

기포를 이용한 마이크로 액츄에이터 개발

최종필*, 반준호*, 전병희**, 장인배***, 김현영***, 김병희***

The Micro-Actuator Development of using the Bubble

J.P. Choi, J.H. Ban, B.H. Jeon, I.B. Jang, H.Y. Kim, B.H. Kim

Abstract

This paper presents the fabrication possibility of the micro actuator which uses a micro-thermal bubble, generated by a micro-heater under pulse heating. The micro-actuator is consist of three plate. The lower plate includes the channel and chamber are fabricated on high processability silicon wafer by the DRIE(Deep Reactive Ion Etching) process. The middle plate includes the chamber and diaphragm, and the upper plate is the micro-heater. The micro-heater designed non-uniform width and results in periodic generation of stable single bubbles in D.I water. The single bubble appears precisely on the narrow part of the micro-heater and control is recorded.

Key Words : Micro Actuator, Bubble, Micro-Heater, Pulse Heating

1. 서 론

미세가공(micromachining)을 이용한 마이크로 스케일의 센서, 액츄에이터, 모터, 펌프 등과 같은 다양한 분야의 MEMS(micro-electro-mechanical system) 요소들의 제조공정과 새로운 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 최근 몇 년간 급속도로 성장한 마이크로 가공기술은 IT, BT 및 의료 분야 사업과 연계되어 다양한 형태 및 재료에 의한 유용성 있는 마이크로 액츄에이터 개발이 이루어지고 있다..

본 논문에서는 반도체 가공기술을 바탕으로 가공된 유로 채널과 실리콘 / 파이렉스 접합기술을 기반으로 버블을 이용한 마이크로 액츄에이터의 개발 가능성 여부를

제시하였다[1]. 이에 본 연구에서는 버블을 이용한 마이크로 액츄에이터 개발에 있어 가장 중요한 요소인 마이크로 히터를 설계, 제작 및 실험을 통하여 버블 발생 패턴에 대한 연구를 수행하였다. 마이크로 히터는 제어가 가능한 싱글 버블의 발생 과정을 파악하기 위하여 각각의 형상과 패턴의 크기에 변화를 주어 제작하였으며, 마이크로 히터에 인가되어지는 전압 및 듀티비와 주파수에 따른 버블의 발생, 성장, 소멸과정을 여러 실험을 통해 규명하였다[2]. 또한 버블 액츄에이터로서의 성능을 평가하기 위하여 버블 발생에 의해 변화하는 다이어프램의 변위를 측정하였으며, 유리/유리, 실리콘/유리 등의 적층 접합 기술을 토대로 버블에 이용한 마이크로 액츄에이터를 시제작하였다.

* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학과 대학원

** 인덕대학교 컴퓨터 응용 설계 전공

*** 강원대학교 기계·메카트로닉스공학과

2. 마이크로 액츄에이터의 구조 및 구동원리

2.1 마이크로 액츄에이터의 구조

Figure 1 (a)은 마이크로 액츄에이터의 구조이다. 마이크로 액츄에이터는 하판, 중간판, 상판의 3단 접합 구조로 이루어져 있으며 전체 크기는 $20 \times 12 \times 1.7 \text{ mm}^3$ 이다. 하판은 마이크로 채널부분으로 한쌍의 벨브리스 디퓨저 / 노즐과 중간 챔버로 이루어져 있으며 중간판은 작동액이 채워져 마이크로 히터에 의해 버블을 발생시키는 챔버부분과 상변화를 일으키는 다이어프램으로 이루어진다. 상판은 마이크로 히터로 중간챔버에 작동액을 채우기 위한 홀이 가공되어 있다. Fig. 1 (b) (c) 는 시 제작된 마이크로 액츄에이터의 사진이다.

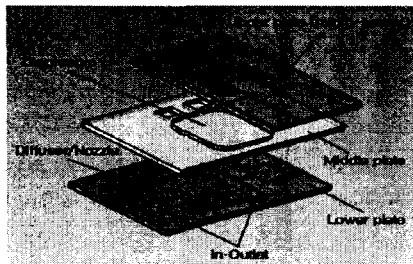


Fig. 1 (a) The schematic of the micro-actuator.

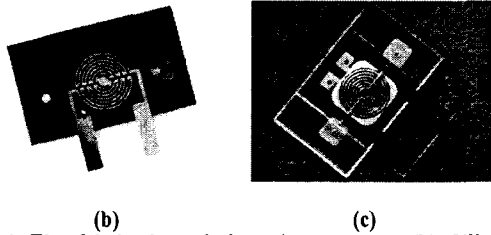


Fig. 1 The fabrication of the micro-actuator (b) Silicon (c) Pyrex.

Fig. 1 Structure of the micro-actuator.

2.2 마이크로 액츄에이터의 구동원리

Fig. 2 에 마이크로 액츄에이터의 구동원리를 보여주고 있다. 마이크로 히터에 전압을 인가하면 히터에서 발생하는 열로 작동액에 버블이 발생하게 된다. 이는 폐쇄된 챔버내의 체적 증가와 압력 상승을 가져오게 되어 챔버 하부의 다이어프램을 구동시키고, 전압을 끊으면 버블이 다시 응축되어 다이어프램은 원상태로 돌아온다. 이러한 상변화의 반복과 마이크로 채널의 디퓨저/노즐 효과에 의해 전달 유체는 순방향으로 흐르게 한다.

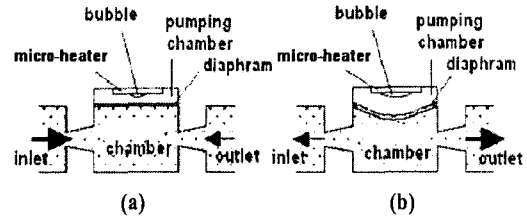


Fig. 2 Operation principle of the micro-actuator (a) bubble collapse (b) bubble expansion.

2.3 적층/접합 기술

본 연구의 마이크로 액츄에이터는 3단 구조의 적층/접합 구조물로 제작되었다[3]. 하판과 중간판은 유리/유리의 퓨전 본딩, 실리콘/유리의 양극 본딩 등과 같이 중간 개재물층 없이 이루어지는 접합이며 중간판과 상판의 접합시에는 PDMS(Poly-Di-Methyl-Siloxane)를 이용하여 접합을 수행하였다. Fig. 3 은 마이크로 액츄에이터의 접합공정도이다. 또한 작동액을 주입 한 후 U.V 경화제를 사용하여 구멍을 밀봉하였다. 이 모든 접합은 얼라이너를 통하여 이루어졌으며 본딩 전에 SC1, SC2 등의 클리닝 공정을 거쳐 표면의 파티클과 유기 오염물, 금속 오염물을 제거해야만 한다. 이는 접합의 질을 향상 시키는 가장 큰 요인이 된다.

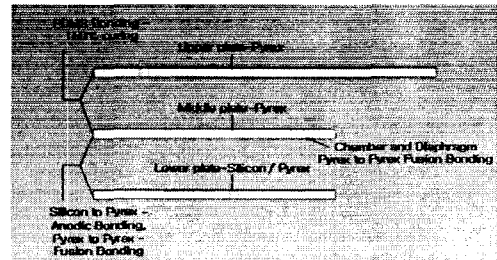


Fig. 3 The bonding process of the micro-actuator.

3. 마이크로 액츄에이터의 제작

3.1 마이크로 채널

본 연구에서 사용한 마이크로 액츄에이터의 하판은 마이크로 채널의 활용도를 높이기 위하여 실리콘과 파이렉스를 반도체 공정의 D.R.I.E와 샌드블라스트 가공을 각각 적용하여 제작하였다[4]. Fig. 4 (a) 는 마이크로 채널의 설계 형상을 보여준다. 하판의 전체 크기는 $20 \times 12 \times 0.5 \text{ mm}^3$ 이며 펌핑을 위한 챔버와 디퓨저 및 노즐부분을 포함하고, 챔버와 유로의 깊이는

80 μm 이다. 디퓨저와 노즐이 시작하는 부분의 폭은 80 μm 이며 끝나는 부분의 폭은 388 μm 이고 시작부분과 끝부분의 직선거리는 2000 μm 인데 이것은 디퓨저의 각도와 점성 저항 등에 연관되어 결정되는 중요 인자로 9°를 이룬다. 디퓨저와 노즐은 챔버의 바닥과 직각 방향을 이루고 있다. Fig. 4 (b) 는 실리콘으로 실제 제작된 하판의 모습이다.

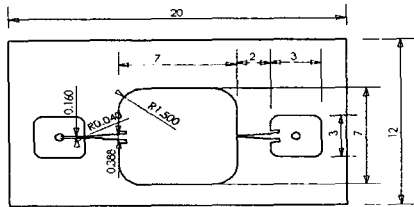


Fig. 4 (a) Top view of the lower plate.

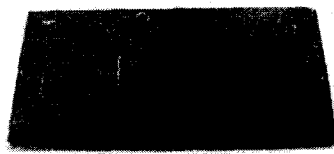


Fig. 4 (b) Lower plate fabricated using D.R.I.E

Fig. 4 The fabrication of lower plate.

3.2 중간챔버 및 다이아프램

중간판의 전체 크기는 20×12×0.5 mm³이며, 재료는 파이렉스 7740(탄성계수 : 7.2 GPa, 열팽창계수 : 3.6×10⁻⁶/°K)으로 작동 유체인 초순수물(DI water)이 채워지는 중간챔버와 유체를 주입하기 위한 두개의 채널로 이루어진다. 샌드블라스 가공을 이용하여 0.5t의 파이렉스에 챔버 형상을 관통하고 0.2t 파이렉스와 유리/유리 본딩을 수행하여 제작하였다. Fig. 5 는 제작된 중간판의 형상이다.

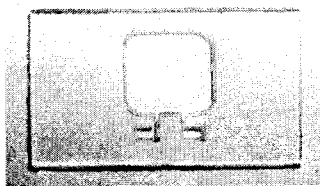


Fig. 5 Middle chamber fabricated using sandblaster.

3.3 마이크로 히터

버블을 이용한 마이크로 액츄에이터를 제작하기 위해

서 무엇보다 우선시 되어야할 사항이 바로 마이크로 히터의 제작이었다. 마이크로 히터의 형상 및 크기에 따라 버블의 발생 패턴을 제어할 수 있음을 확인하였고, 제어가 가능한 버블을 발생시켜야 액츄에이터로서의 역할을 수행할 수 있다[5].

Fig. 6 은 본 연구를 통해 제작된 여러 형태의 마이크로 히터 중에서 국부적인 부분에 열을 집중시켜 작동액을 슈퍼히팅 시키고, 이로 인해 버블을 발생 시키는 형태로써 제어가 가능한 싱글 버블을 만든다[6]. 마이크로 히터의 제작 과정은 전형적인 MEMS 가공 기술로 4인치 0.5t 파이렉스 표면에 Ti의 접합 강도를 높이기 위하여 스퍼터로 SiO₂를 증착한다. P.R(Photo-Resistor) 패턴 공정을 수행한 후 스퍼터를 이용하여 Ti(400Å) / Pt(2000Å)을 증착하고 리프트-오프 공정을 통하여 마이크로 히터를 제작하였다.

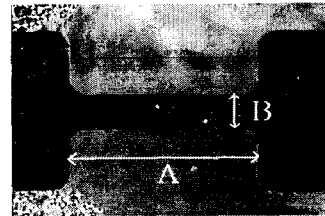


Fig. 6 The fabrication of Non-uniform micro-heater.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 구동 장치

Fig. 7 은 마이크로 히터의 성능 특성을 파악하기 위한 구동 장치도이다. 펄스발생기에서 인가되어지는 사파는 듀티비와 주파수의 조절이 가능하며 증폭회로를 거쳐 마이크로 히터의 버블 발생을 제어한다[7]. 발생된 버블은 광학 현미경을 통하여 관찰할 수 있다.

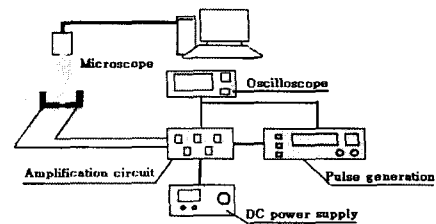


Fig. 7 Schematic diagram of the control circuit.

4.2 마이크로 히터에서의 버블 발생 패턴

마이크로 히터의 패턴 크기에 따른 버블의 발생 현상을 관찰하기 위하여 동일한 형상에 국부적인 열이 발생하는 부분의 크기만을 변화 시켜 제작하고 그 특성을 파악하였다. Table 1 은 전극의 크기에 따른 저항치 변화와 버블이 발생하는 초기의 전압 및 전류를 나타낸다.

Table 1 The quality of the micro-heater for various size.

Number	A(μm)	B(μm)	Ω	V	A
1	100	30	190	7	30
2	500	100	220	10	40
3	700	140	230	13	40
4	1000	200	260	16	50

Fig. 8은 오픈된 공간의 마이크로 히터(4번)에서 발생한 버블의 성장과정을 보여준다. 작동액은 초순수를 사용하였으며 인가 전압은 16V, 주파수는 1Hz, 듀티비는 30%를 유지하며 버블의 성장과정을 광학현미경을 통하여 관찰하였다. 버블의 성장과 소멸의 패턴이 이루어지는 지나 성장하는 속도에 비해 소멸하는 속도가 느리기에 일정 시간이 지남에 따라 버블의 크기는 점점 증가하며 결국에는 터져 버리고 새로운 버블이 발생하게 된다. 또한 인가되어지는 전압을 끊더라도 버블의 소멸에는 아무런 영향을 주지 못했다. 버블 발생 및 성장에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 전압과 듀티비 였으며 주파수의 변화는 버블의 성장에 큰 영향을 미치지 못했다.

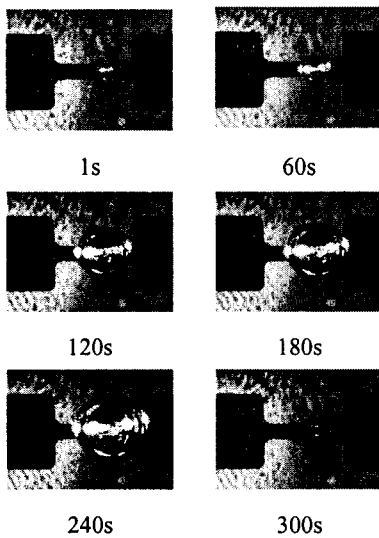


Fig. 8 Micro-single bubble observed D.I water on the micro-heater.

폐쇄된 공간에서는 오픈된 공간에서와는 다른 특성을 보이며 버블이 성장하였다. 버블의 성장 속도도 오픈된 공간에서와 현저한 차이가 있었으며, 인가되어지는 전압을 끊으면 오픈된 공간에서와는 달리 버블이 완전히 소멸되는 현상을 관찰하였다. 그러나 폐쇄된 공간에서도 오랜시간 연속적으로 전압을 인가하였을 때는 버블의 크기가 점차적으로 증가하나 어느 이상은 더 증가하지 않음을 확인 하였다.

4.3 다이어프램 변위 측정

Fig. 9 는 폐쇄된 공간내에서 발생한 버블에 의한 다이어프램의 변위 측정을 위한 장치도이다. 펄스발생기를 통해 전압과 듀티비, 주파수가 인가되어진 마이크로 히터에 열이 발생되고, 그 열로 인하여 작동액에 버블이 생성된다. 이 버블에 의해 다이어프램이 변위를 일으키고 그 변위를 레이저 인터페로미터를 이용하여 측정하였다[8].

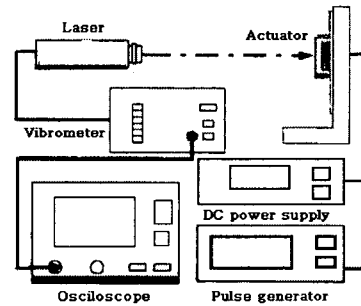


Fig. 9 The actuator displacement measurement setup.

Fig. 10 는 주파수를 1Hz, 듀티비 30%로 마이크로 히터(1번)에 7V의 전압을 인가하였을 때 발생하는 다이어프램의 변위를 측정된 그래프이다. 다이어프램의 변위는 시간에 비례하여 조금씩 증가하며 일정량의 변위 후에는 더 이상 증가하지는 않고 상변화 과정을 되풀이한다.

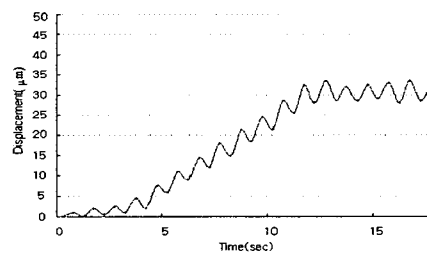


Fig. 10 The diaphragm displacement for various frequencies.

5. 결 론

본 논문에서는 컨트롤이 가능한 싱글 버블을 생성 할 수 있는 마이크로 히터를 제작 및 성능 평가를 통하여 마이크로 액츄에이터를 제작하였다. 제작된 마이크로 액츄에이터는 적층/접합의 구조물이며 유리 및 실리콘등의 다양한 재료를 이용하여 제작되었다.

향후, 마이크로 액츄에이터의 성능 향상을 위하여 정량적인 버블의 성장과 소멸을 위한 전극 패턴의 개발을 수행할 계획이다. 또한 본 마이크로 액츄에이터의 재료인 폴리락스는 생체 적합 물질이기 때문에 의료용 약물 전달 시스템에 적용되어질 수 있는 연구가 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 에이앤디티(주)가 주관하고 강원대학교에서 위탁과제를 수행하는 산업자원부 공동핵심 기술 개발사업의 지원으로 수행되었으며 이에 관 계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) H. Y. Kwak, "Bubble Dynamics", Dream media,

pp. 112-125, 2002.

- (2) T. Chen, J. N. Chung, Coalescence of bubbles in nucleate boiling on microheaters, *J. Heat and Mass Transfer*, 45 (2002) 2329-2341.
- (3) N. Miki, X. Zhang, Multi-stack silicon-direct wafer bonding for 3D MEMS manufacturing, *Sensors and Actuators A*, 103 (2003) 194-201.
- (4) E. H. Klaassen, K. Petersen, Silicon fusion bonding and deep reactive ion etching: a new technology for microstructures, *Sensors and Actuators A*, 52 (1996) 132-139.
- (5) L. Lin, A.P. Pisano, V.P. Carey, Thermal bubble formation on polysilicon micro resistors, *ASME J. Heater Transfer* 120 (1998) 735-742.
- (6) W. J. Yang, K. Tsutsui, Overview of boiling on microstructures-macro bubbles from micro heater, *Microscale Thermophys. Eng.* 4 (2000) 7-24.
- (7) A. Asai, Bubble dynamics in boiling under high heat flux pulse heating, *J. Heat Transfer* 113 (1991) 973-978.
- (8) S. S. Yang, O. C. Jeong, Fabrication and Test of an Electromagnetic Micropump using Solenoid Coil, *Trans. KIEE*. Vol. 49C. No.5, 2000.