

**Magneto-Rheological Fluid를 이용한 인공지능 의족의 Compact damper 개발**

성소영\*, 강성재\*, 문인혁\*, 문무성\*, 장석명\*\*  
 \*산재의료관리원 재활공학연구소, \*\*충남대학교 전기공학과

**Design of Compact Magneto-Rheological Fluid Damper for Artificial Low-Limb Prosthesis**

Soyoung Sung\*, S.J.Kang\*, I.H.Moon\*, M.S.Moon\*, S.M.Jang\*\*  
 \*Korea Orthopedics & Rehabilitation Research Center, \*\*Dept. of Electric Eng. CNU.

**Abstract** - Magneto-Rheological (MR) fluid is suspension of fine magnetic particles in a liquid carrier such as silicon oil or water. MR fluid exhibits solid-like mechanical behavior into chain or clusters with high yield stress when magnetic field is applied to the particles. The response of MR fluids is very quick and reversible after removal of the field. MR Fluids have high yield stress (up to 5kPs) and operate in low voltage power supply. Recently, MR damper using MR fluids was open used in vibration control system such as structural devices, seat vibration controllers and helicopter rotor systems, but it is too big in size and heavy. Therefore, it is not appreciate to rehabilitation devices such as prosthetic limbs.

37.8Nm로 보고된 바 있고, 입각기 중 무릎관절에 발생하는 최대 굽힘 모멘트는 정상인의 보통 속도에서 최대 0.613Nm/Kg 이고 느린 속도에서는 0.413Nm/Kg 으로 발표되었다[2-3] 따라서 슬관절 신전용 공기스프링의 힘은 무릎굴곡이 가능하기 위하여 최대 굴곡 모멘트보다 작고, 유각기에 완전 신전이 가능한 용량을 갖춰야 한다. 따라서 본 연구에서는 최소 60Nm 이상인 MRF Damper를 설계하고 자 한다. 그림 3에 설계된 MRF Damper를 보았다.

1. 서 론

하반신 절단 장애인이 사용하는 의족은 공압식이나 유압식 제동기(damper)를 이용하여 제작하는 것이 일반적이다. 그러나 이러한 의족은 일반적으로 제동력(damping force)을 능동적으로 제어하는 것이 어려워서 경사로나 계단을 보행하는 것에 어려움이 있다. 이러한 이유로 의족에서 유각기 동안의 제동력을 제어하여 몸의 중심을 유지하여 줄 수 있는 능동 제동기(Active damper)가 요구되어진다. 또 의족에 적용하기 위해서는 의족을 포함한 전체 중량이 가벼워서 장애인이 의족을 착용하여 활동하는데 부담이 없어야 한다. 자기유체(MR, Magneto-Rheological Fluid)는 실리콘 오일이나 물과 같은 액체에 수 um의 자성체 미립자를 60-80%의 농도로 혼합하여 자기장을 인가하였을 때 자성체 입자들이 자기장의 방향으로 정렬하여 체인을 형성하여 높은 전단력(Shear stress)를 갖는 물질을 말한다[1]. 이 MRF를 이용하여 제동기를 설계할 경우 자기장을 제어함으로써 효과적으로 매우 큰 제동력을 제어할 수가 있다. 이러한 MRF Damper는 주로 지진파로부터 건물을 보호하는 진동제어 분야에서 활발하게 연구되어지고 있다. 그러나 기존의 MRF Damper는 자체의 무게가 차지하는 비중이 높아 의족에 적용하기가 어려운 부분이 있다. 따라서 본 논문에서는 의족에 적용이 가능한 가볍고 작은 MR Damper를 개발하고자 한다.

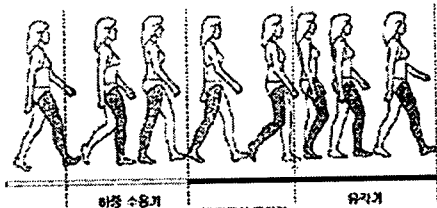


그림 1 정상인의 보행 사이클  
 Fig. 1 Normal Gait cycle

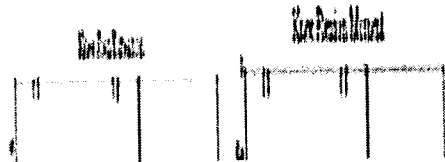


그림 2. 정상보행시 무릎의 굴곡각과 모멘트  
 Fig. 2 Knee angle and Moment at Normal Gait Cycle

2. 본 론

2.1 System Description

그림 1에 정상인의 보행 동작 사이클을 보였다. 정상 보행시 무릎의 굴곡은 그림 2과 같이 전유각기부터 시작되어 중간 유각기에 최대가 된다. 이때 무릎의 굴곡 모멘트는 고관절이 최대 신전된 상태인 발뒤꿈치 들림기에 최대가 된다. 몸무게 57kg인 정상인이 약 1.39m/sec의 속도로 보행하는 경우 최대 무릎 굽힘 모멘트가 약

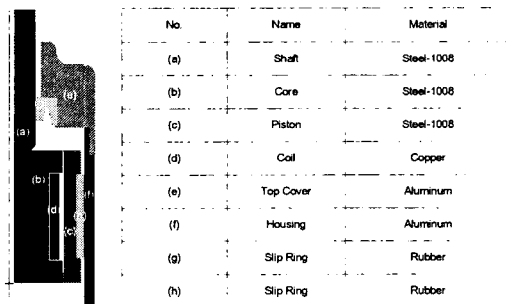


그림 3. 설계된 MRF Damper의 단면도  
 Fig. 3. Sectional view of designed MRF damper

본 연구에서 사용한 MRF는 Lord(<http://www.lord.com>)사의 AD-132D를 사용하였는데, 이 MRF의 자기장에 대한 전단력 특성을 그림 4에 보였다.

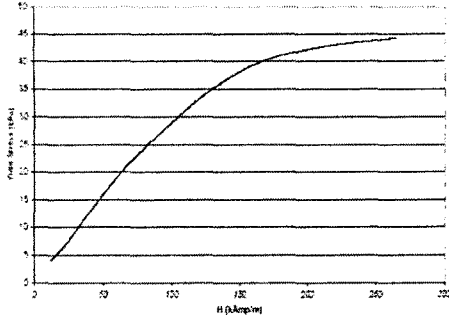


그림 4 MRF AD-132D의 자기장에 대한 전단력 특성

### 2.2 등가자계 해석법에 의한 자계해석

설계의 편의를 위하여 먼저 Analytic solution을 구하기 위해서 그림 4(a)와 같은 해석모델을 설정하였다. 그림 4와 같은 해석모델에서 Core와 Frame의 재질을 비투자율이 무한대인 IRON으로 가정하면 그림 4(b)와 같은 간단한 자기 등가회로로 나타낼 수 있다. 여기서 MMF는 다음 식으로 나타낸다.

$$F = NI = \phi R \quad (1)$$

여기서,  $N$ 은 턴수이고,  $I$ 는 전류이고,  $\phi$ 는 자속,  $R$ 은 자기저항이다.

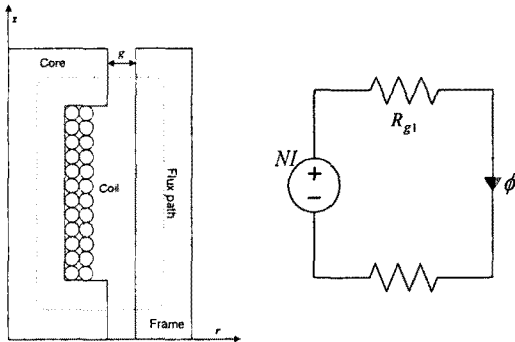


그림 5 등가 자계 회로 해석 모델

Fig. 5 Equivalent electro-magnet model and circuit

Core와 Frame의 비투자율을 무한대로 가정하였기 때문에 공극  $g$ 에서는 릴럭턴스만이 존재한다. 각 치의 릴럭턴스  $R_{g1}, R_{g2}$ 는 다음 식으로 쓸 수 있다

$$R = R_{g1} = R_{g2} = \frac{g}{\mu A} \quad (2)$$

여기서  $\mu$ 는 공극의 투자율  $A$ 는 유효단면적이다. 따라서 자속은 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$\phi = \frac{F}{R_{total}} = \frac{\mu ANI}{2g} \quad (3)$$

또한, 자속은 다음 식으로 정의된다.

$$\phi = BA = \mu HA \quad (4)$$

따라서 자계  $H$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$H = \frac{\phi}{\mu A} = \frac{NI}{2g} \quad (5)$$

식 (1)-(5)에 의해서 등가자기 회로의 공극에서의 자속밀도  $B$ 를 구하면 대략 1.8T 정도로 나타난다. 공극에서의 자속밀도가 1.0T를 넘으면 일반적으로 실제로 사용하는 자성체 재질에서는 자속이 포화되는 것으로 간주한다. 일반적으로 자성체 재질의 최대 포화자속밀도는 약 2-3T 정도이다. 따라서 본 모델은 자속이 포화되는 non-linear

모델이므로 포화되지 않는 조건에서의 analytic solution을 구하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 위 모델은 FEM을 사용하여 해석하여야 한다.

### 2.3 FEM 해석

설계된 MRF Damper의 해석을 위하여 R-Z Plane에서 반모델을 적용하여 해석하고자 한다. 그림 6에 해석 모델의 절점도를 나타내었다.

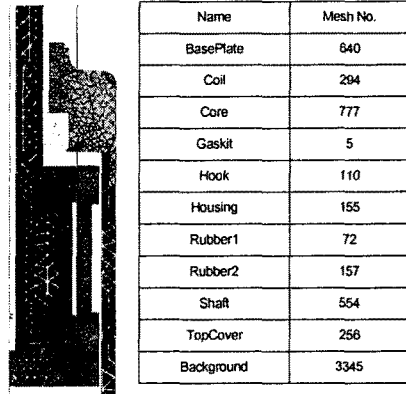


그림 6. 해석모델의 Mesh Plot

Fig. 6 Mesh Plot of designed MRF Damper

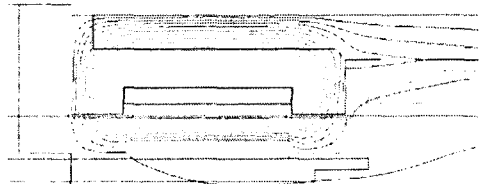


그림 7. 설계된 MRF Damper의 Flux 흐름도

Fig. 7 Flux flow of designed MRF damper

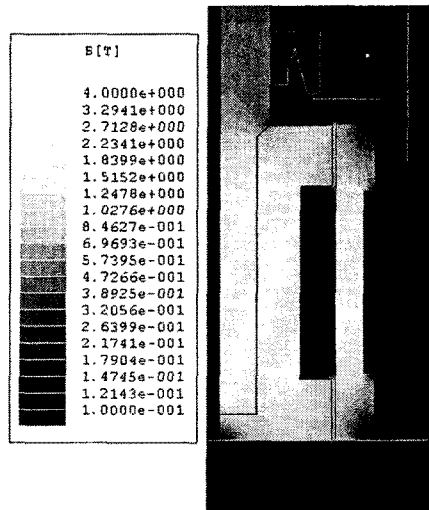


그림 8. 설계된 MRF Damper의 자속밀도

Fig. 8 Flux density of designed MRF Damper

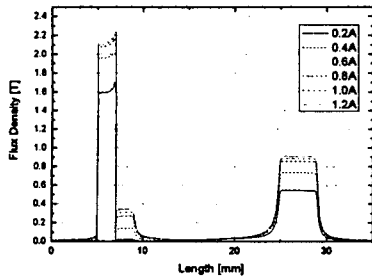


그림 9. 설계된 MRF Damper의 전류에 따른 자속밀도  
Fig. 9 Flux density of MRT Damper against coil current

그림 7은 해석모델의 Flux line 분포도이고, 그림 8은 해석모델의 자속밀도이고, 그림 9는 전류에 따른 공극에서의 자속밀도이다. 그림 9에서 8mm 부분에서 자속밀도가 높게 나온 이유는 기구적으로 코어와 피스톤을 결합하기 위하여 두 개의 재질을 용접한 부분이다. 따라서 이 부분은 자성체 내부의 자속밀도를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 자성체 내부의 자속밀도는 전류가 어느정도 증가한 후 자속이 포화되어 크게 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 그림 10에 3D FEA 해석결과를 보였다.

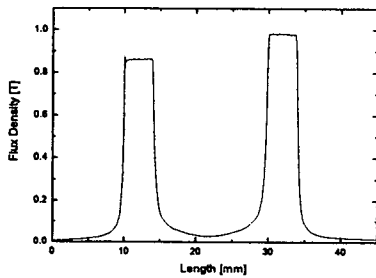


그림 10 3D FEA로 해석했을 경우의 자속 밀도  
Fig. 10 Flux density of 3D FEA

## 2.4 Damping Force

자기장이 인가되었을때의 MRF의 전단력은 Carrier물질의 전단력과 자기장에 의해서 생성되는 자기 미립자의 전단력의 합으로 나타낼 수 있다[4].

$$\tau = \tau_0(H) + \eta \dot{\gamma} \quad (6)$$

여기서  $\tau$ 는 MRF의 전단력,  $\tau_0$ 는 자기장에 의해서 발생하는 MRF의 전단력(그림 4),  $H$ 는 자계,  $\eta$ 은 Carrier fluid의 비스코스 마찰력,  $\dot{\gamma}$ 은 Carrier fluid의 전단율이다. 유동장에서의 물체의 움직임용 기술하는 기본 지배방정식은 다음과 같은 Navier-Stoke 정리로 기술된다[5].

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} u_x(r) + \frac{\partial}{\partial r} \tau_{rx}(r) + \frac{\tau_{rx}(r)}{r} = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (7)$$

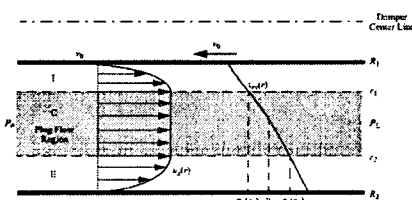


Fig. 10 Stress and velocity profiles through an annular duct

그림 10. 유동장에서의 MRF의 전단력 및 속도  
Fig. 10. Stress and velocity profile through annular duct

여기서  $\rho$ 는 물질의 밀도,  $u_x(r)$ 은 피스톤의 운동속도,  $\tau_{rx}$ 는 전단력,  $r$ 은 공극길이,  $\partial p / \partial x$ 는 수평방향의 압력의 변화율이다. 이 식에서 MRF자체의 운동에너지를 무시하면 (7)식의 첫 번째 항은 무시될 수 있다. 따라서 식(7)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d}{dr} \tau_{rx}(r) + \frac{\tau_{rx}(r)}{r} = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (8)$$

위 식의 해는 다음과 같이 쓸 수 있다

$$\frac{dp(x)}{dx} (r_2^2 - r_1^2) + 2[r_2 \tau_0(r_2) + r_1 \tau_0(r_1)] = 0 \quad (9)$$

따라서 설계된 MRF Damper의 제동력(Damping force)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F = \Delta p A_p = [P_L - P_R] A_p = -L \frac{dp(x)}{dx} A_p \quad (10)$$

여기서  $F$ 는 damping force,  $A_p$ 는 피스톤 헤드의 단면적이다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 하지 절단 장애인용 의족에 적용하기 위한 경량의 MRF Damper를 설계하였다. MRF Damper를 설계하기 위하여 제한된 공간에서의 자기회로의 특성을 고찰하였으며 FEM을 통하여 실제적으로 제작이 가능한 MRF Damper의 특성을 살펴보고, Navier-Stoke정리를 통하여 Damper의 제동력을 구하였다. 설계된 Damper를 제작하여 실험을 통해서 비교 검토하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 자기회로가 포화되어서 자기회로의 analytic solution을 구하지 못했으나, 포화가 일어나지 않는 조건에서의 자성체의 투자율을 고려하여 자계에 대한 Equation을 풀어 낼 수 있다. 이 식과 Navier-Stoke 정리를 이용하여 dynamic model의 설정이 가능하리라 생각하는데 이 부분은 좀 더 연구를 진행하여야 할 것으로 생각한다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Investigation of a Megnetorheological Fluid Damper, Marin Lita, Nicolae Calin Popa, Cornel Velescu and Ladislau Nicolae Vekas, IEEE Trans. On Magnetics, VOL 40, No 2, March 2004, pp469-472
- [2] Marsolais EB, Polando G, Lehneis HR, Tashman S., "Der gang von paraplegikern mit dem hybrid system aus FNS/orthesen Paraplegic walking with hybrid FNS/Orthotic system", Orthopadie Technik, Vol. 49, pp 372-376, 1998.
- [3] Ruthenberg R. M., Neil A. W., John E. B, "An experimental device for investigating the force and power requirements of a powered gait orthosis.", J. of Rehabilitation, Vol. 34, No. 2, pp 203-213, 1997
- [4] Phillips RW. Engineering applications of fluids with a variable yield stress. PhD thesis, University of California, Berkeley, CA, 1969.
- [5] Large-scale MR Fluid dampers: modeling and dynamic performance consideration, G. Yang, B.F. Spencer Jr, J.D. Carlson, M.K. Sain, Engineering Structures 24 (2002), pp. 309-323