

힘 반영 장치용 소형 MR 브레이크

A Small MR Brake for Force Feedback Devices

김승종* · 조창현** · 이종민*** · 황요하*** · 김문상**

Seung-Jong Kim, Chang-Hyun Cho, Jong-Min Lee, Yoha Hwang and Munsang Kim

Key Words : MR Fluid(자기 유변 유체), Force Feedback Device(힘 반영 장치), Brake(브레이크), Composite Mode(복합 모드)

ABSTRACT

This paper proposes a new MR(magneto-rheological) brake utilizing composite modes of MR fluid. Its basic structure and design scheme are almost the same with the conventional MR brake, but for slots in a rotating disk or shell. The slots enable the proposed MR brake to use a new mode, so-called, 'direct cutting chain mode' as well as shear mode, which results in increasing the braking force(almost 150% compared to the case without slots). Some experimental results show that the proposed MR brake provide the sufficient braking force to be adopted for small portable force feedback devices.

1. 서 론

위험 지역에서 임무를 수행하는 로봇의 원격 운전, 각종 실감형 게임기, 원격 수술 등, 원격 조정(tele-manipulation)의 필요성은 다양한 분야에서 나날이 증가하고 있고, 이를 위한 가장 기본적이고 핵심적인 장치인 힘 반영(force feedback) 장치에 대한 연구가 이미 국내외에서 활발하게 수행되고 있다. 힘 반영 장치란, 원격 조정자의 감각적인 조정 또는 원격 로봇과의 상호작용이 가능하도록 하기 위하여, 로봇 손에 작용하는 반작용력 또는 외력을 조정자가 직접 느낄 수 있게 해주는 장치를 뜻하며, 이는 정교하고 안정된 원격 조정을 위하여 필수적이다.

이러한 힘 반영 장치는 능동형과 수동형으로 구분될 수 있는데, 능동형은 조정자와 원격 로봇 사이에 양방향 제어가 가능한 시스템으로서, 주로 전기 모터 방식이 이에 해당하며, 최근에는 압전 소자를 사용한 선형 구동기 또는 초음파 모터를 이용하는 방식들도 소개되고 있다.⁽¹⁾ 능동형은 정교한 조작이 가능하다는 장점이 있으나, 일반적으로 링크 구조가 동반되므로 손등에 장착하기에는 다소 크고, 무겁

고, 고가이며, 제어가 복잡하다는 단점이 있다. 또한 오동작에 의한 사용자 부상을 방지하기 위한 안전장치 등이 필요하다. 이에 비해, 수동형 힘 반영 장치는 브레이크나 전자기식 클러치 등을 이용하여 사용자의 조정에 대한 반력감을 제공한다. 따라서 구조가 간단하고, 사용자 부상의 위험이 없어서 안전하므로, 양방향 제어가 불필요한 응용 분야의 경우, 매우 유용한 대안이 될 수 있다.⁽²⁾ 그러나 기존에 개발된, 전자기식 클러치는 큰 힘을 낼 수 있는 반면 스틱-슬립(stick-slip) 현상이 있어 제어가 쉽지 않고, 전기유변(electro-rheological; ER) 유체를 이용한 브레이크는 경량화에는 유리하지만 고전압이 필요하며, 자기유변(magneto-rheological; MR) 브레이크 방식은 구조가 간단하고 제어성이 좋으나, 소형·경량 제작 시 충분한 힘을 내기 어렵다는 단점들이 있어 지속적인 연구가 필요하다.

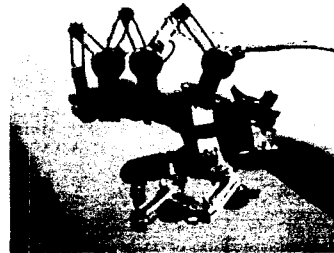


Fig.1 초음파 모터를 이용한 Hand master(성균관대, 1999)

* 정희원, 한국과학기술연구원, 트라이블로지 연구센터
E-mail : sjongkim@kist.re.kr
Tel : (02) 958-5610, Fax : (02) 958-5659

** 한국과학기술연구원, 지능로봇 연구센터

*** 한국과학기술연구원, 트라이블로지 연구센터

이에, 본 논문에서는 소형이면서도 상대적으로 큰 토크를 제공할 수 있는 MR 브레이크를 제안한다. 그 핵심적인 기법은, MR 유체 속에서 움직이는 회전자를 얇게 하고 회전자에 다수의 슬릿(slit)을 만들어서, 종래의 전단 모드(shear mode) 외에 슬릿 사이로 형성되는 MR 유체 체인을 회전자가 끊고 지나가는 새로운 모드가 추가로 작용하도록 한 것이다. 본문에서는, MR 브레이크 설계방법 및 간단한 토크 계산식과 함께, 슬릿의 유무에 따른 최대 토크 변화를 실험적으로 측정, 비교한 결과를 소개한다.

2. MR 브레이크의 기본 설계

본 연구에서 제작된 MR 브레이크의 단면도를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 회색으로 표시된 부분에 MR 유체가 차 있고, 그 사이에 원통 형태의 회전자가 삽입된다. 회전자의 원통부 뒤쪽에는 축이 형성되어 있어 볼 베어링으로 지지된 채 외부 구동부와 연결되고, MR 유체의 밀봉을 위하여 실(seal)이 삽입되었다. 회전자의 원통부는 직경이 10.4 mm, 길이 10.5 mm, 두께가 0.3 mm이고, 그 주변의 MR 유체 부분의 간극은 0.5 mm이다. MR 브레이크의 전체 크기는 직경 17 mm, 길이 36 mm 이고, 무게는 42 g이다.

2.1 토크 계산

인가되는 전류에 따른 브레이킹 토크의 간단한 계산을 위하여 Fig. 3과 같은 자기 회로를 고려한다.⁽³⁾ 여기서는 회전 효과는 고려하지 않으며, 누설 자속, 재료 특성의 비선형성 등은 무시한다. 그림에서 NI 는 코일에서 발생하는 기자력(magneto-motive force; mmf)이고, R_n 은 자속이 지나가는 각 부분 n 에서의 자기 저항(reluctance)으로서 재료의 투자율과 면적에 반비례하고, 길이에 비례한다. 본 실험에 사용된 MR 유체는 LORD社의 MRF-132LD로서, 80kA/m 이하의 약한 자기장에서 상대투자율은 약 6.5이다.⁽⁴⁾ Fig. 3으로부터 전체 등가 자기 저항 R_T 와 총 자속 Φ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$R_T = R_{s0} + R_{si} + \frac{(R_{co} + R_{ci})(R_{s0'} + R_{co'} + R_{ci'} + R_{si'})}{R_{co} + R_{ci} + R_{s0'} + R_{co'} + R_{ci'} + R_{si'}} \quad (1)$$

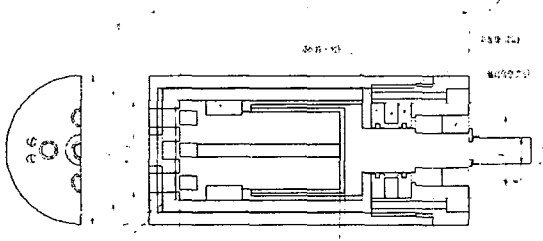


Fig. 2 Cross-section of the MR brake

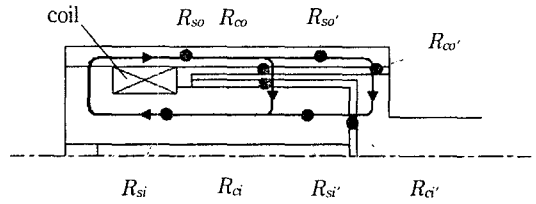


Fig. 3 Magnetic circuit

$$\Phi = \frac{NI}{R_T} \quad (2)$$

또한, Fig. 3에 표시된 두 가지 자속경로를 통해 흐르는 자속 Φ_1 과 Φ_2 는 아래와 같이 계산된다.

$$\Phi_1 = \frac{R_T - R_{s0} - R_{si}}{R_{co} + R_{ci}} \Phi \quad (3)$$

$$\Phi_2 = \Phi - \Phi_1 \quad (4)$$

기자력의 함수인 식(2), (3), (4)를 이용하여 각 부분에서의 자속밀도를 계산하면 자속 포화(magnetic flux saturation) 여부를 판단할 수 있으며 MR 유체부에서의 전단 응력 계산도 가능하다. Fig. 2의 구조에서 고정자 고체부에서 자속 포화가 발생하지 않는 최대 기자력은 약 48 A·turns로 계산되었고, 이 때, 각 MR 유체부(즉, co , ci , co' , ci')에서의 자속밀도는 Table 1에 나타난 바와 같다. 자속밀도가 낮아서, 50 kA/m 이하의 자기장 세기에 해당하므로, MR 유체에서 자속밀도 B 와 자기장의 세기 H 를 선형 관계로 가정할 것이 타당함을 알 수 있으며, 이 때, 전단 항복 응력 τ 는 다음과 같은 식으로 모델링할 수 있다.⁽⁴⁾

$$\tau = \alpha H^3 \quad (5)$$

Table 1 Flux density, yield shear stress and braking torque in the clearance filled with MR fluid

Flux density	Yield stress	Braking torque	
B_{co}	0.1685 T	τ_{co} 4140.8 Pa	0.0077 Nm
B_{ci}	0.1975 T	τ_{ci} 5282.3 Pa	0.0072 Nm
$B_{co'}$	0.1550 T	$\tau_{co'}$ 3641.8 Pa	0.0014 Nm
$B_{ci'}$	0.1797 T	$\tau_{ci'}$ 4571.0 Pa	0.0007 Nm

여기서, $\alpha = 0.001, \beta = 1.5337$ 이다. 식(5)로부터 계산된 전단 응력과 그를 토크로 환산한 결과를 Table 1에 나타내었다. 최종적으로, 코일에 전류를 인가하여 MR 브레이크에서 발생할 수 있는 최대 토크는 0.0170 Nm로 계산된다.

2.2 유동 저항 및 마찰

사용자에게 반력을 제시하기 위한 MR 브레이크는 그 응용분야의 특성상, 축이 고속 회전하는 경우가 드물어서 유동 저항이 그리 크지 않지만, 전류가 인가되지 않을 때 작용하는 기본 토크는 작을수록 좋다. MR 유체는, 자기장이 가해지지 않을 때는 전단 응력이 전단 변형률에 비례하는 뉴턴 유체(Newtonian fluid)로서 해석이 가능하다.⁽⁵⁾

$$\tau_{\eta} = \eta \frac{V}{c} \quad (6)$$

여기서, η 는 마찰 계수(viscosity), V 는 회전자의 선속도, c 는 MR 유체부의 두께이다.

유동 저항 외에도 기본 토크를 결정하는 요소로는 실과 베어링에서의 마찰과 줄(string)을 되감기 위한 스프링력이 있는데, 그 중에서 실에서의 마찰이 주로 문제가 된다. 본 연구에서 제작된 MR 브레이크에는, 일반적으로 많이 쓰이는 영구 자석에 의한 실링은 마찰이 커서 적용이 곤란하기에, 고무를 녹이는 MR 유체의 특성을 감안하여 테프론으로 제작한 접촉식 실을 삽입하였다.

3. 실험 장치 구성

3.1 복합 모드를 이용하는 MR 브레이크

알려진 MR 유체의 작동 모드는 밸브 모드(valve mode), 전단 모드(shear mode), 스퀴즈 모드(squeeze mode)의 세 가지가 있다.⁽⁵⁾ 그 중 브레이크나 클러치에서 주로 이용하는 모드는 전단 모드인데, 서로 상대 운동을 하는 두 자극면 사이에 MR 유체를 넣어서 발생하는 상대 운동에 대한 저항력을 이용하는 것이다. 이러한 전단 모드는 최대 토크가 자극면의 넓이에 비례하므로, 소형으로 제작하였을 때 큰 토크를

기대하기가 어렵다. 이에 본 논문에서는 MR 브레이크의 토크를 향상시키기 위하여 회전자의 두께를 얇게 하고 다수의 슬릿을 만들었다. 이는 기존의 전단 모드에서 MR 유체 체인(chain) 분포를 주기적으로 조밀-소략(疎略)하게 하는 효과를 줄 뿐 아니라, Fig. 4에 나타난 바와 같이 슬릿 사이로 형성되는 체인을 회전자가 직접 끊고 지나가는 새로운 모드, 소위 'direct cutting chain 모드'를 이용할 수 있게 한다. 즉, 복합적인 작동모드를 생성하여 동일한 크기와 구조에서 브레이크 토크를 손쉽게 증가시킬 수 있다.

이와 같은 슬릿의 효과를 실험적으로 검증하기 위하여 Fig. 5와 같이 슬릿의 개수가 다른, 네 개의 회전자를 제작하였다. 슬릿의 폭은 MR 유체부 간극이 위아래 각각 0.5 mm임을 감안하여 1 mm로 하였다.

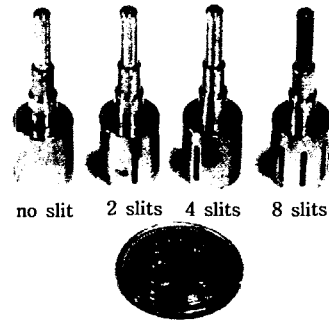


Fig. 5 Rotors with slits

3.2 토크 측정 장치

Fig. 6은 제작된 MR 브레이크의 토크를 측정하기 위하여 구성된 실험 장치이다. 브레이크와 커플링을 통하여 연결된 도르래에 매달린 추의 무게를 조금씩 증가시켜 회전이 시작될 때의 무게를 측정, 토크로 환산한다. 이 토크 측정치에는 자기장에 의한 전단 응력뿐만 아니라, 실, 베어링에서의 마찰의 영향이 포함되며, 유동 저항은 무시될 수 있다. PC와 연결된 드라이버(driver)에서는 MR 브레이크에 인가하는 전류를 제어하며, 엔코더로부터의 회전속도 정보를 처리한다.

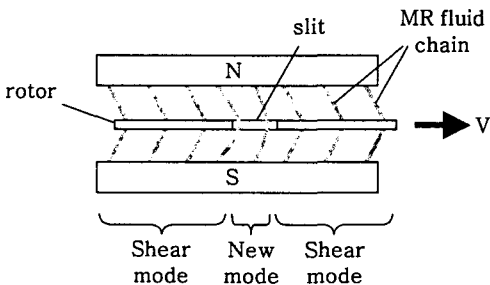


Fig. 4 Composite mode of MR fluid

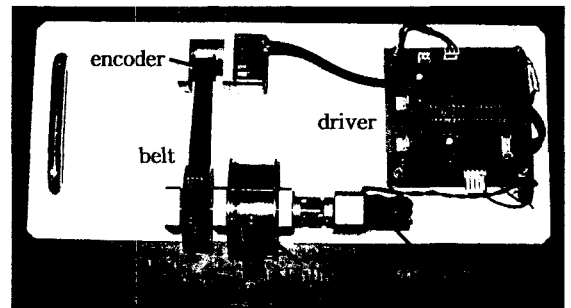


Fig. 6 Experimental setup

4. 실험 결과

Fig. 7은 슬릿이 없거나, 2개, 4개, 8개 있는 회전자들에 장착하여 0.8 A를 인가했을 때의 최대 정지 토크와 0 A일 때의 기본 토크를 측정된 결과이다. 기본 토크의 대부분은 실에서의 마찰이 원인인데, 제작된 브레이크에서는 분해 조립 시 실을 조이는 힘에 따라 마찰력이 크게 달라지므로 기본 토크가 슬릿수와 관계가 있다고 단정하기는 어렵고, 최대 토크에서 기본 토크를 뺀 값, 즉 순수하게 자기장의 영향으로 발생하는 순토크의 변화에 주목할 필요가 있다. 그림에서, 슬릿이 2개일 때는 없을 때와 큰 차이가 없었지만 4개일 때 약간 증가하여, 슬릿이 8개이면 순토크가 약 50% 증가하였다. 슬릿이 토크 개선 효과가 있음이 실험적으로 확인된 것이다. Fig. 8에는 슬릿이 8개인 경우와 슬릿이 없는 경우에 대해서 인가 전류에 따른 순토크(=최대 토크-기본 토크)의 변화를 비교, 도시하였다. 전류에 대한 순토크의 변화는 거의 선형적으로 나타남을 알 수 있다. 앞에서의 자기 회로 해석에 따르면 코일의 권선수가 80회이므로 0.6 A 이상에서는 자속 포화가 발생해야 하지만 실험은 0.8 A까지 수행하였고 토크는 여전히 증가하였다. 참고로, 0.8 A 인

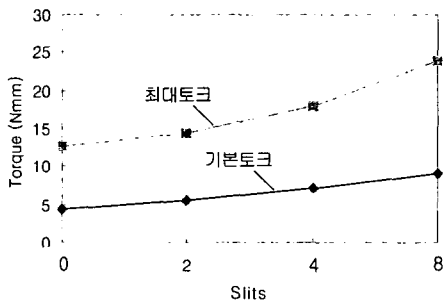


Fig. 7 Torque vs. the number of slits

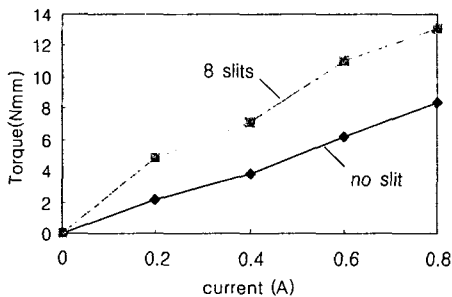


Fig. 8 Torque vs. current

가했을 때, 슬릿이 없는 경우의 순토크는 8.35 Nmm이고 슬릿 8개의 경우는 13.1 Nmm이었다. 이는 'direct cutting chain 모드'가 작용했음을 증명한 것이며, 보다 정확하게 이 모드의 영향을 측정하기 위해서는 비자성체 재질로써 회전자를 제작하여 슬릿이 있는 경우와 없는 경우를 비교 실험할 필요가 있다. 아울러 본 실험에서는 고려 대상이 아니었지만, 슬롯이 있으면 유동 저항이 증가하게 되는 자명하므로 이에 대한 검토가 필요하며, 슬롯에 의해 형성되는 불균일 자기장과 위치마다 달라지는 MR 유체의 점성계수, 그리고 그로 인한 MR 유체의 복잡한 흐름 등을 종합적으로 판단할 전산 해석이 수행될 예정이다.

5. 결 론

소형으로 제작될 경우 토크가 작다는 단점이 지적되어 온 MR 브레이크에서, 회전자에 슬릿을 만들어서 MR 유체의 작동모드가 복합적으로 작용하도록 함으로써 브레이크의 토크를 약 50% 증가시킬 수 있었다. 실험에서는 슬릿의 개수가 많을수록 토크가 증가하였으나, 한계가 있으리라 생각되며, 회전자의 직경 대비 슬릿의 개수와 폭을 최적화하기 위해서는, 불균일한 자기장 내에서의 MR 유체의 특성과 거동에 대한 정확한 모델링과 전산 해석이 필요하다. 본 논문에서 제안한 'direct cutting chain 모드'는 이제까지 알려지지 않은 새로운 작동모드이며, 높은 토크가 요구되는 MR 유체의 응용분야에서 다양한 활용이 가능하다.

참 고 문 헌

- (1) 최병현, 최혁렬, 2001, "초음파 모터 구동방식의 역감제시 기구", 대한기계학회 논문집 A권, 제25권, 제6호, pp. 938~948.
- (2) A. M. Rov, et al., 2003, "Design and Development of Passive and Active Force Feedback Systems Using Magnetorheological Fluids", Proceedings of IMECE'03.
- (3) 김근주, 김정훈, 이종원, 2001, "자기유변유체를 이용한 스킴즈 필름 댐퍼에서의 부강성 효과 규명", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 739~744.
- (4) 정정보, 1999, 자기 유변 유체를 이용한 속도 감응 조향 시스템용 감쇠기의 개발, 한국과학기술원 석사학위논문.
- (5) J. D. Carlson, D. M. Catanzarite and K. A. St. Clair, "Commercial Magneto-Rheological Fluid Devices", The 5th Int'l Conf. on Electro-Rheological, Magneto-Rheological Suspensions and Associated Technology.