

論文

원형 경량 압전 복합재료 작동기를 이용한 마이크로 펌프의 개발

구엔탄팅*, 구남서**

Development of Micropump using Circular Lightweight Piezo-composite Actuator

Thanh-Tung Nguyen* and Nam Seo Goo**

ABSTRACT

In this paper, we focus on improving the performance of the piezoelectric diaphragms of valveless micropumps. A circular lightweight piezoelectric composite actuator (LIPCA) with a high level of displacement and output force has been developed for piezoelectrically actuated micropumps. We used numerical and experimental methods to analyze the characteristics of the actuator to select optimal design. With the developed circular LIPCA, we fabricated a valveless micropump by photo-lithography and PDMS molding techniques. The displacement of the diaphragm, the flow rate and the back pressure of the micropump were evaluated and discussed. With a semi-empirical method, the flow rate with respect to driving frequency was predicted and compared with experimental one. The test results confirm that the circular LIPCA is a promising candidate for micropump application and can be used as a substitute for a conventional piezoelectric actuator diaphragm.

초 록

본 논문에서는 무밸브 마이크로펌프에 사용되는 압전 다이어프램의 성능을 향상시키는 방법이 연구되었다. 큰 작동 변위와 작동력을 가지는 원형 형태의 경량 압전 복합재료 작동기(LIPCA)를 마이크로 펌프용으로 제작하였다. 유한요소 해석과 실험을 통하여 원형 LIPCA의 성능을 예측하여 최적의 적층 형태를 설계하였다. 최적의 원형 LIPCA를 기반으로 포토리소그라피법과 PDMS 몰딩법을 사용하여 무밸브 마이크로 펌프를 제작하였다. 압전 다이어프램의 작동 변위 및 마이크로 펌프의 유량과 배압을 실험적으로 측정하였고, 반경험식을 사용하여 예측한 유량과 비교하였다. 이상의 연구에서 원형 LIPCA가 마이크로 펌프용으로 사용되는 보통의 압전 작동 다이어프램을 대체할 수 있는 우수한 작동기임을 확인할 수 있었다.

Key Words : Valveless micropump(무밸브 마이크로 펌프), Circular LIPCA(원형 LIPCA), Photo-lithography법(포토리소그라피법), PDMS molding techniques(PDMS 몰딩법)

1. 서 론

마이크로 펌프는 랩-온-어-칩 기술 및 소형 항공기의 경계층 제어에 사용되는 핵심적인 요소로 1980년대부터 발전된 MEMS(micro electro mechanical

† 2006년 4월 19일 접수 ~ 2006년 5월16일 심사완료

* 정회원, 건국대학교 대학원 항공우주공학과

** 정회원, 건국대학교 신기술융합학과
연락처, E-mail : nsgoo@konkuk.ac.kr
서울시 광진구 화양동 1번지

system) 기술의 주요한 응용 중 하나이다. 마이크로 펌프를 구성하는 주요 부품인 작동 다이어프램(actuating diaphragm)은 외부의 유체를 인렛을 통하여 챔버 내로 이동시킨 후 이를 다시 아웃렛을 통하여 외부로 보내는 역할을 한다. 이의 작동원리로는 압전, 공압, 열공압, 정전기력, 전자기기력 등이 있으며[1,2], 이중 압전 다이어프램의 경우 작동 전압이 높고, 깨지기 쉽다는 단점이 있으나, 빠른 반응성과 높은 작동력 등의 장점으로 말미암아 많이 연구되어 왔다[3-7].

지금까지 마이크로 펌프에 사용된 압전 다이어프램의 제작 방법은 주로 유리, 실리콘, 또는 금속에 PZT 디스크를 접착하여 제작하였다[5-7]. 이 방법을 사용하면, 완전한 기밀을 유지할 수 있으나 상대적으로 작동 변위가 작고, PZT가 외부에 노출되어 파괴되기 쉬워 별도의 패키징이 필요하다는 단점이 있다. 이러한 기존의 압전 다이어프램의 단점을 극복하고자 Yoon 등에 의하여 개발된 경량 압전 복합재료 작동기 (Lightweight Piezo-Composite Actuator; LIPCA)의 개념[8,9]을 원형 형태로 확장하는 연구를 수행하였다. LIPCA는 기존의 단일(unimorph) 압전 작동기보다 작동 변위 성능이 우수할 뿐 아니라, PZT가 복합재료 층 사이에 놓여 있기 때문에 깨질 가능성이 작다는 장점이 있다. 마이크로 펌프에 적용 가능한 최적의 원형 LIPCA를 개발하기 위하여 네 가지 형태의 적층 형태에 대하여 성능을 해석적 및 실험적으로 비교하였다. 최적의 적층 형태를 가진 원형 LIPCA 다이어프램을 제작한 후 이를 이용하여 무밸브 마이크로 펌프를 설계하고 포토리소그라피(photo-lithography)법과 PDMS (polydimethylsiloxane) 몰딩법을 사용하여 마이크로 펌프를 제작하였다. PDMS는 적합성, 투명성, 우수한 기계적 성질, 제작 용이성 등의 장점을 가지고 있기 때문에 최근 미소 유동 시스템에 많이 사용되고 있다. 제작된 마이크로 펌프의 성능 평가를 위하여, 가진 전압과 작동 주파수에 따른 마이크로 펌프의 유량과 배압을 측정하였다. 또한 측정된 유량을 반경험식을 이용하여 해석한 유량과 비교하였다.

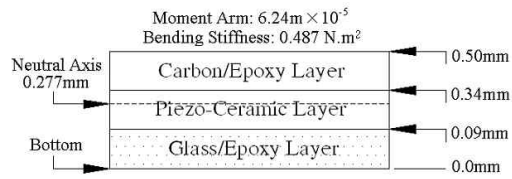
II. 원형 LIPCA의 설계 및 설계

2.1 설계 및 해석시편

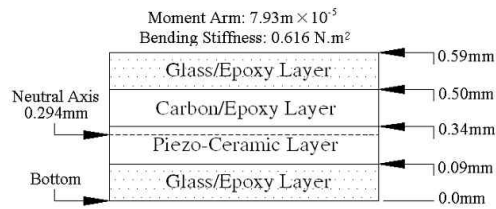
LIPCA 작동기는 탄소/에폭시, 유리/에폭시, 및 PZT 층으로 이루어져 있다. 보 형태의 LIPCA의 경우 일방향 탄소/에폭시 복합재료를 사용하나, 원형 LIPCA의 경우 대칭 구조를 만들기 위하여 탄소/에폭시 패브릭을 사용하였다. 사용된 재료의 물성치를 표 1에 정리하였다. PZT는 CST사의 3203HD, 탄소/

표 1. LIPCA의 구성재료의 제원

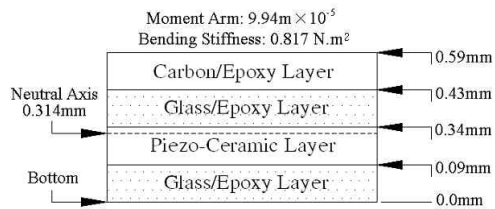
Properties		PZT	Carbon/Epoxy	Glass/Epoxy
Modulus	E_1 (GPa)	62	66.42	21.7
	E_2 (GPa)	62	66.42	21.7
	G_{12} (GPa)	23.7	4.35	3.99
	ν_{12}	0.31	0.054	0.13
Strain coefficient	d_{31} (m/V)	-320 $\times 10^{-12}$	-	-
CTE	α_1, α_2	3.5	-1.58	14.2
Dimension	$D \times t$	14×0.25	14×0.16	14×0.09



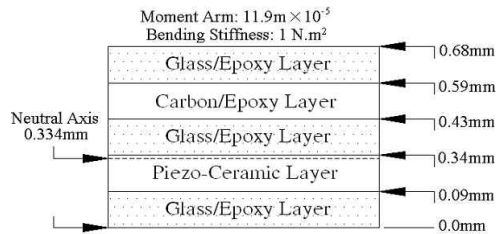
(a) LIPCA C-H1



(b) LIPCA C-H2



(c) LIPCA C-H3



(d) LIPCA C2-Fab

그림 1. 원형 LIPCA의 적층형태 및 특성

에폭시는 SK 케미칼의 WSN1K, 유리/에폭시는 SK 케미칼의 GEP108이다. 네 가지 적층 형태를 그림 1에 나타내었으며 각각 C-H1, C-H2, C-H3, C2-Fab라고 명명하였다. 그림 1에는 적층 형태 및 중립축을 나타내었다. LIPCA의 제작은 일반적인 복합재료의 오토클레이브 성형법을 사용한다.

2.2 원형 LIPCA의 작동성능 실험

제작된 원형 LIPCA의 성능을 실험하기 위하여 그림 2와 같은 실험 장치를 사용하였다. 원형 LIPCA를 지그에 장착한 후 고전압 공급기(TD-2, Face International Co.)로 전압을 공급하여 구동시킨 후 이를 비접촉 레이저 변위계(Keyence LK-081, 분해능 3 μm)로 작동 변위를 계측하였다. 작동기는 1Hz의 주파수로 구동하였으며, 최대 400 Vp-p까지 가하였다.

2.3 해석 및 결과 분석

표 2에는 네 가지 형태의 원형 LIPCA에 대하여 압전 작동기 성능 지수 (coefficient of unimorph actuator)[8,9]와 400 Vp-p의 전압이 가해졌을 때의 작동 변위에 대한 유한요소해석 결과를 나타내었다. 그림 3에는 네 가지 형태의 원형 LIPCA에 대하여 인가 전압에 따른 작동 변위를 나타내었다. PZT는 재료 비선형성이 강하기 때문에[10] 선형 해석과는 차이가 있으나 전반적인 결과가 잘 일치함을 확인할 수 있다. 네 가지 적층 형태에 대한 압전 작동기 성능 지수와 작동변위를 비교해 보면 거의 유사하나 C-H2 적층형태가 상대적으로 큰 값을 나타내어 이를 이용하여 마이크로 펌프의 다이어프램을 제작하였다. C-H2 적층형태를 가진 압전 다이어프램의 공진주파수를 B&K사의 PULSE 3560 FFT 해석 시스템을 사용하여 계측한 결과, 압전 다이어프램의 공진주파수는 9.9 kHz이었다.

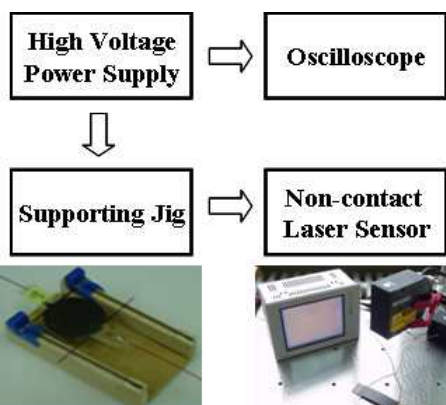
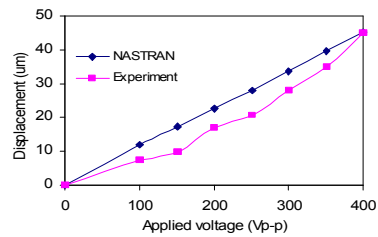


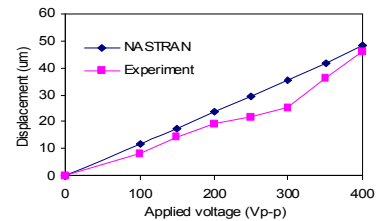
그림 2. 작동 변위 계측을 위한 실험 장치

표 2. 원형 LIPCA의 작동 성능 비교

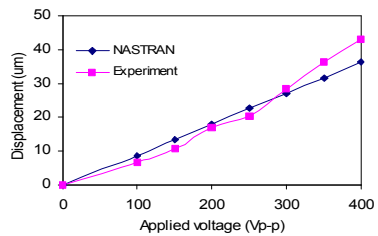
Specimen	C_{ua}	Actuation displacement at 400 Vp-p (μm)
C-H1	1.28	47
C-H2	1.29	48
C-H3	1.22	44
C2-Fab	1.18	44



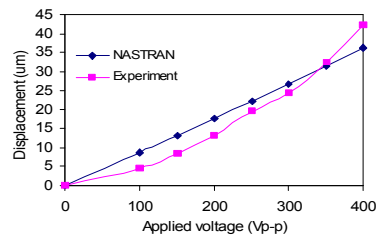
(a) LIPCA C-H1



(b) LIPCA C-H2



(c) LIPCA C-H3



(d) LIPCA C2-Fab

그림 3. 원형 LIPCA의 작동 변위 (f=1Hz)

한편 실험 결과로부터 작동 변위와 지름의 비인 스트로크비(fractional stroke)를 계산해 보면 0.35% 였으며 이는 기존의 압전 다이아프램이 0.2% 정도의 값을 가지는 것에 비하여 상당히 개선되었다[2].

III. 마이크로 펌프의 설계, 제작 및 시험

3.1 설계 및 제작

본 연구에서 개발한 마이크로 펌프의 특징은 그림 4(a)와 같이 PZT를 유리에 붙이는 기존의 압전 다이아프램과는 달리 유연한 PDMS 멤브레인에 원형 LIPCA C-H2를 부착한 데 있다. 일반적으로 멤브레인은 LIPCA의 성능을 최대한 발휘할 수 있도록 유연하고 얇아야 하므로, 본 연구에서는 탄성계수가 750 kPa인 PDMS를 사용하였다[11].

그림 4에 마이크로 펌프의 개략도를 나타내었으며, PDMS 멤브레인의 두께는 100 μ m, 챔버의 지름은 14 mm, 깊이는 120 μ m이다. 두 개의 디퓨저를 참고문헌 [4]에 따라 설계하였으며, 목의 폭이 120 μ m이고 길이는 1.5 mm, 확대각은 8 $^{\circ}$ 이다.

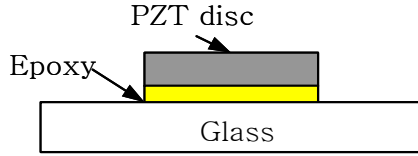
설계된 마이크로 펌프의 유량 성능을 예측하기 위하여 참고문헌[12]의 방법을 사용하였다. 무밸브 마이크로 펌프의 유량은 다음 식으로 계산된다.

$$Q = 2\Delta V f \frac{\sqrt{\eta} - 1}{\sqrt{\eta} + 1}$$

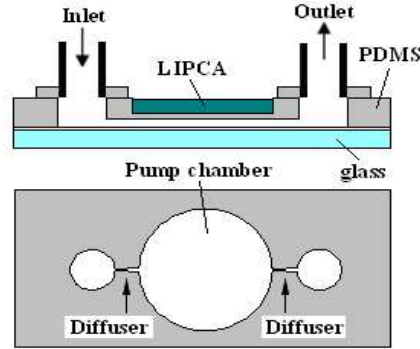
여기에서 ΔV 는 스트로크 체적(stroke volume), f 는 가진 주파수, η 는 디퓨저 요소의 효율을 나타낸다.

원형 LIPCA의 변형이 돔 형상이라고 가정하고, NASTRAN을 이용하여 계산한 압전 다이아프램의 변형량을 최대 돔 높이라 하여 스트로크 체적을 계산하였다. 디퓨저 요소의 효율은 레이놀즈 수가 아주 작거나 ($1 < Re < 30 \sim 50$) 아주 클 경우 ($Re > 10^5$) 이론적인 값이 있으나, 중간인 경우에는 실험적인 값을 사용함이 알려져 있다[13]. 본 연구의 경우 레이놀즈 수의 범위가 1100 근처이므로 경험적인 값을 사용하여야 하며 참고문헌[12]의 값인 1.25를 사용하였다.

그림 5에는 원형 LIPCA를 PDMS에 부착한 후의 작동성능을 NASTRAN을 이용하여 예측한 예를 나타내었다. 200 Vp-p의 경우, 원형 LIPCA의 최대 변형량은 17 μ m이므로 스트로크 체적은 1.3 μ l이었다. 이는 원형 LIPCA C-H2만을 해석한 그림 3의 결과보다 12% 작은 결과이다. 이를 이용하여 가진 주파수에 대한 유량을 계산하여 그림 6에 나타내었으며 유량이 작동 주파수에 비례함을 확인할 수 있다.



(a) 기존 설계



(b) 원형 LIPCA를 이용한 설계

그림 4. 압전 작동기를 이용한 마이크로 펌프의 구조

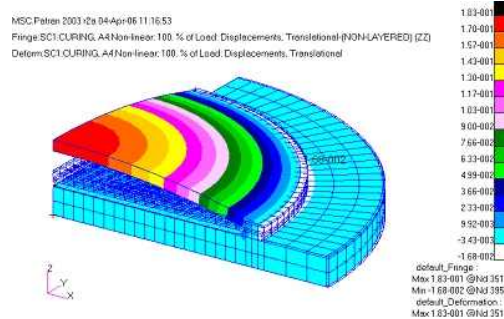


그림 5. NASTRAN을 이용한 원형 LIPCA 다이아프램의 작동 성능 해석

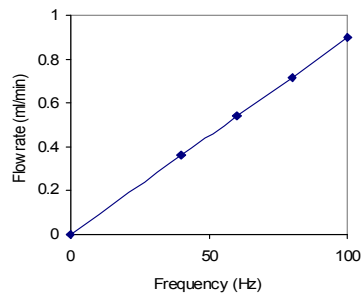


그림 6. 설계된 마이크로 펌프의 가진 주파수에 따른 예측 유량 (Vp-p=200V)

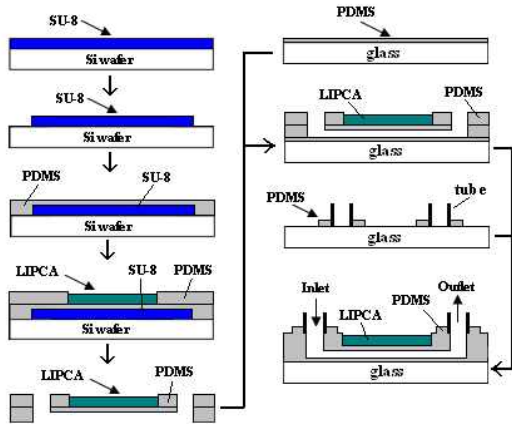


그림 7. 마이크로 펌프의 제작 순서

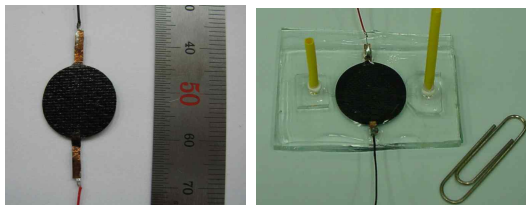


그림 8. 완성된 마이크로 펌프 (지름 14mm)

그림 7에 마이크로 펌프의 제작 절차를 나타내었다. PDMS 몰딩에 필요한 금형을 만들기 위하여 포토리소그래피법을 사용하여 $120\mu\text{m}$ 두께를 가지는 포토 리지스터인 SU-8의 패턴을 제작하였다. 이 위에 PDMS 프리폴리머(prepolymer)를 부은 후 750 rpm으로 스핀 코팅하여 펌프 몸체와 두께 $50\mu\text{m}$ 의 멤브레인을 제작하였다.

다음으로 이를 진공 오븐에 100°C 에서 45분 동안 경화시켰다. PDMS 멤브레인에 LIPCA C-H2를 비경화 PDMS로 접착하였다. 비경화 PDMS를 사용한 이유는 LIPCA 성능에 미치는 접착층의 영향을 최소화하기 위해서이다. LIPCA C-H2와 펌프 챔버를 정렬시켜 진공 오븐에서 경화시킨 후 실리콘 웨이퍼를 떼어내었다. 인렛과 아웃렛용 구멍을 펀치를 사용하여 뚫었다. 펌프의 강성을 증가시키기 위하여 유리에 $20\mu\text{m}$ 두께의 PDMS를 스핀 코팅한 것을 밀판으로 사용하였다. 30분 동안 상온에서 경화된 밀판과 LIPCA를 접착시켜 마이크로 펌프를 완성하였다. 그림 8에 완성된 마이크로 펌프의 사진을 나타내었다.

3.2 성능 시험

제작된 마이크로 펌프의 성능을 계측하기 위하여

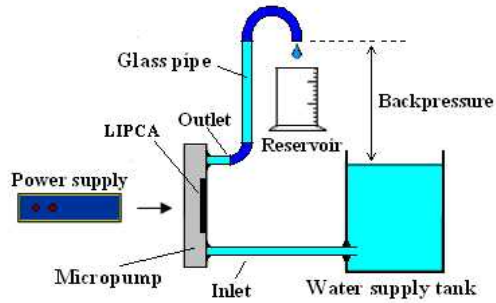


그림 9. 마이크로 펌프의 성능 계측 장치

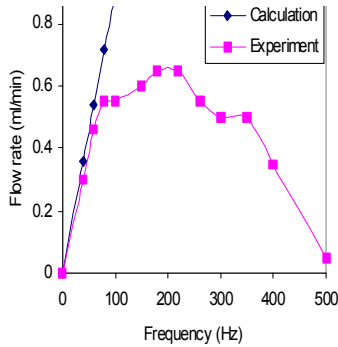
그림 9와 같은 개념을 가지는 실험 장치를 제작하였다. 펌프의 성능은 주파수에 따른 유량의 변화, 가동 전압에 따른 유량의 변화, 배압과 유량의 관계를 계측하였다. 가열 공정으로 가스를 없앤 물을 사용하여 펌프 성능을 시험하였다. 또한 펌프 챔버 내부의 가스 방울을 제거하기 위하여 에탄올 프라밍 절차를 수행하였다. 공급 전압과 주파수를 달리하여 유량을 계측하였으며, 유량과 배압 사이의 관계를 계측하였다.

3.3 결과 및 토의

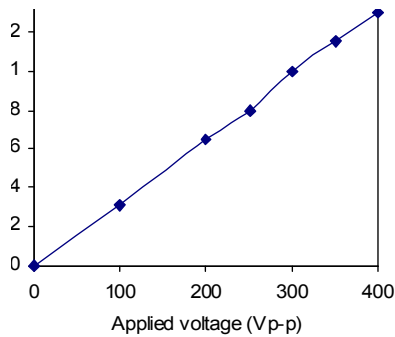
그림 10에는 계측 결과를 그림으로 나타내었다. 그림 10(a)에 나타난 가진 주파수에 따른 유량의 변화를 보면 가진 주파수가 60 Hz까지는 선형적인 관계를 보이며 해석 결과와 잘 일치하나, 이후에는 선형성이 깨짐을 확인할 수 있다. 이는 가진 주파수가 커질수록 다이어프램의 고주파 특성 때문에 작동 변위가 작아지기 때문이라고 생각된다. 또한 작동 중인 마이크로 펌프의 공진 주파수는 200 Hz 부근이었다. 원형 LIPCA 다이어프램의 공진 주파수는 9.9 kHz이나 작동 중인 마이크로 펌프의 경우 유체에 의한 댐핑 및 유압 등 물과의 연성 때문에 공진 주파수가 낮아진다. 그림 10(b)의 작동 전압에 대한 영향을 보면, 작동 전압과 유량은 대체적으로 비례함을 확인할 수 있다. PZT는 재료 비선형성이 있으나 그림 3에서도 알 수 있듯이 본 연구에서 고려한 전압 범위에서는 대체적으로 선형적임을 확인할 수 있다. 그림 10(c)에는 공진 주파수에서의 유량과 배압사이의 관계를 나타내었으며, 서로 반비례 관계에 있음을 확인할 수 있다. 공진 주파수인 200 Hz, 400 Vp-p가 가해지는 경우, 최대 유량은 1.3 ml/min, 최대 배압은 4.1 kPa임을 확인하였다.

본 연구에서 개발한 원형 LIPCA를 이용한 마이크로 펌프와 문헌 상에 나타난 마이크로 펌프와는 서로 크기가 다르기 때문에 직접적인 성능 비교는 쉽지 않다. 그러나 본 연구의 마이크로 펌프는 기존

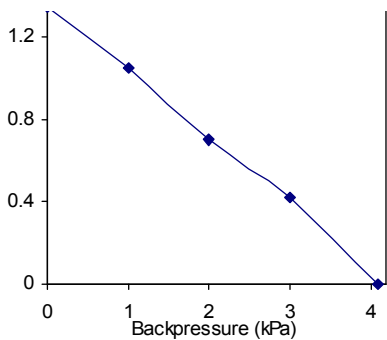
의 것에 비하여 스트로크비가 크다는 장점이 있다. 비록 마이크로 펌프의 성능이 스크로크비 만으로 결정되지 않는다 하더라도 본 연구에서 개발한 마이크로 펌프는 기존에 개발된 것과 비슷하거나 우수한 성능을 가지리라 생각된다. 여기에 본 연구에서 개발한 마이크로 펌프는 별도의 패키징이 필요 없다는 것을 장점을 지니고 있다.



(a) 가진 주파수에 따른 유량 (Vp-p=200V)



(b) 가진 전압에 따른 유량 (f=200Hz)



(c) 유량과 배압 사이의 관계 (Vp-p=400V, f=200 Hz)

그림 10. 개발된 마이크로 펌프의 성능

IV. 결 론

본 연구에서는 원형 형태의 경량 압전 복합재료 작동기 LIPCA를 설계, 제작하여 무밸브 마이크로 펌프의 작동 다이어그램으로 적용하는 연구를 수행하였다. 개발된 압전 다이어그램과 MEMS 기법인 포토리소그래피법과 PDMS 몰딩법을 사용하여 마이크로 펌프를 제작하였다. 실험값에 근거한 반경험적 해석 결과와 비교하여 성능을 예측하고 실험적인 결과에 비교하였다. 본 마이크로 펌프의 공진 주파수는 200 Hz, 최대 유량은 1.3 ml/min, 최대 배압은 4.1 kPa이다.

반경험적 유량 해석 결과는 주파수가 낮은 영역에서 실험 결과와 일치하였으나, 높은 영역에서는 상당한 차이를 나타내었다. 따라서 이 방법은 개념 설계를 위한 기초 해석에 이용할 수 있으나 공진점에서의 마이크로 펌프의 성능을 정확히 예측하기 위해서는 유체-구조 진동 연계 해석을 통한 정밀한 해석 방법을 활용하여야 할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 중점연구소 지원사업 (과제번호: KRF-2004-005-D00046)의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) P. Woias, "Micropumps-past, progress and future prospects", *Sensors and Actuators B*, Vol. 105, 2005, pp. 28-38.
- 2) N.T. Nguyen, Xiaoyang Huang, Toh Kok Chuan, "MEMS-Micropumps: A Review", *Transactions of ASME*, Vol. 124, JUNE 2002, pp. 384-392.
- 3) J. H. Kim, C. J. Kang, Y. S. Kim, "A disposable polydimethylsiloxane-based diffuser micropump actuated by piezoelectric-disc", *Microelectronic Engineering*, Vol. 71, 2004, pp. 119-124.
- 4) A. Olsson, *Valve-less Diffuser Micropumps*, Ph.D. Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1998.
- 5) C. J. Morris and F. K. Forster, "Optimization of a circular piezoelectric bimorph for a micropump driver", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 10, 2000, pp. 459-465.

- 6) A. Ullmann, "The piezoelectric valve-less pump performance enhancement analysis", *Sensors and Actuators A*, Vol. 69, 1998, pp. 97-105.
- 7) S. Li and S. Chen, "Analytical analysis of a circular PZT actuator for valveless micropumps", *Sensors and Actuators A*, Vol. 104, 2003, pp. 151-161.
- 8) K. J. Yoon, S. S. Shin, H. C. Park and N. S. Goo, "Design and Manufacturing of Lightweight Piezo-composite Curved Actuator", *Smart Materials and Structures*, Vol. 11, 2002, pp. 163-168.
- 9) K. J. Yoon, K. H. Park, S. K. Lee, N. S. Goo, and H. C. Park, "Analytical design model for a piezo-composite unimorph actuator and its verification using lightweight piezo-composite curved actuators", *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, 2004, pp. 459-467.
- 10) 이상기, 김영성, 박훈철, 윤광준, 구남서, 조창민, "압전 세라믹의 재료 비선형성을 고려한 LIPCA 작동기의 성능 해석", 한국항공우주학회지, 제 32권 3호, 2004, pp. 37-45.
- 11) J. C. Lotters, W. Olthuis, P. H. Veltink and P. Bergveld, "The mechanical properties of rubber elastic polymer poly dimethylsiloxane for sensor application", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 7, 1997, pp. 145-147.
- 12) A. Olsson, G. Stemme, and E. Stemme, "Diffuser-element design investigation for valve-less pumps", *Sensors and Actuators A*, Vol. 57, 1996, pp. 137-143.
- 13) X. N. Jiang, Z. Y. Zhou, X. Y. Huang, Y. Li, Y. Yang, and C. Y. Liu, "Micronozzle/diffuser flow and its application in micro valveless pumps", *Sensors and Actuators A*, Vol. 70, 1998, pp. 81-87.