

자성유체의 자기적 거동특성을 이용한 광 스위치에 관한 연구

최범규[†] · 오재근 · 김도형 · 송관민

A study on the optical switch using magnetic behavior of magnetic fluids

Bum Kyo Choi[†], Jae Geun Oh, Do Hyung Kim, and Kwan Min Song

Abstract

This paper presents the development of the optical switch using magnetic behavior of magnetic fluids, which is expected to be used broadly in high-speed information communication. The magnetic fluids for switching an incident light, have the magnetic characteristics of magnetic materials and fluidity of liquids, simultaneously. The relations are derived between the intensity of magnetic field and the angle of optical fiber which is bent by a behavior of magnetic fluid when the magnetic field is applied. When optical switch is implemented by the movement of liquid using magnetic fluid, the existing problem of durability for optical switch will be improved. Thus, this study shows the feasibility of the application for the optical switches using magnetic fluids.

Key Words : Magnetic Fluid, MEMS, Optical Switch, Micromachining

1. 서 론

자성 유체(MF: Magnetic Fluid or Ferrofluid)란 강자성 미립자(수 Å)를 매질(물 또는 기름) 속에 균일하게 분산시킨 콜로이드(Colloid)용액이다^[1]. 또한 자성 유체에 자기장이 인가되면 수 Å의 페라이트 입자들이 자기장의 방향으로 정렬되어 유체 자체가 균질하게 강한 자성을 가진 듯이 거동한다. 자성 유체는 자기적으로 soft한 물질이다. 이것은 자기 벡터가 외부 인가장에 자기 이력현상 없이 빠르게 반응함을 의미한다. 또한 낮은 자기장으로도 포화 자화에 빨리 도달할 수 있다. 자성 유체의 자화(Magnetization)는 압력을 유지하거나 디바이스를 구동하기 위해 유체에 요구되는 중요한 특성이다. 특히 자성 유체의 포화자화는 인가 자기장에 대하여 얼마나 큰 압력을 발생 할 수 있는지를 좌우한다^[2]. 따라서 포화자화가 클수록 자기장에서 유체가 발생하는 압력은 커진다.

한편, 광 스위치 분야에서 많이 사용되어지는 마이크로 미러 방식은 광섬유에서 입사된 광을 작은 미러

를 이용해서 각도를 변경시킴으로 광로를 변경하는 방식으로 기존에 사용하는 방식 중 채널 수가 가장 많은 방식이다. 이 방식은 수 μs정도의 짧은 스위칭 시간을 가지며 동작이 ON/OFF의 2단계뿐이므로 제어 용이하다. 그러나 미러의 변형과 먼지 부착을 예방하기 위한 패키징 기술이 어렵고 기계적인 거동에 의해 마모나 crack 등의 기계적인 손실로 인해 약한 내구성을 가지는 단점을 지닌다.

본 연구에서는 자성 유체의 유체적 거동과 인가장에 따라 큰 압력을 발생하는 특징을 이용하여 기존 마이크로 미러 방식의 광 스위치의 기계적 거동방식에 의해 발생하는 내구성의 단점을 개선하는 광 스위치를 제작하였다. 또한 포화자화가 600 G인 자성 유체를 이용하여 자성 유체의 광 스위치로서의 적용가능성을 실험적으로 검증하였다. 그림 1은 자석에 의한 자성유체의 응집력을 나타낸 그림이다.

2. 자성유체를 이용한 스위치 실험

2.1. 자성 유체의 특성

자성 유체는 20년 이상 상업적으로 이용되어 왔다. 액체용매에 섞여 있는 물리적 화학적으로 안정한 마그네타이트 colloid 현탁물이다. 아울러, 자성유체의 유체

서강대학교 기계공학과 (Dept. of Mechanical Engineering, Sogang University)

[†]Corresponding author: bkchoi@sogang.ac.kr

(Received : August 25, 2004, Accepted : November 24, 2004)

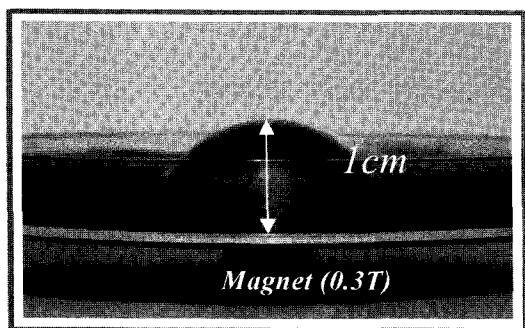


그림 1. 자석에 의한 자성유체의 응집
Fig. 1. Cohesion of magnetic fluid due to a magnet.

성질로 인해 일반적인 ferromagnetic 물질과 달리 자기 이력(Hysteresis)이 존재하지 않는 Soft magnetic 특성이 있다. 가해진 자기장에 반응하며 회전 shaft의 sealing 혹은 인체 내로의 약물 전달과 같은 여러 분야로의 응용이 있다. 자성 유체는 자성이론과 잘 정리된 수학적 이론에 의해서 완성된 자성이론과 유체역학 이론에 의해서 설명되어 질 수 있다.

1960년대 중반 Neuringer와 Rosensweig 는 자성 유체에 관한 많은 업적을 남겼다. R.E. Rosensweig 는 자기학과 유체 역학을 합성하여 자성 유체에 대한 유체 방정식(Ferrohydrodynamics)을 집대성함으로써 자기장 내에서 자성 유체의 힘에 대한 이론적인 방정식을 유도하였다^[2]. 일정한 자계를 인가하였을 때 자성 유체 입자의 거동에 관한 자유 물체도로부터 Ferrohydrodynamic Bernoulli 방정식을 유도할 수 있다. 그림 2는 자성 유체입자의 자유 물체도를 나타낸다^[1].

유선을 따라서 정상 상태(steady state)이고 자성 유체가 비점성(invscid), 비압축성(Incompressible)인 가정과

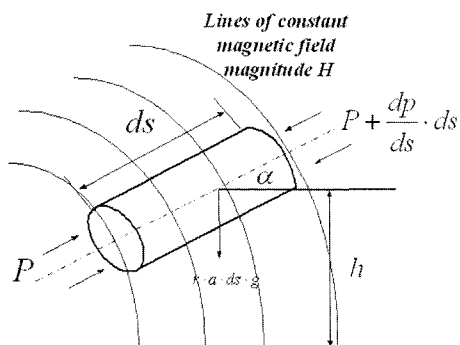


그림 2. 자계 하에서의 자성 유체 입자의 자유 물체도
Fig. 2. Free body diagram for the particle of magnetic fluids under magnetic fields.

뉴턴의 제 2법칙을 적용하여 식 (1)을 얻을 수 있다.

$$\rho a ds v \frac{dv}{ds} = -a \frac{dp}{ds} ds - \rho a g ds \sin \alpha + \mu_0 M \frac{dH}{ds} a ds \quad (1)$$

여기서 p 는 발생 압력, v 는 속도, a 는 원통의 면적, h 는 기준면으로부터의 높이, ds 는 원통의 미소길이, ρ 는 자성 유체의 밀도, M 은 자화 강도, H 는 자장 강도이며, μ_0 는 진공에서의 투자율이다. $\sin \alpha = \frac{ds}{dh}$ 일 때, 구간 (1)에서 (2)까지 적분하면 식 (2)를 얻는다.

$$\begin{aligned} P_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} + \rho g h - \mu_0 \int_0^{H_1} M dh \\ = P_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + \rho g h_2 - \mu_0 \int_0^{H_2} M dh \end{aligned} \quad (2)$$

이를 간단히 하면

$$P + \rho \frac{v^2}{2} + \rho g h - \mu_0 \int M dh = const \quad (3)$$

식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 따라서 자기장에 의해서 발생하는 자성 유체의 압력(P_{mag})은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$P_{mag} = \mu \int M dh + \frac{1}{2} \mu_0 M_n^2 \quad (4)$$

결국 위 식은 자성유체에 대한 Bernoulli Equation으로부터 인가 자기장(H)에 따른 자성유체의 거동(P_{mag})을 나타내고 있다. 따라서 외부에서 자기장을 조절함으로써 자성유체의 압력 발생을 유도할 수 있으므로 자성유체의 이러한 특성을 이용한다면 다양한 유체 소자(Fluidic actuator : valveless pump, micro pump 등)에 응용할 수 있으며 본 연구에서는 자성유체의 외부 자기장에 대한 자체 압력 발생 특성을 이용하여 광 스위치 응용에 대한 연구를 수행하였다.

2.2. 자성 유체의 기초실험

본 연구에서는 앞서 설명한 자성유체의 거동을 광학 소자로 적용하기 위한 기초 실험을 수행하였는데, 그림 3과 같은 측정 장치를 이용하여 일정한 자화를 갖고 있는 영구 자석을 마이크로미터 헤드에 부착하여 거리에 따른 자기장 세기의 변화에 대한 자성유체의 거동을 실험하였다. 이 실험은 자성유체를 이용한 광학 소자 개발을 위한 기초 물질 실험으로서의 의미와 아울러 본 연구에서 제안하는 광변조기에 개발에 대한 적용 가능성 검증 실험으로 의미가 있다. Device

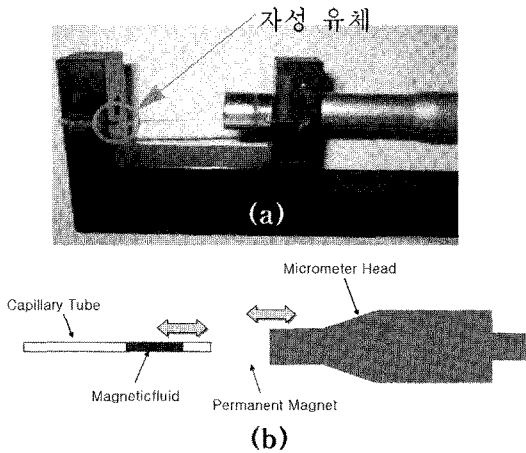


그림 3. 자석의 세기에 따른 자성 유체의 반응 거리 측정; (a) 실험 장치, (b) 장치 구조도
 Fig. 3. Measurement for the reaction distance of magnetic fluids by the intensity of the magnet ; (a) Experimental setup and (b) A schematic diagram of the instrument.

제작에 앞서 필요한 광 스위칭에 사용되는 영구 자석의 거리에 따른 자속밀도 변화에 대한 실험을 수행하였다.

그림 3은 자성 유체를 모세관에 넣은 후 자석의 세기에 따른 자성 유체의 반응을 실험한 사진이다. 이 실험에서는 자성 유체가 모세관에 정착되는 현상을 방지하기 위해 모세관에 자성 유체와 분리되는 물을 채운 후 자성 유체를 집어넣어 모세관에 붙어 자국이 남는 현상을 줄였다. 자성 유체는 기름과 같이 물과 분리가 되기 때문에 이러한 방법이 가능하다. 또한 세기가 다른 영구자석에 의해 자성 유체의 거동이 어느 거리에

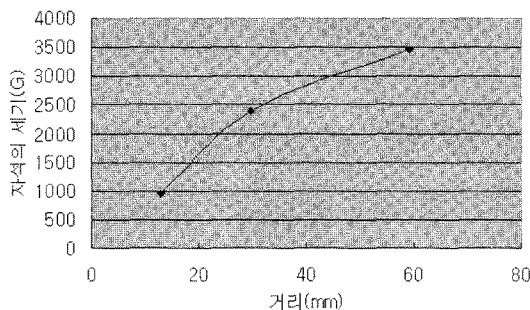


그림 4. 각 자석의 세기(자속밀도로 표현)에 따른 자성 유체의 최초 반응 거리
 Fig. 4. The reaction distance of magnetic fluids by the magnetic flux density of the magnet.

서 일어나는지 측정하기 위해 영구자석을 조금씩 자성 유체에 가까이 움직여가면서 자성 유체가 거동하는 영구자석으로부터의 거리를 측정하였다.

그림 4는 그림 3의 실험 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

위의 그래프를 통해 모세관안에 있는 자성 유체는 자석의 자속 밀도가 1000 G보다 약한 자석으로는 1 cm 안에서 거동이 가능하고 2500 G보다 센 자석으로는 3 cm 밖에서도 거동될 수 있음을 알 수 있다. 이 실험을 기반으로 확실한 거동을 위해서 본 실험에서는 최대 포화 자화도가 3500 G인 자석을 사용하였다.

2.3. 개념도

본 연구에서 제안하고자 하는 광 스위치의 개념도는 다음의 그림 5와 같다.

광섬유 사이에 자성 유체가 담긴 모세관을 배치한 후 광섬유를 모세관 위아래로 그림 5처럼 정렬한다. 자성 유체 기초실험을 할 때 사용한 것처럼 자성 유체는 모세관에서의 자성 유체의 거동을 부드럽게 함과 동시에 모세관에 자성 유체가 남아 빛을 차단하는 현상을 막기 위해 모세관에 물을 채운 후 광의 궤적을 막기 위한, 필요한 양만큼의 자성 유체를 채웠다. 그 후 자성 유체가 빛을 차단과 개방의 거동을 할 수 있는 운동원으로는 영구자석을 사용하였다. 그림 5의 왼쪽 그림은 자성 유체가 광 경로를 막지 않아 빛이 통과하는 모습

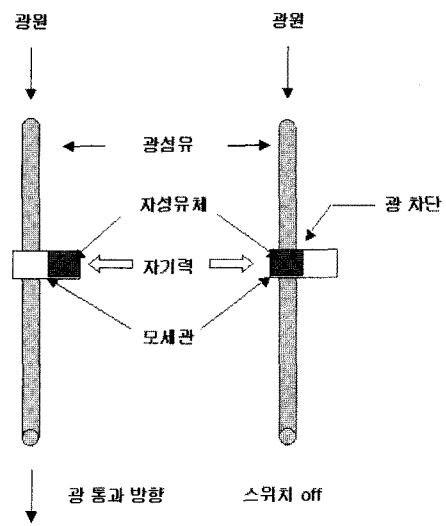


그림 5. 자성 유체에 의한 광 스위치의 개폐
 Fig. 5. The on/off mechanism of the optical switch by magnetic fluids.

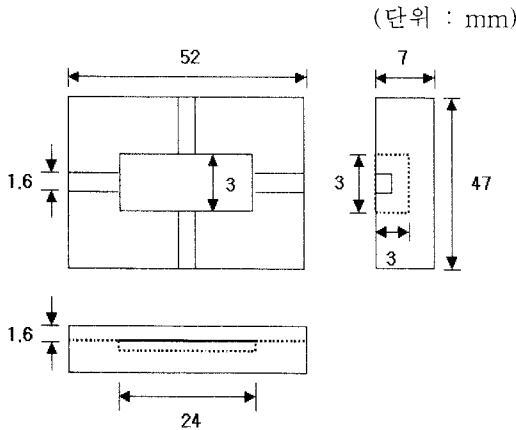


그림 6. 설계 도면
Fig. 6. The drawing for the switch structure.

이고 그림 5의 오른쪽 그림은 자성 유체가 영구자석에 의해 거동하여 광섬유사이에 놓여 직접 광 경로를 차단하는 모습이다.

2.4. 실험장치

광섬유와 모세관을 배치하여 고정하는 구조물은 가공이 용이한 아크릴을 이용하여 구조물을 제작하였다. 그림 6은 구조물의 도면을 나타낸다.

광섬유 센서는 오토닉스 회사의 BF4R-R을 사용하여 광 스위치를 통해 이루어지는 광의 차단과 개방을 확인하였고 모세관은 빛의 통로를 막을 수 있는 크기인 안지름이 10 mm인 모세관을 사용하였다. 가로 부분은 센서가 장착될 부분이고 세로의 부분은 물과 자성 유체가 채워져 있는 모세관이 장착될 부분이다.

광섬유와 모세관을 채널에 넣고 Optical controller를 이용하여 광섬유에 광원을 제공한다. 광섬유를 마주보게 설치하고 광섬유와 광섬유 사이에 모세관을 설치한다. 그 후, 광섬유에 빛을 제공하고 광섬유 사이에 있는 모세관의 자성 유체로 On/Off를 제어한다. 또한 자성 유체의 거동을 위해 스프링과 자석을 이용하여 작은 판을 제작하였다. 자성 유체와 영구 자석간의 거리를 10 mm가 되도록 제작하여 영구 자석이 600 G인 자성 유체를 움직일 수 있는 자기선속밀도를 가질 수 있도록 하였다.

본 연구에 사용된 자성 유체는 미국의 Ferro-tech사에서 제조된 것으로 100 Å정도의 자철석(Fe₃O₄) 분말에 계면활성제(Dispersant)인 올레인 산(Oleic acid)을 흡착한 후, synthetic isoparaffinic solvent를 첨가하여 만들어졌다.

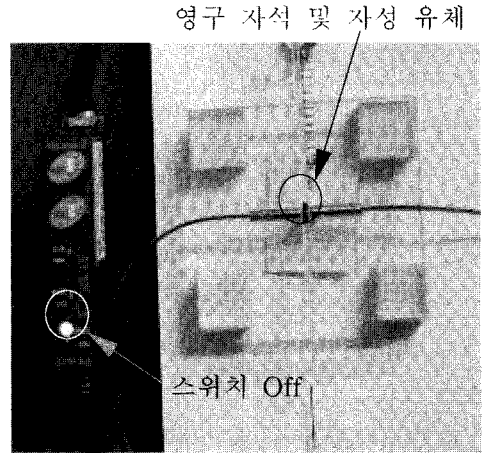


그림 7. 스위치 Off 상태
Fig. 7. The off state of the switch.

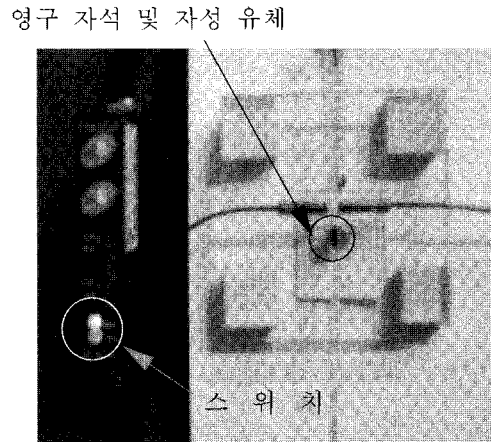


그림 8. 스위치 On 상태
Fig. 8. The on state of the switch.

2.5. 실험결과

그림 7, 8과 같은 실험 장치를 제작하였고, 자성 유체와 영구 자석을 이용하여 광 경로를 스위칭하는 모습을 나타내었다. 모서리 부분의 4개의 받침대를 세우고 받침대 사이에 영구 자석을 붙인 작은 판을 위치시킨 후, 영구 자석의 이동을 통해 광 경로의 On/Off를 실험하였다.

그림 7은 영구 자석을 광섬유 사이에 위치시켜 자성 유체가 광을 차단하는 모습이다. 그림 왼쪽의 원안의 하나의 불빛은 광이 차단되었다는 표시이다. 그림 오른쪽의 원은 광을 차단하고 있는 자성 유체의 모습이다.

또한, 그림 8은 그림 7에서 영구 자석을 중심으로부터

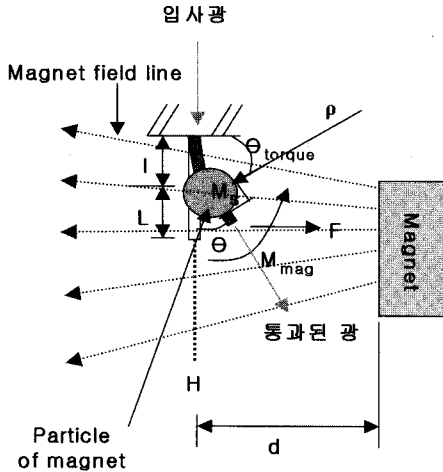


그림 9. 광섬유 광변조기의 개념도
 Fig. 9. The schematic for the optical modulator using optical fiber.

약 10 mm 이동하여 자성 유체가 광 경로를 개방한 모습이다. 그림 왼쪽의 원안의 두개의 불빛은 광이 개방되었다는 표시이다. 그림 오른쪽의 원은 영구 자석의 이동에 의해 광 경로에서 이탈한 자성 유체의 모습이다.

이 실험을 통해 광섬유의 아래 부분에 위치한 영구 자석의 거동에 의해 자성 유체가 광 경로를 차단 또는 개방하여 스위칭 역할을 하는 것을 확인하였다. 아울러, 자성 유체가 스위칭 하기에 적합한 재료임을 실험적으로 확인할 수 있었다.

3. 광섬유를 이용한 광변조기

자성유체와 광섬유를 이용하면 광변조기를 개발할 수 있는데 본 절에서 그 개념을 보이고자 한다. 구현하고자 하는 광섬유를 이용한 광변조기는 그림 9와 같다. 이론적인 계산을 편리하게 하기 위한 방법으로 광섬유를 외팔보로 가정하였다. 광섬유 주변을 자화 물질로 코팅한 후 착자 시키고 자성유체가 들어있는 저장소에 광섬유를 넣게 되면, 자석의 자기장에 의해 자성유체는 그림 9와 같이 구의 형태로 모이게 된다.

그림 9는 자기력의 세기에 따라 외팔보로 모델링한 광섬유 끝단의 거동을 나타내고 있으며, 최종적으로는 본 연구에서 제안하는 자성유체를 광변조기로 활용 가능함을 보이기 위한 설명이다. 그림 9와 같은 광변조기 모델에서 자장 강도(H)의 변화에 따라 광섬유 끝단의 각도 변화량이 광변조를 결정하므로 다음과 같이 그림 9에 이용된 식을 정리하였다^[3].

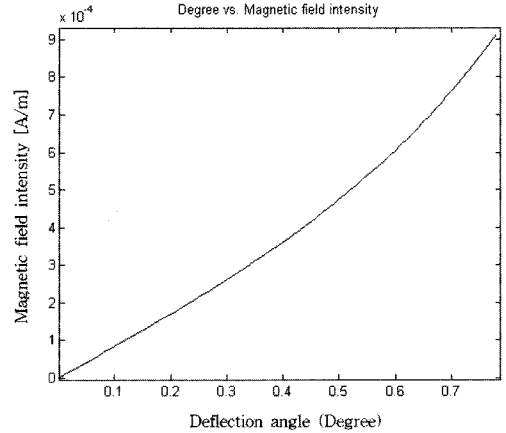


그림 10. 자기장의 세기에 따른 각도 변화
 Fig. 10. The deflection degree of optical fiber due to the magnetic field intensity.

$$F = \frac{M_s H r^2}{d^2} \tag{5}$$

$$T = F L \cos \theta \tag{6}$$

$$\theta_{torque} = \frac{l}{\rho}, \quad \rho = \frac{EI}{T} \tag{7}$$

F는 자성유체에 작용하는 힘을 나타내고, H는 자장 강도, T는 자성유체에 작용하는 힘에 의해 광섬유에 작용하는 모멘트 성분이며, M_s는 자성유체의 포화자화도, ρ는 자성유체에 의해 광섬유가 휘어진 곡선의 반지름, r은 광섬유에 붙은 자성유체가 가지는 반지름을 나타낸다. 또한 E는 광섬유의 탄성계수, I는 관성모멘트를 나타낸다. 그림 9의 개념도에서 θ = θ_{torque}가 되고, 식 (5), (6), (7)을 이용하여 θ에 대해 정리하면 식 (8)과 같이 나타낸다.

$$\frac{\theta}{\cos \theta} = \frac{l r^2 L}{d^2 EI} M_s H \tag{8}$$

그림 10은 d가 5 cm에 위치한 상태에서 포화자화도 600 G를 갖는 자성유체를 이용하고, θ와 H를 변수로 하여 광섬유가 휘어지는 각도와 자기장의 세기에 대한 그래프를 구하였다.

그림 10을 통해 자기장의 세기에 따라 거의 선형적으로 증가하는 모습을 관찰할 수 있었다. 증가하는 각도와 자기장의 세기가 선형적으로 증가하여 제어성이 용이하고, 예측이 가능한 점으로 미루어 자기장의 세기에 따라 거동이 달라지는 자성유체를 이용하여 광섬유를 움직임으로써 광 스위치의 기능을 할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 자성 유체의 자기특성과 액체의 유동성을 가지는 특성을 이용하여 광 스위치로서의 사용 가능성을 실험적으로 검증함으로써 광 스위치 개발 연구에 활용하는데 목적이 있다. 아울러 기계적 방법이 아닌 유체의 거동을 통해 광 스위칭을 할 수 있다는 가능성을 실험적으로 보여주었다. 이러한 기계적 방법이 아닌 유체의 거동을 이용함으로써 기계적 방법을 사용하였을 경우에 생길 수밖에 없는 마모나 crack의 단점을 보완함으로써 스위치의 수명을 연장할 수 있을 것이다. 또한, 자성유체를 이용한 광 모듈 개발과 아울러 광섬유의 휘어지는 각도와 인가 자기장의 세기에 대한 관계를 예측함으로써 광 스위치 개발을 위한 연구에 활용함을 목적으로 했다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다(KRF-2002- 003-D00039).

참고 문헌

- [1] R.E. Rosensweig, "Ferrohydrodynamics", Cambridge Univ. Press, NewYork, 1985.
- [2] Miller C. W., "Magnetic Fluids: magnetic forces and pumping mechanism", NTIS Final Report AD/A-006323, The Sibley School of Mechanical and Aerospace Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, September, 1973.
- [3] W. H. Hayt, Jr., J. A. Buck, "Engineering Electromagnetics", Sixth edition, Mc Graw Hill, 2001.

최 범 규

- 1981년 서울대학교 기계공학과 졸업
- 1983년 동대학원 기계설계학과 졸업(석사)
- 1992년 Univ. of Wisconsin 기계공학과 졸업(공학박사)
- 1984년 ~ 1986년 KIST CAD/CAM 연구실 연구원
- 1992년 ~ 1994년 위스콘신 대학 CxRL 근무
- 1994년 ~ 1997년 삼성전자 주식회사
- 1997년 ~ 현재 서강대학교 기계공학과 부교수
- 주관심분야 : Microsensor 및 Microactuator 설계 제작

오 재 근

- 1996년 서강대학교 전자공학과 졸업
- 2000년 서강대학교 기계공학과 졸업(석사)
- 2004년 현재 서강대학교 기계공학과 박사 학위 과정 재학중
- 1996년 ~ 1998년 기아자동차 중앙기술 연구소 제어 기술부 연구원
- 주관심분야 : Micro Power Generator, Micro Sensor 및 Actuator, Ubiquitous Sensor 및 Sensor Network

김 도 형

- 2003년 선문대학교 기계공학과 졸업
- 2004년 현재 서강대학교 기계공학과 석사 학위 과정 재학중
- 주관심분야 : Micro Sensor

송 관 민

- 2003년 서강대학교 기계공학과 졸업
- 2004년 현재 군복무중
- 주관심분야 : Microfluidics