

연동형 마이크로펌프의 유동에 대한 수치해석 연구

이나리* · 이상혁* · 허남건**†

A Numerical Study on the Flow Characteristics of a Peristaltic Micropump

Na-Ri Lee*, Sang-Hyuk Lee*, Nahm-Keon Hur**†

Keyword : Peristaltic micropump(연동형 마이크로펌프), CFD(전산유체역학), Moving mesh technique(이동 격자 방법)

ABSTRACT

In the present study, the flow characteristics of a peristaltic micropump were numerically analyzed. A channel wall motion of the micropump was simulated using a moving mesh technique. A sine wave pattern was assumed to simulate the peristaltic motion of wall. The present numerical method was verified by comparing the result with the available numerical data. The effects of the operating conditions which include the maximum displacement and frequency of the channel wall and the phase difference between top and bottom walls on the flow characteristics were investigated. From these numerical results, the pressure-flowrate characteristic curve was obtained for various maximum displacement and frequencies.

1. 서 론

최근 미소가공기술의 발전에 따라 많은 산업분야에서 마이크로펌프의 이용이 이루어지고 있다. 연동형 마이크로펌프는 마이크로 장치 중에서도 Bio-MEMS 분야에서 많이 개발되고 있으며, 연동형 마이크로펌프는 밸브가 없고, 펌프 내 형상이 단순하여 유동에 간섭이 적다는 장점이 있으며, 적은 유량을 정밀하게 이송할 수 있어 심장수술 중 혈액 공급에 사용되거나, 환자의 체내에 약물을 공급하기 위해서 정확한 양을 지속적인 방법으로 주입해야하는 치료법에 응용되고 있고, 특히 휴대용 약물주입 펌프 등에 사용되고 있다. 최근 체내 삽입형 마이크로펌프에 대한 관심이 높아지면서 관련분야의 연구가 활발히 진행 중이다. 체내 삽입을 목적으로 하는 마이크로펌프는 체내에서의 세포손상을 최소화해야한다. 따라서 다양한 구동 방식을 사용하여 펌프의 특성에 대한 연구가 수행되고 있다. Yin과 Fung¹은 연동형 마이크로펌프의 유동 특성을 알아보기 위해 이론적 연구와 더불어 타임벨트를 이용한 간단한 실험장

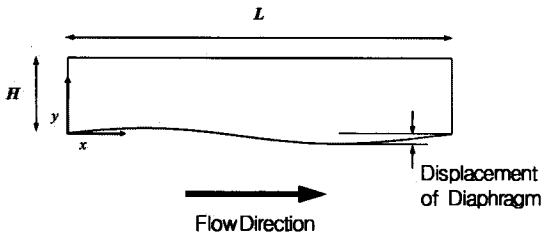
치를 구성하여 실험하였으며, 이로부터 연동형 마이크로펌프의 유동 특성을 분석하였다. Grosjean과 Tai²는 열공압(Thermopneumatic) 구동방식의 마이크로펌프를 설계 및 제작하여 펌프의 전기적 특성에 대해 연구하였다. 이로부터, 열공압형 마이크로펌프는 체내 삽입시 과열로 인한 세포 손상과 반응 속도가 느리고 높은 전력소비가 요구됨을 확인하였다. 또한, Teymoori와 Abbaspour-Sani³는 체내 약물 투여를 위한 정전형(Electrostatic) 마이크로펌프를 설계하기 위해 펌프의 형상과 유량의 관계에 대해 수치해석하였다. 정전형 마이크로펌프의 경우 출력이 낮아 스트로크가 작다는 단점이 있다. Pham 등⁴은 압전형(Piezoelectric) 구동방식의 마이크로펌프를 설계, 제작하여 연구하였다. 압전형 마이크로펌프의 경우 반응시간이 짧고, 출력이 높다는 장점이 있다. 또한, Tatsumi 등⁵은 Yin과 Fung¹이 한 실험에 대하여 수치해석적인 연구를 통해 실험값과 비교하고, 펌프의 다양한 연동운동 형상에 따른 특성을 분석하였다.

본 연구에서는 연동형 마이크로펌프의 유동특성에 대해 수치해석하였다. 수치해석을 수행하기 앞서, 타당한 결과를 얻기 위해 격자 밀도의 민감도 분석 및 기존 해석결과와의 비교를

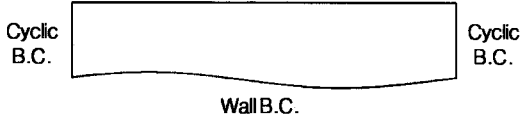
* 서강대학교 대학원

** 서강대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail : nhur@sogang.ac.kr



(a) Geometry of a peristaltic micropump
Wall B.C.



(b) Boundary condition

Fig. 1 Peristaltic micropump

수행하였다. 이를 통해, 채널의 작동 조건에 따른 유동 특성을 분석하였다. 또한, 평판 및 원통형 연동형 마이크로펌프의 유동특성을 비교하였다.

2. 수치해석

2.1 연동형 마이크로펌프

연동형 마이크로펌프는 박막의 움직임으로 인한 채널 단면적의 변화로부터 유동을 발생시킨다. 이 때, 발생하는 채널 내 양방향의 유동속도 차이로부터 유동이 결정된다. 본 연구에서는 연동형 마이크로펌프의 형상 및 작동 조건에 따른 유동특성을 해석하고자 Fig. 1(a)와 같이 주기적인 유동특성을 갖는 영역을 설정하고 2차원으로 모델링하여 계산을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 연동형 마이크로펌프 채널의 주기적인 영역은 폭(H) 0.1 mm, 길이(L) 1 mm를 가지며, 채널 상하단 박막의 변위에 따라 다양한 유동이 발생하게 한다. 이 때, 박막은 0.005 ~ 0.04 mm의 최대 변위를 갖는 sine 파형으로 다음의 상관식과 같이 시간에 따라 변형한다.

$$y = a \sin(2\pi x + 2\pi ft) \quad (1)$$

여기서, a 는 박막의 최대변위, f 는 주파수를 나타낸다. 박막의 최대변위 및 주파수에 따라 연동되는 채널형상이 결정된다. 박막의 최고점이 왼쪽에서 오른쪽으로 이동함에 따라 전반적으로 오른쪽 방향으로 유동이 형성된다. 이 때, 연동형 마이크로펌프의 특성속도를 채널 길이 L 과 주파수 f 로부터 다음과 같이 정의하였다.

$$c = L \times f(2)$$

연동형 마이크로펌프의 특성을 알아보기 위해 Rathish와 Naidu⁶와 Haroun⁷은 다양한 변수들을 무차원화 하였으며, 본 연구에서도 각각의 변수들을 다음과 같이 무차원화 하였다.

$$t' = \frac{t}{T}, y' = \frac{y}{H}, A' = \frac{A_{\min}}{A_0}, \bar{u}' = \frac{\bar{u}}{c}, U' = \frac{U}{c} \quad (3)$$

여기서, t 는 특정 해당 시간, T 는 전체 주기 시간을 나타내고, y 는 측정 위치, H 는 채널의 평균 높이를 나타낸다. A_{\min} 는 박막의 최대 변위시 단면적, A_0 는 초기 단면적이며, 수치해석으로부터 얻은 속도 u 의 채널내 해당 위치에서 시간에 따른 평균값 \bar{u} 와 채널 전체에서의 평균값 U 는 특성속도 c 로 각각 무차원화하였다.

2.2 경계조건 및 해석기법

연동형 마이크로펌프의 연동운동을 모사하기 위해, 본 연구에서는 Fig. 1(b)와 같이 펌프가 주기적으로 반복되는 채널의 양면에 주기경계조건을 설정하고 나머지 면에는 벽 경계조건을 설정함으로써, 주기적으로 반복되는 유동에 대해 수치해석하였다. 상용 CFD 프로그램인 STAR-CD⁸를 사용하여 비정상 비압축성 층류유동에 대한 해석을 수행하였다. 지배방정식으로 다음과 같은 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 이용하였다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (5)$$

또한, 연동형 마이크로펌프 내 유동을 발생시키는 채널 상하단 박막의 변형을 위하여 이동 격자 방법(Moving Mesh Method)이 사용되었다. 이동 격자 방법은 형상의 변형을 표현하기 위해 계산영역 내 격자를 이동함으로써 유동의 해석을 가능하게 한다. 본 연구에서는 펌프의 상하단 박막 형상이 변형되므로 시간에 따라 이동 격자 방법에 의하여 격자를 재정렬함으로써 계산을 수행하였다.

3. 연동형 마이크로펌프 내 유동특성

3.1 수치해석 결과 검증

연동형 마이크로펌프는 채널의 연동운동으로 인해 유동이 발생된다. 이에 따른 압력과 속도분포를 가시화하여 유동장을 확인하였다. Fig. 2는 연동형 마이크로펌프 내 유동이 완전 발달되었을 때 일정시간에서의 압력과 속도분포를 나타낸다. Fig. 2(a)의 압력분포로부터 채널의 단면이 좁아지는 영역에서 높은 압력을, 단면적이 넓어지는 부분에서 낮은 압력을 갖는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 압력분포의 영향으로 Fig. 2(b)와 같은 유동장이 형성된다. 단면적이 좁은 부분에서 넓은 부분 방향으로 유동이 발생하며, 시간에 따라 박막의 최고점이 왼쪽에서 오른쪽으로 이동함으로써, 전반적으로 오른쪽 방향으로 유동이 형성된다. 이 때, 본 연구에서 수행한 펌프의 작동조건 하에서는 Reynolds수가 1.1 ~ 78.6 범위 내의 층류 유동 특성을 가진다.

이와 같은 유동 특성을 분석하기에 앞서, 타당한 해석결과를 얻기 위해서는 다양한 격자 밀도를 사용한 해석으로부터 해석의 타당성 검토를 수행하여야 한다. 본 연구에서는 채널 하단의 박막이 0.01 mm의 최대 박막 변위 및 100Hz의 변형 주파수로 작동하는 연동형 마이크로펌프의 유동특성에 대해, 펌프 채널의 높이와 길이에 20×200, 40×400, 70×700, 100×1000 개의 격자를 사용한 해석결과를 Tatsumi 등⁵이 수행한 기존 해석결과와 비교하였다. Fig. 3은 충분히 발달한 채널 내 특정 시간에서의 속도 분포에 대해 기존 해석결과와 다양한 격자 밀도를 사용한 해석결과를 비교하였다. 박막변형의 주기 동안에 하단의 박막 변형으로부터 채널 내 유동이 박막 최대점 이동 방향 및 반대 방향으로 형성되는 것을 볼 수 있다. 이 때, 양방향으로 형성된 속도장을 보면, 박막의 최대점 이동 방향으로 더 많은 유동이 발생하게 된다. 이와 같은 연동형 마이크로펌프의 채널 내 유동에 대해 다양한 격자 밀도를 사용한 결과를 보면, 본 연구에서 사용한 격자밀도 범위에서는 격자밀도에 따른 해석결과가 큰 차이를 보이지 않았다.

또한, 본 연구에서의 해석 결과는 기존 해석결과와 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 마이크로펌프 내 유동특성을 분석하기 위해, 40×400개의 격자를 사용함으로써, 각각의 해석 조건에 대해 2.40Hz AMD Opteron 64bit processor 1CPU로 8 시간 정도의 계산을 수행하였다.

3.2 박막의 최대변위에 따른 유동특성

본 연구에서는 연동형 마이크로펌프의 성능을 결정하는 박막의 최대변위 및 변형 주파수, 변형되는 상하단 박막의 위상차에 따른 유동특성을 수치해석 하였다. 박막의 최대변위에 따른 영향을 알아보기 위해, 박막의 변형 주파수 100Hz로 펌프특

성 속도가 0.1 m/s 일 때, 박막 최대변위를 0.005 ~ 0.04 mm으로 설정함으로써 단면 감소율(A_{min}/A_0)이 0.60 ~ 0.95에

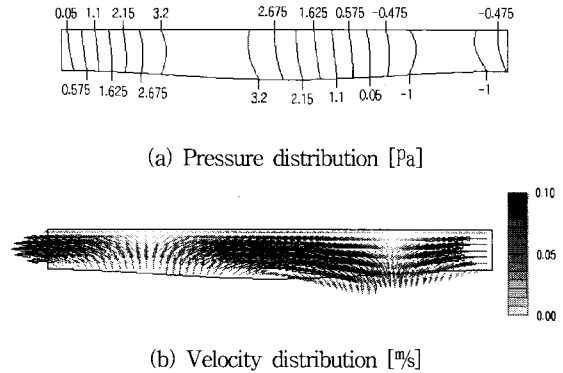


Fig. 2 Flow characteristics inside the peristaltic micropump

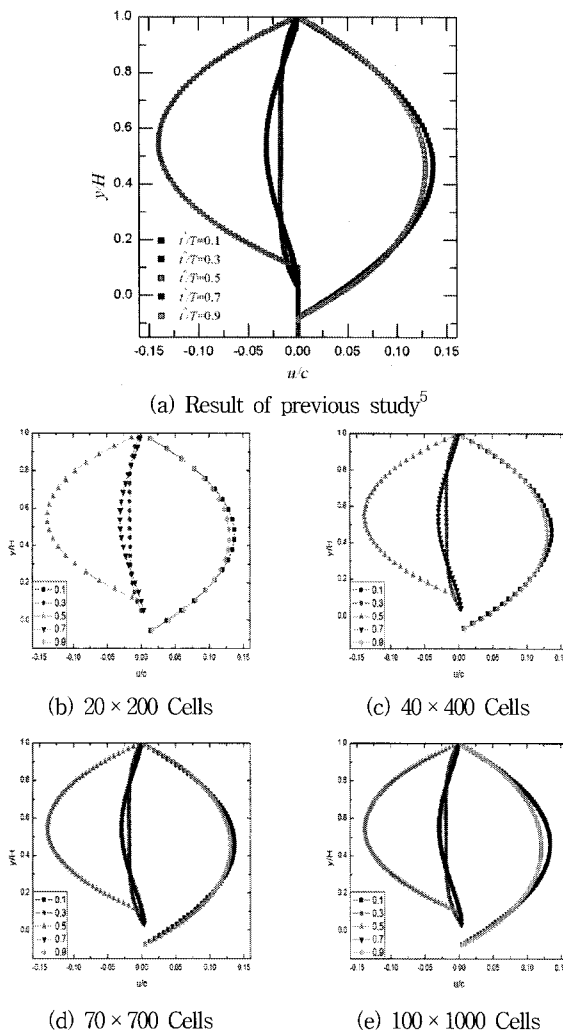


Fig. 3 Comparison of the time-averaged velocity from the numerical analysis with various grid densities with result of the previous study⁵

대해 해석을 수행하였다. Fig. 4는 채널 내 해당 높이에서 박막 최고점이 이동하는 방향으로 형성되는 유동의 평균속도를 보여준다. 시간에 따른 평균 유동 분포는 관내 유동과 같이 포물선 형태의 유동 분포를 가지며, 속도장의 크기는 박막의 최대변위의 영향을 받는 것을 볼 수 있다. 박막의 최대변위로 인한 채널 내 단면감소율에 따른 채널 전체에서 형성되는 유동의 평균 속도를 Fig. 5에서 볼 수 있다. 채널의 단면 감소가 많이 일어날수록 채널 전체의 평균 속도는 더 큰 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 이 때, 단면감소율의 변화보다 평균 속도가 증가하는 양이 더 크게 된다. 이는 박막이 변형이 많이 일어날 경우 역류를 많이 감소시킬 수 있게 되어 더 많은 양의 유량을 얻게 된다. 이와 같이 연동형 마이크로펌프 내 유체의 속도를 결정하는데 있어 박막의 최대변위에 따른 채널의 단면감소율은 중요한 영향을 미친다.

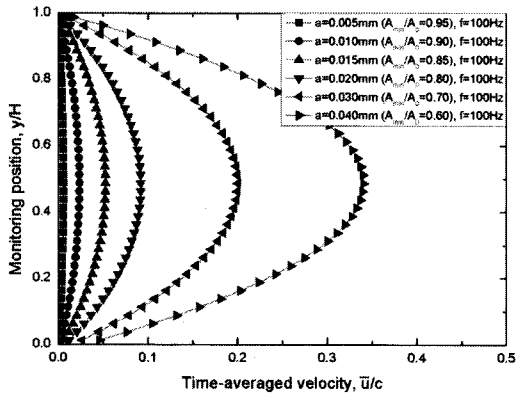


Fig. 4 Time-averaged velocity with various max. displacements

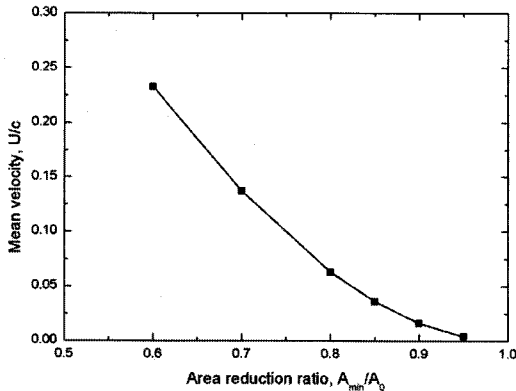


Fig. 5 Mean velocity with various max. displacements

3.3 박막의 변형 주파수에 따른 유동특성

연동형 마이크로펌프에서 발생하는 유동을 결정하는 중요변수로써, 채널의 벽 이동 속도는 유체의 속도를 결정하게 된다.

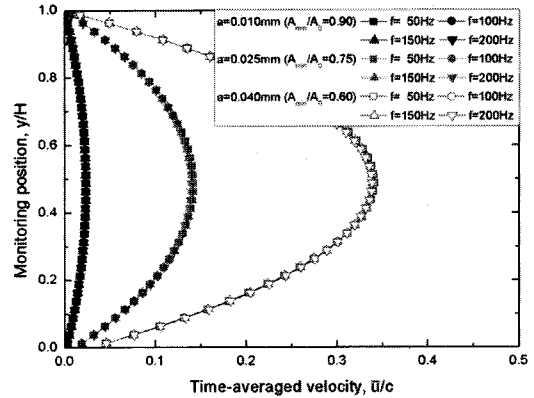


Fig. 6 Time-averaged velocity with various frequencies

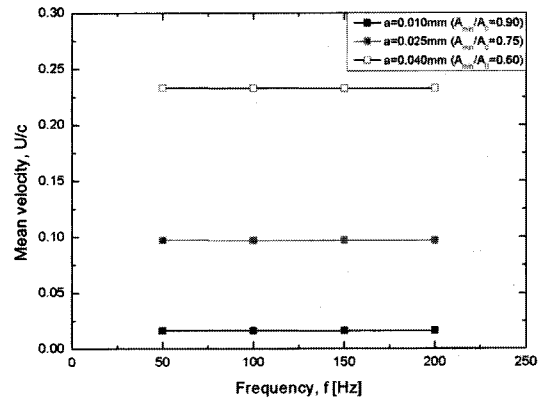


Fig. 7 Mean velocity with various frequencies

연동형 마이크로펌프는 채널 형상의 변형을 가지면서 유동을 발생시키므로 채널의 벽 이동속도가 유체의 속도에 영향을 주게 된다. 이 때 벽의 이동속도는 주기적으로 반복되는 운동을 하는 연동형 마이크로펌프의 특성상 주파수에 의존하게 된다. 따라서 본 연구에서는 단면감소율이 0.90, 0.75, 0.60일 때, 변형 주파수를 50 ~ 200Hz로 설정함으로써 펌프의 특성 속도가 0.05 ~ 0.20 m/s에 대해 해석을 수행하였다. Fig. 6은 채널 내 해당 높이에서 박막 변형 주파수에 따른 유체의 평균속도를 나타낸다. 채널의 단면감소율에 따라 무차원된 속도분포가 정해지며, 변형 주파수는 큰 영향을 주지 않는 것을 볼 수 있다. 변형 주파수가 증가함에 따라 펌프의 특성속도가 증가하게 되나, 발생하는 유체의 속도 분포도 주파수에 비례하여 증가하게 되므로, 무차원된 평균 속도는 변형 주파수의 영향을 받지 않게 된다. 주파수에 대한 영향은 주파수에 따른 채널 전체의 평균 속도를 보여주는 Fig. 7에서 확인할 수 있다. 이와 같이 변형 주파수에 따른 채널 내 유체의 무차원된 속도는 일정한 값을 갖게 된다.

3.4 상하단 박막의 변형사이 위상차에 따른 유동특성

연동형 마이크로펌프의 경우 채널의 형상 변화가 유동의 발생에 가장 큰 원인이 되므로 형상 변형에 다양성을 추구하여 정밀한 유량이송을 도출하여 내는 것이 중요하다. 본 계산에서는 채널의 상하단 박막 변형에 차이에 따른 펌프의 성능을 비교하고자 상하단 박막 변형이 위상차를 갖고 작동하는 경우에 대해 수치해석 하였다. 채널의 하단 박막이 식 (1)과 같이 변형할 경우, 위상차를 갖는 상단은

$$y = a \sin\{(2\pi x + 2\pi ft) + \theta\} \quad (6)$$

와 같이 변형하게 된다. 여기서, θ 는 위상차를 나타낸다. 이와 같은 변형되는 상하단 박막의 위상차에 따른 영향을 분석하기 위해, 상하단 각각의 박막 최대변위가 0.010 mm이고 변형 주파수가 100Hz일 때, Fig. 8과 같이 상하단 박막 변형의 위상차가 0.25π , 0.05π , 0.75π , 1.00π 에 대해 수치해석 하였다. Fig. 9는 채널 내 해당 높이에서의 상하단 박막 변형 사이 위상차에 따른 유체의 평균속도를 나타낸다. 채널 상하단의 박막이 위상차가 없이 변형하는 경우, 채널 내 단면적의 변화가 일어나는 부분이 없기 때문에 박막 최대점이 이동하는 방향으로 유동이 발생하지 않는다. 위상차가 발생함에 따라 채널 내 단면적에 변화가 생기게 되며, 최대 위상차인 1.00π 가 될 때까지 위상차의 증가에 따라 채널 내 유체의 속도장의 크기가 커지게 된다. 이와 같이 변형되는 상하단 박막사이 위상차로 인한 단면감소율에 따른 채널 전체에서의 평균 속도를 Fig. 10에서 볼 수 있다. 상하단 박막 위상차로 인해 발생하는 평균 속도 결과를 하단 박막의 최대변위를 변화시킨 결과와 비교하였다. 위상차로 인한 채널 단면감소율인 0.92, 0.86, 0.82, 0.80에서 평균 속도는 기존 박막의 최대변위를 변화하였을 경우 평균 속도 결과와 일치하는 것을 볼 수 있다. 상하단 박막의 변형 위상차와 같은 채널 형상의 변화는 유량을 변화하게 되며, 발생하는 유량은 채널의 단면감소율에 의해 결정된다. 따라서 연동형 마이크로 펌프의 채널 단면감소율 및 박막 변형 주파수에 의해 펌프 성능이 결정되는 것을 볼 수 있다.

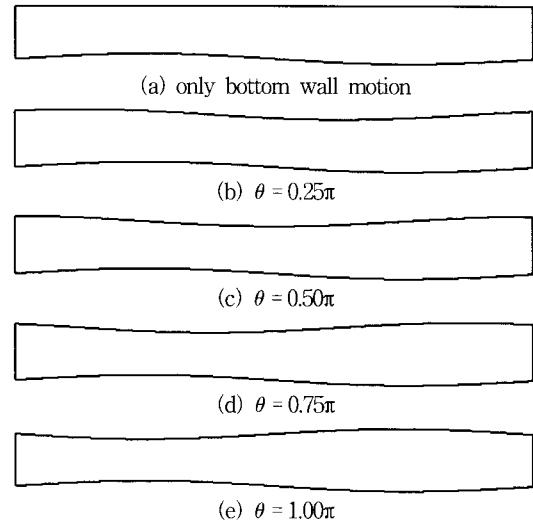


Fig. 8 Wall motion with various phase difference between top and bottom wall

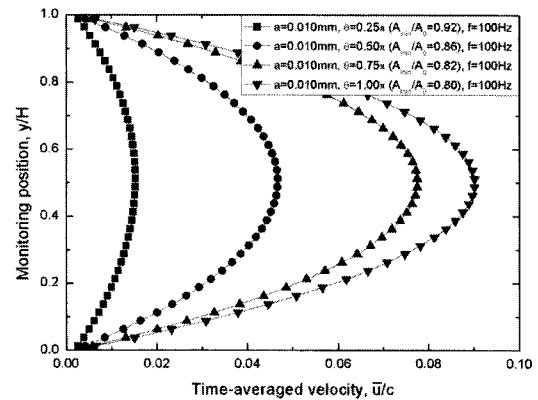


Fig. 9 Time-averaged velocity with various phase difference between top and bottom wall motion

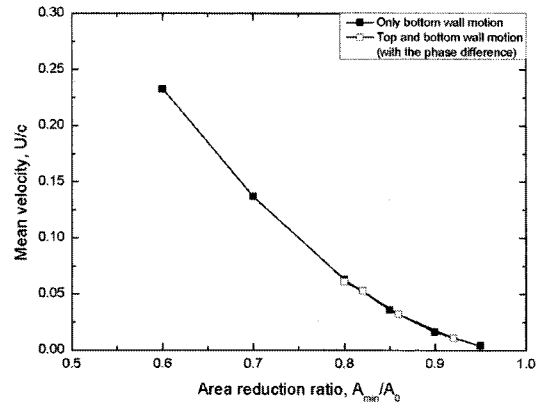


Fig. 10 Mean velocity with various phase difference between top and bottom wall motion

3.5 펌프 양단의 압력차에 따른 유동특성

본 연구에서는 연동형 마이크로 펌프 양단에서 압력차가 발생할 경우, 펌프의 성능에 대해 수치해석 하였다. 펌프의 성능을 결정하는 채널의 단면감소율 0.50 ~ 0.90, 박막의 변형 주파수 50 ~ 200Hz에 대해, 펌프의 양단에 압력차를 적용하였다. 이와 같은 작동조건으로부터 펌프 양단의 압력차에 따른 채널 전체 평균속도를 보여주는 압력-유량 성능 곡선을 Fig. 11과 같이 얻었다. Fig. 11에서 평균속도가 0인 가로축이 나타내는 압력차는 역류가 일어나지 않게 하는 최대 압력차이고, 펌프의 압력차가 0인 세로축이 나타내는 평균속도는 펌프가 가질 수 있는 최대 평균속도이다. 이 때, 속도 및 압력차는 펌프 특성속도 및 변형 주파수를 이용하여 무차원화를 함으로써, 변형 주파수에 대한 영향은 거의 일어나지 않고 채널의 단면감소율에 따라 압력-유량 성능 곡선이 결정되는 것을 볼 수 있다. 채널의 단면감소율이 높아졌을 경우, 펌프는 더 큰 유동을 발생시키며 더 높은 압력에서도 작동 가능함을 보인다.

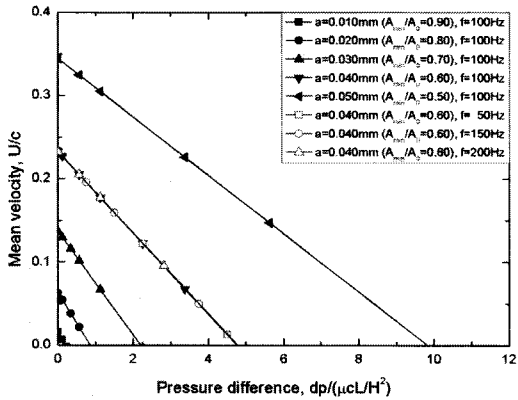


Fig. 11 Pressure-flow characteristic curve with various max. displacement and frequency

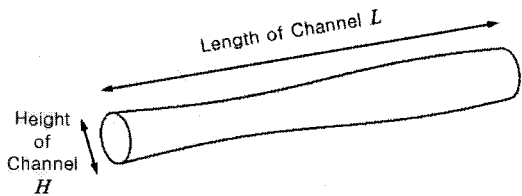


Fig. 12 Peristaltic motion of circular duct

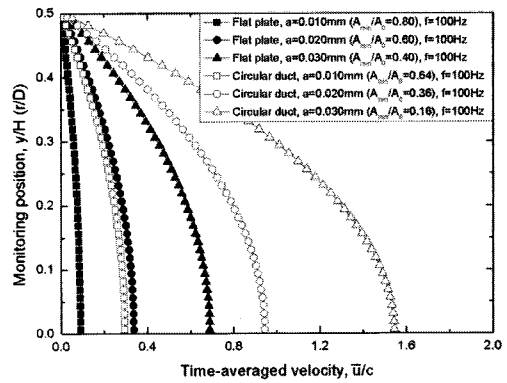


Fig. 13 Time-averaged velocity with various max. displacements of flat plate and circular duct

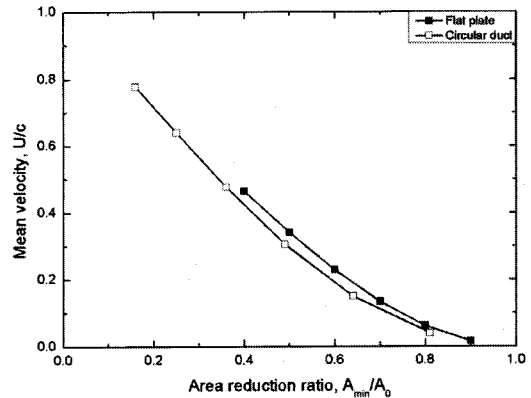


Fig. 14 Comparison of mean velocity with flat plate and circular duct

3.6 평판 / 원통형 연동형 마이크로펌프의 유동특성

연동형 마이크로펌프를 위해 채널 상하단의 평판 형태의 박막이 변형되는 채널뿐만 아니라 원통 형태의 채널의 벽면이 변형을 하는 원통형 채널도 사용된다. 본 연구에서는 Fig. 12와 같은 원통형태의 연동형 마이크로 펌프 내 유동특성에 대해 2차원 축대칭 수치해석을 수행하였다. 그리고 원통형 채널에 대한 수치해석 결과를 평판형 채널 결과와 비교하였다. 높이에 대한 무차원화 하기 위해 평판형의 H 와 원통형의 D 를 0.1mm로 하였다. Fig. 13은 평판형 및 원통형 채널에서 해당위치의 평균속도를 보여준다. 이를 보면, 평판형 및 원통형 채널에서 박막과 채널 중앙까지 속도장의 분포는 비슷한 경향성을 갖는 것을 볼 수 있다. 그러나 원통형 채널은 연동운동시 채널둘레를 따라 박막의 변위가 변하게 되고 평판형 채널의 경우 채널 상하단에서만 변위가 변하게 된다. 따라서 박막의 최대변위에

다른 속도를 비교했을 때 채널 높이 및 지름은 같으나, 단면감소율이 달라지므로 유동 발생시 속도에 차이가 나게 되어, 위 그래프와 같이 관의 형상차이로 인한 유량의 차이가 발생한다. 박막의 변형으로 인한 채널의 단면감소율에 따른 채널 전체의 평균 속도를 비교해 보면, Fig. 14와 같이 평판형 및 원통형 채널이 비슷한 결과를 갖는 것을 볼 수 있다. 따라서 평판형태의 채널을 갖는 연동형 마이크로펌프 뿐만 아니라 원통형태의 채널을 사용할 경우에도 채널 내 유동 특성이 채널의 단면감소율에 의해 결정된다.

4. 결 론

본 연구에서는 연동형 마이크로펌프 내 유동특성을 분석하기 위하여, sine파형의 박막 변형을 갖는 채널에서 박막의 최대변위, 박막의 변형 주파수와 채널 양단의 압력차와 같은 작동조건을 변화시키고 이동 격자 방법을 사용하여 2차원 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과로부터 각 작동조건에 따른 채널 내 유동 특성과 압력-유량 성능곡선을 얻을 수 있었다. 이와 같은 평판 형태의 박막을 사용하는 평판형 채널 뿐만 아니라 원통형 채널을 사용하는 연동형 마이크로 펌프의 유동특성에 대해서도 2차원 축대칭 해석을 수행하였다. 이러한 연동형 마이크로 펌프의 경우, 채널 단면감소율 및 변형 주파수에 의해 특성 및 성능이 결정되는 것을 확인하였다. 따라서, 채널 단면감소율 및 변형 주파수에 영향을 주는 변수를 변화하면 필요한 작동조건 및 유량을 충족하는 연동형 마이크로펌프의 설계가 가능할 것이다.

참고문헌

- (1) Yin, F. C. P. and Fung, Y. C., 1971, "Comparison of theory and experiment in peristaltic transport," *J. fluid Mech.*, Vol. 47, Part 1, pp. 93~112.
- (2) Grosjean, C. and Tai, Y. C., 1999, "A thermopneumatic peristaltic micropump," *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'99)*, Sendai, Japan, pp. 1776~1779.
- (3) Teymoori, M. M. and Abbaspour-Sani, E., 2005, "Design and simulation of a novel electrostatic peristaltic micromachined pump for drug delivery applications," *Sensors and Actuators, A*, Vol. 117, pp. 222~229.
- (4) Pham, M., Nguyen, T. T. and Goo, N. S., 2007, "Development of a peristaltic micropump for bio-medical applications based on mini LIPCA," *Proceedings of ICIUS 2007*, Bali, Indonesia, paper No. ICIUS2007-B002.
- (5) Tatsumi, K., Matsunaga, Y., Miwa, Y. and Nakabe, K., 2007, "Numerical study on fluid flow characteristics of peristaltic pump," *Proceedings of ASCHT07 Xi'an, China*, paper No. ASCHT2007-002.
- (6) Rathish, B. V. and Naidu, K. B., 1995, "A numerical study of peristaltic flows," *Computers and Fluids*, Vol. 24, No. 2, pp. 161~176.
- (7) Haroun, M. H., 2007, "Effect of Deborah number and phase difference on peristaltic transport of a third-order fluid in an asymmetric channel," *Comm. in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 12, pp. 1464~1480.
- (8) STAR-CD Methodology Version 3.24, 2004, Computational Dynamics Ltd.