

# 전자기 저항을 이용한 압전 구동방식 마이크로 펌프의 내부유동 특성과 펌핑성능에 대한 수치해석적 연구

## A Numerical Study on the Internal Flow Characteristics and Pumping Performance of a Piezoelectric-based Micropump with Electromagnetic Resistance

안용준<sup>1</sup>, 오세홍<sup>1</sup>, 김창녕<sup>2,✉</sup>

Yong Jun An<sup>1</sup>, Se Hong Oh<sup>1</sup> and Chang Nyung Kim<sup>2,✉</sup>

<sup>1</sup> 경희대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kyung Hee Univ.)

<sup>2</sup> 경희대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee Univ.)

✉ Corresponding author: cnkim@khu.ac.kr, Tel: 031-201-2578

Manuscript received: 2010.3.26 / Revised: 2010.6.24 / Accepted: 2010.7.26

*In this study a numerical analysis has been conducted for the flow characteristics and pumping performance of a piezoelectric-based micropump with electromagnetic resistance exerted on electrically conducting fluid. Here, electromagnetic resistance is alternately applied at the inlet and outlet with alternately applied magnetic fields in association with the reciprocal membrane motion of the piezoelectric-based micropump. A model of Prescribed Deformation is used for the description of the membrane motion. The internal flow characteristics and pumping performance are investigated with the variation of magnetic flux density, tube size, displacement of membrane and the frequency of the membrane. It turns out that the current micropump has a wide range of pumping flow rate compared with diffuser-nozzle based micropumps.*

Key Words: Micro Pump (마이크로펌프), MHD (전자기유체역학), Numerical Analysis (수치해석), Lorentz Force (로렌츠 힘)

### 기호설명

B = Magnetic flux density [T]  
D = Diameter [m]  
F = Lorentz force [ $kg \cdot m/s^2$ ]  
J = Current density [ $A/m^2$ ]  
P = Pressure [ $kg/ms^2$ ]  
t = Time [s]  
u = Velocity [m/s]  
V = Voltage [V]  
 $\mu$  = Dynamic viscosity [ $kg/m \cdot s$ ]  
 $\rho$  = Density [ $kg/m^3$ ]  
 $\sigma$  = Electrical conductivity [S/m]

$\phi$  = Electric potential [V]

### 1. 서론

최근에 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 기술의 발전과 더불어 마이크로 가공기술이 비약적으로 발전하고 있는데 이에 따라 여러 종류의 마이크로 소자(micro device) 및 마이크로 시스템(micro system)에 관한 연구개발이 이루어지고 있다. 특히 미소량의 유체를 제어하기 위한 마이크로 유체시스템(micro fluidic-system) 및 유체기기(micro fluidic-device)의 연구도 활발히 이루어지고 있다. 마이크로 유체기기의 핵심소자 중의 하나인 마이

크로 펌프의 설계와 제작은 마이크로 시스템 설계 기술, 마이크로 가공기술, 마이크로 유체역학 등 다양한 지식과 첨단기술을 필요로 하며 바이오/의료 응용기기의 연구에 활용될 수 있다.<sup>1</sup> 마이크로 펌프는 일반 펌프와 달리 그 크기가 매우 작고 미소유량을 마이크로 채널을 통해 이송하기 때문에 점성효과가 크게 중요하다.

박막의 진동으로 유체가 이송되는 마이크로 펌프의 초기 연구에는 캔틸레버 형태의 체크밸브가 사용되었다. 하지만 체크밸브 사용 시 큰 압력강하와 장시간 사용 시 캔틸레버의 파손 등이 발생되고 마이크로 펌프 성능이 저하된다. 이러한 문제를 극복하기 위해 valveless 마이크로 펌프에 대한 여러 가지 연구가 진행되고 있는 가운데 디퓨저/노즐을 이용하여 유동제어를 하는 valveless 마이크로 펌프가 그 동안 많이 주목받았다. 그러나 디퓨저/노즐 원리를 이용한 마이크로 펌프는 디퓨저와 노즐의 유동 저항의 차이가 현격히 크지 않기 때문에 펌핑 효과가 작으며 펌핑유량의 범위가 작다.

밸브를 제거한 valveless 압전구동방식 마이크로 펌프에 관한 기존의 몇몇 연구를 살펴보면 다음과 같다. Stemme and Stemme<sup>2</sup> 은 디퓨저/노즐의 원리를 이용한 새로운 형태의 valveless 마이크로 펌프를 제작하고, 동일한 사이즈의 수동형 체크밸브를 갖는 펌프와 비교함으로써 valveless 펌프의 장점을 제시하였다. Nguyen and Yuang<sup>3,4</sup> 은 miniature valveless pump 를 제작하였으며, Timoshenko 의 이론을 이용하여 membrane 의 deform 곡선을 가정하여 수치해석을 수행하여 실험치와 비교하였다. Song<sup>5</sup> 은 membrane 의 deform 곡선을 원의 한 부분으로 가정하여 수치해석하고 실험과 비교하였다. Park et al.<sup>6</sup> 은 실리콘 웨이퍼와 파이렉스의 접합기술을 기반으로 제작된 valveless 마이크로 펌프에 대한 실험적 수치해석적 연구를 수행하였다.

MHD(magnetohydrodynamics)는 전자기유체에서 전자기적 에너지와 기계적 에너지의 전환을 다루는 학문이다.<sup>7</sup> 주로 MHD 는 갈륨, 수은과 같은 액체금속과 이온화된 가스를 펌핑하고 제어하는 데 응용되고 있고, magnetic fusion device 에 대한 연구에도 사용되고 있다. 그 동안 마이크로 기기에서 무궁무진하게 사용될 수 있는 전자기력은 매우 매력적이었으나, 그리 큰 관심을 받지 못했다. 최근 몇몇 연구자<sup>8,9</sup> 들에 의해 MHD 마이크로 펌프에 대한 긍정적인 평가가 발표되면서 MHD 펌프에 대한 관심이 높아졌다. 최근에 발표된 MHD 마이

크로 펌프에 대한 연구 중에 Jang and Lee<sup>8</sup> 는 바닷물을 작동유체로 한 DC MHD 마이크로 펌프를 제작하고 수두 차이를 측정하여 MHD 마이크로 펌프의 성능에 연구하였고 이와 비슷하게 Huang et al.<sup>10,11</sup> 은 여러 수용액에 대하여 MHD 마이크로 펌프에 성능에 대해 연구하였다. 최근 들어 Patel and Kassegne<sup>12</sup> 은 전기침투와 열을 이용한 MHD 마이크로 펌프에서 채널 형상이 펌핑 성능에 미치는 영향을 수치해석적으로 연구하였으며 Nguyen and Kassegne<sup>13</sup> 은 작동유체의 이온화에 의해 발생하는 버블을 분리하는 릴리즈시스템을 이용한 높은 전류의 DC MHD 마이크로 펌프에 대해 실험 및 수치해석적으로 연구를 하였다. 또한 Lim 과 Choi<sup>14</sup> 은 MHD 마이크로 펌프에서 인가된 전류에 따른 유량을 실험 및 수치해석적으로 연구하여 인가되는 전류가 일정 이상으로 높아지면 펌프를 통해 이송되는 유체의 유량이 급속하게 감소되는 것을 밝혀냈다.

본 연구에서는 통전유체(electrically conducting fluid)의 미세 유동을 제어하기 위한 마이크로 펌프에서 valveless 마이크로 펌프의 장점을 살리면서 넓은 범위의 펌핑유량을 갖게 하기 위하여 로렌츠 힘(Lorentz force)에 의한 유동저항 원리를 이용하는 압전구동방식 마이크로 펌프의 유동을 수치해석하고 펌핑성능을 평가하고자 한다.

본 연구는 마이크로 펌프의 입·출구 튜브에 인가되는 자기장의 세기, 입·출구 튜브 단면적의 크기, 압전디스크에 인가되는 전압에 따른 박막의 최대변위 등을 변수로 설정하였고 박막의 거동을 Prescribed Deformation model 로 구현하였다. 박막의 변위가 유체 유동에 영향을 주는 one-way coupling 의 방법으로 위의 설계 변수에 따른 마이크로 펌프의 유동 특성과 펌핑 성능을 평가하였다.

## 2. 지배방정식

### 2.1 유동저항으로 사용되는 Lorentz force

통전 유체가 튜브에서 흐를 때 그 유체의 유동 방향에 직각으로 자기장을 가하게 되면 유체에서 전류가 발생되고, 발생된 전류와 자기장에 의해 Lorentz force 가 생성되어 유체의 흐름을 방해하게 된다(Fig. 1).

자속  $\vec{B}_z$  가 걸려 있고 유체의 속도가  $\vec{u}$  일 때에 아래의 식과 같이 전류의 세기(전류밀도)  $\vec{j}$  가 발생된다.

$$\vec{J} = \sigma(-\nabla\phi + \vec{u} \times \vec{B}_a) \quad (1)$$

여기서,  $\phi$  는 전기포텐셜,  $\sigma$  는 통전유체의 전기전도도이다. 발생된 전류밀도와 자기장에 의해 아래의 식과 같이 Lorentz force,  $F$  가 발생된다.

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}_a \quad (2)$$

여기서, 로렌츠힘은 유체의 유동 방향과 반대로 작용된다. 이 힘이 유동 저항으로 작용되어 마이크로 펌프에서 유동 제어를 담당하게 된다

통전 유체를 펌핑하는 압전 구동방식 마이크로 펌프에서 압전 디스크가 상승할 때에 입구와 출구에서 모두 유동이 밖으로 향하려는 경향을 갖는다. 여기에서, 압전 디스크가 상승할 때에 입구측에 자기장을 걸어주어 유동저항을 발생시켜 작동유체가 출구로 쉽게 흐르도록 한다. 한편, 압전 디스크가 하강할 때에는 출구 쪽에서 유체가 chamber 내부로 유입되는 현상을 억제하기 위하여 출구측에 자기장을 걸어 주어 유동 저항을 발생시켜 작동유체가 입구에서 chamber 로 쉽게 흐르도록 한다. 이와 같이 로렌츠 힘(Lorentz force)을 이용하여 통전 유체의 흐름에 블록킹(blocking) 효과를 주어 박막

의 상승/하강 운동과 함께 입구측에서 출구측으로 유체를 이송시킬 수 있는 마이크로 펌프를 만들 수 있다.

### 2.2 지배방정식, 초기조건과 경계조건

MHD 유동에서 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식이 지배방정식으로 사용된다. 또한 유동장 내 유도전류 및 로렌츠 힘을 계산하기 위하여 Maxwell's 방정식이 고려되어야 한다. 비정상, 비압축성, 층류 유동 그리고 물성치가 상수일 때, 통전 유체에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

유체의 연속방정식

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (3)$$

유체의 운동방정식

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{J} \times \vec{B} \quad (4)$$

전하 보존의 법칙

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (5)$$

오옴의 법칙

$$\vec{J} = \sigma(-\nabla\phi + \vec{u} \times \vec{B}) \quad (6)$$

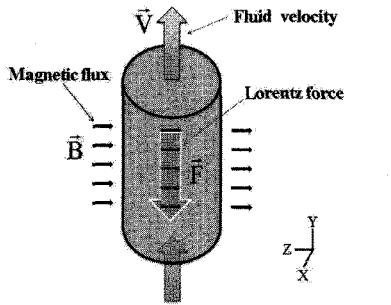
Induction 식

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{B} = \alpha_m \nabla^2 \vec{B} + (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{u} \quad (7)$$

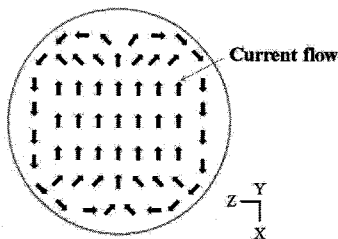
여기서,  $J$  는 전류의 세기,  $B$  는 자장의 세기,  $\phi$  는 전기포텐셜,  $\alpha_m = (\mu_0\sigma)^{-1}$  이고  $\mu_0$  와  $\sigma$  는 각각 자기 투과율(magnetic permeability), 전기 전도도(electrical conductivity)이다. 액체금속의 경우에는 전류의 흐름에 의하여 유도되는 자장의 세기가 미미하므로  $\vec{B}_a = \vec{B}$  가 성립한다.

본 수치해석에서는 전체 계산영역에서  $\vec{u} = 0$ ,  $\vec{J} = 0$ ,  $P = 0$ ,  $\vec{B} = 0$  이 초기조건으로 사용되었다. 유동에 대하여 점착조건(no-slip condition)이 사용되었다. 작동유체는 통전유체이지만 마이크로 펌프 구조물은 전기가 통하지 않는다고 가정하여 작동유체를 둘러싸고 있는 계산영역의 표면에서 전류의 세기에 대한 아래의 식이 성립한다.

$$\vec{J} \cdot \vec{n} = 0 \quad (8)$$



(a) Lorentz force exerted in the tube



(b) current flow in a cross-section of a tube

Fig. 1 Schematic diagram for the Lorentz force and induced current

여기에서  $\vec{n}$ 은 단위 법선벡터이다.

### 3. 수치해석 모델

본 수치해석 연구에서 고려된 마이크로 펌프의 2 차원 단면 형상이 Fig. 2 에 나타나 있다. 마이크로 펌프의 chamber 높이는 0.5 mm, 지름은 40 mm 이고 원형의 chamber 윗면에 수직으로 튜브가 설치되어 있다. 챔버의 바닥에는 시간에 따라 상승 하강하는 박막(membrane)이 있다. 튜브의 총 길이는 24 mm 이며, 챔버의 윗면에서 7 mm 되는 지점부터 17 mm 되는 지점까지의 영역에 자기장이  $-z$  의 방향으로 가해진다. 계산에 사용된 격자계에는 Fig. 3 에 제시된 바와 같이 전 영역에 걸쳐 hexagonal grid 가 사용되었다. 튜브와 chamber 가 연결되는 부분에서는 박막의 상하 움직임에 의해 유동이 급격히 변화하며 또 자기장이 인가되는 영역의 가장자리에서는 유체의 속도 변화가 심하므로

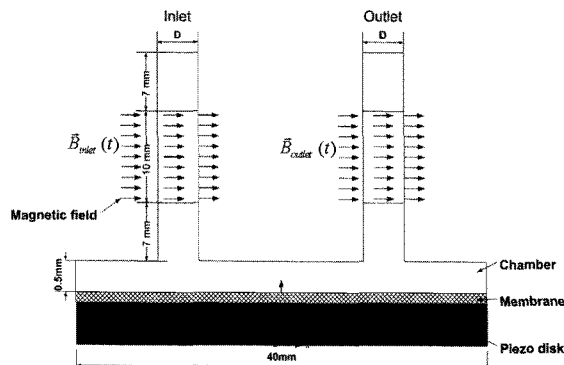


Fig. 2 Cross-sectional view of the piezoelectric micropump with electromagnetic resistance

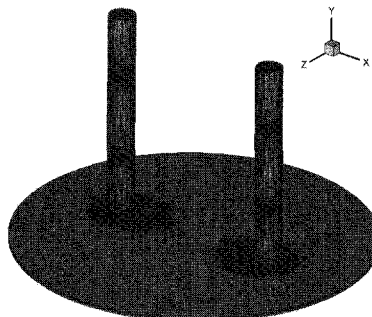
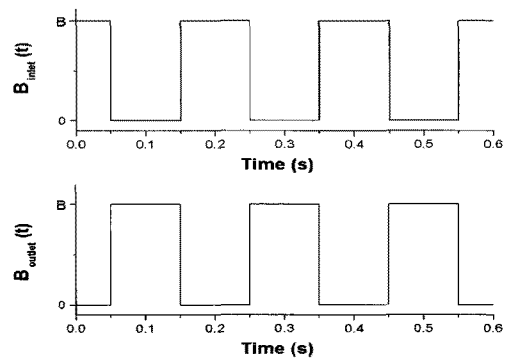


Fig. 3 Grid system for the piezoelectric micropump (Case 3)

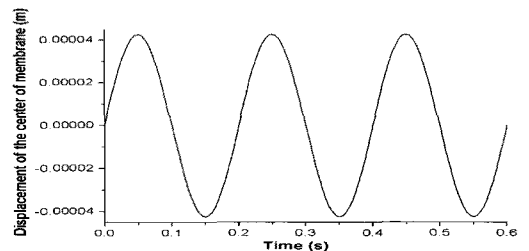
이러한 영역에서는 size function 을 이용하여 격자를 더욱 조밀하게 설치하였다. 본 연구는 상용 코드 FLUENT 을 사용하였는데 MHD 의 유동을 해석 하기 위해 FLUENT 의 개발 모듈인 MHD 모듈을 사용하였고, 박막의 상승과 하강을 모사하기 위해서 Spring-Based Smoothing Method 가 이용되었다. 본 격자계에서 사용된 격자의 셀(cells)은 마이크로 펌프의 형상에 따라 약 500,000~800,000 개가 사용되었다.

본 연구에서 고려된 압전디스크 구동방식 마이크로 펌프에서는 0.2 s 가 한 주기로 Fig. 4(a)는 박막의 움직임에 따른 입구측 및 출구측에 인가되는 자기장의 거동을 시간에 따라 나타내었고 Fig. 4(b)는 멤브레인의 중앙부위의 거동을 나타내고 있다. 박막은 0 ~ 0.05 s 동안 상승하고 0.05 ~ 0.15 s 동안 하강하며 다시 0.05 ~ 0.15 s 동안은 상승하여 한 주기를 이룬다. 또한 압전디스크가 상승할 때에 입구 튜브에 자기장이 가해지며 압전디스크가 하강할 때에는 출구 튜브에 자기장이 가해진다.

본 연구에서는 자기장의 세기( $B = 0.1 \sim 0.5 T$ ), 입출구 튜브의 직경( $D = 1 \sim 5 mm$ ), 압전디스크에



(a) magnetic field



(b) Displacement

Fig. 4 The magnetic fields applied at the inlet/outlet and the displacement of the center of the membrane

인가되는 전압( $\phi = 200 \sim 600 V$ )에 따른 마이크로 펌프의 펌핑 성능을 파악하였는데 Table 1 에 수치 계산의 조건(case)들이 제시되어 있다. 또한 case 3 을 기준으로 하여 펌프의 구동주파수( $f = 5 \sim 65 Hz$ )에 따른 펌핑유량의 변화를 예측하였으며, 더불어 입출구 양단의 정압 차이에 따른 펌프의 펌핑유량을 구함으로서 펌프의 성능을 평가하였다.

Table 1 The calculation conditions

	B (Tesla)	D (mm)	Voltage (V)
Case 1	0.1	3	400
Case 2	0.2	3	400
Case 3	0.3	3	400
Case 4	0.4	3	400
Case 5	0.5	3	400
Case 6	0.3	1	400
Case 7	0.3	2	400
Case 8	0.3	4	400
Case 9	0.3	5	400
Case 10	0.3	3	200
Case 11	0.3	3	300
Case 12	0.3	3	500
Case 13	0.3	3	600

본 연구에 사용된 MHD 마이크로 펌프의 통전 유체는 갈륨(gallium)인데 35°C에서의 물성치는 전기전도도  $\sigma = 3,880,000 S/m$ , 밀도  $\rho = 5,904 kg/m^3$ , 점도  $\mu = 0.00189 kg/m \cdot s$  이다.

본 연구에서는 박막의 변형을 모사하기 위하여 Timoshenko<sup>15</sup> 의 이론에 의한 박막의 변형을 나타내는 Prescribed Deformation 방식을 이용하였는데, 실제로 two-way coupling 을 사용하는 FSI 방식과 one-way coupling 을 사용하는 Prescribed Deformation 방식이 약 50 Hz 이하의 저주파 영역에서는 거의 같은 박막의 변형을 제공한다는 것을 확인하였다. 즉 저주파 영역에서는 유체유동이 압전디스크의 거동에 미치는 효과가 미미하며 압전디스크의 거동이 유체유동에 단방향(one-way)으로 영향을 미치므로 Prescribed Deformation 방식을 사용할 수 있었다. Prescribed Deformation 에서 사용된 디스크 변형에 의한 박막의 거동을 나타내는 Timoshenko 의 식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$dy(x,t) = A_0(t) \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]^2 \quad (9)$$

where  $A_0(t) = D_0 \times \sin \left( 2 \times \pi \times t \times \frac{1}{\lambda} \right)$

식 (9)에서 R 은 chamber 의 반지름이고,  $A_0(t)$  는 전압과 동일한 형태인 sine 파 형태로 가정된 압전디스크의 중심에서의 시간에 따른 y 방향 변위이며  $\lambda$  는 sine 함수의 한 주기를 나타내며  $D_0$  는 membrane 의 최대변위로 이것은 압전디스크에 인가되는 전압(200 V ~ 600 V)에 따라 22.5 ~ 62.5  $\mu m$  로 설정하였다.

chamber 의 바닥면에서 식 (9)에 따른 박막의 변위가 유체의 운동을 야기하는데, 박막의 거동이 UDF(User-Defined Function)으로 구현되었다.

#### 4. 수치해석 결과

통전유체를 이송시키는 기존의 MHD 펌프에 대한 연구에서는 Lorentz force 만을 이용하여 유체를 이동시키고자 하였다. 그러나 이러한 기존의 MHD 펌프는 인가전류가 커지거나 장시간 사용하였을 때 이온화에 의하여 버블이 생성되어 펌프의 효율을 떨어트리는 단점이 있었다. 그러나 본 연구에서는 Lorentz force 를 유체의 이송에 직접 이용하지 않고 유체 흐름을 방해하는 저항으로 이용하여 기존 MHD 펌프의 단점을 개선하였다. 또한 본 연구에서 수행된 통전 유체의 전자기 저항을 이용하는 마이크로 펌프에서는 기존의 valveless 마이크로 펌프인 디퓨저/노즐을 이용한 마이크로 펌프보다 넓은 범위의 펌핑유량을 보이고 있다.

Fig. 5 는 마이크로 펌프의 튜브에 자기장이 인가됐을 때 튜브의 단면에서 전류가 유도되어 흐르는 것을 나타내고 있다. 이렇게 유도된 전류는 다시 자기장과 작용하여 유동방향의 반대방향으로 작용하는 Lorentz force(Fig. 6) 생성하게 되어 마이크로 펌프의 밸브 역할을 하게 된다. 본 연구에서는 자기장의 세기가 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 T(Tesla) 인 5 가지 경우에 대해 수치해석을 하였다. Fig. 7, Fig. 8 은 각각 자기장이 입구 측 튜브에 인가되었을 때( $t = 0.425 s$ ) 유체의 흐름을 나타내는 속도 분포와 속도 벡터 그림이다. 박막이 상승함에 따라 펌프 내부에 있는 통전유체는 입구와 출구를 통하여

외부로 빠져나가려는 경향을 갖지만 입구 튜브에 가해진 자기장에 의하여 발생된 Lorentz force 는 유체의 흐름을 방해하며 이에 따라 출구 튜브에서의 유체속도는 입구 튜브에서 유체속도보다 크게 된다. 한편, 박막이 하강함에 따라 계산 영역 내로 통전유체가 들어오려 하지만 출구 튜브 측에 자기장이 가해져 있기 때문에 유동 저항이 발생하여 출구 측 튜브에서보다 입구 측 튜브에서 훨씬 많은 유량이 나타나게 된다. 이로써 박막이 상승하고 하강하는 동안 통전 유체가 입구로부터 출구로 흐르는 순 유동(net flow)이 발생하게 된다.

Fig. 9는 자기장의 세기가 0.1 T, 0.2 T, 0.3 T, 0.4 T, 0.5 T인 경우에 대하여 마이크로 펌프의 입/출구 측 질량유량을 나타낸 그림이다. 본 수치해석에서는 계산영역으로 들어오는 유량을 양의 유량으로, 계산영역 밖으로 나가는 유량을 음의 유량으로 정의하였다. 여기에서 자기장의 세기가 커질수록 입/

출구 유량을 나타내는 두 개의 곡선이 서로 멀어 지므로 순유량(net mass flow rate)이 증가함을 보이고 있다. Fig. 9의 각각의 경우에서 보인 두 개의 곡선의 차이를 시간적분하여 얻은 순(net) 펌핑유량이 자기장의 세기에 따라 증가하고 있다(Fig. 10). 여기에서 자기장의 세기에 의존하는 펌핑유량의 범위가 상당히 넓다.

박막의 왕복운동에 의하여 유동이 유발될 때에 chamber 내부와 입출구 튜브에서 유동저항이 있으며 입·출구에서 발생하는 유동저항은 입출구의 단면적과 이곳을 통하는 유체속도에 의존한다. 한편, 자기장이 걸려있는 상황에서 입/출구의 단면적이 작아지면 일반적으로 유체의 속도가 빨라지고 유체의 속도와 자기장에 의해 생기는 유도전류가 커지기 때문에 Lorentz force의 크기가 증가하여 펌핑 성능이 향상될 수 있다. 그러나, 마이크로 펌프의 튜브 단면적 크기에 따라 위에서 언급된 요소가 복합적으로 어우러져 작용하기 때문에 펌핑 성

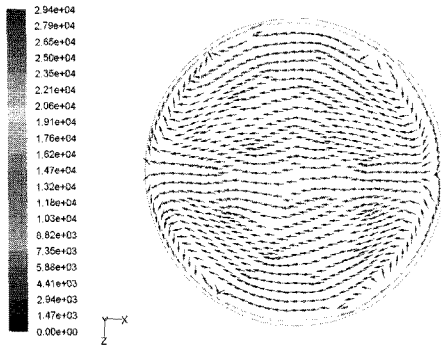


Fig. 5 Current flows in the cross section at the inlet (Case 3:  $B = 0.3 T$ ,  $y = 12 mm$ ,  $t = 0.425 s$ )

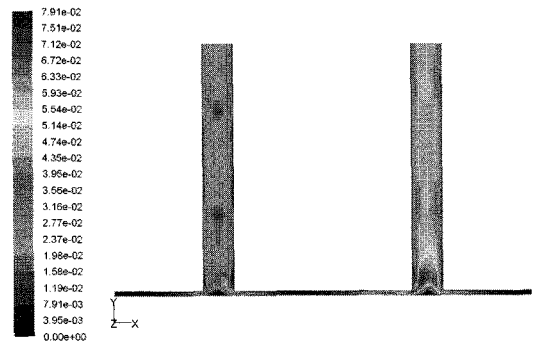


Fig. 7 Velocity contour in the micropump (Case 3:  $B = 0.3 T$ ,  $t = 0.425 s$ )

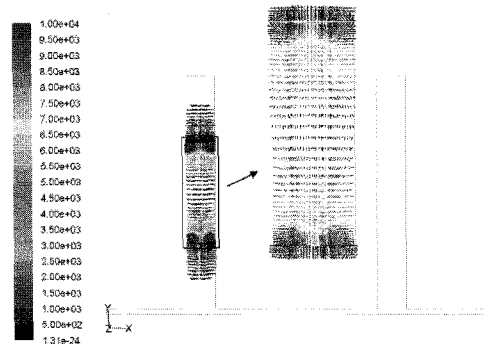


Fig. 6 Lorentz force in the mid x-y plane normal to the magnetic field applied at the inlet (Case 3:  $B = 0.3 T$ ,  $t = 0.425 s$ )

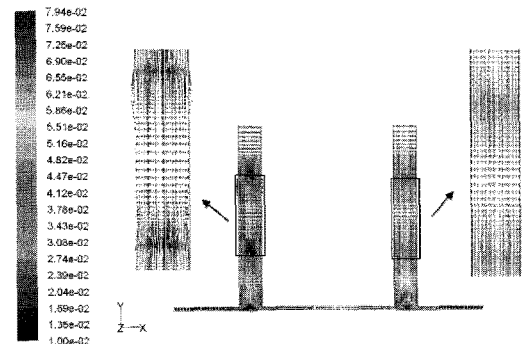


Fig. 8 Velocity vectors in the micropump (Case 3:  $B = 0.3 T$ ,  $t = 0.425 s$ )

능을 직관적으로 판단하기 어렵다.

본 연구에서는 튜브 직경의 크기가 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm 인 경우에 대하여 수치해석을 하였다. Fig. 11 은 튜브 크기의 변화에 따른 마이크로 펌프의 출구 측 순(net) 질량유량을 나타내고 있다. 튜브의 직경이 증가함에 따라 펌핑유량은 증가하다 감소하고 있으며 D = 3 mm 인 경우에 최대 질량유량이 나타나고 있다. 이 결과는 전자기 저항을 이용한 마이크로 펌프에서 최대의 펌핑유량을

가능하게 하는 튜브단면적이 존재한다는 것을 의미한다.

마이크로 펌프의 박막의 상하운동을 시키는 압전디스크는 음의 전압을 갖는 sine 파형의 전류를 이용하여 구동하게 된다. 압전디스크에 인가되는 음의 전압의 peak 값이 커지게 되면 압전디스크의 변위가 커지게 되어 박막의 변위가 커지게 되며 이로써 단위시간당 입·출구 튜브에서의 질량유량이 증가한다. Fig. 12 는 마이크로 펌프의 압전디스크에 인가되는 전압에 따른 순 질량유량을 보이고 있다. 마이크로 펌프에 인가되는 전압이 커질수록 순(net) 질량유량이 거의 선형적으로 증가하고 있다.

또한 자기장의 세기(B) 0.3 T, 튜브의 직경(D) 3 mm, 압전디스크 인가전압(V) 400 V 의 조건에서 압전디스크의 구동주파수의 변화( $f = 5 \text{ Hz} \sim 65 \text{ Hz}$ )에 따른 순(net) 펌핑유량의 변화가 Fig. 13 에 나타나 있다. 구동주파수가 증가함에 따라 순(net) 질량유량이 현저하게 증가하다가 약 40 Hz 의 구동주파수 이후로는 구동주파수 증가에 따른 순유량의 증가는 미미하였다.

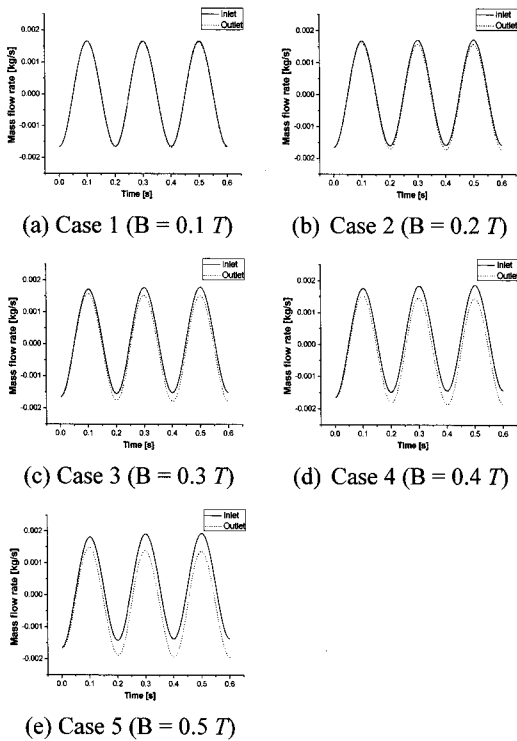


Fig. 9 Mass flow rates at the inlet and outlet with different magnetic flux densities

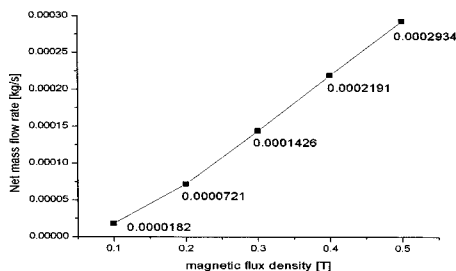


Fig. 10 Net mass flow rates with different magnetic flux densities

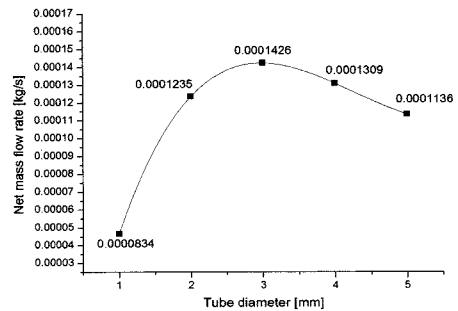


Fig. 11 Net mass flow rates with different tube sizes

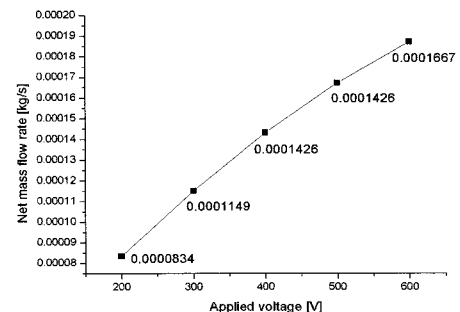


Fig. 12 Net mass flow rates with different applied voltages

자기장의 세기(B) 0.3 T, 튜브의 직경(D) 3 mm, 압전디스크 인가전압(V) 400 V 의 조건에서 본 마이크로 펌프의 정압수두와 토출유량 간의 관계를 나타내는 성능곡선이 Fig. 14 에 제시되어 있다. 주어진 조건 하에서 펌프 입/출구 양단의 정압 차이가 약 0 ~ 9 Pa 의 구간에서 대략 0 ~ 0.0013 kg/s 의 순유량을 나타내고 있다.

Fig. 10 에 제시된 펌핑유량의 범위를 펌프 단위 체적당 펌핑유량으로 나타내면 약 0 ~ 4,774  $\mu\text{l}/\text{min}\cdot\text{cm}^3$  이 되는데 이는 Yong<sup>16</sup> 의 연구 결과인 1,432  $\mu\text{l}/\text{min}\cdot\text{cm}^3$  보다 그 최대치가 훨씬 크다. 또 위의 펌프 단위체적당 펌핑유량을 펌프 단위 체적당 펌핑 질량흐름율로 나타내면 0 ~ 28,186  $\mu\text{l}/\text{min}\cdot\text{cm}^3$  이 된다. 이는 압전 구동방식 마이크로 펌프에 대한 Shen<sup>17</sup> 및 Choi<sup>18</sup> 의 연구 결과인 19,098  $\mu\text{l}/\text{min}\cdot\text{cm}^3$  및 20,562  $\mu\text{l}/\text{min}\cdot\text{cm}^3$  보다 더 큰 최대값을 갖는 펌프 단위체적당 펌핑 질량흐름율을 의미한다.

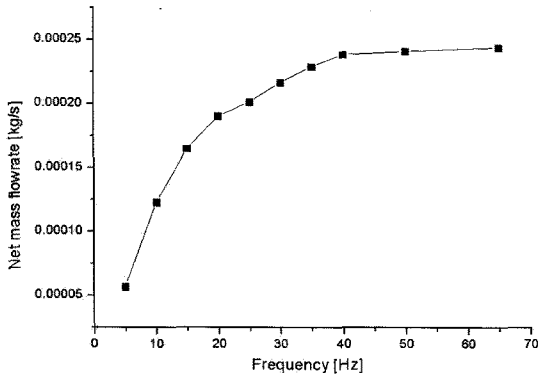


Fig. 13 Net mass flow rates with different frequencies of a piezo disk

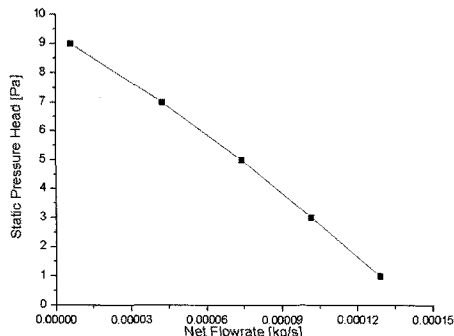


Fig. 14 Static pressure head with net mass flow rates

### 5. 결론

본 연구에서는 MHD 의 원리를 이용한 압전구동방식 마이크로 펌프의 펌핑유량을 비정상 3 차원으로 수치해석하였다. 마이크로 펌프의 박막의 거동은 Prescribed Deformation 방식을 이용하였고, FLUENT 에 의하여 해석되는 유체유동에 MHD 모델이 이용되어 전자기 효과가 함께 고려되었다. 전자기 저항을 유체유동의 제어에 사용한 마이크로 펌프의 연구가 이제까지는 거의 없었다. 본 연구에서는 자기장의 세기, 튜브의 크기, 압전디스크에 인가되는 전압의 세기에 따른 마이크로 펌프의 펌핑성능이 해석되었다.

여기에서 통전유체의 전자기 저항을 이용한 마이크로 펌프가 기존의 valveless 마이크로 펌프를 대체하여 펌핑효과를 낼 수 있다는 것을 보였다. 본 연구에서 자기장의 세기에 따라 자기장이 증가할수록 펌핑유량은 증가하였으며 펌프의 펌핑성능을 극대화할 수 있는 튜브의 지름값이 존재한다는 것을 보임으로 마이크로 펌프의 기본 설계방법을 제시하였으며 압전디스크의 인가되는 전압의 Peak 값이 커질수록 펌핑유량이 거의 선형적으로 증가함을 보였다. 또한, 압전 디스크의 구동주파수의 증가에 따른 펌핑유량 변화의 특성을 제시하였으며, 펌프의 입/출구 양단의 정압 차이에 따른 펌핑유량의 변화 특성이 밝혀졌다.

전자기 저항을 이용한 마이크로 펌프는 자장의 세기를 제어함으로써 펌핑유량을 간단히 조절할 수 있으며 또 펌핑유량의 범위가 넓다는 장점으로 인하여 기존의 디퓨저/노즐을 이용한 마이크로 펌프에 비해 보다 다양한 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 자기장 인가를 위한 별도의 장치를 설치해야 한다는 점은 펌프를 소형으로 제작하는 데에 어려운 점으로 작용할 수 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다.

본 연구는 작동유체가 통전유체일 때 전자기 저항을 이용하여 마이크로 펌프의 유동을 제어할 수 있다는 점을 수치해석적으로 보였고, 또한 valveless 마이크로 펌프의 장점을 살리면서 펌핑성능이 뛰어난 마이크로 펌프를 개발할 수 있는 기본 토대를 마련하였다. 또한 본 연구의 수치해석의 결과는 이후의 통전유체를 이용한 마이크로 펌프에 대한 실험적 연구에 공헌을 할 수 있다.



## 후 기

본 연구는 한국연구재단의 기초연구사업(지역 대학우수과학자지원사업)에 의해 지원받아 수행되었습니다(과제번호:521-2007-1-D00067).

## 참고문헌

- Park, J. S., "Technology trends in the micro-devices and components," Korea Institute of Science and Technology Information, 2002.
- Stemme, E. and Stemme, G., "A valveless diffuser/nozzle-based fluid pump, Sensors and Actuators A," Vol. 39, No. 2, pp. 159-167, 1993.
- Nguyen, N. T. and Yuang, X. Y., "Numerical simulation of pulse-width-modulated micropumps with diffuser/nozzle elements," Nanyang Technological University, 2000.
- Nguyen, N. T. and Yuang, X. Y., "Miniature valveless pumps based on printed circuit board technique," Sensors and Actuators A, Vol. 88, No. 2, pp. 104-111, 2001.
- Song, Y. S., "Numerical simulation of flow in a piezoelectric diffuser/nozzle-based micropump for microfluidic application," Mechanical Engineering, MS Thesis, KAIST, 2002.
- Park, D. S., Choi, J. P., Kim, B. H., Chang, I. B. and Kim, H. Y., "The flow analysis and evaluation of the peristaltic micropump," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 2, pp. 195-202, 2004.
- Davison, P. A., "An Introduction to Magneto Hydrodynamics," Cambridge, 2001.
- Jang, J. and Lee, S. S., "Theoretical and experimental study of MHD micropump," Sensors and Actuators A, Vol. 80, No. 1, pp. 84-89, 2000.
- Lemoff, A. V. and Lee, A. P., "An ac magneto hydrodynamics micropump," Sensors and Actuators B, Vol. 63, No. 3, pp. 178-185, 2000.
- Huang, L., Wang, W. and Murphy, M. C., "A lumped-parameter model for a micro-pump based on the magnetohydrodynamics(MHD) principle," Proc. SPIE-Design Test Micro Fabrication, MEMS MOEMS, Vol. 3680, pp. 379-387, 1999.
- Huang, L., Wang, W., Murphy, M. C., Lian, K. and Ling, Z. G., "LIGA fabrication and test of a DC type magneto-hydrodynamics(MHD) Micro-pump," Micro System Technology, Vol. 6. No. 8, pp. 235-240, 2000.
- Patel, V. and Kassegne, S. K., "Electroosmosis and thermal effects in magnetohydrodynamic(MHD) micropumps using 3D MHD equations," Sensors and Actuators B, Vol. 122, No. 1, pp. 42-52, 2007.
- Nguyen, B. and Kassegne S. K., "High-current density DC magnetohydrodynamics micropump with bubble isolation and release system," Microfluid Nanofluid, Vol. 5, No. 3, pp. 383-393, 2008.
- Lim, S. S. and Choi, B. K., "A study on the MHD(magnetohydrodynamics) micropump with side-walled electrodes," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 23, No. 3, pp. 739-749, 2009.
- Timoshenko, S. P. and Woinosky-krieger, S., "Theory of Plates and Shells 3<sup>rd</sup> edition," McGraw Hill Book Co. Inc., 1959.
- Yong, J. K., Kim, C. N. and Kim, C. U., "An experimental study on the pumping characteristics of diffuser/nozzle based piezoelectric micropumps with different geometries and operating conditions," Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 33-40, 2009.
- Shen, C. Y. and Liu, H. K., "Fabrication and drive test of piezoelectric PDMS valveless micro pump," Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 31, No. 4 pp. 615-623, 2008.
- Choi, J. W., Yoon, J. S. and Kim, M. S., "A study on the performance characteristics of a new Bi-directional micropump using piezoelectric actuator," Journal of Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol. 30, No. 4, pp. 350-357, 2006.