

자성유체의 온도에 따른 점성 변화를 이용한 미소 유체 소자

최범규[†] · 오재근 · 안정재

The Microfluidic Device using Viscosity Deviation of Magnetic Fluids Due to Temperature Changes

Bumkyoo Choi[†], Jae-geun Oh, and JeongJae Ahn

Abstract

This study focused on the characteristic of magnetic fluids, the viscosity deviation of magnetic fluids due to temperature changes, and fabrication of a 'purely' liquid type microvalve. The viscosity of magnetic fluids decreases sharply during increasing of temperature. The viscosity of magnetic fluids is rated 1,000 cP at the room temperature and 25 cP when the temperature reaches 100 °C. Briefly, it is remarkable that the fluid flow can be controlled by the temperature and this characteristic can be adopted to the microfluidics as a microvalve. The fabrication of a liquid type microvalve is more easy than solid state microvalves and which can increase an efficiency of the controllability with respect to the thermo-pneumatic micropump which is studied broadly for many years. When the magnetic fluid used as a sealant for high level sealing, the pressure leakage is less than solid state microvalve. The experimental results show that the pressure drop in microchannel, filled with the magnetic fluid, is significant in the temperature range of 20 °C~50 °C and this result explains why the use of magnetic fluids is possible as a microvalve searcher uses this characteristics, Well known thermo-pneumatic.

Key Words : MEMS, magnetic fluids, microvalve, microfluidics

1. 서 론

Microfluidics 분야는 기초연구에서부터 응용소자까지 급속한 속도로 발전하고 있다. 특히, 최근 Biomedical 분야에서의 MEMS 기술의 발전은 상용화된 DNA Chip, Cell Counter, Micro Dilution Device 등의 출현으로 발전속도가 급속히 진전되는 분야이다.

Microfluidics를 구성하는 주요 소자는 마이크로펌프(Micropump), 반응기(Reactor), 마이크로밸브(Microvalve)등 매우 다양하며 그중 마이크로밸브는 MEMS 기술 개발의 초창기부터 응용 가능성에 대해 많은 연구를 진행해 왔던 분야이다. Microfluidics 적용을 위한 마이크로밸브는 대부분 Silicon 기반 위에서 제작되어 지게 된다. 그러나, Silicon 기반의 구조물은 취성(Brittleness)을 갖고있어 연속적인 구조물의 마찰 발생시 구

조물이 변형되거나 혹은 파괴되는 단점을 안고 있다. 또한, 구조물과 구조물간의 높은 밀봉을 요하는 마이크로밸브의 경우 Silicon으로 제작시 높은 수준의 밀봉 효과를 기대하기 힘들다. 따라서, 본 연구에서는 높은 수준의 밀봉 효과 및 연속적인 밸브 동작에서도 취성에 의한 구조물 변형의 우려가 없는 마이크로밸브를 개발하기 위해 자성유체의 특성을 이용한 액체 밸브를 제작하고 실험적으로 성능을 평가한다.

자연계에서는 유체 스스로 강한 자성을 지닌 물질은 존재하지 않는다. 즉, 자성에 반응하지 않는 유체에 자성을 가지게 하기 위해서는 자성을 가진 고체미립자의 도움을 받아야 한다. 자성유체(MF:Magnetic Fluid or Ferrofluid)란 강자성 미립자(수 Å)를 매질(물 또는 기름) 속에 균일하게 분산시킨 콜로이드(Colloid) 용액이다. 이 콜로이드는 액상 중에서 응집, 침강하지 않도록 강자성 초미립자에 계면활성제를 흡착시킨 후 분산시켜 제조하며, 완전히 안정되어 증력이나 자계 기울기에 의해서도 침강이나 응집되지 않아 단상의 유체와 거시적으로 유사한 성질을 갖는다. 따라서 인가된 전압에 의

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

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

(Received : April 28, 2003, Accepted : January 7, 2004)

해 부피가 변하는 압전 물질이나 자기장이거나 전기장에 따라 점도가 변하는 전기유변(ER:Electrorheological) 또는 자기유변(MR:Magnetorheological) 유체와는 달리 자성유체는 인가된 자기장에 의해 유체의 형상이 변형되는 특성을 가지고 있으며, 이러한 특징을 이용한 미세 구동기에 관한 연구를 진행중에 있다^{1,2)}. 자성유체의 또다른 특징중 하나인 온도에 따른 유체의 점도가 급격히 변하는 성질이 있는데, 본 연구에서 사용한 SMF-110은 상온에서 1,000 cP의 점도를 갖게되지만 온도를 상승시키에 따라 100 °C에서는 25 cP 정도의 점도를 갖는 특이한 성질이 있다. 순수한 물의 경우 상온에서 1.003 cP이며, 100 °C에서는 0.283 cP로써 자성 유체와 비교하여 온도에 따른 점성 변화가 그리 크지 않다³⁾. 순수한 물의 온도에 따른 점도 변화를 이용한 Microscale에서의 유체이송 소자를 제작한 예도 있으나 그 효과는 그리 크지 않다⁴⁾. 본 연구에서는 자성유체의 점도 변화에 따른 마이크로밸브 작동 효과를 검증하기 위해 Si 기판을 TMAH로 식각하여 미세유로를 만들고 국부적인 발열을 통한 자성유체의 점도 제어를 위해 Pyrex glass에 저항률이 10.6 $\mu\Omega\text{-cm}$ 인 백금(Pt)을 이용하여 1,000 Å 두께로 7.26 cm 길이의 발열부(Heater)를 형성하였다. 이 때, 발열 전극의 저항은 60 Ω 이다. 본 연구는 자성유체의 특성중 온도에 따른 급격한 점도 변화 특성 및 액상 밀봉 특성을 마이크로 유체 제어에 활용할 경우 LOC 분야중 Chemistry On a Chip에 적합할 뿐 아니라 특히, 자성유체가 자기장에 따른 액체-고체 상변이 현상을 함께 활용시 장치 Microfluidics에서 활용할 가치가 매우 크다는 점에 의의가 있다.

2. 자성유체의 특징 및 조성

자성유체에 자기장이 인가되면 수 Å의 페라이트 입자들이 자기장의 방향으로 정렬되어 유체 자체가 균질하게 강한 자성을 가진 듯이 거동한다. 또한, 기계적 진동이나 온도와 같은 외부 환경 변화에 대하여 자기적 성질이 안정되어 있다. 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. 자성유체의 자화(Magnetization)는 압력을 유지하거나 디바이스를 구동하기 위해 유체에 요구되는 중요한 특성이다. 특히, 자성 유체의 포화자화(M_s)는 인가장에 대하여 얼마나 큰 압력을 발생할 수 있는지를 좌우한다. 따라서 포화자화가 클수록 자기장에서 유체가 발생하는 압력은 커진다. 자성 유체에 관한 연구는 1965년

미국의 Pappel이 로켓 연료를 무중력하에서 연료를 공급하는 방법중의 하나로 연료의 자성 유체화를 제안함으로써 시작되었다. 이어서 NASA의 계획과 관련하여 연구가 진행된 결과 자성 유체를 높은 자기장에 유지함으로써 생기는 밀봉 작용을 이용하여 우주복 등에 사용되었다고 알려져 있다. 자성 유체의 연구는 제법과 물성, 기초 학문 분야로서의 자성 유체역학, 그리고 여러가지 응용 측면에 대한 개발이 시도되고 있으나 미시적 구조가 복잡하기 때문에 이론적으로도 실험적으로도 아직 충분한 성과를 얻지 못하고 있다.

현재 적용분야로는 회전축의 진공 밀봉장치(Seal), HDD(Hard Disk Drive)의 방진 밀봉(Seal), 스피커 댐퍼 용으로 상업화가 되어있으며 생물학, 의료용으로 인체에 무해하며 이식 가능한 자성 유체가 개발되어 있다.

자성유체의 물성치는 제조 방법과 강자성체 분말의 체적 농도, 매질등에 의해 바뀐다. 자성 유체는 매질에 따라서 크게 수성, 유성으로 나뉜다. 자성유체의 포화자화(M_s)와 점도는 매질내에 포함된 강자성체 입자의 체적 농도에 따라 다르다. 다시 말해, 체적 농도가 클수록 포화 자화와 점도는 증가하고 체적 농도가 적을수록 포화자화와 점도는 감소한다. 현재까지는 100 - 900 Gauss의 포화 자화를 가진 자성 유체가 제조 가능하다. 본 연구에서 사용된 자성 유체는 삼화전자(주)에서 제조된 것으로서 100 Å 정도의 자철석(Fe_3O_4) 분말에 계면활성제(Dispersant)인 올레인 산(Oleic acid)을 흡착한 후, 광유계 오일을 첨가하여 만들어졌다. 표 1은 본 연구에 사용된 자성 유체의 물성치를 나타낸 것이고, 그림 1은 자성 유체의 M-H 곡선이다. 아울러, 자성 유체는 수 nm에서 수십 nm의 크기가 같은 강자성체의 미립자를 적절한 계면 활성제를 조밀하게 피복하고 기름이나 물 등의 액체 용매 중에 고밀도로 분산시킨 입자 콜로이드(colloid)이므로, 자성유체중에서 자화되어 있는 입자는 $10^1 \sim 10^4 \mu_r$ 의 자기 모멘트를 가진 개개의 단자구 미립자이며 자성유체 전체는 초상자성을 나타낸다. 이 콜로이드는 완전히 안정되어 중력이나 자계 기울기에 의해서도 침강이나 응집을 나타내는 일이 없고 고분자 용액과 같이 가시적으로는 연속체로서 작용한다. 자성유체는 분산상으로의 강자성 미립자, 그

표 1. 자성 유체의 물성치

Table 1. Properties of magnetic fluid

밀도 (g/cm^3)	점도 (cp)	포화자화, M_s (Gauss)	입자크기 (Å)
1.04	1000	100	100

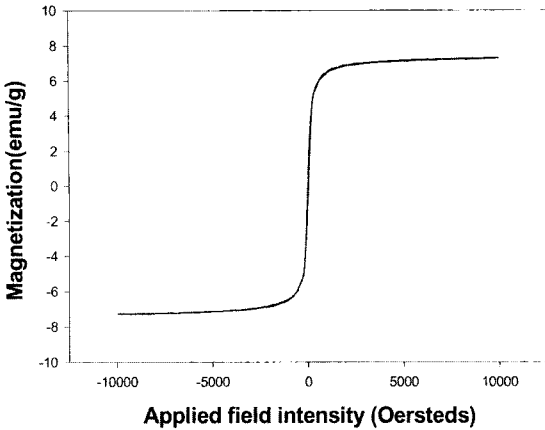


그림 1. 자성 유체의 M-H 곡선
Fig. 1. M-H curve of magnetic fluid.

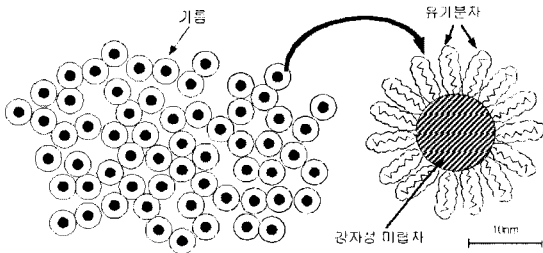


그림 2. 자성 유체의 미세 구조 모델
Fig. 2. Micro structural model for magnetic fluid.

것을 덮는 계면 활성제 및 입자를 분산시키는 분산 매체로 이루어진다. 그림 2에 자성유체의 미시적 구조를 나타내었다. 자성유체의 자성을 지니고 있는 Fe₃O₄ 등의 강자성 미립자는 흡착성의 관능기를 끝에 가진 고리 모양 구조의 계면 활성제 분자로 표면에 조밀하게 덮여 있고 액체 용매 중에 고밀도로 분산되어 있으며, 주위의 액체를 연결하는 친화의 역할도 하고 있다. 그 때문에 미립자는 열운동에 의해 응집되는 일이 없고 안정된 분산 상태를 유지하게 된다⁵⁾. 본 연구에서 사용한 SMF-110의 온도에 따른 점도변화에 대한 그래프는 그림 3과 같다.

3. 소자 설계 및 제작

자성유체의 온도에 따른 점도 변화 특성을 실험하기 위해 표 2와 같이 수력 직경(Hydraulic diameter)이 161.8813 μm~176.3943 μm인 미세유로를 제작한다. 미세유로는 (100)방향의 Si 기판을 TMAH 식각하여 제작 하였다. 미세유로는 자성유체가 채워지며 상온에서

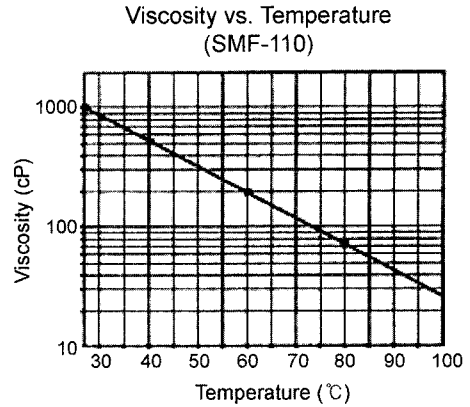


그림 3. 자성 유체의 온도에 따른 점도변화
Fig. 3. The viscosity deviation of magnetic fluids due to temperature changes.

표 2. 미세유로의 형상
Table 2. The Characteristic Dimensions of a microchannel

Channel	<i>a</i> (μm)	<i>b</i> (μm)	<i>h</i> (μm)	<i>D_h</i> (μm)
1	600	453.2076	100	161.8813
2	800	653.2076	100	170.844
3	1,000	853.2076	100	176.3943

**a*: 윗면 너비, *b*: 아랫면 너비, *h*: 높이

1,000 cP인 자성유체는 유체 플러그 역할을 수행하게 된다. 미세유로 형성을 위해 TMAH 식각시 면에 대하여 54.7°의 각도로 식각이 수행되므로 식각된 유로의 단면은 사다리꼴로 형성되게 된다. 이때의 수력직경 (*D_h*)을 표현하면 식 (1)과 같다.

$$D_h = \frac{4A}{P} \tag{1}$$

식 (1)에서 *A*는 유로의 단면적이며, *P*는 둘레이다.

자성유체에 열을 공급하기 위해 제작한 Folded Film Heater 전극은 10.6 μΩ-cm의 저항률을 갖는 Pt 전극을 1,000 Å 두께로 Pyrex glass 위에 증착하여 제작하였다. Pt 전극의 실제 길이는 7.26 cm이므로 전체 전극의 저항은 40~50 Ω으로 예측되나 실제 측정 결과 60 Ω으로 측정되었다. 설계시 Microchannel은 유체를 용이하게 다루기 위하여 비교적 큰 크기로 설계하였으며, 제작결과 저장소의 크기는 14,560 × 14,570 × 100(μm³)이며, 유로의 길이는 33,700 μm로 제작하였다.

유체 거동에 따른 Microchannel 내에서 압력 손실을 측정하는 정압 측정부를 결정하기 위해 유체의 완전 발달(Fully developed)시 층류(Laminar flow) 및 난류

(Turbulence flow) 사이의 영역에서 모두 만족할 수 있는 식 (2) 및 식 (3)을 사용하여 Microchannel 입구에서부터 정압 측정부까지의 거리를 결정하였다.

$$\frac{L_e}{D_h} = 0.06Re \tag{2}$$

$$\frac{L_e}{D_h} = 4.4Re^{1/6} \tag{3}$$

정압 측정을 위한 압력측정부의 크기는 유체의 흐름을 방해하지 않도록 50×50 μm²의 크기로 제작하였다.

4. 측정 방법

자성유체의 온도에 따른 점도 변화 특성을 이용한 Microvalve 응용 실험을 위해 제작한 그림 4(b)와 같은 실험 시편에 대해 그림 5와 같은 측정장치를 구성하여 미소유동 현상에 대한 실험을 수행한다.

작동유체는 0.1 ml/hr~506 ml/hr의 유속(Flow rate)을

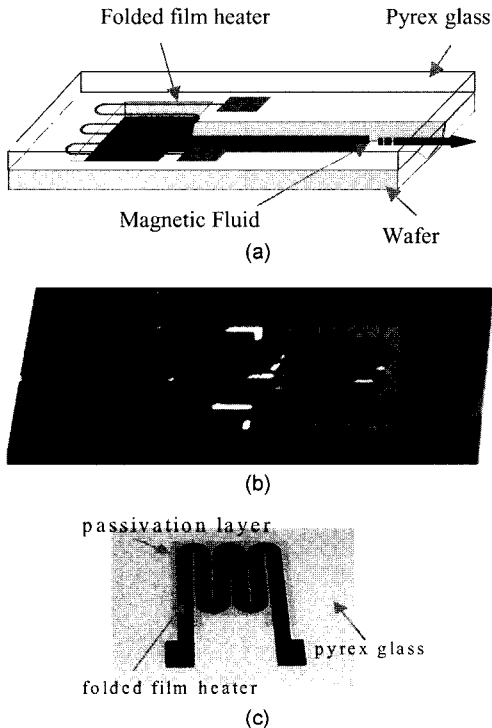


그림 4. 유체 플러그 마이크로밸브 제작 결과; (a) 개략도, (b) 제작 결과, (c) Folded Film Heater 전극 사진
 Fig. 4. Fabrication results of liquid plug type microvalve; (a) Schematic diagram, (b) Microscope image of fabrication result, and (c) Microscope image of folded film heater.

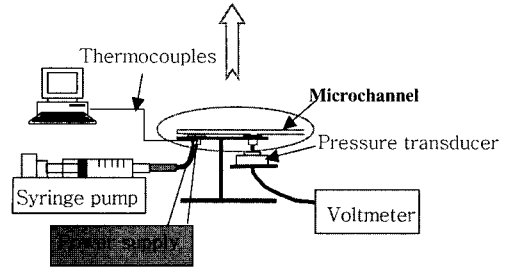
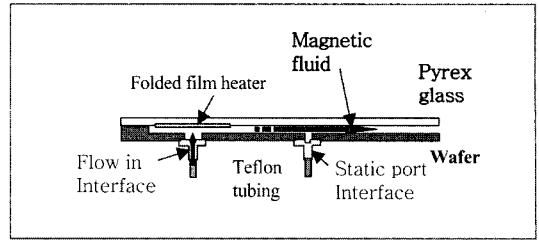


그림 5. 측정장치 구성도
 Fig. 5. Schematic of experimental setup.

선형적으로 조절할 수 있는 주사기형 펌프(Infusion syringe pump; Kdsscientific 100)를 통해 시편으로 공급된다. 시편과 연결부위는 압력 손실을 최소화 하기 위하여 테프론 튜브를 사용한다. 본 연구에서는 132.5 ml/hr의 유속으로 작동 조건을 설정하고 실험하였다. 압력 손실은 미세유로 외부의 대기압과 미세유로 내부의 정압 측정부 사이의 압력차를 구함으로써 연산할 수 있다. 압력 측정을 위해 1~1,000 mmH₂O의 압력을 측정할 수 있는 압력 센서(Model-PSHC0100CAA, Sensys Co.)를 정압 측정부에 장착하여 유동압력 손실을 측정한다.

자성유체는 Folded film heater를 통해 서서히 100 °C 까지 가열하고, Thermocouple을 통해 온도를 측정한다.

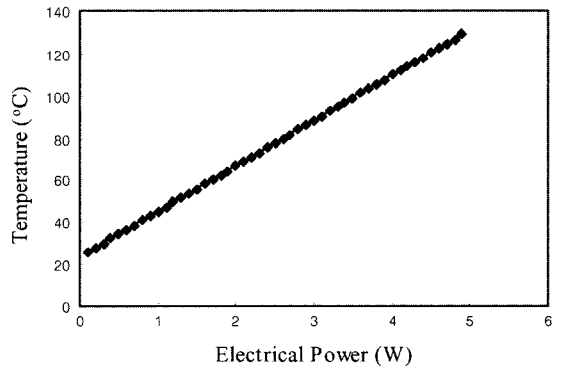


그림 6. 인가 전력에 대한 Heater의 표면 온도
 Fig. 6. Temperature changes of heater's surface due to electrical power input.

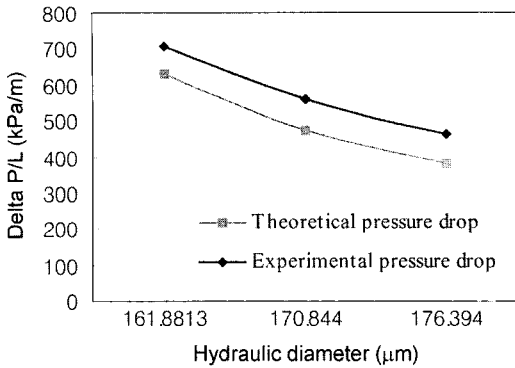


그림 7. 수력 직경에 따른 Hagen-Poiseuille flow에 대한 이론적 압력기울기와 실험값

Fig. 7. The comparison between theoretically calculated and experimentally measured pressure gradient of Hagen-Poiseuille flow for the hydraulic diameter.

인가 전력에 대한 온도 변화의 측정 결과는 그림 6과 같다. 자성 유체의 온도에 따른 점도 변화 실험에 앞서 압력차의 보정을 위해 초순수(Deionized Ultra Pure Water)를 작동 유체로 한 실험을 수행한다. 압력차의 보정은 완전 발달한 유체의 속도 구배가 층류의 조건을 만족시킨다는 전제하에서 Hagen-Poiseuille flow가 되었을 때의 각각의 수력직경에 대한 보정계수(Correction coefficient)를 구하기 위해서 수행한다. 실제 실험 결과 계산값보다 실험값이 다소 높게 나오는데(그림 7), 이는 Channel 벽면의 표면 거칠기에 기인한다.

5. 측정 결과

본 연구에서는 미세유로 내부를 채우고 있는 자성유체의 온도 상승에 따른 급격한 점도 변화 특성을 이용한 마이크로밸브를 제작하였으며 그림 5와 같은 측정 장치를 구성하였다. 실험시 시편내 Folded film heater 전극에 전류를 인가하여 상온에서부터 100 °C까지 온도를 높여가며 각 온도 구간에서의 압력 손실을 측정하였다. 그림 8에서는 이에 대한 실험 결과를 나타낸다.

자성유체가 채워진 미세유로에서 압력 손실은 70 °C 이상의 온도에서는 그리 큰 변화를 보이지 않고, 오히려 25 °C~50 °C 구간에서 큰 변화를 보이고 있다. 이 결과는 온도에 따른 자성유체의 점도 변화(그림 3)를 감안하면 충분히 설명이 가능하다. 즉, 상온에서 자성유체의 점도는 약 1,000 cP정도이나, 50 °C정도까지 온도를 올릴 경우 약 300 cP정도로 급격히 떨어지게 된다. 반면, 70 °C~100 °C에서의 점도 변화량은 100 cP정도이므로 25 °C~50 °C에서의 점도 변화량 700 cP에 비

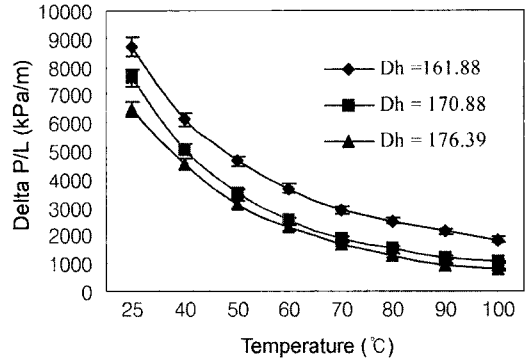


그림 8. 온도 변화에 따른 압력 손실

Fig. 8. The pressure drop due to temperature changes.

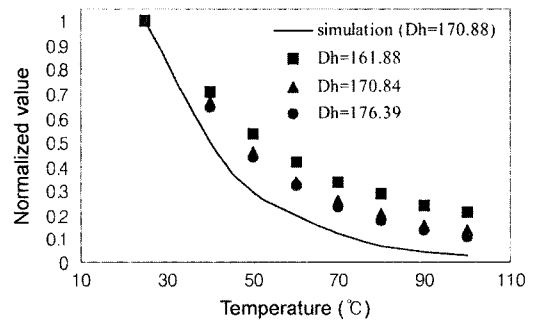


그림 9. 온도에 따른 각 수력직경별 정규화된 압력손실 측정값과 시뮬레이션 결과

Fig. 9. The normalization of measured pressure drop with respect to maximum pressure drop at room temperature and simulation result due to temperature changes for each hydraulic diameter.

해 매우 작다. 따라서, 온도에 따른 압력 손실은 그림 8과 같은 결과를 얻을 수 있다. 측정된 압력 손실과 비교하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 그림 9에 결과를 나타낸다. 그림 9에서 y-축은 각 수력 직경에 대해 상온에서의 최대 압력 손실에 대한 정규화된 압력 손실을 나타낸다. 시뮬레이션 결과와 실제 측정 결과와 차이점이 발생하는 이유는 저장소에서 가열된 자성유체가 미세유로를 통과하면서 열을 빼앗기게 되므로, 이로 인해 초기 가열된 상태에서의 점도에 비해 상대적으로 높은 점도 특성을 지닌 채 미세유로를 통과하기 때문이다. 수력 직경이 작을 경우 압력 손실 정도는 수력 직경이 큰 경우에 비해 작게 된다. 일반적인 유체의 점성 특성은 유체의 점도(Fluid viscosity)와 유로 벽면의 거칠기에 따른 Roughness viscosity의 합으로 표현되는데^[6], 유로의 폭이 작을수록 Roughness viscosity의 영향이 점점 커지기 때문이다. Roughness viscosity의

영향은 점성제어를 통한 유체 제어를 목적으로하는 본 연구에서는 매우 중요한 고려사항이며, 작은 수력직경에서도 Roughness viscosity의 영향성을 무시할 수 있는 마이크로밸브 설계 변수 추출이 필요하다.

6. 결 론

본 연구는 자성유체의 온도 변화에 따른 점도 변화 특성을 이용하여 Chemistry On a Chip 제작의 핵심 부품인 마이크로밸브 제작을 위한 연구이다.

본 연구를 위해 유체 플러그형 마이크로밸브를 제작하여 자성유체의 미세 거동 현상을 파악하였으며, 자성유체의 온도가 25 °C~50 °C인 경우에 마이크로밸브 작동 효과를 얻을 수 있음을 실험을 통해 검증하였다. 자성유체를 이용할 경우 밸브 작동을 위해 고온(100 °C)의 작동 조건이 필요하지 않다는 점은 마이크로밸브의 응답 속도 향상 및 자성유체의 온도에 의한 불필요한 화학반응 유도 가능성을 배제할 수 있다는 점에서 응용시스템 적용 가능성을 넓혀주고 있다. 현재 본 연구에 대한 추가 실험을 위해 열공압형 마이크로 펌프의 발생압력을 제어할 수 있는 Micro Pressure Regulator 및 마이크로밸브에 응용하기 위한 마이크로시스템을 제작중이다.

감사의 글

이 연구는 2002년도 서강대학교 교내 연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

참고 문헌

- [1] Wonchul Sim, Jae-geun Oh, and Bumkyoo Choi, "Fabrication and Experiment of a New Microactuator using Magnetic Fluids", *Proceedings of the 1st IMS*, 19-21 April 2001.
- [2] H. Janocha, "Application Potential of Magnetic Field Driven New Actuators", *Sensors and Actuators A 91*, 126-132, 2001.
- [3] Frank M. White, "Fluidmechanics", *Mcgraw Hill International*, 3rd Ed., 700-701, 1994.
- [4] Daniel Baechi and Rudolf Buser, "Suspension Handling System", *Sensors and Actuators*, B 63, pp. 195-200, 2000.
- [5] R. E. Rosensweig, "Ferrohydrodynamics", *Cambridge Univ. Press*, 1985.
- [6] W. Qu, Gh. M. Mala, and D. Li, "Heat Transfer for Water Flow in Trapezoidal Silicon Microchannels", *Int. Journal of Heat and Mass Transfer* 43, 3925-3936, 2000.

최 범 규

- 1981년 서울대학교 기계공학과 졸업
- 1983년 동대학원 기계설계학과 졸업(석사)
- 1992년 Univ. of Wisconsin 기계 공 학과 졸업(공학박)
- 1984년 ~ 1986년 KIST CAD/CAM 연구실 연구원
- 1986년 ~ 1994년 펜실바니아 주립대 연구 조교
- 1992년 ~ 1994년 위스콘신 대학 CxRL 근무
- 1994년 ~ 1997년 삼성전자 주식회사
- 1997년 ~ 현재 서강대학교 기계공학과 부교수
- 주관심분야 : 구조 해석, Micro Mirror, Sensor

오 재 근

- 1996년 서강대학교 전자공학과 졸업
- 2000년 서강대학교 기계공학과 졸업(석사)
- 2003년 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

안 정 재

- 2001년 서강대학교 기계공학과 졸업
- 2003년 서강대학교 기계공학과 졸업(석사)
- 주관심분야 : Microfluidics, Bio MEMS