

마이크로 정량펌프의 유동해석과 작동성능 평가

박대섭*, 최종필*, 김병희#, 장인배**, 김현영**

The Flow Analysis and Evaluation of the Peristaltic Micropump

Dae Seob Park*, Jong Pil Choi*, Byeong Hee Kim#, In Bae Chang**, Heon Young Kim**

ABSTRACT

This paper presents the fabrication and evaluation of mechanical behavior for a peristaltic micropump by flow simulation. The valve-less micropump using the diffuser/nozzle is consists of the lower plate, the middle plate, the upper plate and the tube that connects inlet and outlet of the pump. The lower plate includes the channel and the chamber, and the plain middle plate are made of glass and actuated by the piezoelectric translator. Channels and a chamber on the lower plate are fabricated on high processability silicon wafer by the DRIE(Deep Reactive Ion Etching) process. The upper plate does the roll of a pump cover and has inlet/outlet/electric holes. Three plates are laminated by the aligner and bonded by the anodic bonding process. Flow simulation is performed using error-reduced finite volume method (FVM). As results of the flow simulation and experiments, the single chamber pump has severe flow problems, such as a backflow and large fluctuation of a flow rate. It is proved that the double-chamber micropump proposed in this paper can reduce the drawback of the single-chamber one.

Key Words : Peristaltic micropump(정량 마이크로펌프), diffuser(디퓨저), nozzle(노즐), DRIE(Deep Reactive Ion Etching), backflow(역류)

1. 서론

MEMS라고 부르는 마이크로 가공기술은 마이크로 구조물, 센서, 액추에이터, 마이크로 로봇 등을 포함하는 광범위한 분야에 걸쳐 응용되고 있다. 1970년대에 반도체 공정에 기초한 몸체미세가공공정에 의해 압력센서가 생산되면서 태동한 마이크로 가공기술은 근래에 들어 IT 및 BT 사업과 연계되어 다양한 응용제품을 도출하면서 큰 시너지효과를 나타내고 있다. 특히, 의료 분야에서는 약물의 공

급, 시료의 분석 및 기기의 세척 등을 위하여 마이크로 펌프를 이용하려는 연구가 진행되고 있다. 유량을 정밀하게 제어하고 펌핑하기 위해서는 열과 같은 외부에 의한 영향으로 유체의 특성이 변화되지 않아야 하고, 유체의 역류가 발생하지 말아야 한다⁽¹⁾.

본 논문에서는 마이크로 펌프가 가지는 최대의 단점인 밸브 등 구동부의 피로파괴 문제를 근원적으로 해결하고 밸브 막힘의 위험성도 줄일 수 있는, 밸브리스(valve-less) 디퓨저/노즐(diffuser/nozzle)

접수일: 2003년 4월 9일; 게재승인일: 2003년 11월 14일
* 강원대학교 기계-메카트로닉스공학부 대학원
교신저자, 강원대학교 기계-메카트로닉스공학부
Email kbh@kangwon.ac.kr Tel. (033) 250-6374
** 강원대학교 기계-메카트로닉스공학부

식 마이크로 펌프^(2,3)를 실리콘 웨이퍼와 파이렉스의 접합기술을 기반으로 제작하여 나노 리터 단위의 미세유량 제어를 시도하였다. 또한 다양한 설계 변수의 변화에 따른 특성을 유한체적법을 이용한 마이크로 유동해석과 실제 제작된 마이크로 펌프의 성능시험을 통하여 비교 분석함으로써 최적의 설계 변수를 도출하였다. 또한 단일챔버 형태의 마이크로 펌프에서 흔히 발생하는 역류량을 줄이기 위하여 두 가지의 더블 펌핑챔버 모델을 제안하고 유동 해석을 통해 그 유용성을 밝혔다.

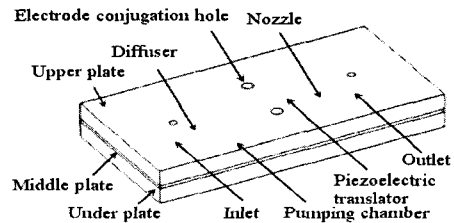
2. 마이크로 펌프의 구조 및 원리

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 마이크로 펌프의 구조를 보여주고 있다. 마이크로 펌프는 하판, 중간판, 상판들이 서로 접합된 구조로 전체 크기는 15×7.5×1.7mm이다. 하판의 재질은 실리콘이며 Fig. 1(a)에서 보듯이 하판에는 펌핑 챔버, 디퓨저 및 노즐부분을 포함하고 있으며 챔버 및 유로의 깊이는 80 μ m이다. 디퓨저와 노즐이 시작하는 부분의 폭은 80 μ m이고 끝나는 부분의 폭은 260 μ m이다. 또한 시작부분과 끝부분의 직선거리는 1080 μ m인데 이것은 디퓨저 각도와 점성저항 등에 연관되어 결정되는 값이다. 디퓨저와 노즐은 챔버의 바닥과 직각 방향을 이루고 있고 디퓨저 각도는 9.8°이다. 중간판의 크기는 15×7.5×0.2mm이며, 재질은 파이렉스 7740(탄성계수 : 63 GPa, 열팽창계수 : 3.26×10⁻⁶/°C)이다. 하판에 연결되는 입구와 출구는 유체가 흐를 수 있도록 직경이 500 μ m인 구멍이 가공되어 있으며, 이 홀은 상판에 있는 튜브까지 연결되어 있다. 상판은 15×7.5×1mm의 크기로 폴리머로 제작되었다. 상판에는 직경이 9mm인 압전물질(PZT)이 부착되고 전압 공급 라인을 위한 홀이 가공되어 있다.

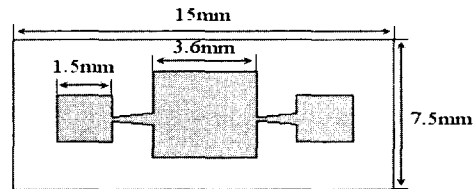
이러한 마이크로 펌프는 압전 물질에 전압을 인가하여 생기는 변형으로 중간판을 구동하고 이로 인한 펌핑 챔버 내의 체적 변화로 인해서 펌핑되는 구조로 되어 있다. 하판의 디퓨저와 노즐요소에 유체가 흐를 때, 양방향의 유로저항이 다르므로 한쪽 방향의 순유량이 생기게 된다. 일반적으로 디퓨저와 노즐은 함께 사용되며, 주로 밸브가 없는 펌프에 사용된다. 마이크로펌프 내에 공기가 잔류하면 펌핑에 대한 완충 요소로 작용하여 원활한 펌핑을 방해하므로 이를 완벽하게 제거하여야만 한다. 이를 위해서는 프라이밍(priming)공정을 통하여 펌프

를 작동시키기 전에 유체로 펌프내의 공동을 채워야만 한다. 일반적인 프라이밍은 이산화탄소(CO₂)를 일정 시간동안 공동 내를 흐르게 하다가 물을 공급하는 방식을 사용한다. 초기에는 기포가 발생하지만 이산화탄소가 물에 용해되므로 시간이 지나면서 완전히 기포가 없어지는 원리이다. 그러나 이 방법은 비용과 장비가 많이 필요하므로 본 연구에서는 같은 원리를 이용하면서도 이산화탄소 대신에 메탄올을 사용하여 이와 같은 문제점을 해결하였다^(4,5).

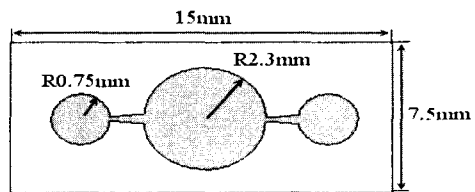
Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)는 마이크로 펌프의 하판을 보여주고 있다. 본 연구에서는 6개의 펌프 모델에 대하여 유동 해석과 제작 및 시험을 하였는데, 6개의 펌프 모델 중에서 5개는 Fig. 1(b)와 같은 사각형 챔버를 가지고 있고 나머지 한 경우에만 Fig. 1(c)와 같은 원형 챔버를 가지고 있다.



(a) 3-D view of the micropump



(b) top view of the square chamber in lower plate



(c) top view of the circle chamber in lower plate

Fig. 1 Structure of the micropump

3. 마이크로 펌프의 제작

본 논문에서는 마이크로 펌프의 직접적인 성능

에 가장 큰 영향을 미치는 부분인 하판의 유로 형상 가공의 정밀도를 확보하기 위하여 DRIE에칭 기법을 사용하였다⁽⁶⁻⁹⁾.

중간판은 0.2mm 두께의 파이렉스 유리에 입구와 출구의 홀을 KrF 엑시머 레이저를 이용하여 가공하였다. 가공이 끝난 하판과 중간판을 정렬한 뒤, 양극 접합(anodic bonding)을 이용하여 실리콘/유리 본딩을 수행하였다. 양극 접합은 주로 실리콘과 알칼리 금속을 함유한 유리간의 접합에 사용되며, 기판 내부에서의 전하 이동에 의존한다^(10,11). Anodic bonding은 유리 기판을 실리콘 기판과 맞닿도록 한 뒤, 유리의 뒷면에 강한 음의 전압을 인가하게 되면 유리 내부에 Na⁺ 이온들이 발생하여 음전극 방향으로 이동하게 된다. 이로 인하여 실리콘/유리 접합 계면에 공간 전하 영역이 형성되어 두 기판을 강하게 끌어당긴다. 이때, 양이온의 이동도는 온도에 비례하여 증가하게 되며, 전계에 의해 유리로부터 접합 계면으로 이동한 산소들은 실리콘과 결합하여 SiO₂ 층을 형성함으로써 접합을 더욱 견고하게 한다.

상판은 가공이 쉽고 펌핑 식별이 가능한 폴리머를 사용하였다. 압전물질을 삽입할 간단한 홈을 가공 후, 중간판과 일반 접합제 본딩을 수행하였다. 마이크로 펌프의 접합 과정을 마친 다음 접합 특성 평가를 하였다. 접합 특성평가는 비 접합 영역과 접합 강도를 대상으로 하였고, 필요한 경우에 전자현미경을 이용하여 계면에 대한 심층 분석 과정을 수행하였다. 접합 특성 평가를 한 결과, 아주 양호한 결과를 얻었다. Fig. 2는 실제 제작한 마이크로 펌프와 50원 주화를 비교한 사진이다.

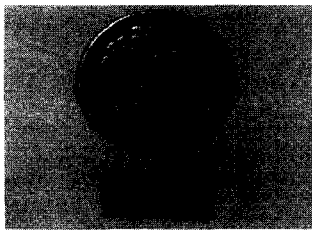


Fig. 2 Photograph of micropump and 50-won coin

4. 마이크로 펌프의 유동 해석

본 연구에서는 마이크로 펌프의 유동 현상 및 특성을 설명하기 위하여 상용 유동 해석 소프트웨어인 FLOW-3D를 사용하였다.

설계변수와 챔버의 형상을 변화시킨 6가지 펌프 모델에 대하여 해석을 수행하였고, 경계조건과 최종적인 유량을 통해서 가장 적합한 모델을 제시하였다. 주요 해석 목표로는 각 펌프 모델에 따른 유동의 특성, 노즐의 길이 변화에 따른 유동 특성, 디퓨저와 노즐 부분에 라운드의 유무에 따른 유동의 변화, 사각형 챔버와 원형 챔버의 성능비교 등이 있다.

4.1 유동 해석 이론-지배방정식

유한체적법(FVM)을 사용하여 전체 해석 영역을 작은 셀(cell)로 나누고(Fig. 3), 각각의 셀에 대해서 연속, 운동량, 에너지 보존방정식과 층류 및 난류 방정식 등에 비선형 방정식의 해를 구한다. 또한 유체의 3차원 자유표면은 Fig. 4에서 나타낸 VOF(volume of fluid) 기법에 의해서 표현할 수 있다. 이것은 시스템을 유한한 셀로 나누고 셀에 유체가 채워져 있는 상태를 나타내주는 F(volume fraction)인자로 자유표면을 정의한다.

본 해석에서 사용되는 지배방정식으로는 연속, 운동량, 에너지, VOF 방정식 등이 있고 좌표는 데카르트 좌표계가 적용되며, 그 식은 다음과 같다.

(1) 연속 방정식(continuity equation)

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{RSOR}{\rho} \quad (1)$$

여기서, u, v, w 는 속도, ρ 는 밀도, $RSOR$ 은 질량의 근원을 나타낸다.

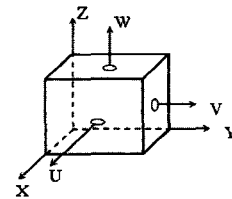


Fig. 3 Control volume

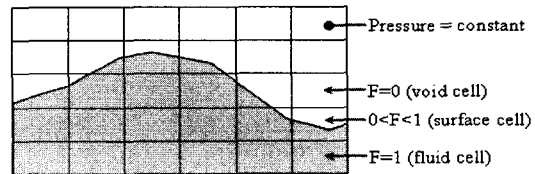


Fig. 4 Volume fraction of control volume

(2) 운동량 방정식(momentum equation)

운동량 방정식은 뉴턴의 제2법칙을 나타내는 방정식으로 유체에서의 미분형 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_f} u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + v A_z \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + F_x - \frac{RSOR}{\rho V_f} u \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_f} u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + v A_z \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + F_y - \frac{RSOR}{\rho V_f} v \quad (3)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{V_f} u A_x \frac{\partial z}{\partial x} + v A_y \frac{\partial z}{\partial y} + v A_z \frac{\partial z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + F_z - \frac{RSOR}{\rho V_f} z \quad (4)$$

위의 식에서, RSOR은 연속 방정식과는 달리 가속도 항을 나타낸다.

(3) 에너지 방정식(energy equation)

$$V_f \frac{\partial}{\partial t}(\rho l) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho l u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho l v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho l w A_z) + \epsilon \frac{\rho l u A_x}{x} = -p \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \epsilon \frac{u A_x}{x} + RIDIG + TDIF + RISOR \quad (5)$$

여기서, RIDIG는 난류 확장, TDIF는 고체를 통한 열전도, RISOR은 에너지 생성항이다.

(4) VOF 방정식(volume-of-fluid equation)

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Fu A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(Fv A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(Fw A_z) = FDIF + FSOR \quad (6)$$

여기서, FDIF : Diffusion of fluid fraction, FSOR : Fluid source를 나타낸다.

4.2 설계변수 및 경계조건

펌프의 기본모델은 챔버의 형상에 따라 사각형 챔버와 원형 챔버로 분류하고, 다시 설계변수를 변경하여 세부적인 모델을 만들었다. Fig. 5은 사각형 챔버를 채택한 펌프의 하판이며, 디퓨저 부분의 라

운드를 보여주기 위해서 확대하여 나타내었다.

펌프의 설계변수는 크게 디퓨저 입구 부분의 폭 d 와 출구 부분의 폭 D , 디퓨저의 길이 L 로 설정하였고 입구 부분에 라운드의 유무 또한 중요한 설계변수 중 하나이다. 디퓨저의 개략적인 모양은 Fig. 6에 나타내었다. 설계변수들이 유체의 유동에 어떠한 영향을 미치는가를 알기 위해서 펌프의 형상을 크게 6가지로 나누고 해석을 수행하였다.

실제 해석에 사용된 경계조건은 Fig. 7에 나타내었다. 진동자의 진동수는 이론적으로 1~10Hz 정도가 적당하며, 본 해석에서는 4Hz의 진동수를 주었다. 진폭은 챔버 깊이의 50%인 40 μ m로 하였고, 유체의 물성치는 물의 물성치를 사용하였다. 출구에서의 흐름은 가능한 직류성분에 가깝도록 조절해 주어야 하나, 본 해석에서 채택한 마이크로 펌프의 형상으로는 약간의 역류가 발생하는 것은 피할 수 없다. 따라서 마이크로 펌프를 제작하기 전에 유동 해석이 먼저 수행되어야 한다. 기본적인 유량을 만족하더라도 출구에서의 역류량이 문제가 되기 때문에 이를 유동 해석을 통해서 검증해야 한다⁽¹²⁾.

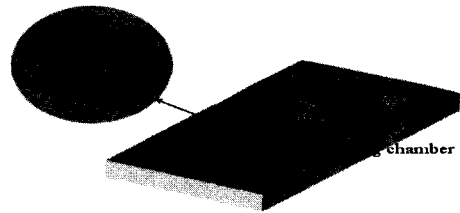


Fig. 5 Square chamber of lower plate

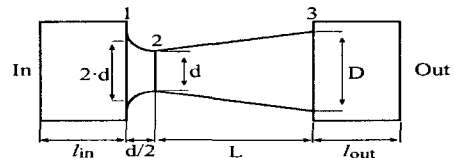


Fig. 6 Geometry of diffuser

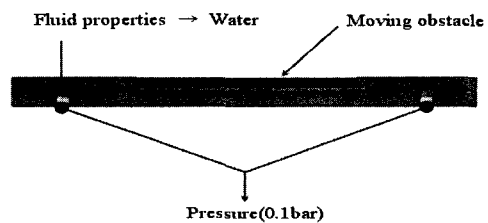


Fig. 7 Boundary conditions of micro-pump

4.3 유동 해석 결과 및 고찰

Table 1은 해석 및 시험에 사용한 펌프의 형상 변화를 나타내고 있다. 다양한 평가를 위하여 6개의 시험모형을 설정하였다. 음영이 들어간 부분은 노즐이 시작하는 부분에 라운드가 없는 것을 의미한다. Table 2에는 해석에 사용된 기타 조건 등을 나타내었다.

Fig. 8은 펌프 1의 조건을 가질 경우, 마이크로 유동 해석에 있어 상변화시 입구와 출구에서의 시간에 따른 유량의 변화를 보여 주고 있다. 입구와 출구의 유량이 거의 일정하다는 것을 알 수 있다. 진동에 따른 펌프 내의 유량 변화는 $0.023\text{mm}^3/\text{sec}$ (= $0.023\mu\text{l}/\text{sec}$)이다. 한편, Fig. 9에서 보는 바와 같이 펌프 2는 노즐 부분이 길어짐에 따라 유체의 점성 마찰이 증가하여 전체적인 유량이 펌프 1 보다 줄어들게 된다. 하지만 Fig. 9에서 보는 것처럼 출구 부분에서의 유동 변화가 적기 때문에 음의 흐름(역류)이 발생을 피하기 위한 관점에서 볼 때에는 펌프 2가 펌프 1에 비하여 우수한 성능을 가짐을 알 수 있으며 유량 변화는 $0.015\text{mm}^3/\text{sec}$ 이다. 펌프 3은 펌프 1과 비교해서 출구의 노즐 부분에 라운드가 없는 것을 제외하면 모든 조건이 같다. 하지만 유량은 펌프 1이 $0.023\text{mm}^3/\text{sec}$ 이고 펌프 3은 $0.031\text{mm}^3/\text{sec}$ 으로 펌프 3이 더 크다. 이것은 노즐 부분에 라운드가 없어지면서 생긴 유동의 변화에 의한 것이며, 이 결과로 부터 라운드의 유무가 유체의 유동에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 펌프 4는 펌프 3과 비교해서 출구의 노즐 부분에 설계변수인 d_2 , D_2 가 증가한 것을 제외하면 모든 조건이 같다. 하지만 해석 결과에서는 펌프 3보다 유량이 훨씬 크다. 이것은 노즐부분의 설계변수 d_2 , D_2 가

Table 1 The measured flow rate of the micropump for performance test result

	Inlet[μm]			Outlet[μm]		
	d_1	L_1	D_1	d_2	L_2	D_2
Pump1	80	1080	260	80	1080	260
Pump2	80	1080	260	80	1400	234
Pump3	80	1080	260	80	1080	260
Pump4	80	1080	260	96	1080	378
Pump5	60	1080	228	60	1000	228
Pump6	Inlet($\varnothing 1.5$), Outlet($\varnothing 1.5$), Pump cavity($\varnothing 4.6$), Circle chamber					

Table 2 The analysis conditions of micropump

Finish time	0.5 sec
Time step size	1.0e^{-5}
Flow mode	Incompressible
Viscous flow	Laminar
Fluid properties	Water
Meshing	154350개
Initial pressure field	Uniform
Pressure iterations	Line implicit
Viscous stress evaluation	Jacobi implicit
Heat transfer	Explicit

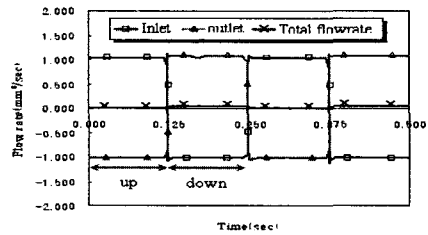


Fig. 8 Flow rate of pump 1

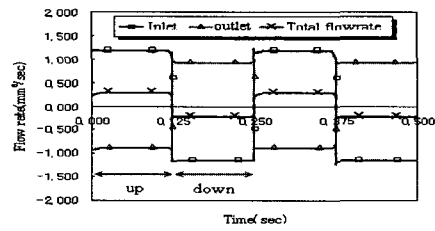


Fig. 9 Flow rate of pump 2

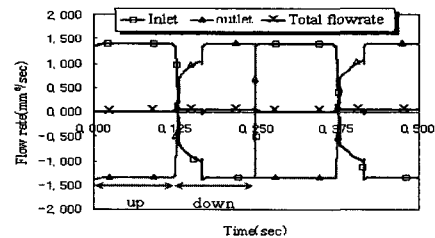


Fig. 10 Flow rate of pump 6

증가하면 유량도 증가한다는 것을 보여준다. 유량은 펌프 4가 가장 크지만 출구부분에서 유동의 변화가 너무 크기 때문에 펌프의 특성으로 보면 좋지 않으며 유량 변화는 $0.044\text{mm}^3/\text{sec}$ 이다. 펌프 5를 펌프 1과 비교하면 디퓨저와 노즐부분의 설계변수 d , D 가 모두 감소하였다. 이로 인해 디퓨저와 노즐의

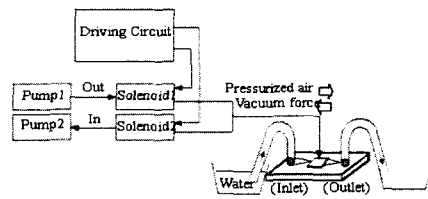
단면적이 감소하게 되어 펌프 1에서 유속 변화 보다 펌프 5에서의 유속이 훨씬 크게 나타난다. 입구와 출구에서의 유체의 유동은 거의 일정하게 나타나고, 유량 변화는 $0.041\text{mm}^3/\text{sec}$ 이다. 펌프 6은 펌프 모델 6가지 중에서 유일하게 원형 챔버를 가지고 있는 모델이다. Fig. 10에서 보듯이 중간판이 하강을 할 때 난류로 인해서 매우 불규칙한 유체의 유동 특성이 나타난다. 이러한 유동 특성은 펌프의 유량을 제어하는데 어려움이 있으므로 좋지 않으며 유량변화는 $0.028\text{mm}^3/\text{sec}$ 이다.

5. 마이크로 펌프의 성능시험

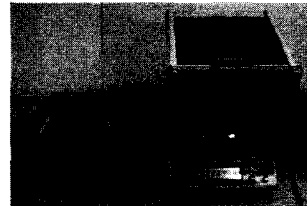
마이크로 펌프의 작동성을 시험하고 또한 더 나아가서, 생체 분석 등의 목적을 위하여 유체의 물성 변화를 유발하지 않으며, 작동성을 표준화시킬 수 있는 방안을 도출하기 위하여 펌프의 작동 성능 시험에 공기 정압 구동 방식을 채택하였다. 작동성 시험을 위하여 구성된 시험장치는 Fig. 11에 도시되어 있다. Fig. 11(a)는 시스템의 구성도를 블록선도로 나타낸 것이다. 마이크로 펌프의 작동 성능을 시험하기 위하여 펌프 내 펌핑 영역의 다이아프램에 $4\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 공기압력과 $0\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 진공 압력을 교대로 가하였다. 이에 따라서 펌핑 영역에서는 0.2mm 두께의 파이렉스 유리 재료인 다이아프램에 약 640g 의 압축력과 160g 의 견인력을 교대로 가하게 된다. 그런데 제작된 마이크로 펌프의 경우, 입/출력 유로에 별도의 유로 연결구가 성형되어 있지 않기 때문에 3개 부분으로 나뉘어진 렌드들을 효과적으로 밀봉하면서 펌핑부에 공기 누출 없이 공기압을 가하기 위하여 실리콘 재질의 박막 가스켓을 끼운 후 Fig. 11(b)에서와 같이 두 장의 아크릴 판을 사용하여 마이크로 펌프를 고정시켰다. 시험 결과 확산 노즐이 장착된 마이크로 펌프 시스템은 초기 구동을 위하여 진공 압력 등을 이용하여 펌프의 출구 측에서 펌프 내에 잔존하는 공기를 빨아내어야 펌핑을 개시할 수 있었다. 이는 펌프 내에 잔존하는 공기가 마이크로 펌프의 펌핑 작용을 저해하는 감쇄 요인으로 작용함을 의미한다. 이를 극복하기 위해서는 이산화탄소 등과 같은 수용성 기체로 펌프 내부를 채운 후에 펌핑을 개시하거나 진공 펌프 등으로 미리 펌프 내에 공기를 제거하고 물을 채워놓아야 한다. 이에 대한 다양한 해결 방안이 논문 등을 통하여 제시되어 있으므로 이에 대한 보

다 전향적인 접근방법을 모색하여야 할 것으로 판단된다.

실리콘 웨이퍼와 파이렉스 유리를 접합하여 제작한 펌프 4 모델의 마이크로 펌프에 대한 펌핑 성능 시험 결과 3600회 펌핑 시 약 0.589ml 의 물이 펌핑됨을 확인하였고, 이는 약 스트로크 당 163nl 의 물을 펌핑 할 수 있는 수준이다. 이는 본 연구에서 목표한 펌핑량인 150nl 에 매우 근접한 값으로 공기 작동압력 조절 여하에 따라 펌핑 유량을 조절할 수 있으므로 매우 성공적인 결과를 도출한 것이라 할 수 있다.



(a) schematic diagram of test



(b) test setup

Fig. 11 Test rig for performance of micropump

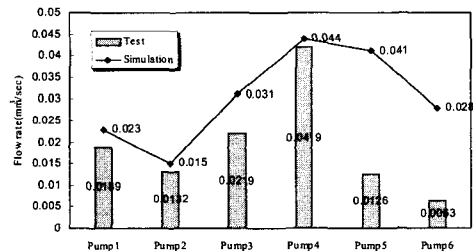


Fig. 12 Comparison of simulation and experiment

6. 유동 해석과 실제 시험 결과의 비교

6.1 유동 해석과 성능 시험

앞 절에서 마이크로 펌프의 성능 시험과 유동 해석 결과를 살펴보았다. 이를 토대로 Fig. 12는 두

결과를 비교한 것으로써 유량은 약간의 차이가 나지만, 전체적으로 그래프의 추세는 유사한 것을 알 수 있다. 펌프 모델 중 2, 3, 4번은 유동 해석 결과와 성능 시험 결과가 거의 일치하게 나타났지만 1, 5, 6번 모델은 약간의 오차가 발생한 것을 알 수 있다. 오차가 발생한 원인에 대해서는 다음 절에서 논의하였다.

6.2 오차의 원인 분석

오차의 원인으로 첫째, 이론의 불완전성을 들 수 있다. 현재 정립된 난류 이론으로는 자연 현상에 존재하는 난류 현상을 정확하게 묘사하지 못하며 특히 마이크로 유동의 경우는 기존의 유동에서 보이는 특성과는 다른 유체점성의 효과가 매우 크게 작용하기 때문에 정확한 유동특성을 파악하는 것이 어렵다. 이렇게 근사값을 해로 가정하기 때문에 약간의 오차는 피할 수 없다. 둘째, 유동 해석에서는 단순히 PZT에 의한 중간판의 상하운동을 수치적인 진폭으로 나타내었지만, 실험에서는 PZT와 중간판의 마찰이나 유체의 압력에 의해 발생하는 정확한 진폭을 얻을 수는 없었다. 셋째, 격자수의 한계이다. 복잡한 형상일 경우 정확한 유동 묘사를 위해서 충분한 격자수의 확보가 중요하나 해석 시간의 문제로 인해서 이론에 적합한 격자크기나 에스펙트비(aspect ratio)를 얻을 수는 없었다. 넷째, 해석에서 사용된 경계 조건과 실험에서 사용된 경계 조건의 차이이다. 실제 현상과 동일한 조건의 유체의 점도, 열전달계수 등의 물성치를 실험과 해석시에 서로 동일한 조건으로 설정하는 것에 어려움이 있었다.

6.3 더블 펌핑 챔버 해석

펌핑 챔버가 하나일 때 설계변수를 변경하여 여러 가지 모델에 대해서 해석한 결과 유량은 만족할 만한 결과를 얻었지만, 출구에서의 역류는 여전히 해결해야 할 문제로 남아있다. 본 논문에서는 출구에서의 역류량을 줄이고자 새로운 모델에 대한 해석을 수행하여 보았다. Fig. 13은 해석에 사용된 더블 펌핑 챔버를 가지고 있는 펌프 모델을 보여주고 있으며, 디퓨저 부분의 라운드를 보여주기 위하여 확대하여 나타내었다. 디퓨저와 노즐의 길이를 비롯한 챔버의 깊이, 유로의 폭, 라운드의 유무 등은 앞에서 해석한 펌프 1과 같다. 단지 펌프 1이 펌핑하는 챔버가 하나라는 것만 다르다. 이것은 더블

펌핑 챔버의 해석 결과를 펌프 1과 비교하여 출구에서의 역류량이 얼마나 줄었는지를 판단하기 위함이다. 해석 시 경계조건은 펌프 1과 동일하게 주었으며, 진동자의 주기만 펌프 1과 다르다. 더블 펌핑 챔버의 경우 하나의 진동자가 하강하면 다른 하나는 상승하는 구조로 이루어져 있다. 이것은 두 펌핑 챔버 모두 같은 방향성을 가지게 된다면, 유량은 두 배가 되지만 출구에서의 역류량 또한 두 배가 되기 때문에 디퓨저/노즐의 원리를 이용하여 역류량을 줄이기 위해서 채택된 형식이다.

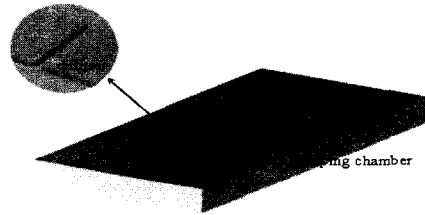


Fig. 13 Picture of double pumping chamber

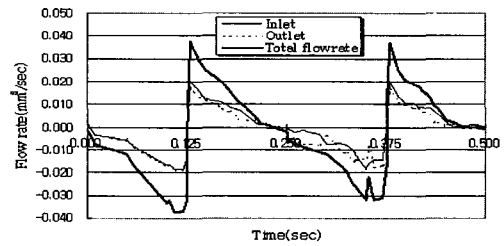


Fig. 14 Flow rate of double pumping chamber

Fig. 14는 진동자의 운동에 따른 입구와 출구에서 시간에 따른 유량의 변화를 보여주고 있다. Fig. 8의 펌프 1에서의 결과와는 달리 입구와 출구에서의 유동 방향이 동일하게 나타남을 알 수 있다.

더블 펌핑 챔버의 유량은 $0.041\text{mm}^3/\text{sec}$ 로 펌프 1과 비교하여 약 1.8배 크며, 전체적인 유량의 변화는 작게 나타났다. 또한 출구 부분에서의 역류량이 더블 펌핑 챔버가 $0.023\text{mm}^3/\text{sec}$ 로 펌프 1의 $1.039\text{mm}^3/\text{sec}$ 보다 98% 감소하였다. 마이크로 펌프에서 가장 중요하게 고려되는 전체적인 유량과 역류량의 문제로 볼 때, 더블 펌핑 챔버는 앞서 해석한 여러 가지 펌프 모델들 보다 우수한 특성을 가지고 있다. 더 나아가서 펌핑 챔버의 개수를 늘린다면, 역

류량이 적고 보다 정밀하게 유량을 제어할 수 있을 것이다.

7. 결론

본 연구에서는 실리콘 웨이퍼와 파이렉스 유리를 DRIE가공 및 양극 접합하여 마이크로 펌프를 제작/시험하였으며, 마이크로 유동 해석을 통해 최적의 펌프설계 데이터를 도출하였다. 또한 역류되는 유량을 줄이기 위하여 더블 펌핑 챔버를 도입하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) DRIE기술을 이용하여 실리콘에 유로형상을 가공하였으며, 양극 접합을 이용하여 실리콘/유리 본딩을 수행하여 다양한 형태의 마이크로 펌프를 제작/시험하였다.
- 2) FVM을 기반으로 한 마이크로 유동해석기법을 응용하여 마이크로펌프 설계변수들의 파라메트릭 해석을 수행함으로써 마이크로 디퓨전 펌프의 최적 설계를 위한 기초해석기술을 제안하였다.
- 3) 주요 설계 변수들이 실제 마이크로 펌프가 동작할 때 어떠한 영향을 미치는지 유동 해석을 통하여 알 수 있었으며, 각 펌프 모델들이 가지는 유동 특성을 확인하였다.
- 4) 디퓨저/노즐 형식의 벨브리스 마이크로 펌프는 최소한의 역류가 발생하는 것을 피할 수 없지만, 더블 펌핑 챔버의 해석을 바탕으로 추가적인 연구를 수행한다면 역류량의 감소와 유량을 보다 정밀하게 제어할 수 있다는 것을 입증하였다.
- 5) 마이크로 펌프는 작동 중에 발생하는 공기 캐비티가 펌프의 작동을 중단시키는 원인이 됨을 관찰하였으며, 이러한 공기 캐비티의 생성 및 소멸에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 에이앤디티(주)가 주관하고 강원대학교에서 위탁과제를 수행하는 산업자원부 공통핵심 기술 개발사업의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 김영수, 양상식, "실리콘 박막을 이용한 마이크로펌프의 제작 및 성능시험," 대한전기학회 논문지, 제 46 권, 제 7 호, pp. 1135-1140, 1997.
2. Stemme, E. and Stemme, G., "A Valve-less Diffuser/Nozzle based Fluid Pump," Sensors and Actuators, Vol. A39, pp. 159-167, 1993.
3. Stemme, E. and Stemme, G., "Valve-Less Fluid Pump," Swedish Patent Appl. No. 9300, 604-607, 1993.
4. Kim, B. H., Chang, I. B. and Kim, H. Y., "Development of having double-chamber in micro-bubble pump," Proceedings of the KSPE Spring Annual Meeting, pp.1186-1190, 2003
5. Shoji, S. and Esashi, M., "Microflow devices and systems," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 4, pp. 157-171, 1994.
6. Elwenspoek, M., Lammerink, T. S. J., Miyake, R. and Fluitman, J. H. J., "Towards integrated microliquid handling systems," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 4, pp. 227-245, 1994.
7. White, F. M., Fluid Mechanics. New York: McGraw-Hill, 1986.
8. Smits, J. G., "Piezoelectric Micropump with Three Valves Working Peristaltically," Sensors and Actuators, Vol. A21-A23, pp. 203-206, 1990.
9. Zengerle, R., Kluge, S., Richter, M. and Richter, A., "A Bidirectional Silicon Micropump," presented at IEEE 8th International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'95), Amsterdam, the Netherlands, Jan. 29 - Feb. 2, 1995.
10. Bacher, W., Menz, W. and Schomburg, W. K., "Micropump manufactured by thermoplastic molding," presented at IEEE 7th International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'94), Oiso, Japan, January 25-28, 1994.
11. Klaassen, E. H., Petersen, K., Noworolski, J. M., Logan, J., Maluf, N. I., Storment, C., McCulley, W. and Kovacs, G. T. A., "Silicon fusionbonding and deep reactive ion etching; a new technology for microstructures," presented at ansducers'95 - Eurosensor IX, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995.