

장력제어용 고출력 MR 브레이크

박중호[†]·김진규*·윤동원*·함상용*·노종호**·유진산**

A Study on High-output MR (Magneto-rheological) Brake for Tension Control

Jung-Ho Park, Jin-Gyu Kim, Dong-Won Youn, Sang-Yong Ham, Jong-Ho Noh and Jin-San Yoo

Key Words: MR Fluid(자기점성유체), Brake(브레이크), Torque(토크), Magnetic Field(자기장), Tension Control(장력제어), Rotor Shape(로터형상)

Abstract

MR fluid is a suspension of micrometer-sized magnetizable particles in silicon oil and a functional fluid whose apparent viscosity can be controlled by the applied magnetic field strength. In this paper, a rotary brake using MR fluid called MR brake for tension control of precision machinery such as roll-to-roll printing machinery is presented. First, to obtain the higher performance than conventional powder brake, a MR brake with a modified rotor shape is newly designed and analyzed using FEM. Second, the prototype of MR brake is fabricated with the optimized structural parameters and an experimental apparatus is constructed. Then, basic characteristics of the MR brake are investigated with the different MR fluids. Finally, the validity of the developed MR brake is verified through the comparison with the conventional powder brake.

1. 서 론

고속으로 대량의 인쇄물을 출력하는데 사용되는 장치를 롤투롤(Roll-to-Roll) 웹(Web) 이송장치라고 하는데 웹의 처짐이나 구겨짐을 방지하기 위하여 장력제어가 필수적으로 사용되며, 일반적으로 파우더 브레이크가 많이 이용되고 있다.

파우더 브레이크는 자기장을 인가함으로써 자성을 가지고 있는 파우더가 자기장에 따라 체인

형상의 클러스터를 형성하여 마찰력을 발생하게 되어 브레이크 작용을 한다. 하지만, 성능 대비 외형 사이즈가 크며 고속응답을 기대하기 어렵고 일정 사용시간이 지나면 파우더를 보충해야 된다는 문제점을 가지고 있다. 따라서 고속으로 회전하는 롤투롤 웹 이송장치의 응답성에 고정밀도로 추종하기 위해서는 인가자기장에 의해 수 ms 단위로 점성변화를 제어할 수 있는 MR (Magneto-Rheological) 유체를 이용한 소형 로터리 브레이크의 개발을 필요로 하고 있다.

본 연구에서는, 기존의 파우더 브레이크를 대체하기 위한 고출력 MR 브레이크의 개발을 목적으로, 브레이크 로터형상에 대한 전자기장 해석을 통하여 설계 파라미터를 확립하고 프로토타입을 제작하였다. 또한, 성능평가 시스템을 구축하고 특성실험을 통해서 타당성을 검토하였다.

† 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부
E-mail : jhpark@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7607 FAX : (042)868-7611

* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구본부

** (주)하이드로메틱스

2. MR 브레이크 설계 및 해석

2.1 MR 유체

기능성유체(Functional Fluids)는, 외부에서 가해지는 물리량(전기장, 자기장, 온도, 광 등)을 제어함으로써 유체가 가지고 있는 점성 혹은 탄성과 같은 특성을 변화시켜 공학적으로 응용 가능한 기능성을 발현시키는 유체를 의미하며, 최근에는 Magneto-rheological (MR) 유체, Electro-rheological (ER) 유체가 산업계에의 적용을 위한 대표주자로서 주목받고 있다. 기능성유체를 유체제어용 액추에이터로 응용하는 이점으로써는, 단순구조의 신뢰성이 높은 기계요소의 제작이 가능하다는 점, 표면에서의 고체마찰에 대한 영향(가공정도와 간극제어 등의 한계성)이 없다는 점, 단위체적/중량당 출력비가 높다는 점, 점성변화를 위한 제어속도가 빠르다는 점 등을 들 수 있다. 이러한 기능성유체의 특성을 이용해서 댐퍼, 밸브, 클러치, 브레이크 등 폭넓은 분야에의 응용을 위한 연구, 개발이 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾

실리콘오일과 같은 전기절연성의 액체중에 수 μm 크기의 강자성체의 입자들을 분산시킨 MR (Magneto-rheological) 유체는 인가한 자기장에 반응하여 입자들이 서로 밀집되어 체인구조와 같은 클러스터를 형성하여 유동저항의 발생에 의한 점성변화를 수 ms 단위로 가역적으로 제어한다.⁽¹⁾

MR 유체는 ER 유체에 비교해서 보다 큰 항복응력의 제어영역을 가지고 입자의 분산안정성이 우수하며 ER 유체에는 없는 자극에 흡인되는 독특한 특성을 갖는다. MR 유체의 항복강도는 ER 유체보다 10배 이상이며 적용온도 안정범위도 -40°C 에서 150°C 에 이른다. 또한 MR 유체의 물성은 불순물에 민감하지 않으며 여러 가지의 첨가물(계면활성제, 분산제, 마찰완화제, 내마모제 등)을 사용하면 안정성을 향상시킬 수 있다.

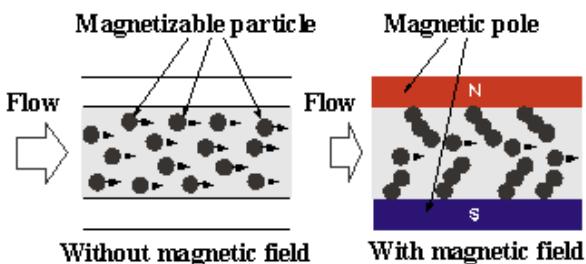


Fig. 1 Model of viscosity change of MR fluids

Fig. 1에 MR 유체의 점성변화 원리를 나타낸다. 형성된 클러스터에 의해서 유동저항이 발생하게 되고 자기장 세기에 비례하여 걸보기 점성이 증가한다. MR 유체가 가지는 이러한 특성은 저전압(12~24V)에서 1~2A의 전류에 의해 용이하게 제어할 수 있다.

Table 1 Design parameters of MR brake

Maximum Applied current	2A
Maximum Torque	4.5kgf·m
Outer diameter	less than 200mm
Maximum Rotational Speed	200RPM
MR fluids	MRF-122-FD

2.2 MR 브레이크 설계

소형이면서 고출력인 MR 브레이크를 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 설계하였다. 설계사양을 Table 1에 나타낸다. 전체 외형은 200mm 이하, 최대출력토크는 2A 인가시에 4.5kgf·m 이상으로 설정하였다. 고출력을 얻기 위하여 한정된 공간에서 로터와 스테이터 사이의 MR 유체가 채워지는 공극 길이를 로터 돌기부를 이용하여 가능한 길게 확보하고 있다.

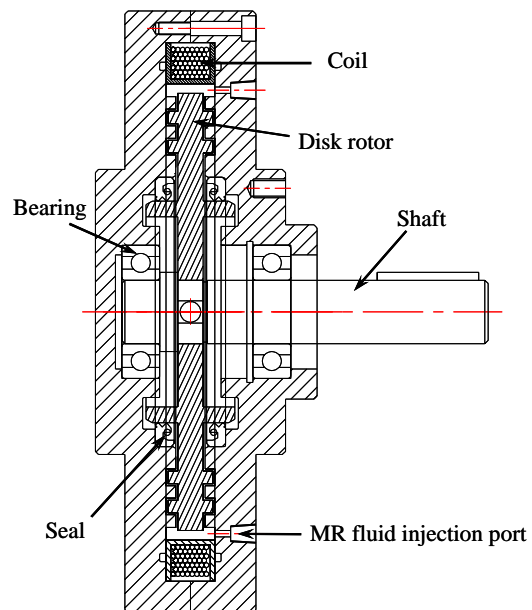


Fig. 2 Schematic of the designed MR brake

설계에 고려된 MR 유체는 미국 LORD사 제품의 MRF-122-FD이며, MR 브레이크 공극에 가득 채웠을 때의 양은 약 60ml이다. Fig. 3에 설계된 MR 브레이크의 3D-단면도를 나타낸다.

2.3 MR 브레이크 전자기장 해석

설계된 MR 브레이크의 축대칭 모델에 대해서 전자기장 해석을 수행하였다. 해석결과의 일례를 Fig. 4에 나타낸다. 코일턴수는 250턴, 입력전류는

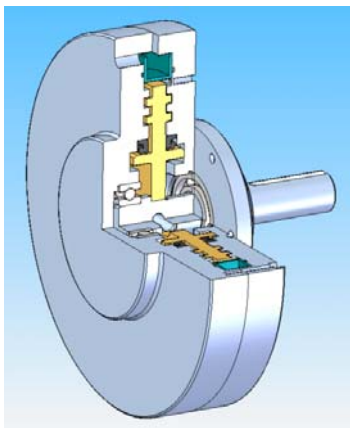
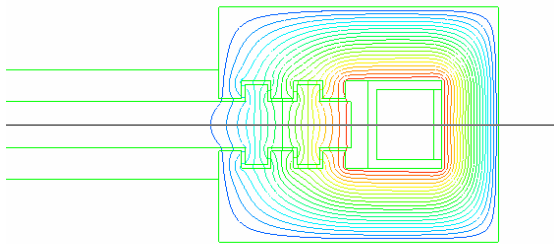
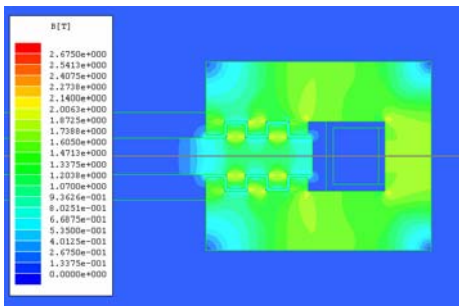


Fig. 3 3D-cross section of the MR brake



(a) Magnetic flux line distribution



(b) Magnetic flux density

Fig. 4 Analysis result of the MR brake

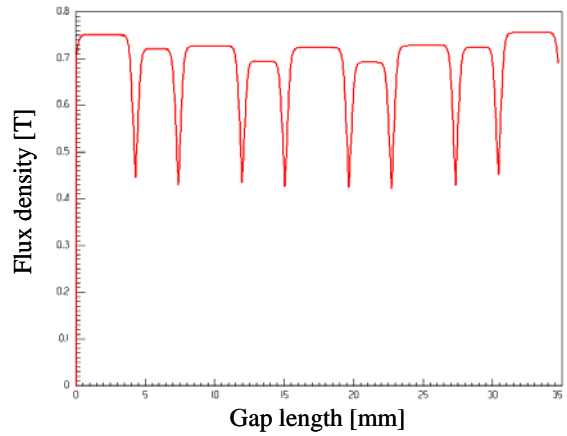


Fig. 5 Flux density at gap length

2A로 가정하였을 때의 로터와 스테이터 및 전자석 부분의 자속선과 자속밀도 분포를 보여주고 있다. 스테이터와 로터에 사용된 재질은 순철이며, 공극부의 갭은 0.6mm로 설정하고 있다. 자기포화 없이 갭 부분에 있어서 일정한 자속밀도 값이 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 공극을 따른 길이에 대한 자속밀도를 Fig. 5에 나타낸다. 갭이 꺾이는 부분에서 일시적으로 자속밀도가 감소하고 있지만, 공극길이 전반에 걸쳐서 0.7T 이상의 자속밀도가 얻어지는 것을 알 수 있다. 또한, MR 브레이크에서 발생할 수 있는 최대토크를 구하기 위해서 이전 연구에서 얻어진 식⁽⁵⁾을 이용하여 계산한 결과 약 4.5kgf·m의 토크가 계산되어 설계사양을 만족시키고 있는 것을 알 수 있다.

3. MR 브레이크 특성실험

3.1 MR 브레이크 제작 및 실험장치

제2장에서 얻어진 해석결과를 바탕으로 MR 브레이크의 프로토타입을 제작하였다. Fig. 6에 제작된 MR 브레이크의 실물사진을 나타낸다. 외형은 190mm이고, 중량은 9.0kg이다. 사용된 코일의 직경은 $\phi 0.6\text{mm}$ 이며, 코일턴수는 280턴으로 해석결과보다 고효율이 예상된다. MR 브레이크의 특성파악을 위한 실험장치를 Fig. 7에 나타낸다. 기본적인 구성은 MR 브레이크, 토크미터, AC 서보모터로 되어 있으며 15:1 감속기에 의해서 최고 200RPM까지 회전시킬 수 있다. 토크미터는 가능한 측정분해능을 높이기 위해서 5.0kgf·m의 용량을 사용하였다. MR 브레이크에의 입력은 전용 드라이버에 의해서 2A까지 공급되어진다.



Fig. 6 Fabricated MR brake

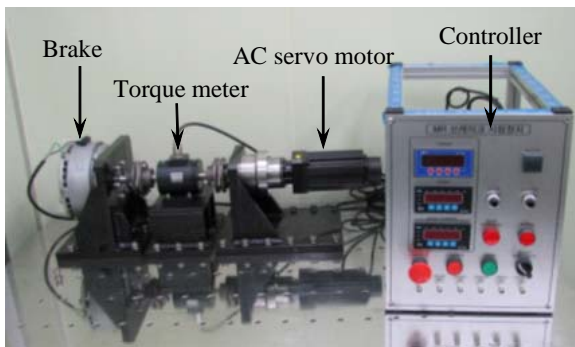


Fig. 7 Experimental apparatus

3.2 실험결과 및 고찰

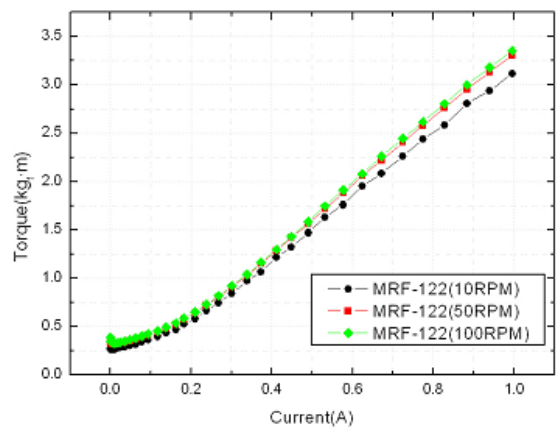
제작된 MR 브레이크의 특성실험을 두 종류의 MR 유체를 이용하여 수행하였다. 미국 LORD사의 MRF-122-FD를 사용하였을 때의 정속회전에서 입력전류 대비 토크를 측정된 결과와 정전류 인가시에 회전수에 따른 토크 측정결과를 Fig. 8에 나타낸다. MR 유체의 누설을 방지하기 위하여 사용된 씰의 마찰력 때문에 비교적 높은 0.3kgf·m의 기동토크가 일어났지만 씰의 개선에 의하여 충분히 감소되리라고 사료된다. 실험결과에 의하면 설계치보다 높은 토크가 얻어지는 것을 알 수 있다. 전자기장 해석결과에서 얻어진 항복응력에 있어서 MR 유체의 투자율을 고려하지 않은 점이 원인으로 사료된다. 따라서, 실험장치의 특성상 2A의 전류를 인가하면 토크미터의 용량을 넘기 때문에 실험결과에는 1A까지의 측정치만 나타내고 있으며 약간의 차이는 있지만 Fig. 8(b)의 결과에서도 알 수 있듯이 회전수에 거의 영향을 받지 않고 일정한 토크가 얻어지며, 입력전류에 거의 선형적인 관계인 것을 알 수 있다.

실험에서 목표치인 200RPM까지 증가시키지 않

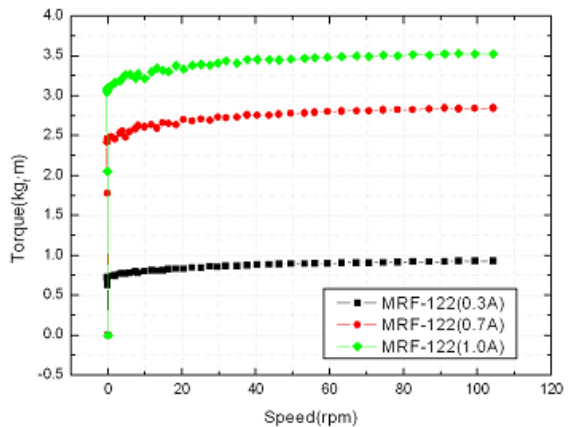
은 이유로서는 100RPM이상, 1A이상의 입력을 인가하면 급격히 MR 브레이크에서 열이 발생하였기 때문이다. 실제 장력제어에서 브레이크를 사용시에는 지속적으로 고전류가 인가되지 않고 필요에 따라서 간헐적으로 인가되기 때문에 큰 문제는 되지 않으리라고 예상되지만, 향후 시제작시에는 방열특성을 고려할 필요가 있다.

한편, 국내에서 제작된 MR 유체(MRF-26500)를 이용하여 같은 조건의 실험으로부터 얻어진 결과를 Fig. 9에 나타낸다. 미국 LORD사 제품의 결과와 비슷한 출력특성이 얻어진 것을 알 수 있다.

출력 성능면에 있어서는 큰 차이는 보이지 않았지만, 수일간의 실험 후에 브레이크를 분해하면 수입품에 비해서 국내 제작된 MR 유체는 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 자성입자간의 고착화가 관찰되었으며 내구성 등에 문제가 발생할 수 있기 때문에 계면활성제 첨가 등의 침전안전성에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

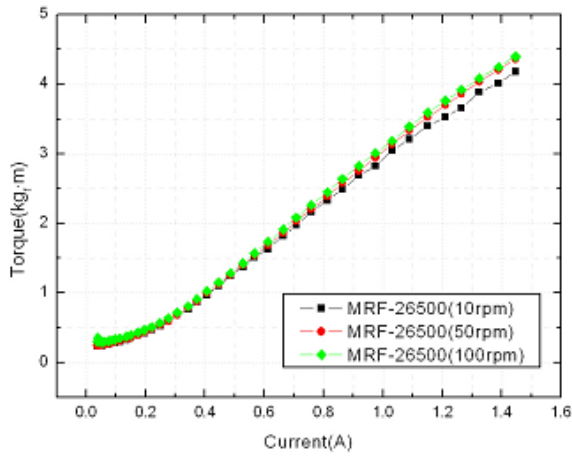


(a) Current vs. Torque with constant speed

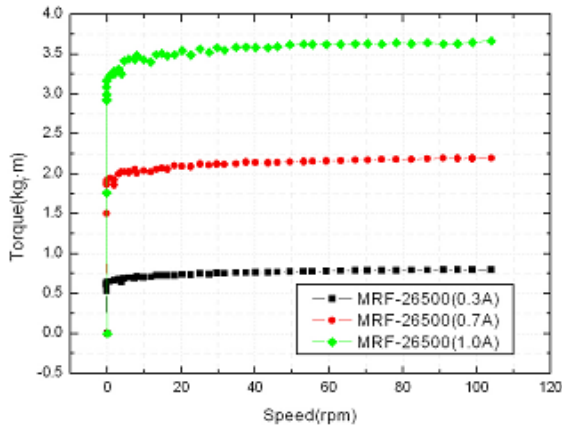


(b) Speed vs. Torque with constant current

Fig. 8 Experimental results using MRF-122-FD



(a) Current vs. Torque with constant speed



(b) Speed vs. Torque with constant current

Fig. 9 Experimental results using MRF-26500



Fig. 10 Photocopy of MRF-26500 after decomposition

한편, 기존 장력제어에 있어서 일반적으로 사용되고 있는 MR 브레이크와 비슷한 크기의 파우더 브레이크를 이용하여 실험한 결과의 일례를 Fig. 11에 나타낸다. 실험조건은 같지만, 0.3A 이하의 저전류에 있어서 반응이 미약하고 전반적으로 선형적이지 못하다는 점과 성능이 MR 브레이크에 비해서 뒤떨어지는 것을 알 수 있었다. 두 종류의 MR 브레이크를 이용하여 얻어진 결과와

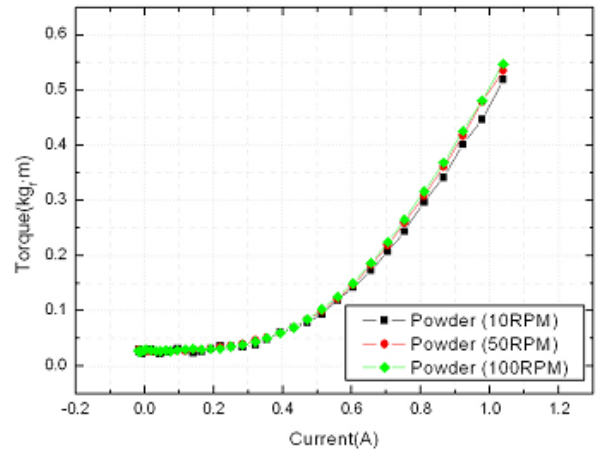


Fig. 11 Experimental results using powder brake

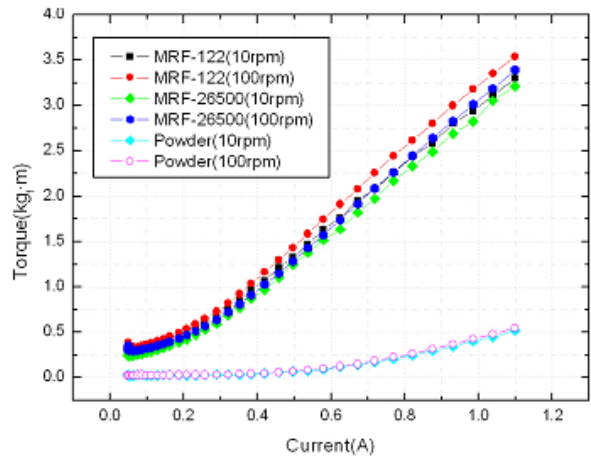


Fig. 12 Comparison results of brake performance

파우더 브레이크의 비교 결과를 Fig. 12에 나타낸다. MR 유체를 이용한 브레이크의 우수한 출력 성능을 명확히 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 인쇄기 등의 장력제어에 사용되는 기존의 파우더 브레이크가 가지고 있는 문제점을 극복하기 위해서, 자기장에 반응하여 수 ms의 응답속도를 가지는 MR 유체를 이용한 고출력 브레이크의 개발을 목적으로, 새로운 형태의 로터 형상을 제안하고 전자기장 해석을 통하여 최적의 구조 설계변수를 확립하였으며 이를 바탕으로 MR 브레이크를 시제작하고 특성파악 등을 통하여 타당성을 검증하였다. 얻어진 주요한 결과는 다음과 같다.

- 제안한 MR 브레이크에 사용되는 로터 형상에 관한 자기회로 설계와 해석을 통하여 로터와 스테이터 사이의 갭 0.6mm, 코일턴수 250turn에서 2A의 전류인가시에 0.7T의 자속밀도가 얻어지는 것을 확인하고 최적의 설계 파라미터를 도출하였다. 이러한 해석을 통하여 향후 보다 소형화, 고성능화된 MR 브레이크 및 자기회로의 설계기술을 확보할 수 있었다.

- 직경 190mm의 MR 브레이크의 시제품을 제작하였고, 출력특성을 파악하기 위한 실험장치를 구성하였으며 특성실험을 통해서 제작한 MR 브레이크의 양호한 동작특성을 확인하였으며 1A의 전류인가시에 목표사양(4.5kg_f·m@2A)보다 우수한 3.5kg_f·m 이상의 출력이 얻어지는 것을 확인하였다. 또한, 비슷한 크기의 기존 파워더 브레이크와의 비교를 통하여 4~5배 이상의 출력을 얻을 수 있어서 개발 타당성을 입증할 수 있었다.

- 향후, 동특성 및 방열특성에 대한 추가실험이 필요하지만, 확보한 MR 브레이크의 설계기술 및 제작기술을 바탕으로 인쇄기 장력제어에 적용하여 실용화 개발연구를 지속할 계획이다.

참고문헌

- (1) J. David Carlson, 2001, "WHAT MAKES A GOOD MR FLUID?," Proceedings of the 8th International Conference on Electrorheological (ER) Fluids and Magneto-rheological (MR) Suspensions.
- (2) Yokota S., Yoshida K. and Kondoh Y., 1999, "A pressure control valve using MR fluid," Proceedings of the 4TH JHPS-ISFP, pp. 377-380.
- (3) Ericksen, E. O and Gordaninejad, F., 2003, "A Magneto-Rheological Fluid Shock Absorber for an Off-Road Motorcycle," International J. Vehicle Design.
- (4) J.-H. Park, S.-M. Cho, D.-W. Youn., S.-N. Yun and K.-K. Ahn, 2005, "A Pressure Control Valve Using MR(Magneto-rheological) Fluid", Proceedings of KSPSE autumn conference 2005, pp. 170-174.
- (5) D.-W. Youn, J.-H. Park, S.-K. Choi, S.-N. Yun, and S.-Y. Ham, 2006, "Electromagnetic Analysis and design of rotary MR brake", Proceedings of KSPSE autumn conference 2006, pp. 146-151
- (6) <http://www.lord.com/>