

밸브 없는 양방향 피에조 마이크로펌프의 유동해석

이상혁* · 허인영** · 허남건***

A Numerical Study on Flow Analysis of a Valveless Bidirectional Piezoelectric Micropump

Sang Hyuk Lee*, Janet Hur**, Nahmkeon Hur***

Key Words : Valveless Micropump(밸브 없는 마이크로 펌프), Oblique Channel(경사 채널), Diaphragm(박막), CFD(전산유체역학), Moving Mesh Technique(이동격자방법)

ABSTRACT

A numerical simulation on the flow field of a valveless bidirectional piezoelectric micropump has been performed. In this type of micropump, the oscillation of the piezoelectric diaphragm generates the blowing and suction flow through the oblique channel from the pumping chamber. The angle between the oblique and main channel causes the variation of flow distribution through upstream and downstream channels in suction and blowing modes. In the suction flow mode, the working fluid flows from both the upstream and downstream of the main channel to the pumping chamber through the oblique channel. However, in the blowing flow mode, the fluid pushed out of the pumping chamber flows more toward the downstream of the main channel due to the inertia of the fluid. In the present study, the effects of geometries such as the angle of oblique channel and the shape of main channel on the flow rate of the up/downstream were investigated. The flow rate obtained from the pump and the energy required to the pump were also analyzed for various displacements and frequencies of the oscillation of the diaphragm.

1. 서론

최근 MEMS(Micro-Electro Mechanical System)와 미소가공 기술이 발전에 따라 다양한 마이크로 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 마이크로 시스템은 전자 및 기계적 요소들이 결합된 장치로써, 이에 대한 연구에 있어 미세유체(Microfluid) 장치 및 현상

에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히, 마이크로 단위의 영역에서 매우 적은 유량을 조절하는 미세유체기계 장비들은 생물학, 화학, 의학과 의공학 분야에서 널리 이용될 수 있다.

마이크로 펌프는 미세유체기계 중에서도 가장 필수적인 요소로서, 제어하기 어려운 마이크로 단위의 유체를 움직이는 데 사용된다. 이를 구동하기 위한 동력원으로는 전자기력, 압전소자, 유압 등이 사용된다. 다양한 종류의 구동방법 중에서도 압전소자 중의 하나인 압전세라믹(Piezoelectric Transducer, PZT)을 이용하여 박막에 변위를 주는 방식이 제작과 구동이 간단하기 때문에 널리 연구되어 왔다(1).

* 서강대학교 대학원

** 서강대학교 공과대학

*** 서강대학교 기계공학과 (교신저자)

E-mail : nhur@sogang.ac.kr

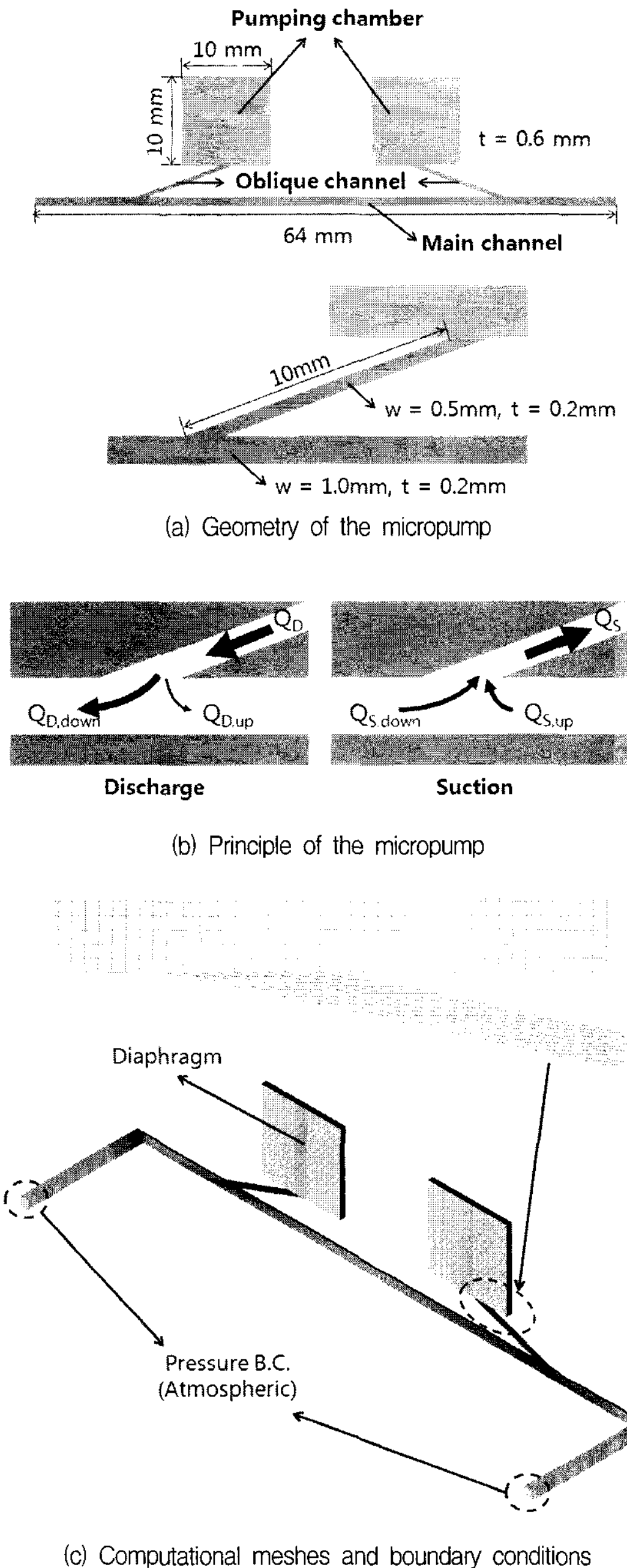


Fig. 1 Valveless bidirectional piezoelectric micropump[8]

압전소자를 이용하여 구동하는 마이크로 펌프는 체크 밸브의 유무에 따라 분류할 수 있다. Richter et al.[2]는 마이크로 펌프의 작동에 있어서 원하는 방향으로 유체를 보내기 위해 체크 밸브를 이용한 마이크로

로 펌프를 제안하였다. 그러나 체크 밸브를 이용한 마이크로 펌프는 복잡한 가공과 밸브 부위의 작동 시 불안정성을 야기한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 체크 밸브 없이 디퓨저/노즐과 같은 고정된 형상으로부터 저항계수의 차이를 이용하여 유동을 한 방향으로 흐르게 하는 밸브없는(Valveless) 마이크로 펌프에 대한 연구가 진행되고 있다. Jiang et al.[3]은 디퓨저/노즐을 이용한 펌프에 대해 실험을 통해 형상 및 작동조건에 따른 영향을 알아보았으며, Singhal et al.[4]은 저 레이놀즈수에서 디퓨저/노즐의 압력 손실에 대한 연구를 수행하였다. 또한, Kim and Tezuka[5]와 Jeong and Kim[6]는 수치해석을 통해 디퓨저/노즐을 이용한 펌프에 대한 유동 특성을 해석하였다. 이러한 마이크로 펌프의 효율의 증가를 위해 Olsson et al.[7]은 상을 달리하는 2개의 마이크로 펌프를 작동하는 연구를 진행하였다. 그러나 기존 고정된 디퓨저/노즐을 이용한 마이크로 펌프는 한 방향으로 밖에 유체를 작동시키지 못하므로, 마이크로 펌프의 적용 범위를 확대시키기 위해서 여러 방향으로 유체를 작동시키는 마이크로 펌프에 대한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는, 유체의 관성을 이용하여 Yoon et al.[8]이 제시한 밸브없는 양방향 피에조 마이크로펌프에 대해 경사 채널의 형상에 따른 마이크로 펌프의 성능에 대해 수치해석 하였다. 또한 박막의 가진 주파수 및 최대변위에 따른 유량의 변화 및 이에 따라 필요로 하는 작동 에너지에 대해 분석하였다.

2. 수치해석

2.1 마이크로 펌프

Yoon et al.[8]이 제안한 밸브없는 양방향 피에조 마이크로 펌프의 형상 및 작동조건에 따른 유동 특성을 해석하기 위하여 Fig. 1(a)와 같은 형상에 대해 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 마이크로 펌프는 크게 구동부(Pumping chamber), 경사채널(Oblique channel)과 주채널(Main channel)로 구성되었다. 본 연구에서 사용한 기본 모델에 대한 각 부분의 크기 및 채널의 폭(w)과 두께(t)는 Fig. 1(a)와 같다. 여기서, 구동부에 설치되어 있는 압전세라믹과 같은 압전소자의 변형에 따라 박막의 변위가 변화하게 된다. 이로 인해 구동부에서 체적 변화에 따라 구동부 내 압력이 변화하게 되며 이는 채널에서 작동유체인 물의 유동을

발생시킨다. 구동부에서 발생된 유동은 경사채널을 따라 흐른다. 이 때, 경사채널과 주채널 사이 경사각으로 인해 흡입(Suction) 및 배출(Discharge)시 발생하는 관성의 차이로부터 상류(Upstream)와 하류(Downstream) 사이에 유량 차이가 발생된다. Fig. 1(b)에 이러한 흡입과 배출시 유량의 차이를 정성적으로 보여주고 있다. 배출 시에는 경사채널을 흐르는 유체의 관성으로 인해 하류로 유동이 크게 발생되며, 흡입 시에는 상/하류에서 경사채널로의 유량이 크게 차이가 나지 않는다. 따라서 구동부의 작동으로 인해 전반적으로 하류로 유동이 발생되며 2개의 구동부 중에 작동되는 구동부에 따라 유동의 방향이 결정된다.

2.2 해석 조건 및 방법

구동부에서 박막의 변위에 따른 유동특성을 알아보기 위해서 Fig. 1(c)과 같은 격자를 사용하였다. 이 때, 주채널의 양 끝부분에서 입출구 영향으로 유동에 미치는 영향을 줄이기 위해서 일정 영역을 포함하였으며, 채널 내 유동을 적절히 얻기 위하여 폭과 높이 방향으로 각각 20개와 10개의 격자를 사용함으로써 약 18만 개의 전체 계산 격자를 생성하였다. 주채널의 양 끝에는 압력 경계조건을 사용하여 대기압으로 설정하였다.

또한, 본 연구를 수행하기 위해서 상용 프로그램인 STAR-CD[9]를 사용하여 비정상 비압축성 난류유동을 해석하였으며, 지배방정식은 기본적인 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 사용하였고, 난류 모델은 $k-\epsilon$ 모델, 해석 알고리즘은 PISO 법을 적용하였다. 또한, 펌프 내 유동 특성에 대한 결과를 얻기 위해서 속도, 압력 분포가 시간에 따라 주기적인 특성을 갖게 되어 유동이 충분히 발달되었다고 판단될 때까지 해석을 수행하였다.

2.3 이동 격자(Moving Mesh) 방법

이동 격자 방법은 계산 영역 내의 격자가 변화될 때 사용하는 방법이다. 본 연구에서는 펌프 작동시 구동부의 박막이 변형을 가져오기 때문에 시간에 따라 이동 격자 방법을 사용하여 구동부의 격자를 변화시켰다. 즉, 박막에 해당하는 Shell 격자를 미리 생성하여 시간에 따라 최대 변위에 해당하는 박막의 형태로 박막의 격자를 변화시키고 구동부 내의 격자를 재정렬하여 계산을 수행하였다.

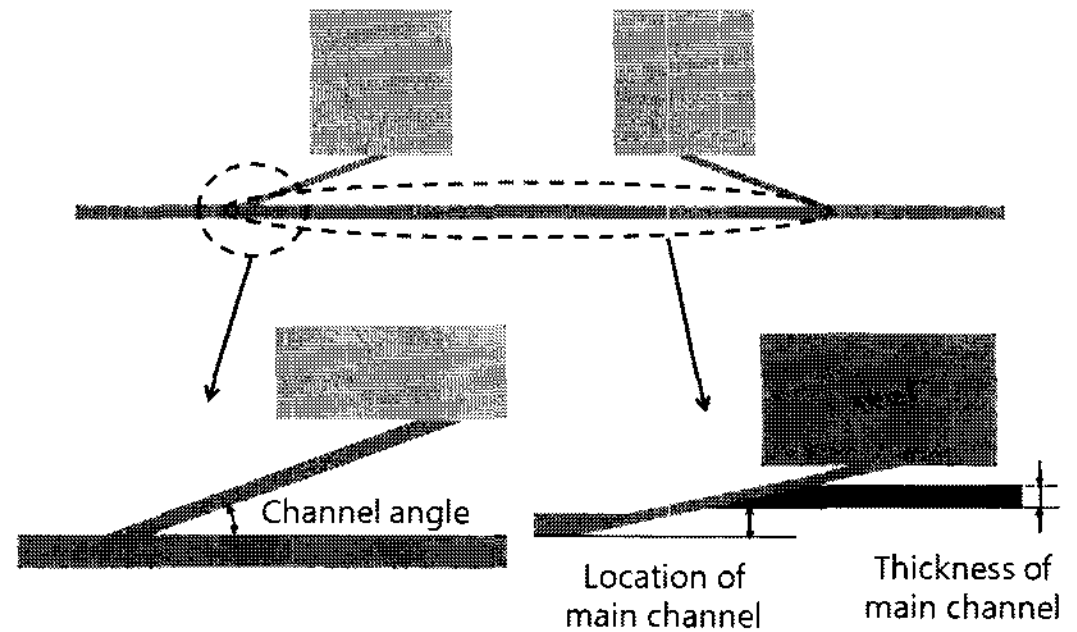


Fig. 2 Geometric variables of the micropump

2.4 박막의 변위(Deflection of Diaphragm)

마이크로 범위에서의 박막의 변형은 일반적인 Bar 나 Beam과 다른 경향성을 갖는다. 이에 따라 박막 변형에 대한 연구에 의해 마이크로 규모에서 상당히 정확한 거동 예측 기법이 개발되었다. 본 연구에서는 정전 용량형 압력센서 박막에 균일한 힘이 작용할 때의 거동[10]을 나타내는

$$w(x,y) = w_0 \left(1 + 0.401 \frac{x^2 + y^2}{a^2} + 1.611 \frac{x^2 y^2}{a^4} \right) \times \cos \frac{\pi x}{2a} \cos \frac{\pi y}{2a} \quad (1)$$

와 같은 상관식을 사용하였다. 여기서, 최대 변위 w_0 는 박막의 중심인 x, y 가 0인 지점에서 발생하는 변위의 크기이다. 또한 a 는 박막의 너비와 폭의 절반에 해당하는 수치이다. 이로부터 본 연구에서는 Yoon et al.[8]에서 사용한 압전소자의 전압에 따른 변위 범위인 4~8 μm 에 대해 해석을 수행하였다.

3. 펌프 형상에 따른 유동 특성

밸브 없는 양방향 피에조 마이크로 펌프가 작동함에 따른 유동 특성에 대한 해석에 앞서, 펌프 형상 변화가 유동 특성에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 기본적인 마이크로 펌프 형상은 Fig. 1(a)와 같으며, 이 때, 구동부에서 흡입 및 배출시 유동 특성에 영향을 주는 요소로써, Fig. 2와 같이 경사채널과 주채널의 사이각, 주채널의 위치 및 주채널의 두께를 형상 변수로 선정하였으며, 각각의 형상 변수가 유동에 미치는 영향을 해석하기 위해 다른 형상 변수는 통제하고 해석을 수행하였다.

3.1 경사채널과 주채널 사이각의 영향

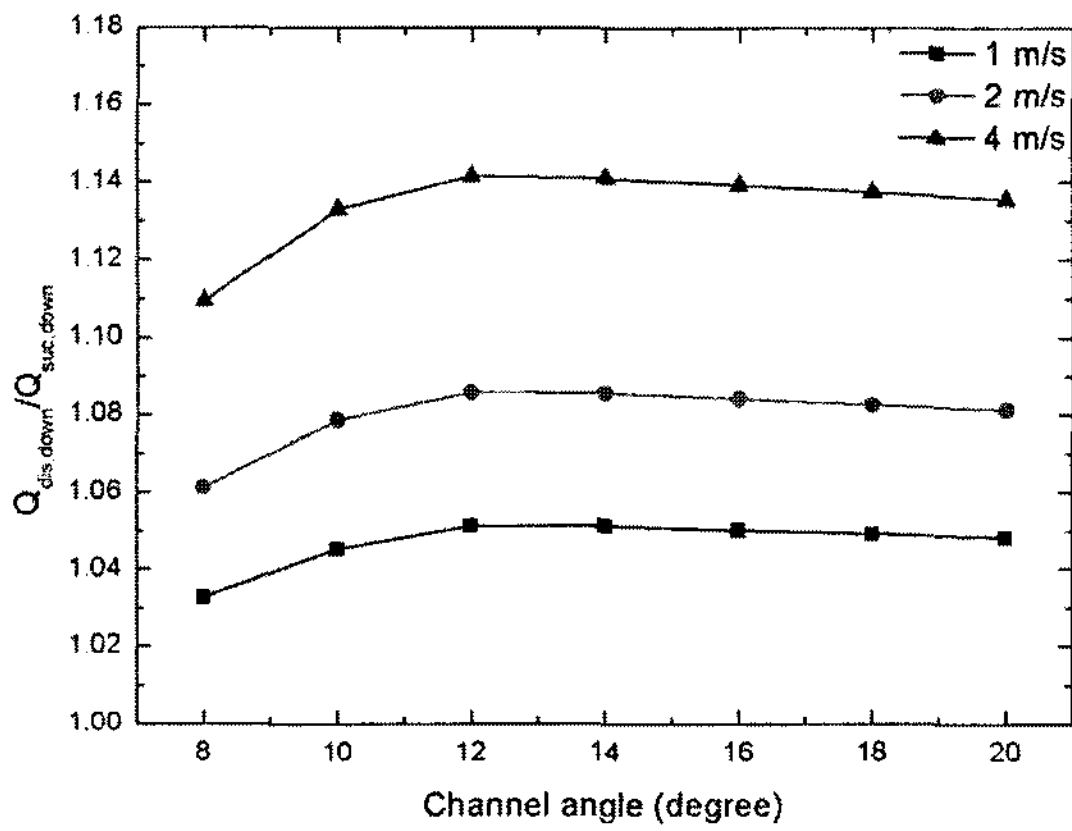


Fig. 3 Flow rate ratio with the various channel angles

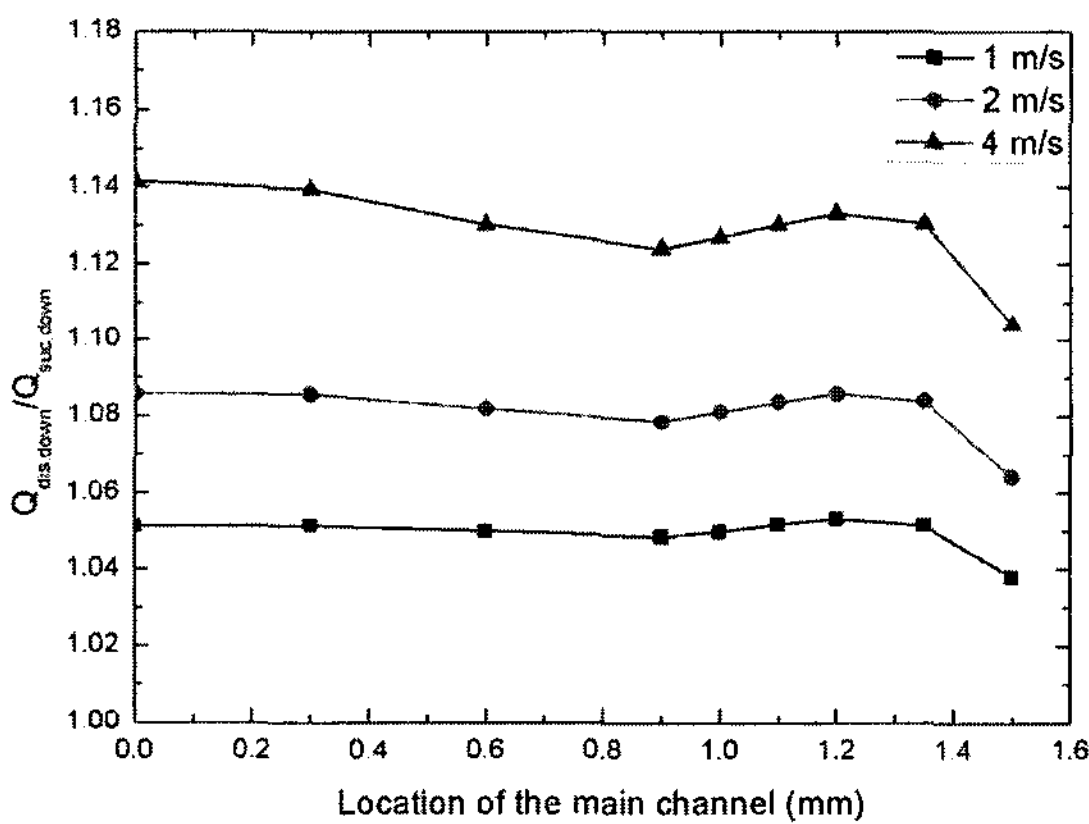


Fig. 4 Flow rate ratio with the various locations of the main channel

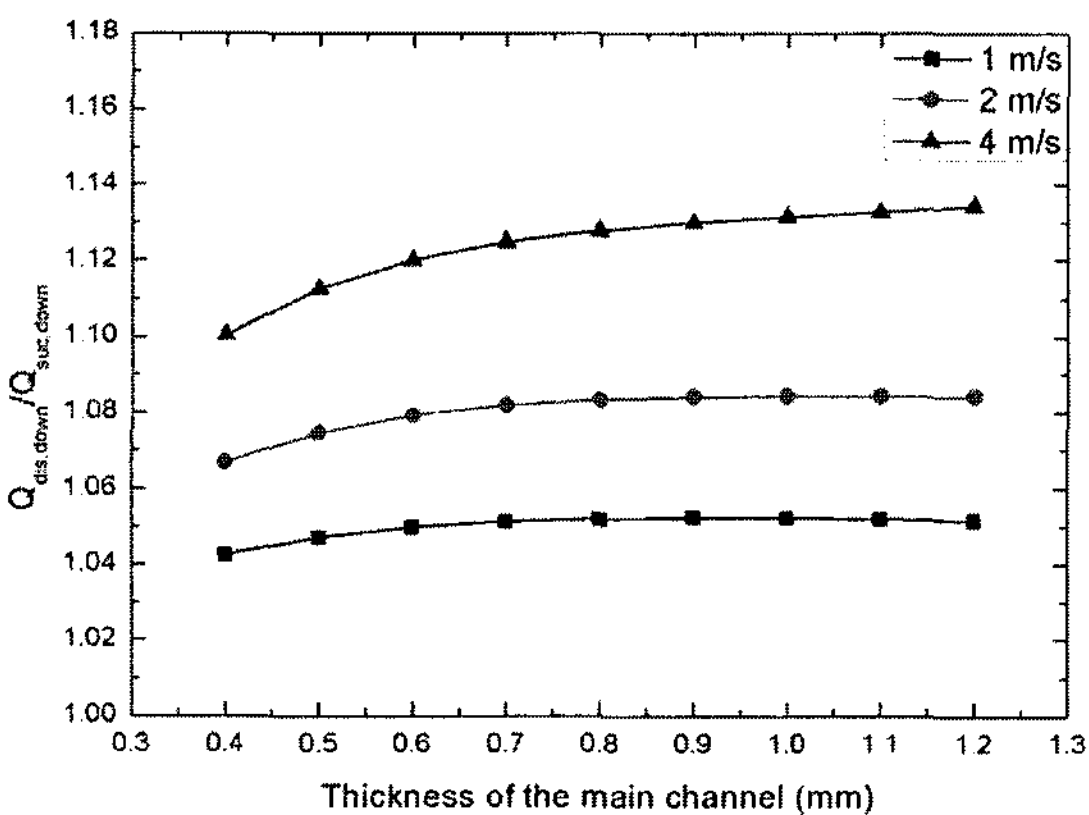


Fig. 5 Flow rate ratio with the various thickness of the main channel

본 연구에 사용된 마이크로 펌프의 경우, 구동부에서 흡입 및 배출시 경사채널을 지나 2방향의 주채널로 유량의 분배비율이 펌프의 성능을 좌우한다. 따라서, 펌프 형상이 펌프 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 Fig. 1과 같은 형상을 사용하여 흡입 및 배출시 경사채널에서 1~4m/s의 평균 속도를 갖게 박막에 입구 경계조건을 사용하여 정상상태 해석을 수행하였다. 이때, 경사채널을 지난 유동이 하류 쪽으로 흐르는 흡입 및 배출시 유량(Fig. 1 (b))의 비로써 형상에 따른 성능에 대해 비교하였다.

경사채널과 주채널 사이각은 경사채널을 지난 유체의 관성을 결정하기 때문에 경사채널과 연결된 2방향의 주채널로 유량 분배에 큰 영향을 미치는 요소로써 이에 따른 성능의 변화를 예측하기 위해서 경사각 8~20° 일 때 하류 방향의 흡입 및 배출시 유량비에 대해 수치해석을 수행하였다. Fig. 3은 주채널과 경사채널 사이각에 따른 유량비를 보여주고 있다. 유량비는 흡입시에 비해 배출시에 하류로의 유량을 나타내는 것이기 때문에 유량비가 큰 것이 펌프 성능이 좋은 것을 나타낸다. 채널각이 12° 이하에서는 채널각의 증가에 따라 유량비가 증가하며 12° 이상에서는 유량비가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 채널각이 감소함에 따라 구동부에서 배출시 관성에 의해 흡입시 보다 더 많은 유량을 하류로 보내기 때문인 것으로 보인다. 그러나 채널각이 일정 각 이하에서는 흡입시에도 하류에서 유량이 더 많이 흡입되어 성능이 감소하는 것이다. 따라서, Fig. 1과 같은 크기의 펌프에서는 경사채널과 주채널의 각이 12° 일 때 성능이 가장 좋게 나타났다.

3.2 주채널 위치의 영향

펌프의 성능에 영향을 미치는 요인으로 채널 사이각 뿐만 아니라 2개의 경사채널 사이 주채널의 위치도 큰 영향을 미치게 된다. 주채널 위치에 따른 성능을 비교하기 위해서 Fig. 2와 같이 경사채널 사이 주채널 위치를 변화시켰다. Fig. 4는 주채널의 위치가 변화할 때 유량비 변화를 보여주고 있다. 이를 보면, 상류쪽 주채널 설치 높이가 높아질수록 1mm 이하에서는 유량비가 감소하였다. 이는 주채널이 두께가 1mm 이기 때문에 상류의 주채널 높이가 커질수록 유동장이 상류로 쉽게 발생하게 된다. 그러나 상류의 주채널 높이가 1mm보다 증가할 경우 상류로 유량 배분이 경사채널 내에서 일어나서 관성으로 인해 쉽게 상하류의 유량이

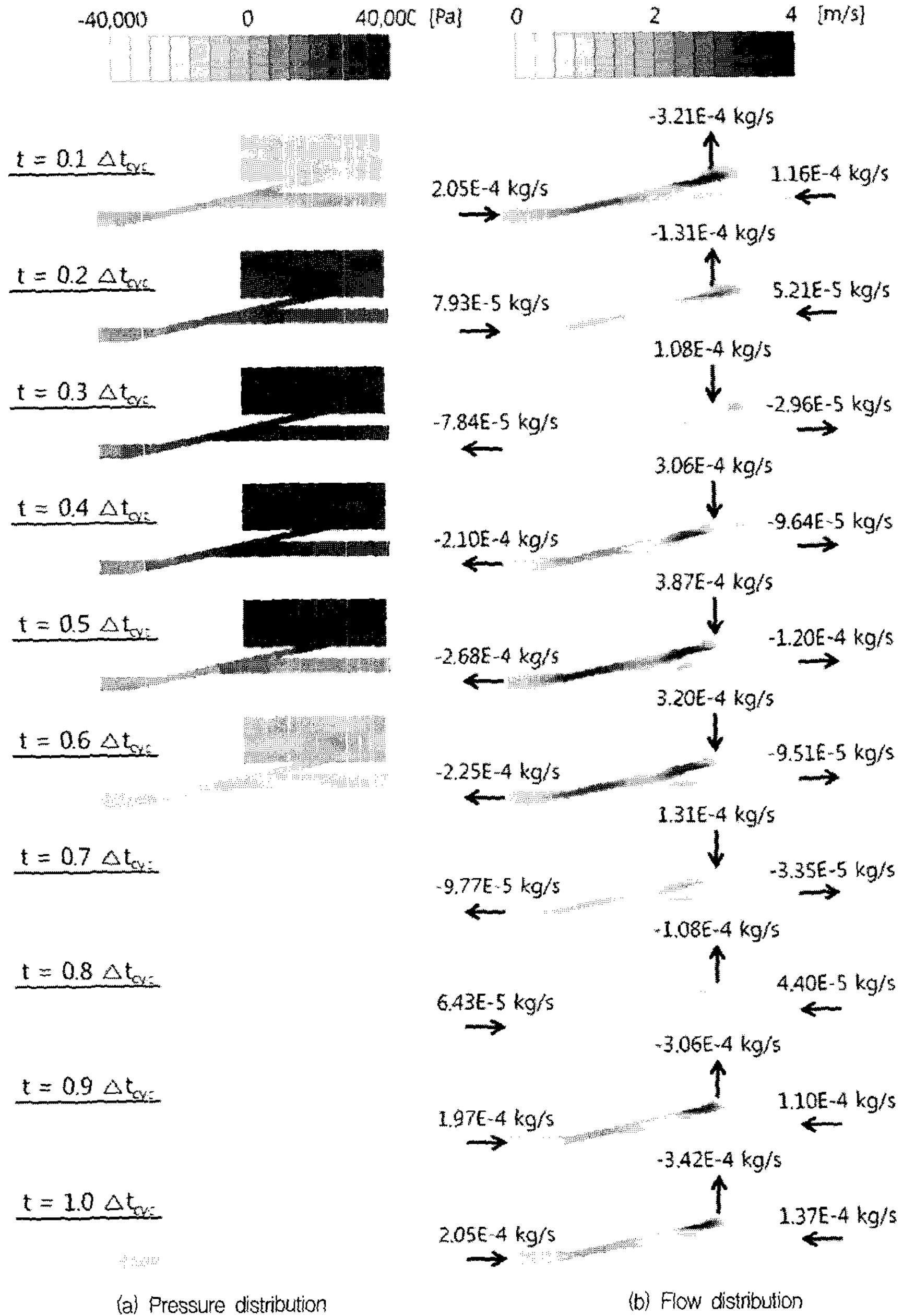


Fig. 6 Flow and pressure distribution (max. displacement 8 μm , frequency 160 Hz)

분리 되어 성능이 좋아진다. 그러나 1.2 mm 이상에서는 구동부와 상류로의 주채널이 바로 연결되기 때문에 성능이 나빠지게 된다. 따라서, 본 연구에서 사용한 기본 형상으로부터 최대 성능을 갖는 주채널의 높이로 1.2 mm를 택하였다.

3.3 주채널 두께의 영향

상류 방향 주채널 설치 높이와 더불어 채널 두께도 상류와 연결되는 유동에 영향을 미치기 때문에 펌프의 성능을 변화시킨다. 기존 Fig. 1의 형상에서 채널 두께

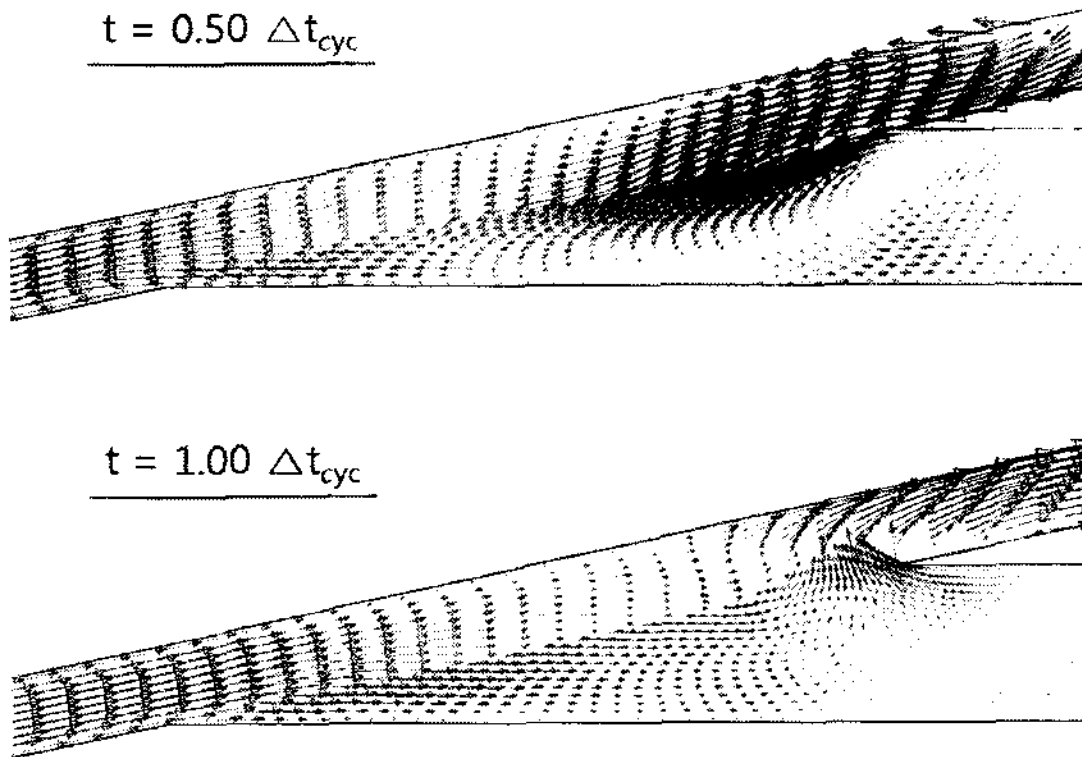


Fig. 7 Flow distribution (max. displacement 8 μm , frequency 160 Hz)

1 mm를 0.4~1.2 mm로 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 이로부터 Fig. 5와 같은 상류 방향의 주채널의 두께 변화에 따른 유량비를 얻을 수 있었다. 경사채널을 흐르는 평균 속도가 1 m/s과 2 m/s에서는 두께가 1.0 mm에서 최대 효율을 얻을 수 있었으며 평균 속도가 4 m/s일 때는 채널 두께가 증가할수록 성능이 증가하였다. 이는 속도가 빠를 경우 경사채널 내에서 관성이 더 크게 미쳐서 이러한 결과를 얻었다. 본 연구에서 사용하는 구동부의 작동 범위에서는 경사채널에서 평균 유속이 2 m/s 정도이기 때문에 펌프 작동시 성능을 분석하기 위해서 채널 두께를 1.0 mm로 선택하였다.

4. 작동 조건에 따른 유동 특성

마이크로 펌프의 형상에 따른 결과로부터 최대 유량비를 갖는 펌프 형상에 대해 구동부에서 박막의 변형에 따른 유동 특성에 대해 수치해석 하였다. 이 때, 시간에 따른 박막의 변형을 표현하기 위해서, 분포하중에 따른 박막의 변형관계식인 식 (1)에 박막의 가진주파수와 관계를 sin파를 사용하여 표현하였다. 본 연구에서는 사용된 마이크로 펌프의 작동 범위인 박막 최대변위 4~8 μm 와 가진주파수 80~160 Hz에서의 유동특성에 대해 분석하였다. 이와 같이 박막의 변형을 표현한 해석 결과가 주기적인 특성을 갖게 하기 위해서 10 회 변형 후의 값으로부터 다음의 결과를 얻었다.

4.1 박막 변형에 따른 유동 특성

본 연구에서 분석한 박막 최대변위 및 가진주파수

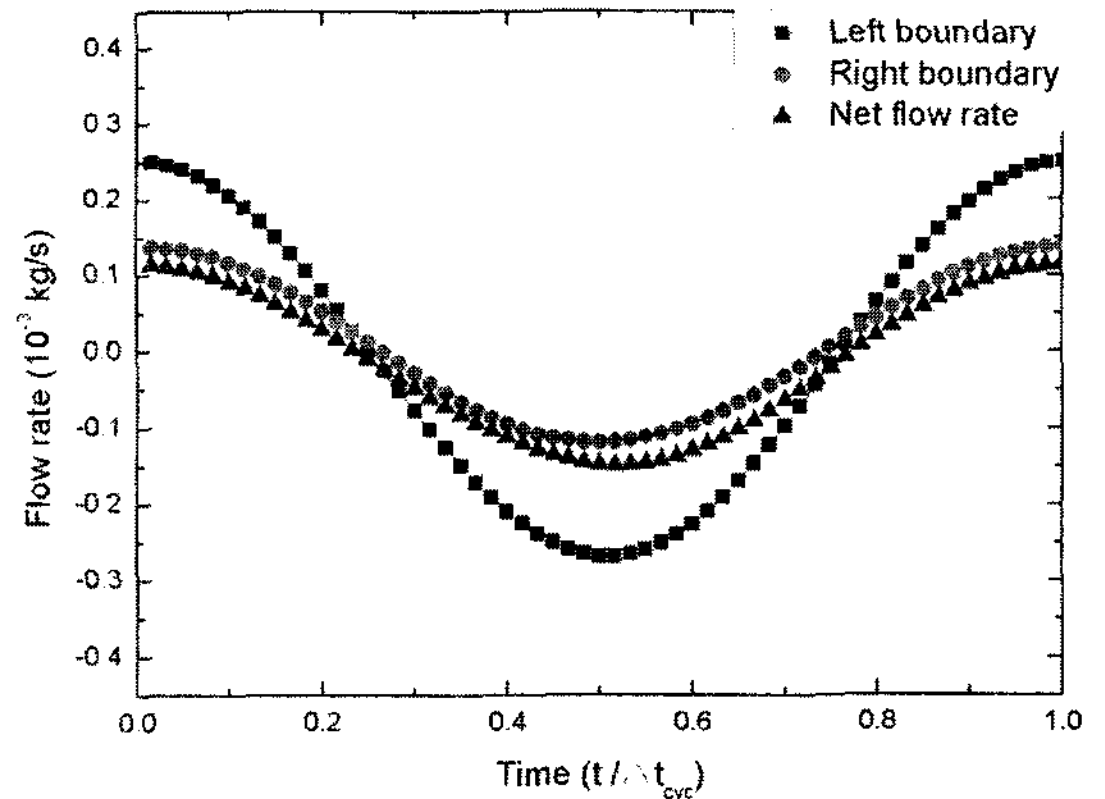


Fig. 8 Mass flow rate (max. displacement 8 μm , frequency 160 Hz)

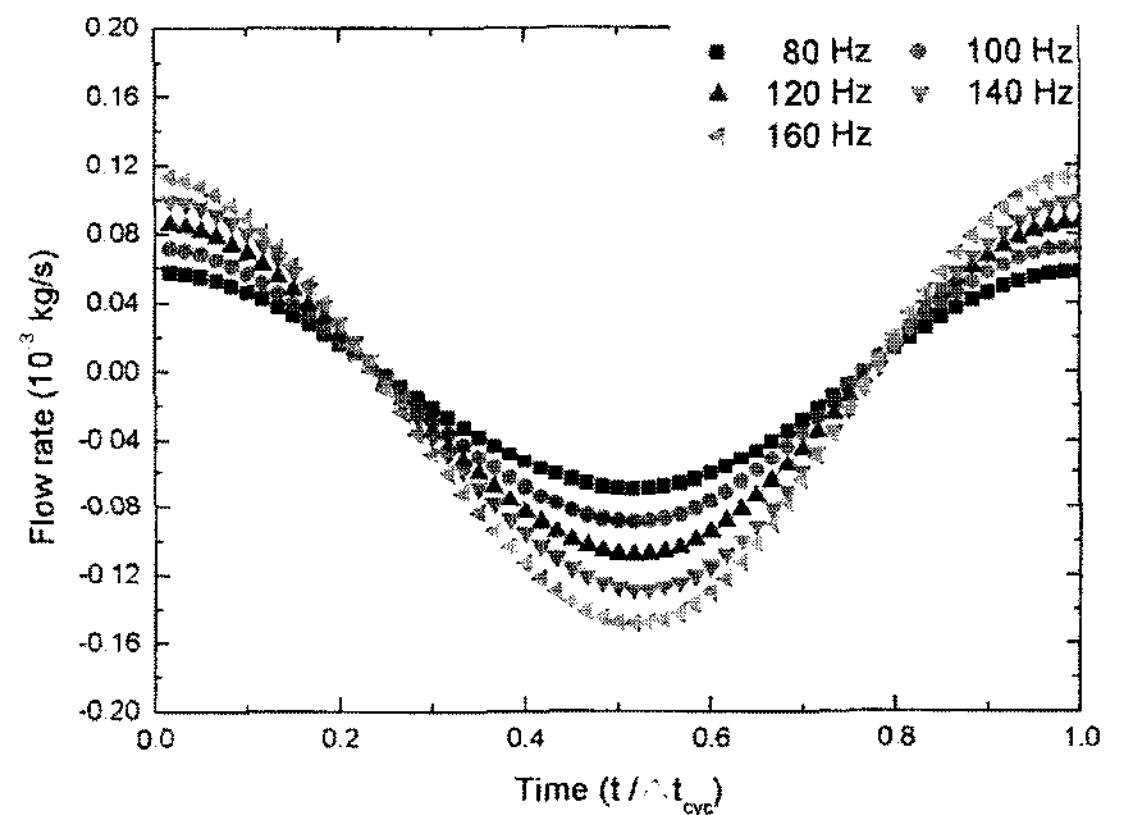


Fig. 9 Mass flow rate with the various frequencies (max. displacement 8 μm)

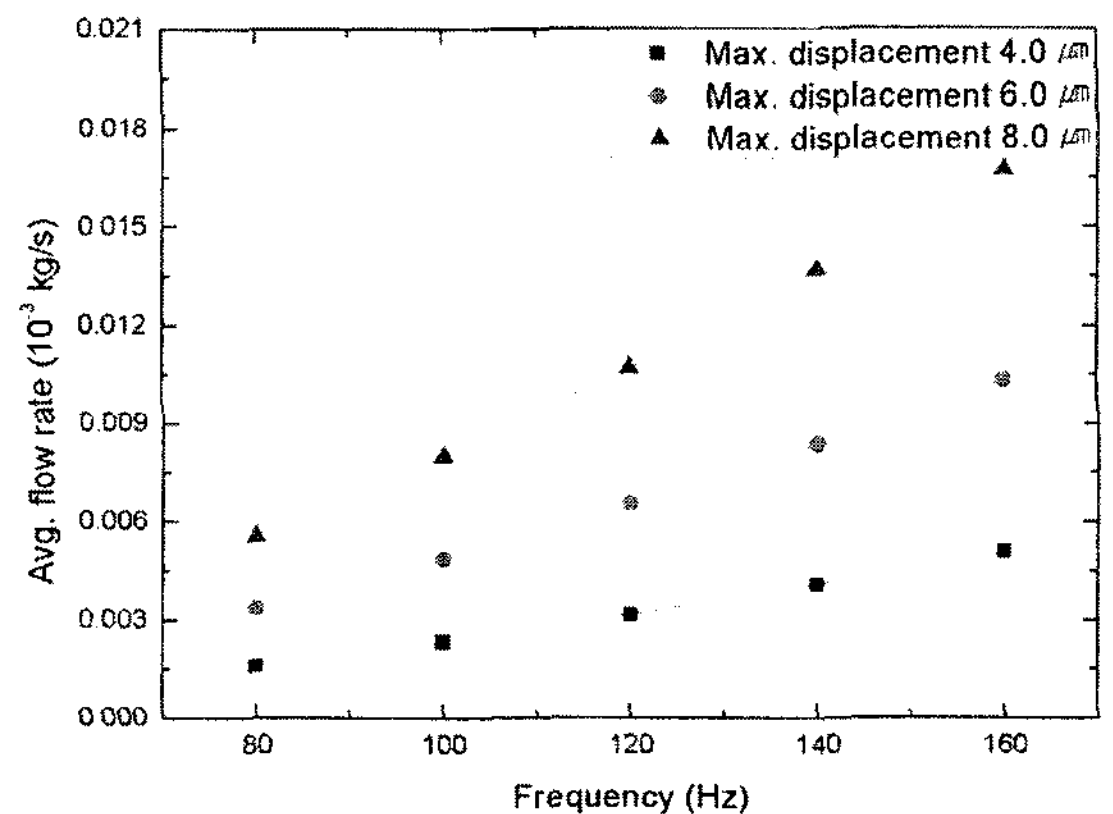


Fig. 10 Averaged mass flow rate with the various frequencies

영역에서는 유량 및 압력 값에 다소 차이는 보였지만 전반적인 유동 특성은 비슷한 경향성을 가졌다. Fig. 6

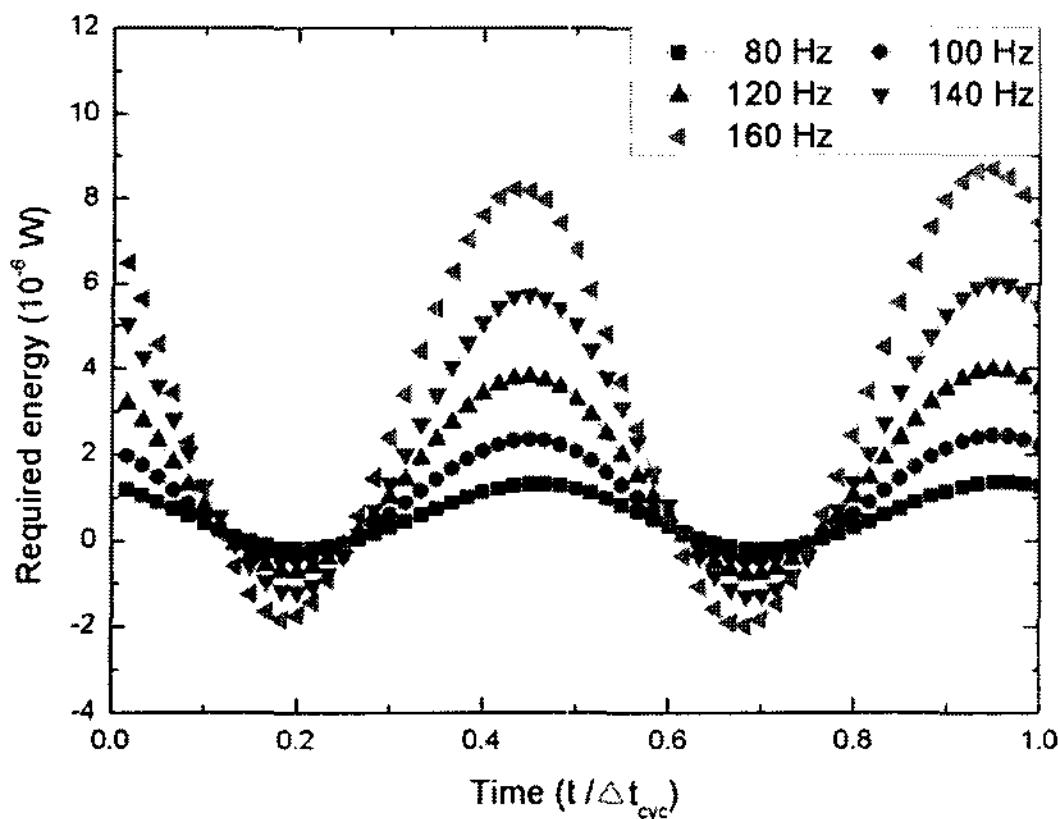


Fig. 11 Required energy with the various frequencies (max. displacement 8 μm)

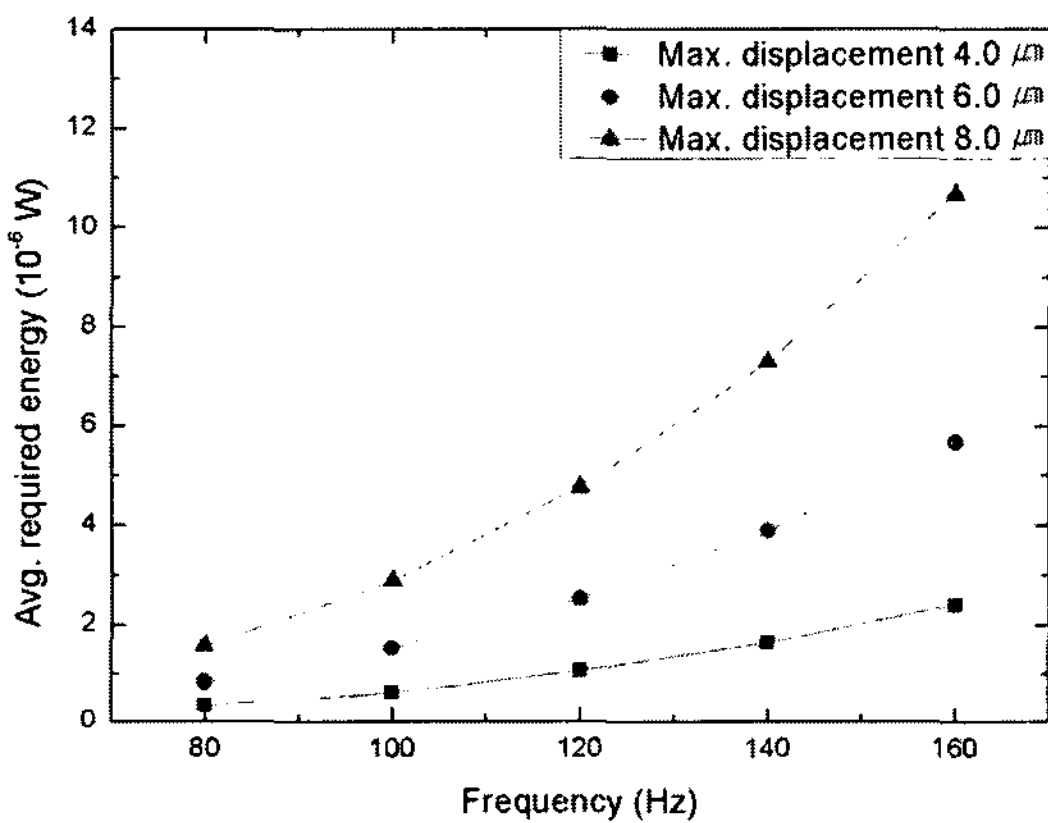


Fig. 12 Required energy with the various frequencies

은 최대변위가 8 μm 와 가진주파수 160 Hz 일 때의 유동 및 압력 분포를 보여주고 있다. 본 연구에서 구동부에서 유동을 발생시키기 위해서 박막의 변위를 표현할 때 식 (1)을 사용하였으며 이는 박막 전반에 균일한 하중이 작용하였을 때의 변형 양상을 보여준다. 이와 같은 박막의 변위를 사용하여 Fig. 6(a)와 같은 구동부 내 압력 분포를 얻었으며 시간에 따라 구동부 내 유체의 압력은 거의 균일한 분포를 가졌다. 최대 변형시에도 구동부 내 압력분포는 평균값을 기준으로 1% 정도의 편차를 가졌다. 또한 Fig. 6(b)의 유동 분포를 보면, 구동부의 압축으로 인해 구동부에서 유량이 배출되었을 경우가 구동부의 팽창으로 인해 구동부로 흡입이 이루어졌을 경우보다 하류로 흐르는 유량이 더 크게 나타나며 이 차이로부터 펌프가 작동하는 것이다.

최대 변위시 경사채널과 주채널의 연결 부위에서 유동장은 Fig. 7과 같이 형성된다. 이를 보면, 구동부

로 흡입시에는 양방향에서 모두 유동이 흘러 들어가는 것을 볼 수 있다. 그러나 배출시에는 상류의 주채널과 연결된 부분에서 와류가 생기면서 상류로 흐르는 유동을 방해하게 되어 하류로 유동이 더 크게 발생하게 된다. 이와 같이 경사채널의 각을 이용한 마이크로 펌프의 경우 상하류의 유동 발생으로부터 펌프의 성능을 얻을 수 있었다.

4.2 박막 최대변위 및 가진주파수에 따른 유량

마이크로 펌프 박막의 최대변위가 8 μm 이고 가진주파수가 160 Hz일 때 주채널 양단에서 유량은 Fig. 8과 같다. 이를 보면, 구동부에서 흡입 및 배출로 인해 양단 유량차에 변화를 가져오게 되며 하류에서 유량 변화 폭이 상류에서 유량 변화 폭보다 크게 나타났다. 또한 펌프 작동으로 인한 상류와 하류의 유량 차이를 보면 전반적인 유동이 상류에서 하류로 발생하게 된다.

Fig. 9는 박막의 최대변위가 8 μm 이고 가진주파수가 80~160 Hz일 때 상류에서 하류로 유량 변화를 보여주고 있다. 이를 보면, 가진주파수가 증가할수록 유량 변화 폭이 크게 나타났다. 이는 본 논문에서 사용한 가진주파수 영역에서 주파수가 증가할수록 구동부 내 압력변화가 크게 발생하게 되며 이에 따라 유량 변화가 더 크게 나타나기 때문인 것으로 보인다.

이와 같은 박막의 최대변위 및 가진주파수 변화에 따른 평균 유량은 Fig. 10과 같다. 박막의 최대변위 및 가진주파수의 증가는 유량 증가를 가져오게 되며 박막의 최대변위 및 가진주파수는 유량과 선형적인 관계를 갖는다. 따라서 마이크로 펌프로부터 얻고자 하는 유량을 맞추기 위해서는 박막의 최대 변위 및 가진주파수 변화로부터 얻을 수 있다.

4.3 박막 최대변위 및 가진주파수에 따른 필요에너지

마이크로 펌프 내에서 박막의 변형은 펌프 내의 유동을 발생시킨다. 박막의 양면에 변형을 위한 힘 외의 힘을 받지 않는 상황에서는 박막의 변형을 일으키는 힘에 따른 에너지를 필요로 하지만, 펌프의 구동원으로 사용되는 박막의 경우 변형을 일으키고자 하는 힘 외에도 구동부 내 유체의 압력으로 인한 힘을 고려하여야 한다. 본 연구에서는, 박막의 변형에 있어 박막 최대변위 및 가진주파수의 변화에 따른 구동부 내 압

력 변화로 인해 필요로 하는 에너지를 비교하였다.

펌프의 작동에 있어 구동부 내 압력 변화로 인해 필요로 하는 동력은

$$Power = VI = \frac{P \cdot \Delta l \cdot A}{\Delta t} \quad (2)$$

와 같이 유체에 의해 박막에 작용하는 압력 P , 시간에 따른 박막 변위량 Δl , 박막 단면적 A 와 계산을 위한 시간 간격 Δt 로 부터 구할 수 있다. Fig. 11은 박막 최대변위가 $8 \mu\text{m}$ 일 때 가진주파수에 따라 필요로 하는 에너지를 보여주고 있다. 이를 보면, 시간에 따른 1번의 박막 변형 주기 동안 2번의 에너지 변화 주기를 형성한다. 이는 압력변화 주기 및 박막 변위변화 주기의 차이로 인해 발생한다. 또한, 가진 주파수의 증가에 따라 필요로 하는 에너지가 증가하는 것을 볼 수 있으며 음의 값 보다 양의 값이 더 큼을 확인할 수 있다. 이는 구동부의 팽창 시에 드는 에너지보다 압축 시에 드는 에너지가 크기 때문이다.

이와 같이 박막 최대변위 및 가진주파수에 따라 요구하는 에너지 최대와 최소값의 차이를 Fig. 12와 같이 구하였다. 이를 보면, 최대변위 및 가진주파수 증가에 따라 필요로 하는 에너지가 유량의 증가 폭보다 더 크게 커지는 것을 볼 수 있다. 펌프로부터 얻는 유량의 증가를 위한 박막의 최대변위 및 가진주파수 증가는 더 많은 양의 에너지를 요구한다. 따라서 펌프 설계 시 필요로 하는 에너지를 고려하여 유량에 맞는 형상이 설계되어야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 미세유체기계에 핵심 장비로 사용되는 마이크로 펌프 중에, 유체의 관성을 이용한 밸브 없는 양방향 피에조 마이크로 펌프에 대한 유동특성을 분석하기 위해서 수치해석을 수행하였다. 이 때, 구동부 박막의 변형을 모사하기 위해서 이동격자를 사용하여 구동부로부터 유동을 발생시켰다.

이와 같은 해석방법으로부터 마이크로 펌프의 성능을 변화시키는 형상변수로써, 경사채널과 주채널 사이 각, 주채널의 위치 및 두께를 고려하여 구동부의 흡입 및 배출시 유량비를 최대로 갖는 형상을 얻었다. 이 때 얻은 형상으로부터 박막의 변형에 따른 유량과 필요로 하는 에너지에 대해 분석하였다. 박막의 최대변

위 및 가진주파수의 증가로부터 더 많은 유량을 펌프에서 얻을 수 있었지만 이는 유량의 증가보다 더 큰 에너지를 필요로 하였다.

참고문헌

- (1) W. Wang and S.A. Soper, 2007, "Bio-MEMS Technologies and Application," CRC Press, pp. 150~163.
- (2) M. Richter, R. Linnemann and P. Woias, 1998, "Robust Design of Gas and Liquid Micropumps," Sensors and Actuators A, Vol.68, pp.480-486.
- (3) X.N. Jiang, Z.Y. Zhou, X.Y. Huang, Y. Li, Y. Yang and C.Y. Liu, 1998, "Micronozzle/diffuser Flow and its Application in Micro Valveless Pumps," Sensors and Actuators A, Vol.70, pp. 81~87
- (4) V. Singhal, S.V. Garimella and J.Y. Murthy, 2004, "Low Reynolds Number Flow through Nozzle-Diffuser Elements in Valveless Micropumps," Sensors and Actuators A, Vol.113, pp. 226~235.
- (5) I.Y. Kim and A. Tezuka, 2003, "Optimization and Numerical Flow Analysis of a Valveless Micropump," JSME, Vol.46, No.2, pp. 772~778.
- (6) J. Jeong and C.N. Kim, 2007, "A Numerical Simulation on Diffuser-Nozzle based Piezoelectric Micropumps with Two Different Numerical Models," International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.53, pp. 561~571.
- (7) A. Olsson, G. Stemme and E. Stemme, 2000, "Numerical and Experimental Studies of Flat-walled Diffuser Elements for Valve-less Micropumps," Sensors and Actuators A, Vol.84, pp. 165~175.
- (8) J.S. Yoon, J.W. Choi, I.H. Lee and M.S. Kim, 2006, "A Valveless Micropump for Bidirectional Application," Sensors and Actuators A, Vol.135, pp. 833~838.
- (9) 2004, STAR-CD Version 3.20 Methodology, CD Adapco Group.
- (10) S.M. Sze, 1994, "Semiconductor Sensors," John Wiley & Sons, Inc.