

모세관 인력으로 작동되는 열공압형 마이크로 펌프의 형상이 성능에 미치는 영향

전도한*, 양상식†

(2009년 7월 31일 접수, 2009년 9월 21일 수정, 2009년 9월 23일 심사완료)

The Influence of the Geometry on the Performance of a Thermopneumatic Micropump Operated by Capillary Attraction

Do Han Jun and Sang Sik Yang

Key Words : Capillary Attraction(모세관 인력), Finite Volume Methods(유한체적법), Micropump(마이크로펌프), Thermopneumatic(열공압)

Abstract

Recently, we developed a simple thermopneumatic micropump having neither a membrane nor a valve. This micropump discharges liquid by a thermopneumatic pressure and refill by a capillary attraction. In case of the micropump driven by the capillary attraction, the flow characteristic depends mainly on the geometry of the micropump. In this paper, we investigated the influence of the geometry of the micropump on the performance of the micropump to illustrate the properness of the micropump shape. We analyzed the micropump characteristics of six types having different geometries by FVM simulation with a commercial CFD tool. Also we fabricated the micropumps with PDMS and glass by micromachining, and tested the performances. The simulation and the test results illustrate that the discharge volume and the discharge time depend on the chamber volume. The expansion angle of the inlet channel location has influence on the refill time, while the front air channel direction has influence on the backward flow loss.

1. 서론

최근 발달한 마이크로머시닝 기술을 바이오, 의료 기기 등의 분야에 응용하려는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 대표적인 예로 랩온어칩(Lab-on-a-chip), 약물 전달 장치(Drug Delivery System) 등이 있다. 약물 전달 장치의 경우 국소 환부에만 일정한 양의 약물 농도를 유지할 수 있어 기존의 약물 투여 방식에 비해 치료 효과를 높이고 부작용을

줄일 수 있는 장점이 있다.

이러한 약물 전달 장치의 정상적인 동작을 위해서 극미량의 유체의 움직임을 제어할 수 있는 마이크로 펌프, 마이크로 밸브 등의 개발이 필요하고, 여러 연구 기관과 회사에서 활발한 연구를 진행하고 있다.⁽¹⁻³⁾ 발표된 연구 결과에서는 초소형의 마이크로 펌프를 제작하였고 그 성능도 우수하지만, 마이크로 펌프의 구조와 제작 공정이 복잡하다는 단점이 있다. 구조와 제작 공정이 간단한 마이크로 펌프의 개발이 필요함에 따라 본 연구진은 열공압과 표면장력으로 구동되는 간단한 구조의 마이크로 펌프를 제안하고 그 작동을 확인하였다.⁽⁴⁾

본 논문에서는 이미 발표된 마이크로 펌프의 형상의 적합성을 확인하기 위하여 마이크로 채널의 위치와 형상에 따른 마이크로 펌프의 동작 성능의

[이 논문은 2009년도 신뢰성부문 춘계학술대회(2009. 5. 21., BEXCO) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 아주대학교 전자공학부

E-mail : ssyang@ajou.ac.kr

TEL : (031)219-2481 FAX : (031)212-9531

* 아주대학교 전자공학부

차이를 수치해석과 실험으로 밝히고 비교한다.

2. 마이크로 펌프의 형상

2.1 마이크로 펌프의 구조

Fig. 1은 마이크로 펌프의 구조도이다. 마이크로 펌프는 공기챔버와 히터, 펌프챔버, 입구, 출구, 공기유로 등으로 구성되어 있다. 입구와 출구는 미세 유로를 통해서 펌프챔버와 연결되어 있고, 공기챔버와 펌프챔버는 전방공기유로와 후방공기유로를 통해서 연결되어 있다. 또한 모세관력을 이용하는 미소 유체 소자의 경우 채널의 중형비와 채널의 확장각에 따라서 유체의 이동이 영향을 받는다.⁽⁶⁾ 이러한 성질을 이용하여 입구측 유로는 유체 유입이 용이하게 확장각을 설계하였고, 출구측 유로는 유체가 출구에서 유입되는 것을 막기 위해서 확장각을 90°로 설계하였다. 이 마이크로 펌프는 유리와 PDMS 층으로 구성하고 마이크로 펌프의 크기는 11.7 x 8.8 x 1.7 mm³이다.

2.2 마이크로 펌프의 동작 원리

이 마이크로 펌프는 열공압과 표면장력을 이용하여 펌프 내부에 들어있는 유체의 이동을 제어하게 되며 동작 순서는 다음과 같다. 먼저 입구를 통해서 유체가 펌프챔버를 채우게 된다. 그 후 공기챔버에 있는 히터에 전압을 인가하면 히터가 공기챔버 내의 기체를 가열하여 팽창시키고 압력이 증가하게 된다. 팽창되는 공기는 전방공기유로를 통해서 펌프챔버로 이동하고 이 압력으로 펌프챔버 내부에 있는 유체를 출구로 밀어내게 된다. 이때 입구 방향으로 역류하는 유량을 최소화한다.

이 후 인가된 전압을 끊으면 자연 냉각에 의해 팽창된 공기가 수축하게 되고 이 때 발생하는 압력차이로 인해서 입구에서 유체가 펌프챔버 내부로 들어온다. 이 과정에서 수축하는 공기는 후방 공기유로를 통해서 이동하게 되어 있고, 출구에서 들어오는 유체는 출구측 미세 유로의 확장각이 커서 펌프챔버 내부로 들어오지 못하고 펌프챔버와 미세 유로가 만나는 곳에서 정지하게 된다.

2.3 마이크로 펌프의 다양한 형상

본 논문에서는 입구측 유로의 확장각과 전방공기유로의 방향을 다르게 하여 Fig. 2와 같이 다

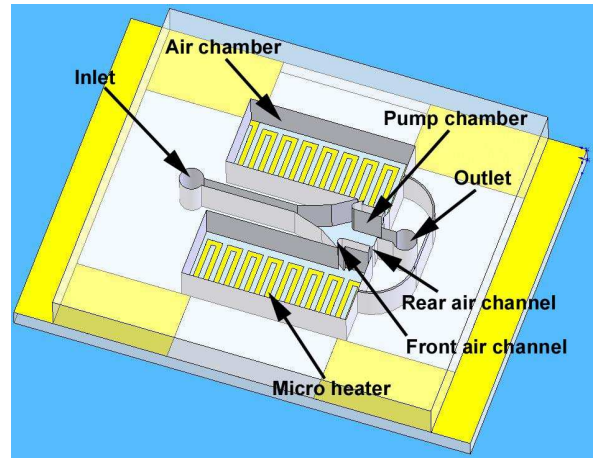


Fig. 1 The schematic of micropump

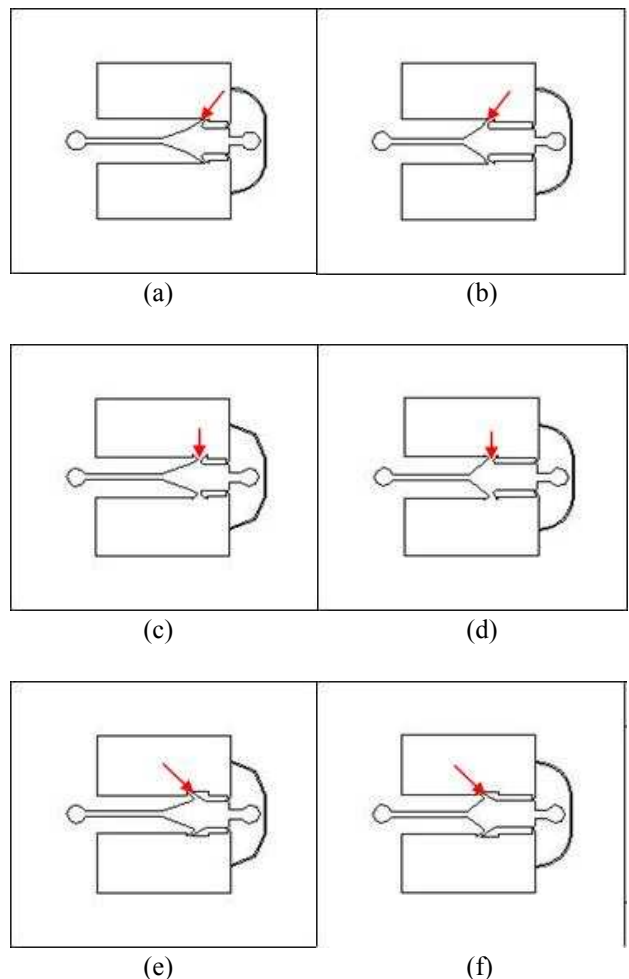


Fig. 2 The layouts of various pump geometries(Arrows indicate the front air channel direction) ; (a) Type 1A, (b) Type 2A, (c) Type 1B, (d) Type 2B, (e) Type 1C, (f) Type 2C

양한 형상의 마이크로 펌프의 성능을 비교함으로써 두 가지 주요 형상이 펌프의 성능에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 입구측 유로의 확장각에 따라 두 가지 형태로 나누고 확장각이 20° 인 형상을 Type 1, 확장각이 37° 인 형상을 Type 2로 하였다. 확장각의 차이로 전방공기유로의 위치와 펌프챔버의 부피가 조금 다르다. Type 1과 Type 2의 펌프챔버 부피는 각각 120 nL와 140 nL이다. 전방공기유로의 방향에 따라 세 가지 형태로 나누고 전방공기유로가 입구를 향하는 형상을 Type A, 가운데를 향하는 형상을 Type B, 출구를 향하는 형상을 Type C로 하였다.

3. 수치해석

펌프의 작동을 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 수치해석적 방법으로 해석하였다. 자유표면 문제를 해결하기 위해서 VOF(Volume of fluid) 방법을 이용하였다.⁽⁶⁾ 수치해석은 유한체적법을 기반으로 한 상용소프트웨어인 CFD-ACE+ Ver. 2009를 이용하여 수행하였다. 수치해석에서 펌프의 입구와 출구 압력은 대기압으로, 유리와 PDMS의 접촉각은 각각 15° , 100° 로 설정하였다. 마이크로 펌프의 구조가 대칭이므로 반쪽만 수치해석방법으로 계산하였다. 계산에 사용된 격자수는 6500~7000 개로서 마이크로펌프의 형상에 따라 격자수가 약간 다르다. Fig. 3은 마이크로 펌프 시뮬레이션을 위해 설정한 격자 구조를 나타내고 있다.

수치해석에서 얻은 마이크로 펌프의 동작 특성은 Table 1과 같다. 마이크로 펌프의 대칭성으로 반쪽만 수치해석을 수행하였기 때문에 토출량과 역류량은 수치해석에서 얻은 값의 2 배로 나타내었다.

4. 제작공정

마이크로 펌프는 유리, PDMS, 유리의 3 층으로 구성되어 있다. 하부 기판인 유리와 중간층인 PDMS는 마이크로 펌프를 구성한다. 이 마이크로 펌프는 히터에서 발생하는 열을 이용하기 때문에 마이크로 펌프 구동시 발생하는 열에 의해 발생할 수 있는 펌프의 변형을 방지하기 위해서 상부 기판으로 유리를 사용하였다.

Fig. 4는 제작공정도이다. 제작공정은 다음과 같다. 먼저 하부 기판인 유리에 Ti/Au를 각각 500/2000Å 두께로 증착한 후 사진식각 공정을 이용하여 히터를 패터닝하고 전기 화학 방전 가공(Electro Chemical Discharge Machining)공정을 이용하여 입구와 출구를 제작하였다. 제작된 히터의 저항은 20Ω 이다.

중간층은 먼저 음성후막감광제를 이용하여 마이크로 펌프 형상의 몰드를 제작한 후, 그 위에 10:1 비율로 섞은 PDMS를 부어 마이크로 펌프 구조의 PDMS층을 제작하였다. 이렇게 제작된 하부 기판, 중간층, 상부 기판을 O_2 플라즈마를 이용하여 접합하여 최종적으로 마이크로 펌프를 제작하였다.

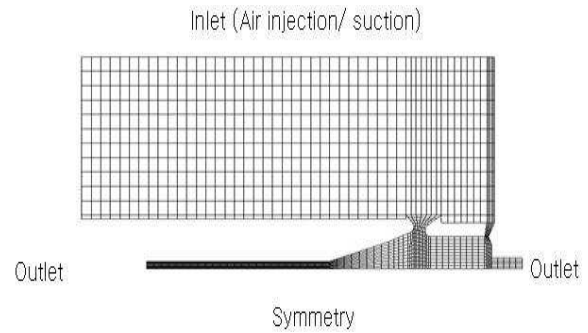


Fig. 3 The grid structure and simulation condition

Table 1 Simulation results of micropumps

	Type 1A	Type 1B	Type 1C	Type 2A	Type 2B	Type 2C
Discharge time (sec)	2.83	2.91	2.93	3.54	3.62	3.58
Refill time (sec)	3.07	3.12	2.92	3.71	3.79	3.81
Discharge volume (nL)	101.4	103	104.2	124.6	126.4	127.8
Backward flow loss (nL)	49.6	56.8	49.2	47.4	55.6	46.4

Table 2 Test results of micropumps

	Type 1A	Type 1B	Type 1C	Type 2A	Type 2B	Type 2C
Discharge time (sec)	4.2	4.2	6.4	7	7.1	6.3
Refill time (sec)	16.1	16.2	17.9	32.3	31.1	28.7
Discharge volume (nL)	102.8	102	100.5	123.1	125.9	127.3
Backward flow lose (nL)	50.9	75.4	50.1	48.2	76.6	48.2
Standard deviation (nL)	1.4	1.7	1.6	1.5	1.8	1.1

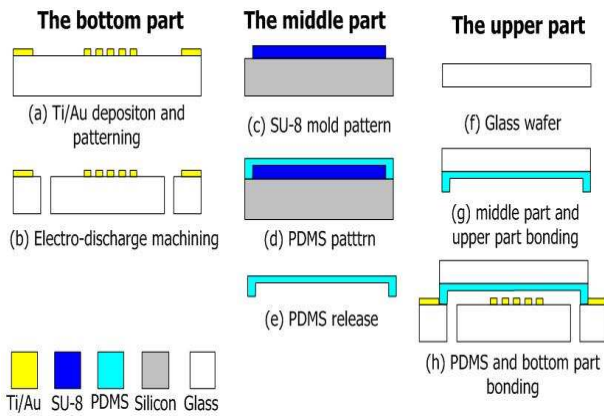


Fig. 4 The fabrication process

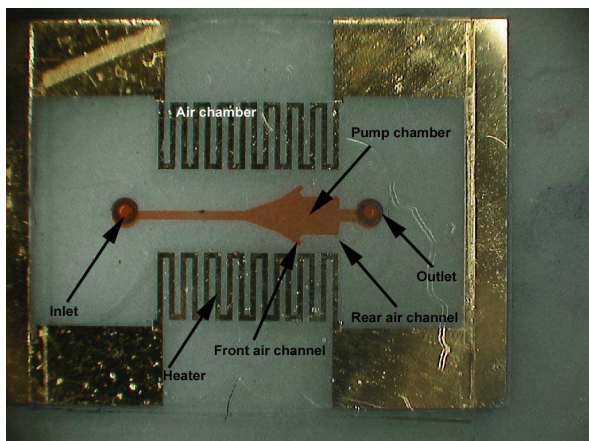


Fig. 5 The image of micropump (Type 1A)

Fig. 5 는 최종 제작된 마이크로 펌프의 사진이며, 제작에 사용된 PDMS 와 유리가 투명하므로 마이크로 펌프의 형상이 잘 보이게 하기 위해서 붉은색 잉크를 주입하여 사진을 찍었다.

5. 실험 결과

제작된 마이크로 펌프에 2V 의 전압을 인가하여 동작 실험을 수행하였다. 그리고 펌프 작동시 출구와 입구에서 토출되는 유량은 입구와 출구에 연결된 튜브에서 유체의 이동을 측정하여 계산하였으며 10 회의 토출 실험을 수행하여 평균 토출량과 표준편차를 계산하였다.

Table 2 는 여섯 가지 형상의 마이크로 펌프에 대하여 토출량과 토출시간, 충전시간, 역류량, 표준편차 등의 펌프 특성을 보여준다. Fig. 6 은 수치해석에서 구한 토출량과 실험에서 구한 토출량의 평균치와 최고치 및 최저치를 나타낸 그래프이다. 모든 형상의 토출량의 표준편차는 2% 이내였다. 토출시간과 표준편차 등의 특성을 볼 때 여섯 가지 형상의 마이크로 펌프는 모두 약물 전달 장치에 응용할 수 있는 수준으로 판단된다.

수치해석 결과와 실험 결과를 비교해 보면 토출시간과 충전시간에 차이가 있는데, 이는 실제 실험에서는 펌프를 구동시키는 공기의 팽창과 수축이 가열과 냉각에 의해서 발생하지만, 시뮬레이션에서는 컴퓨터의 성능 및 소요되는 계산 시간 등의 제한 요소로 인해 가열과 냉각에 의한 공기의 팽창과 수축을 계산할 수 없어 공기 챔버의 벽에서 공기가 주입되거나 흡입되도록 조건을 설정하였다. 이 때문에 실험 결과와 수치해석 결과에 약간의 차이가 존재한다.

입구측 유로의 확장각에 따른 마이크로 펌프의 동작 특성을 살펴보면 실험 결과에서 Type 2 가 Type 1 에 비하여 토출량이 크고, 토출시간이 길다. 토출량의 차이는 펌프 챔버의 부피 차이로 인한 것이다. 수치해석 결과에서는 토출시간이 펌프 챔버 부피에 단순하게 비례하나, 실험 결과에서는

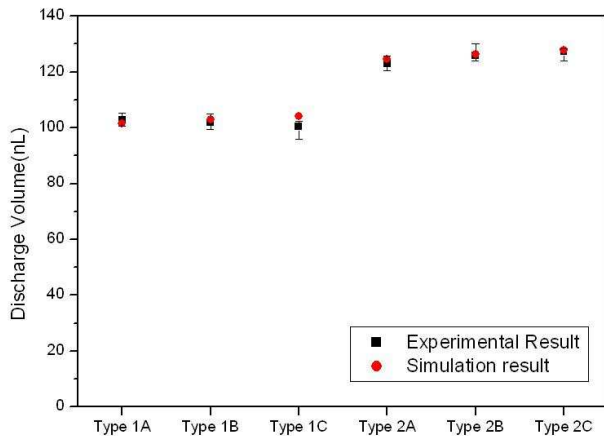


Fig. 6 The graph of the discharge volume and deviation

열공압의 비선형적 특성 때문에 챔버의 크기가 커지면 그 부피만큼 공기를 더 팽창시키기 위해 훨씬 더 많은 열이 필요하여 토출시간이 비선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. Type 2의 충전시간이 Type 1에 비해서 더 오래 걸리는데 이는 Type 2의 펌프챔버의 부피가 클 뿐만 아니라, Type 2의 입구측 유로의 확장각이 Type 1에 비하여 크기 때문에 유체가 느리게 유입되기 때문이다. 입구측 유로의 확장각이 유체의 역류량에는 영향을 미치지 못함을 보인다.

수치해석 결과에서 전방공기유로의 방향에 따른 펌프 동작 특성 비교해 보면 전방공기유로는 토출량과 토출시간, 충전시간 등에는 영향을 주지 않는다. Type B의 경우, 즉 전방공기유로가 가운데를 향하는 경우 다른 형상에 비하여 역류량이 큰 것을 보여준다. 실험 결과도 수치해석과 유사한 경향을 보여준다. 다만 Type 1C와 2C의 경우 토출시간이 다른 형상과 차이가 있는데 이는 히터 제작상의 불균일로 인한 것으로 생각된다.

6. 결론

본 논문에서는 FVM 수치해석과 제작, 실험을 통해서 입구측 유로의 확장각과 전방공기유로의 방향이 다른 여섯 가지 형상의 열공압과 표면장력으로 구동되는 마이크로 펌프의 동작 성능을 비교

하였다.

제작된 마이크로 펌프는 2V의 전압에서 동작하였으며 수치해석 상의 제한 요소로 인한 차이를 제외하고는 수치해석과 실험에서 유사한 펌프 특성을 얻었다. 펌프의 토출량과 토출시간은 펌프챔버의 부피에 따라 달라지며, 입구측 유로의 확장각이 큰 경우 충전시간이 길어지나 역류량에는 영향을 주지 않는다. 전방공기유로의 방향은 유체의 역류량에 영향을 미치며 공기 채널이 가운데를 향하고 있는 경우 다른 경우에 비해 역류량이 크다.

수치해석과 실험에서 얻은 역류량과 충전시간으로 평가할 때 Type 1A와 Type 1C가 우수하다. 특히 타입 1A는 토출시간에 비한 토출량이 커서 본 논문에서 시도한 여섯 가지 형상의 마이크로 펌프 중에서 가장 우수한 성능을 갖는 것으로 평가된다. 토출량의 표준편차는 2% 이내로 약물 전달 장치에 적합한 특성을 보인다.

참고문헌

- (1) Charles Grosjean, X. Yang, and Yu-Chong Tai, 1999, "A Thermopneumatic Peristaltic Micropump," *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*.
- (2) Van, D. A. L., McGuire, T. and Langer, R., 2003, "Small-Scale Systems for in Vivo Drug Delivery," *Nature biotechnology*, Vol. 21, No. 10, pp. 1184~1191.
- (3) Maillefer, D., Gamper, S., Frehner, B., Balmer, P., Van Lintel, H. and Renaud, P., 2001, "A High-Performance Silicon Micropump for Disposable Drug Delivery Systems," *The 14th IEEE international conference on MEMS*.
- (4) Do Han Jun, Woo Young Sim, and Sang Sik Yang, 2007, "A Novel Constant Delivery Thermopneumatic Micropump Using Surface Tensions," *Sensors and Actuators A*, Vol. 139, No. 1-2, pp. 210~215.
- (5) Kwang Hyo Chung, Sung-Jin Kim, Hyun-Bong Pyo, and Hae-Sik Yang, 2004, "Polymer Microfluidic Device Accomplishing Self-Wash and Fluid Replacement via Capillary Force," *The 6th Korean MEMS conference*
- (6) Hirt, C. W. and Nichols, B. D., 1981, "Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *Journal of computational physics*, Vol. 39, No. 1, pp. 201~225.