

한 쌍의 실린더를 가지는 점성구동 마이크로 펌프의 성능 해석

맹주성[†] · 최형일^{*} · 조성찬^{**}

(2003년 2월 13일 접수, 2003년 7월 3일 심사완료)

Performance Analysis of the Viscous-driven Micropump with Tandem Rotating Cylinders

Joo-sung Maeng, Hyung-il Choi and Sung-chan Cho

Key Words : MEMS(미소전자기계시스템), Micropump(마이크로 펌프), Performance index(성능 지수: 효율), Unstructured grid(비정렬격자)

Abstract

Since the viscous effect increases as the size of device decreases, viscous-driven micropump is a promising mechanism in microscale applications. In the present study, a dual-rotor type pump which contains two counter-rotating cylinders for improving performance characteristics is proposed. First, for flows in the single-rotor type pump, the present unstructured grid simulation method is validated by comparing its results to the previous results. Next, the performance of the dual-rotor type pump is evaluated by the parametric studies and is compared to that of the previous single-rotor type pump. The flow characteristics are qualitatively similar to those of single-rotor type pump. However, the performance of the micropump with tandem rotors is still better than that of previous pumping type, e.g. much larger flow rate, smaller driving region, higher efficiency, and wider operation range.

1. 서 론

최근 미소제작(micro-fabrication)기술 공정의 발전에 힘입어 미소기계(micromachine)들이 점차 실용화 되고 있으며, 여기에는 압력, 온도, 속도 등의 물리량 측정 장치, 선형-비선형 움직임을 만드는 액추에이터, 의학적 기구 등이 있다. 이와 더불어 미소기계의 성능향상을 위한 유동특성의 해석과 설계에 관한 연구가 요구되어지고 있다.

현재 개발되고 있는 다양한 미소 응용장치들은 유체를 이송해주는 펌프가 필요하며 따라서 마이크로 펌프에 대한 연구들이 널리 이루어 지고 있다.⁽¹⁾ 미소크기에서는 표면-부피비(surface to volume

ratio)가 매우 커지므로 표면에서의 효과가 상대적으로 더 중요해진다. 또한, 저레이놀즈수의 효과로 인해 점성력이 관성력에 비하여 상대적으로 크게 작용한다. 이는 기존 고레이놀즈수에서 사용되던 관성력을 이용하는 펌프들의 구동효과가 작아지게 됨을 의미하며, 이를 해결하기 위해 연구자들마다 다양한 구동방식의 펌프를 제안, 개발하고 있다. 이중 본 연구에서는 점성구동 방식의 펌프에 대하여 유동특성을 고찰하였다.

이 구동방식은 Odell and Kovaszny⁽²⁾가 여러 개의 회전하는 디스크를 통해 점성력을 발생시켜 밀도단층유동(density stratified flow)을 이송시키는 펌프를 제작한 것이 그 효시가 된다. 그 후, 이와 관련된 회전하는 원형 실린더 주위의 유동에 대한 연구가 점차 이루어져 왔다. Tang and Ingham⁽³⁾은 저레이놀즈수에서 회전하는 원형 실린더 주위의 압력 분포가 대칭임을 보였으며, 양력과 항력에 대한 자료를 제공하였다. Hellou and Coutanceau⁽⁴⁾는 저레이놀즈수에서 밀폐된 채널내의 벽면과 회전하는 실린더 사이에 형성되는 와동의 특성을 관찰하

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : jsmaeng@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2290-0439 FAX : (02)2298-4634

^{*} 회원, 한양대학교 기계기술연구소

^{**} 한양대학교 대학원 기계공학과

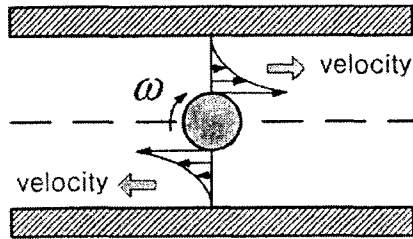


Fig. 1 General aspect of flow in viscous driven micro pump

였으며 채널 길이에 따른 와동의 구조에 관해 연구하였다. Sen 등⁽⁵⁾은 이와 같은 물리현상에 기반하여, 글리세린을 작동 유체로 하고 두 평행판 사이에 한 개의 회전하는 원형 실린더를 배치시킨 점성구동 펌프를 제작하였다. 그리고, 실험을 통해 평균 유속이 실린더 회전속도의 약 10%임을 밝혀내었다. 그 후, Sharatchandra 등⁽⁶⁾은 점성구동 마이크로 펌프에서 형상인자에 따른 유동특성을 상세히 파악하기 위해 정렬격자를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

이와 같은 점성구동 펌프는 다른 방식의 마이크로 펌프에 비해 상대적으로 구조가 간단하며 혈장과 같이 손상을 피해야 하는 유체를 이송시킬 수 있다. 또한, 정상상태 연속유동을 만들어 낼 수 있는 특징을 가지고 있다. 그러나, 매우 제한된 압력부하에서만 유량이 발생되며 효율도 상당히 낮은 결점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 성능 향상을 위하여 한 쌍의 회전 실린더를 가지는 펌프를 제안했으며, 수치해석을 통해 기존의 펌프와 성능을 비교하였다. 2 차원 비압축성 유동을 해석하기 위해 압력기반 해법을 사용하였다. 점성효과(viscous effect)가 크게 발생하는 실린더 주위에 양질의 격자를 생성하기 위하여 비정렬격자 기법을 적용하였다. 먼저, 본 연구에서 채택한 수치기법의 타당성을 검증하기 위해 하나의 구동 실린더를 가지는 마이크로 펌프에 관해 수치해석을 수행하였으며 기존의 연구 결과인 Sen 등의 실험결과와 Sharatchandra 등의 수치결과와 비교하였다. 다음으로, 본 연구에서 제시한 한 쌍의 구동 실린더를 가지는 펌프와 기존 펌프의 성능을 수치해석을 통하여 비교하였다.

2. 연구모델 및 방법

2.1 점성구동 펌프

점성구동 펌프는 채널과 로터의 두 부분으로 구성된 간단한 구조를 가지며 오로지 로터의 회전

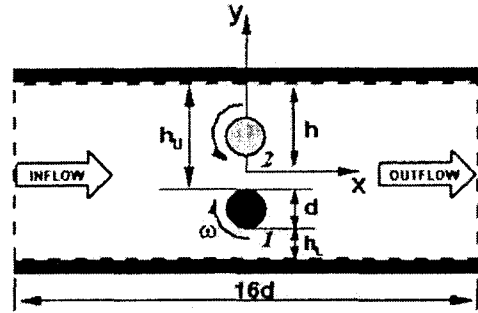


Fig. 2 Schematic view of flow configuration

에 따른 점성에 의한 운동량 확산으로 유동장이 형성되기 때문에 점성이 상대적으로 큰 힘으로 작용되는 마이크로 규모의 유동에 적합하다.

Fig. 1 과 같이 로터가 각속도 ω 로 회전하는 경우, 채널의 상반부와 하반부에서 서로 반대방향으로 흐름이 발생되며, $\frac{\partial p}{\partial x}$ 의 부호가 반대가 되는 특성을 갖는다. 이러한 유동 특성은 로터 부근에서 커다란 와류를 발생시키는 원인이 되어 펌프효율을 저하시킨다. 단일 로터의 경우는 설치 위치에 따라 와의 크기가 달라지지만 완전히 사라지는 않는다.^(5,6) 따라서 와를 완전히 소멸시킬 수 있는 설계변수 즉, 로터의 개수, 채널의 높이, 로터의 편심도, 압력차 등을 변화시켜 효율(η)를 높여야 하는 문제를 안고 있다.

2.2 연구모델

단일 로터를 갖는 모델은 서론에서 언급한 바와 같이 많은 연구 결과가 보고 되었다. 본 연구에서는 Fig. 2 와 같은 한 쌍의 로터를 갖는 모델을 제시하고, 2.1 에서 언급한 설계변수들이 유동효율에 미치는 영향을 조사하여 단일 로터의 경우와 비교 하였다.

Fig. 2 는 채널의 폭이 높이에 비해 아주 크므로 2 차원 유동으로 가정할 수 있으며, 로터 1 과 로터 2 는 대칭되는 위치에서 반대방향으로 회전한다. 로터의 직경(d), 로터 표면의 회전속도(U)를 사용하여 무차원화 하면

$$s = \frac{h}{a} \tag{1}$$

$$e = \frac{h - a - h_L}{2a} \tag{2}$$

$$\Delta p^* = \frac{\Delta p}{\rho v^2} \tag{3}$$

$$\eta = \frac{\bar{u}s\Delta p}{Re^2 C_M} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

여기에서, a 는 로터의 반경, h 는 채널의 절반 높이, h_L 은 로터 1과 아래 평판과의 간극을 나타내며, 최대 편심(e_{max})은 $h_L = 0.05a$ 일 때로 정의하였다.⁽⁶⁾ ν 는 동점성계수, Δp 는 압력차, \bar{u} 는 평균유속 그리고 η 는 펌프의 효율이며, 평균유속 \bar{u} 와 모멘트 계수 C_M 은 다음과 같다.

$$\bar{u} = \frac{1}{s} \int_0^s u(y) dy \quad (5)$$

$$C_M = \int_0^{2\pi} \tau \cdot a \cdot d\theta \quad (6)$$

2.3 수치해석

질량, 운동량에 대한 적분형 2차원 정상 비압축성 보존 방정식은

$$\int_S F \cdot n dS - \int_V G \cdot n dS = 0 \quad (7)$$

여기서, $F = f i + g j$;

$$G = \frac{1}{Re} (f_v i + g_v j) \text{ 이고,}$$

$$f = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \end{bmatrix} ; g = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho vw \\ \rho v^2 + p \end{bmatrix} ;$$

$$f_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} ; g_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \end{bmatrix}$$

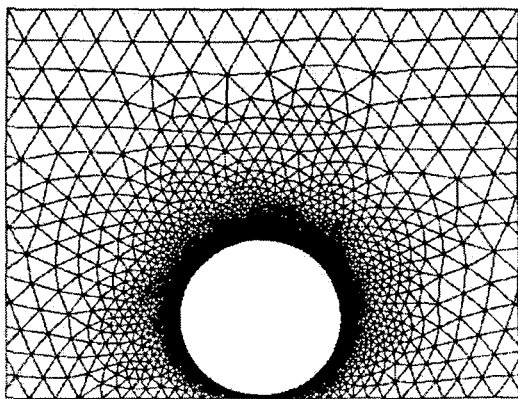


Fig. 3 Unstructured grid refinement in vicinity of rotor

경계조건은

$$\text{대칭 면 : } \frac{\partial u}{\partial y} = 0, v = 0 \quad (8a)$$

$$\text{채널 벽면 : } u = 0, v = 0 \quad (8b)$$

$$\text{입출구 : } p_i, p_o \quad (8c)$$

$$\text{원형 실린더 벽면 : } U_N = 0, U_T \quad (8d)$$

여기에서, U_T 는 실린더 표면의 접선방향 속도성분, U_N 은 실린더 표면의 법선방향 속도성분이다.

수치해석은 채널의 하반부만을 계산영역으로 하여 Fig. 3 과 같은 비정렬격자와 압력기반 해법을 적용하였다.^(7,8) Demirdzic 와 Muzafferija⁽⁹⁾가 제안한 이산화기법을 격자점 중심에 적용하였고, 해석프로그램에 대한 내용은 저자의 이전 연구에 자세히 기술되어 있다.⁽¹⁰⁾

3. 결과 및 고찰

먼저 수치기법의 검증을 위해 단일 로터를 가지는 펌프에 대해 계산을 수행하고, Sen 등의 실험 결과 및 Sharatchandra 등의 수치해석 결과와 비교하였다. Fig. 4 는 e_{max} 에서 채널 높이(s)에 따른 평균유속(\bar{u})과 유량($\bar{u}s$)의 관계를 나타낸 것으로, s 가 2.5 이상 되면서 보다 더 실험값에 근접함을 보여주고 있다. Fig. 5 는 $s = 2.5$ 에서 로터의 편심도(e)와 평균 유속(\bar{u})의 관계를 나타낸 것으로 기존 수치해석 결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

따라서 한 쌍의 로터를 가지는 펌프에 대한 해석결과에 대하여도 신뢰성을 부여할 수 있을 것으로 판단된다.

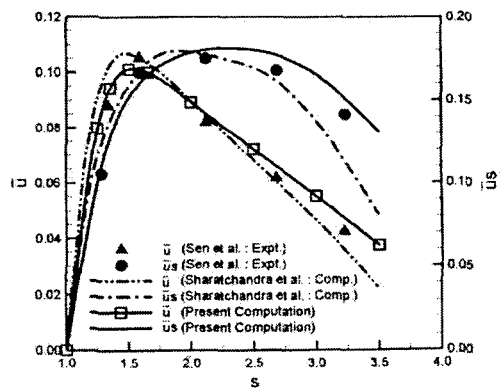


Fig. 4 Variation of bulk velocity and flow rate with s for $Re = 0.5, \Delta p = 0.5$ and e_{max}

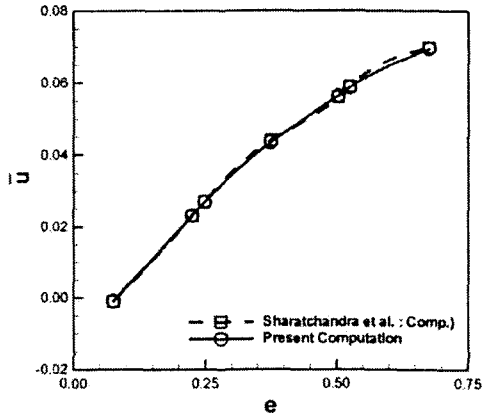


Fig. 5 Effect of eccentricity on \bar{u} for $Re = 1.0$, $\Delta p^* = 1.0$ and $s = 2.5$.

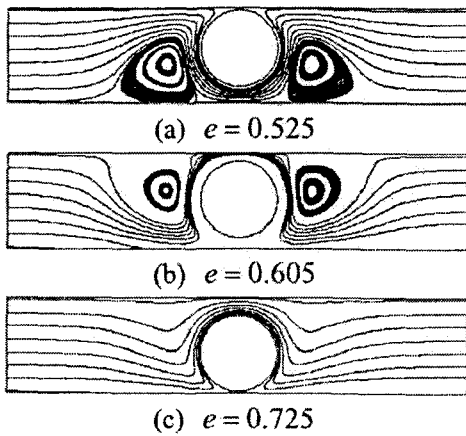


Fig. 6 Streamlines for $Re = 1.0$, $\Delta p^* = 1.0$ and $s = 2.5$ as a function of eccentricity

3.1 유동특성

3.1.1 편심도 영향($Re = 1.0, \Delta p^* = 1.0, s = 2.5$)

Fig. 6 은 로터의 편심도에 따른 유선을 나타낸 것으로 로터가 벽면에 가까울수록 와의 크기가 작아진다는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 어느 위치부터는(여기서는 $e = 0.725$) 와가 완전히 사라지는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 sen 등⁽⁵⁾과 Sharatchandra 등⁽⁶⁾이 보고한 바와 같이, 단일 로터의 경우에 상단부와 하단부의 비대칭적인 유동 특성으로 인하여 와가 항상 존재하는 것과는 근본적으로 유동구조가 다르다는 것을 의미한다.

Fig. 7 은 편심도에 따른 유량의 변화를 단일 로터의 경우와 비교한 것으로 $e \approx 0.64$ 근방까지는 단일 로터가 큰 유량을 갖는다는 것을 알 수 있다.

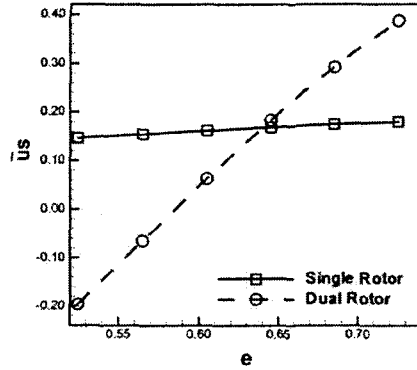


Fig. 7 Effect of eccentricity on \bar{u}_s for $\Delta p^* = 1.0$, $Re = 1.0$, $s = 2.5$ and e_{max} .

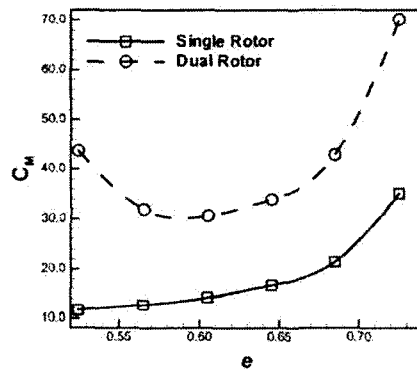


Fig. 8 Effect of eccentricity on Moment coefficient for $\Delta p^* = 1.0$, $Re = 1.0$, $s = 2.5$ and e_{max}

이것은 한 쌍의 로터가 서로 가까이 위치할 경우 와가 크게 발생하여 오히려 유동 효율이 나빠지는 것을 의미한다. 그러나 유량 증가율이 커서 $e \approx 0.64$ 부터는 반대현상이 나타날 뿐만 아니라, 큰 유량 증가율로 $e \approx 0.73$ 부근에서 약 2.5 배가 된다.

Fig. 8 은 편심도와 로터 모멘트계수 C_M 과의 관계를 나타낸 것이다. 단일 로터에서는 벽면에 가까워지면서 τ 의 증가가 단순하게 이루어지고 있으나, 한 쌍일 경우에는 두 로터가 가까이 있거나, 양쪽벽에 각각 가까워지면서 τ 값이 급격히 증가함을 알 수 있다.

3.1.2 채널높이 영향($Re = 1.0, \Delta p^* = 1.0, e_{max}$)

Fig. 9 는 채널높이에 따른 유량 변화를 나타낸 것이다. 단일 로터의 경우 채널높이가 커질수록 유량이 작아짐을 볼 수 있다.

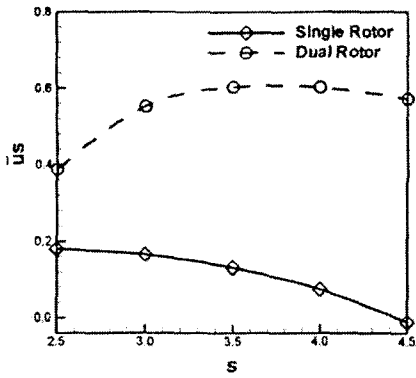
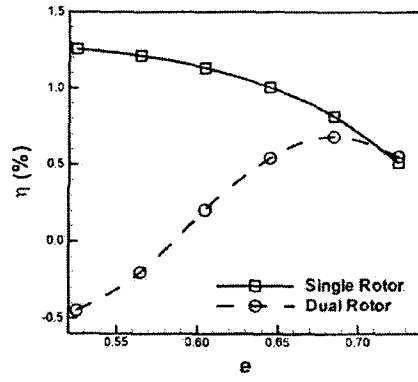
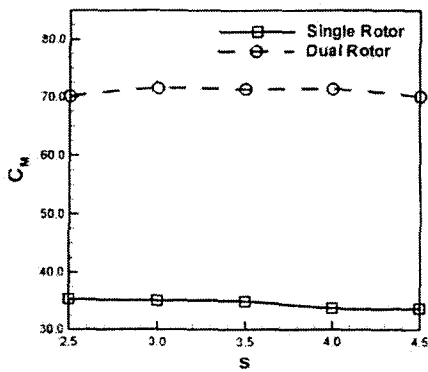


Fig. 9 Effect of channel height on \bar{u}_s for $Re=1.0$, $\Delta p^*=1.0$ and e_{max}



(a)



(b)

Fig. 10 Effect of channel height on moment coefficient for $Re=1.0$, $\Delta p^*=1.0$ and e_{max}

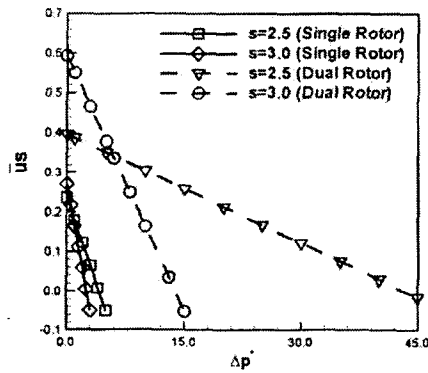
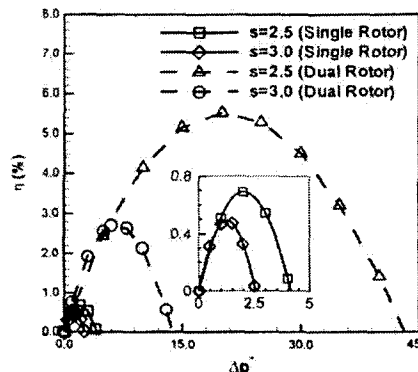
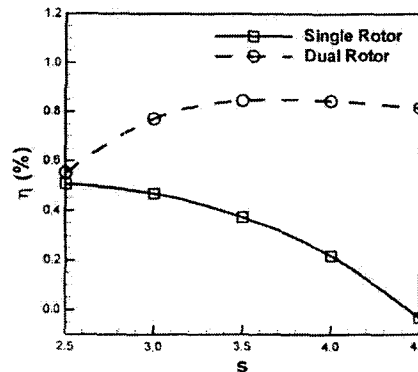


Fig. 11 Variation of \bar{u}_s with load for $Re=1.0$ and e_{max}



(c)

Fig. 12 Effect of design variables : (a) Eccentricity, (b) Channel height for $Re=1.0$, $\Delta p^*=1.0$ and e_{max} , (c) Load (Δp^*) for $Re=1.0$, e_{max}

이 현상은 참고문헌(6)에서 보여준 바와 같이 단일 외동의 크기가 증가하기 때문에 일어나는 것으로 생각되어 진다. 반면에 한 쌍의 로터인 경우 $s \approx 3.5$ 근방에서 최대의 유량을 갖으며 단일 로터보다 약 3 배 가량 큼을 알 수 있다.

Fig. 10 은 채널높이에 따른 모멘트 계수의 변화를 나타낸 것으로 채널높이가 영향을 미치지 않음을 보여주고 있다.

3.1.3 압력차 영향($Re=1.0, e_{max}$)

Fig. 11은 펌프의 부하(압력차)와 유량의 관계를 나타내는 것으로 $s=2.5$ 와 $s=3.0$ 을 비교하였다. 단일 로터일 경우는 $0 \leq \Delta p^* \leq 6$ 정도 범위에서 작동이 가능하나 한 쌍의 경우는 그 보다 훨씬 넓은 범위인 $0 \leq \Delta p^* \leq 45$ 정도에서 작동이 가능함을 알 수 있다.

3.2 펌프효율(η)

식 (4)로부터 펌프효율 $\eta = f(\bar{u}s, Re, C_M, \Delta p^*)$ 이며 3.1에서 $Re=1.0$ 인 경우 나머지 변수에 대한 고찰을 하였다. 이와 같은 고찰을 통하여 각각의 펌프효율을 관측한 결과를 Fig. 12(a), Fig. 12(b), Fig. 12(c)에 도시하였다.

Fig. 12(a)에서 보는 바와 같이 한 쌍의 로터 편심도에 따른 유량 증가가 효율을 가파르게 상승시키는 반면에 로터 개수가 증가하기 때문에 모멘트 계수 또한 커지게 되어 단일 로터 효율을 증가하지 못한다. e_{max} 되는 곳에서 거의 비슷한 효율을 나타낸다. Fig. 12(b)에서는 채널의 높이가 효율에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며, Fig. 12(c)에서는 단일 로터 $s=2.5$ 의 경우 $\Delta p^* \approx 2.5$ 근방에서 최대효율을 나타내는 반면에 한 쌍의 경우 $\Delta p^* \approx 25$ 근방에서 나타남을 알 수 있다. 뿐만 아니라 한 쌍의 경우 $s=2.5$ 가 $s=3.0$ 보다 약 2 배의 최대효율을 나타내고 있어 채널의 기하학적 형상이 압력 차에 의한 효율에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

4. 결론

점성 구동 마이크로 펌프의 성능 향상을 위해 각각의 설계변수가 미치는 영향을 고찰한 결과 다음과 같은 결론은 얻었다.

(1) 로터의 편심도에 따라 와의 크기가 예민하게 변하며 참고문헌(6)에서 보고된 바와 같이 단일 로터의 경우 반드시 와가 존재하는 것에 비하여 한 쌍의 경우는 와가 완전히 사라지는 위치가 존재한다.

(2) 채널의 벽면과 로터 표면 및 로터와 로터

표면의 수직거리에 따라 전단력의 크기가 변하므로 최대 유량을 갖는 로터의 배열이 존재한다.

(3) 압력차의 크기에 따라 펌프의 운전 가능 범위가 존재한다. 위의 결과로부터 펌프효율 $\eta = f(\bar{u}s, Re, C_M, \Delta p^*)$ 를 최대화 하기 위한 형상 설계가 필요하다.

참고문헌

- (1) Elwenspoek, M., Lammerink, T. S. J., Miyake, R., and Fluitman, J. H. J., 1994, "Towards integrated microfluid handling systems," *Journal of Micromech. and Microeng.*, Vol. 4, No. 4, pp. 227~245.
- (2) Odell, G.M., and Kovaszny, L. S. G., 1971, "A New Type of Water Channel with Density Stratification," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 50, pp. 535~557.
- (3) Tang, T., and Ingham, D. B., 1991, "On the Steady Flow Past a Rotating Circular Cylinder at Reynolds Numbers 60 and 100," *Computers and Fluids*, Vol. 19, No. 2, pp. 217~230.
- (4) Hellou, M., and Coutanceau, M., 1992, "Cellular Stokes Flow Induced by Rotation of a Cylinder in a Closed Channel," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 236, pp. 557~577.
- (5) Sen, M., Wajerski, D., and Gad-el-Hak, M., 1996, "A Novel Pump for MEMS Applications," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 118, No. 3, pp. 624~627.
- (6) Sharatchandra, M. C., Sen, M., and Gad-el-Hak, M., 1997, "Navier-Stokes Simulations of a Novel Viscous Pump," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 372~382.
- (7) Jessec, J. P. and Fiveland, W. A., 1996, "A Cell Vertex Algorithm for the Incompressible Navier-Stokes Equations on Non-orthogonal Grids," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol. 23, pp.271~293.
- (8) Anderson, W. K., and Bonhaus, D. L., 1994, "An Implicit Upwind Algorithm for Computing Turbulent Flows on Unstructured Grids," *Computers Fluids*, Vol. 23, No. 1, pp. 1~21.
- (9) Demirdzic, I. and Muzaferija, S., 1995, "Numerical method for coupled fluid flow, heat transfer and stress analysis using unstructured moving meshes with cells of arbitrary topology," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 125, pp. 235~255.
- (10) Choi, H., Lee, D., and Maeng, J., 2002, "Unstructured Pressure Based Method for All Speed Flows," *KSME Journal B*, Vol. 26, No. 11, pp. 1521~1530.