullough⁽⁶⁾등을 비롯한 여러 연구자들에 의하여 개발되고 있는중이다.

본 연구에 사용된 유변유체는 소수성 전기유변유체로서 polymer계통의 NaPSS (polystyrene sulfonate sodium salt) 입자를 10% Chlorinated paraffin oil에 분산시켜 제조하였으며, 분산된 입자분말의 무게 분율은 0.25였다. Fig. 2는 couette cell형 Haake 점도계로 측정된 NaPSS 입자 분말이 분산된 유변유체의 전단응력(τ)대 전단 변형률($\dot{\gamma}$)을 나타내는 그래프로서 인가된 전기장의 함수로서 도식하였다. 이때 한계응력 τ_0 는 그림에서 보는 것

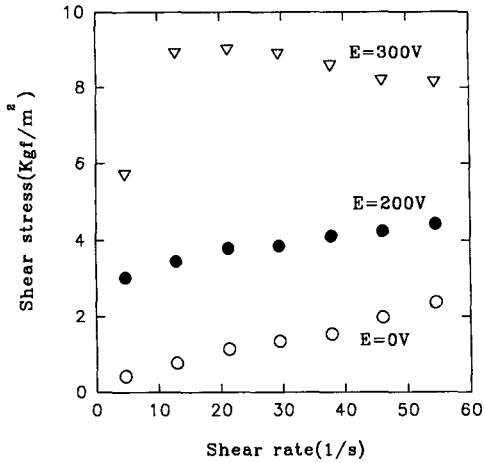


Fig. 2 Shear stress vs. Shear rate of an ER fluid which consists of NaPSS particles in 10% Chlorinated paraffin oil

처럼 전단 변형률이 0인 경우의 전단응력 값으로 정의하였으며 이는 유체의 초기흐름을 유발하기 위해 필요한 최소한의 응력으로 유체기계 설계시 중요한 인자이다. 연구 결과에 의하면 한계응력 값은 인가된 전기장의 자승에 비례하는 것으로 알려져 있다.^(2~4) 여기서 직선의 기울기는 유체의 점성(η)을 나타낸다.

일반적으로 전기유변유체의 유변학적 거동을 해석할 경우 Bingham 플라스틱 모델을 적용하여 해석한다. 즉, 전기유변유체의 전단응력 τ 는 인가된 전기장에 의하여 발생하는 한계응력 τ_0 와 전기장에 무관한 유체자체의 점성에 의한 항의 합으로 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \tag{1}$$

3. 기본 설계식

전기유변유체를 동작매체로 하는 실험용 토크 전달장치의 개략도는 Fig. 3과 같다. 이는 비교적 간단한 구조를 갖는 토크 전달장치로서 양극으로써의 역할을 하는 구동축과 연결된 디스크와 음극 전압이 인가될 수동축과 연결된 하우징(housing)으로 구성되어 있으며 전기장 인가시 입자분말들은 디스크와 하우징 사이에서 사슬구조를 형성하게 된다. 지금까지 많은 관심이 동력 전달장치의 개발에 모아지고있으나 전달 토크가 낮은 경우를 제외하고는 자동차의 클러치와 같은 장치를 개발하기에는 유체

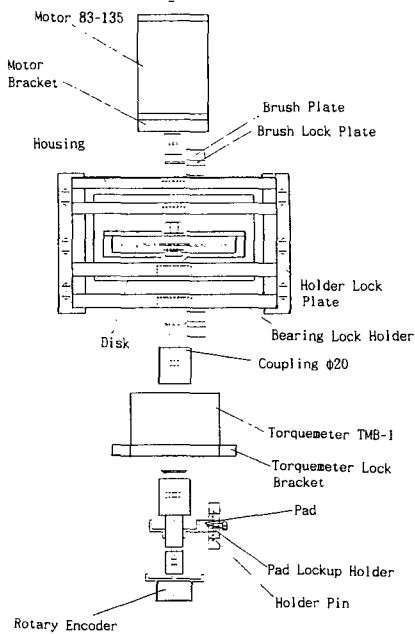


Fig. 3 Schematic diagram of an experimental type torque converter

의 한계응력이 낮은 것으로 알려져 있다. Fig. 3에서와 같은 방법으로 구동축의 토크를 수동축으로 전달하기 위해서는 양축 사이에 채워진 유변유체의 점도를 전기장에 의하여 변화시켜야 한다.

본 연구에서는 Carlson 등⁽⁴⁾에 의하여 제안된 설계식을 이용하여 토크 전달장치를 설계하였다. 전기유변유체에 의하여 전달될 수 있는 토크는 인가된 전기장에 의하여 전달되는 전기 유변적 토크(T_{ER})와 유체자체가 가지는 점성에 의하여 전달되는 점성적 토크(T_{η})의 합으로 표시할 수 있다. 전기유변유체를 동작매체로하는 디스크형 토크 전달장치의 경우 이들 토크는 다음식으로 표시될 수 있다.

$$T_{ER} = 2N\pi\tau_0(R_o^3 - R_i^3)/3 \tag{2}$$

$$T_{\eta} = N\pi^2\eta f(R_o^4 - R_i^4)/g \tag{3}$$

여기서, N =디스크 면의 수(앞뒷면), τ_0 =인가된 전기장에 의한 유변유체의 한계응력(Pa),⁽⁵⁾ R_o =디스크 면의 외측 반경(m), R_i =디스크 면의 내측 반경(m)[Fig. 5 참조], η =전기장 비인가시 유변유체 자체의 점도(Pa.s), g =전극사이의 거리(m), f =디스크의 회전속도(Hz)를 각각 나타낸다. 즉, 유변유체에 의한 동력전달은 디스크 판의 R_i 와 R_o 사이에서만 이루어진다. 유변유체를 이용한 토크

전달장치의 설계에 있어서 가장 중요한 인자는 전기장에 의한 토크와 점성에 의한 토크의 비, T_{ER}/T_v 이다. 디스크형 토크 전달장치의 경우 이 비율이 클수록 일반적으로 유리하지만 클러치나 브레이크의 토크를 제어하기 위하여는 적절한 비율값이 선정되어야 한다. 상기식 (2)와 (3)을 비교하여 보면 T_{ER} 과 T_v 는 디스크 반지름의 각각 3승 및 4승에 비례하므로 이 비율값은 클러치의 크기에 따라 변함을 알 수 있다. 따라서 클러치 설계시 더 많은 토크를 발생시키기 위하여 디스크 지름을 크게 하는 경우 이 값도 따라서 변함을 유의하여야 한다.

4. 실험용 토크 전달장치 제작

본 연구에서 설계 제작한 실험용 토크 전달장치의 특성평가를 위한 실험장치의 구성은 Fig. 4에 도시한 바와 같이 크게 기계적인 부분과 실험 데이터를 수집하여 분석할 수 있는 데이터 수집장치로 이루어져 있다. 기계적인 부분의 주요 구성부품은 낮은 회전속도에서 비교적 높은 토크를 내는 Micro-stepping 모터, 유변유체를 동작매체로 하는 토크 전달장치, Torque-meter, 부하발생장치 (brake), 그리고 rotary encoder로 구성되어 있다. 실험장치는 수직으로 설치되어 모터가 상부에 있고 encoder는 하부에 위치하고 있으며 장치를 지지하기 위하여 알루미늄 재질로 제작된 밀판과 뒷판에 장치를 고정하였다. Micro-stepping 모터는 Parker 회사 제품으로 컴퓨터에 의하여 가속, 감속 등의 주요 조작을 할 수 있게 되어 있다. 이 모터를

선정하기 전에 본 실험에서 요구되는 torque를 발생시킬 수 있는지의 여부를 살펴보았다. 앞서 측정 한 동작매체의 한계응력은 전극사이의 거리가 7 mm로 설계된 토크 전달장치에서 인가된 전기장 세기가 1500 V일때 약 50 Pa 정도로 추정된다. 식 (2)와 (3)으로 부터 전기유변 효과에 의한 토크는 다음과 같이 각각 계산할 수 있다.

$$T_{ER} = 2 \times 2 \times 3.14 \times 50 [0.063^3 - 0.015^3] / (3 \times 9.8) = 0.0052 [\text{Kgf}\cdot\text{m}]$$

$$T_v = 2 \times 3.14^2 \times 0.25 \times 5 [0.063^4 - 0.015^4] / (0.007 \times 9.8) = 0.0057 [\text{Kgf}\cdot\text{m}]$$

상기 식에서 점성에 의한 토크는 전기장을 인가하지 않았을 경우 전기유변유체의 점도를 0.25 Pa.s. 모터 회전수 $f = 5 \text{ Hz}$ 라고 가정하였다.

Parker 모터의 회전수/토크 특성 그래프에서 최저 토크는 0.06 Kgf·m이기 때문에 토크 전달장치에 요구되는 부하를 충분히 감당할 수 있음을 알 수 있다.

실험장치에서 가장 중요한 부분인 토크 전달장치의 확대도면은 Fig. 5와 같다. 이는 모터에 연결되어 회전하는 디스크와 주변의 housing으로 구성되어 있다. 디스크는 모터축에 연결되어 있으며 housing은 밀부분에 위치하고 있는 Torque-meter에 연결되어 있다. 유체의 점도가 낮을 때는 디스크와 housing은 서로 분리되어 있지만 외부 전기장이 가하여져 유변유체의 점도가 증가되면 모터축에 연결된 토크가 housing에 전달되어 housing도 같이 회전한다. Torque-meter 하부에 위치하고 있는 brake가 부하를 걸어주면 Torque-meter에서 토크가 측정되어 데이터 수집장치에 의하여 컴퓨터에 데이터가 입력되게 설계하였다.

토크 전달장치의 housing은 상·하부로 나누어

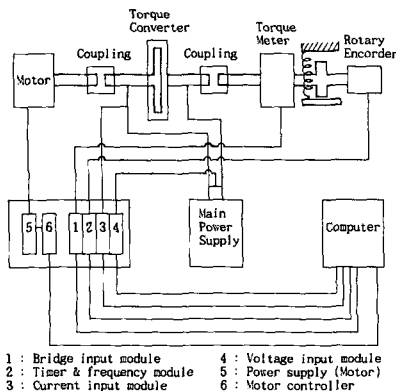


Fig. 4 Experimental set up to evaluate the performances of the torque converter

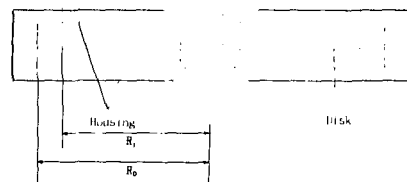


Fig. 5 Details of the disk type torque converter

져 조립하게 되어 있으며 중앙부에는 O-ring을 삽입하여 밀봉하였다. 본 연구에서는 디스크의 반경은 6.3 cm이며 housing는 내측 반경은 7.0 cm로 제작되어 측면 벽과의 거리가 0.7 cm되게 하였으며 disk와 housing 상·하판과의 거리도 0.7 cm되게 제작하였다. 따라서 전기 전도도가 비교적 큰 유변유체라고 하여도 1 KV 이상의 전압을 인가할 수 있게 하였다. 디스크판은 housing 내부 중앙에 위치시켜 디스크면의 수를 $N=2$ 로 하여 전달되는 토크가 2배가 되도록 설계하였다.

Housing 재질은 알루미늄으로 만들어졌으며 disk 판은 stainless-steel이다. 유변유체 주입구는 housing 상부 덮개판 중앙부와 연결축 사이의 gap이며 주사기를 사용하여 주입하고 유체를 교체시에도 역시 주사기를 사용하여 흡인하여 제거하였다. 실험용 클러치에 전압을 공급하는 방법은 얇은 황동판을 올려내어 제작한 brush를 이용하였다. 인가된 전압은 0~1500 V이며 모터의 회전수는 1~15 Hz 범위 내에서 조절하였다.

5. 실험결과 및 고찰

앞절에서 설명한대로 유변유체를 토크 전달장치 내에 주입하고 인가된 전압 및 모터의 회전속도를 변화시키면서 토크 전달장치에 의하여 전달된 토크를 측정된 결과를 Fig. 6에 제시하였다. 이때 모터의 회전수는 각각 0.5 Hz, 3.0 Hz, 5.0 Hz, 7.5 Hz, 10 Hz, 12 Hz 및 15 Hz였다. 측정된 데이터를 종합하여 어떤 인가된 전기장 세기에서 모터 회전속도 증가에 따른 토크의 변화를 보기 위하여 first-order regression 기법으로 데이터를 fitting하여 각각 인가된 전압에 따라 도시하였다.

이 그래프로부터 모터의 회전속도가 증가함에 따라 전기장이 인가되지 않은 상태에서 토크가 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 유체 자체의 점성에 의하여 회전력이 전달된 결과이다. 회전속도가 0.5 Hz일때 유체 점성에 의한 토크는 거의 무시할 수 있을 정도이나 모터의 회전수가 증가함에 따라 점성에 의한 토크도 점차 증가하여 $f=12$ Hz일 때는 약 0.01[Kgf·m] 정도인 것을 알 수 있다. 그래프로부터 전압이 증가함에 따라 전달되는 토크도 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 이 그래프로부터 전압이 인가된 상태에서 유변유체에 의하여 전달된 토크는 모터의 회전수에 따라서 증가하며 인가된

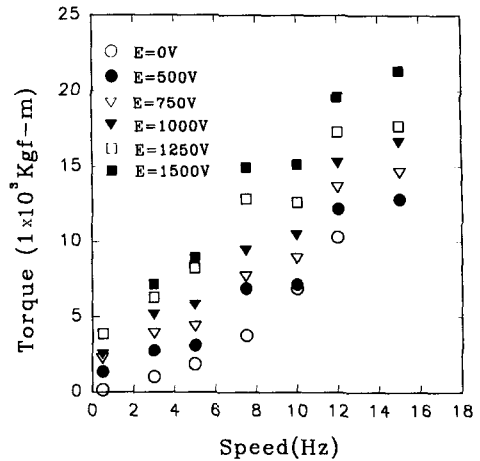


Fig. 6 Torque transferred vs. rotating speed of the torque converter at different electric fields

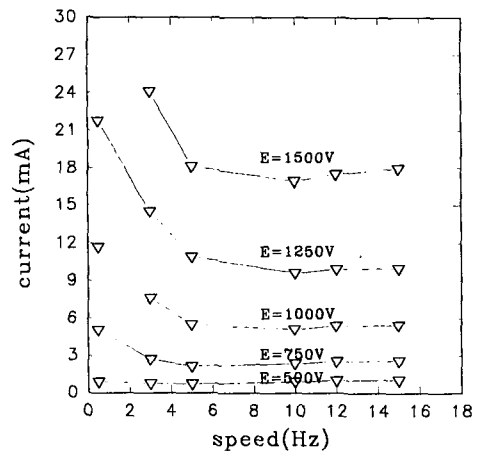


Fig. 7 Current drawn by the ER fluid vs. rotating speed of the torque converter by changing the electric fields

전기장의 세기가 증가함에 따라 전달되는 토크도 증가하는 것을 알 수 있다.

유변유체를 동작매체로하는 토크 전달장치를 실용화하는데는 인가된 전기장 내에서 전류밀도가 낮을수록 바람직하다. 전류밀도가 낮으면 절연파괴의 위험성이 감소하고 전원공급장치의 크기도 작아질 수 있다.

Fig. 7은 인가된 전기장 하에서 모터 회전속도 증가에 따른 전류밀도의 변화를 나타낸 그림이다. 이그림에 도시된 것처럼 전류밀도는 인가된 전기장에 따라 급격히 증가하는데 이는 유변유체 내에 분산된 NaPSS 입자가 소량의 Na^+ 이온을 포함하고

있어 약간의 전도도를 가지고 있기 때문에 생각된다. $E=1500\text{ V}/0.7\text{ cm}$ 일때 측정된 전류밀도는 모터 회전속도가 5 Hz 이상일 때 약 18 mA이었다. 또한 특정 전기장에서 모터의 회전속도가 증가함에 따라 전류밀도가 감소하는 경향을 나타내었으나 모터의 회전속도가 5 Hz를 초과하면 전류밀도는 더이상 감소하지 않았다. 이러한 경향은 인가된 전기장이 클수록 분명히 나타났으며 전기장이 낮은 영역에서는 모터 회전속도 변화에 따른 전류밀도의 변화가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 토크 전달장치 속에 주입된 유변유체의 사슬구조가 전기장 인가시 형성되었다가 모터의 회전속도가 증가하면 파괴되기 때문이며 회전속도가 5 Hz 이상에서는 파괴되는 사슬의 수와 새로이 생성되는 사슬의 수가 같아지기 때문으로 생각된다.

6. 결 론

NaPSS 입자를 10% chlorinated paraffin oil에 분산시켜 제조한 소수성(dry-base) 전기유변유체를 동작매체로 한 실험용 토크 전달장치를 제작하여 인가된 전기장의 세기, 모터의 회전수에 따라 유변유체에 의하여 전달된 토크 및 전류밀도를 측정하였다.

토크 전달장치는 모터 구동축과 연결되어 양극 역할을 하는 디스크와 torque-meter에 연결되어 음극 역할을 하는 하우징으로 구성하였다. 디스크의 반경은 6.3 cm이며 디스크와 하우징 상·하판과의 거리는 0.7 cm가 되게 제작하였다.

실험결과 전기유변유체에 의하여 전달된 토크는

모터 회전수에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었으며 인가된 전기장 세기가 증가함에 따라 급격히 증가하여 $f=15\text{ Hz}$, $E=1500\text{ V}/0.7\text{ cm}$ 에서 측정된 토크는 약 0.021 Kgf-m이었다. 한편 전류밀도는 인가된 전기장 세기가 증가함에 따라 급격히 증가하였으며 모터의 회전수가 증가함에 따라 감소하였으나 약 $f=5\text{ Hz}$ 이상에서는 거의 변하지 않았다.

참고문헌

- (1) Winslow, M. W., 1949, *J. Appl. Phys.*, 20, 1137~1140.
- (2) Block, H. and Kelly, J. P., 1988, "Electrorheology," *J. Physics D : Appl. Phys.* 21, p. 1661~1667.
- (3) Stangroom, J. E., 1983, "Electrorheological Fluids," *Phys. Technol.*, 14, p. 290~296.
- (4) Carlson, J. D. and Duclos, T. G., 1989, "ER Fluid Clutches and Brakes," *Proc. 2nd Int. Conf. Electrorheological Fluids*, Technomic Publ. Co., p. 353~367.
- (5) Colvin, D. P. and Carlson, J. D., 1989, "Control of Fall-Safe Tether Using an ER Fluids," *Proc. 2nd Int. Conf. Electrorheological Fluids*, Technomic Publ. Co., Lancaster, PA. p. 426~436.
- (6) Bullough, W. A., et. al., 1992, "Fast Pick-Up and Drop Load Performance of a low Electrical and Mechanical Time Constant," *Mechatronics Systems Engineering* 1, p. 315~327.