

적층형 압전밸브의 유동특성 해석

김재민, 이종춘*, 윤석진**, 정귀상

동서대학교, 경남정보대학*, 한국과학기술연구원**

Analysis of Flow Characteristics of Multilayer Type Piezo Valve

Jae-Min Kim, Jong-Choon Lee*, Suk-Jin Yoon**, and Gwi-Y-Sang Chung

Dongseo Univ., Kyungnam Information College*, KIST**

Abstract

This paper reports on the fluid flow simulation results of a multilayer type piezoelectric valve. The mechanical and fluidic analysis are done by finite element method. The designed structure is normally closed type using buckling effect, which is consist of three separate structures; a valve seat die, an actuator die and a MLCA(Multilayer Type Ceramic Actuator). It is confirmed that the complete laminar flow and the lowest flow leakage are strongly depend on the valve seat geometry. In addition, turbulent flow was occurs in valve outlet according to increase seat dimension, height and inlet pressure. From this, we was deducts the optimum geometry of the valve seat and diaphragm deflection that have an great influence fluid flow in valve. Thus, it is expected that our simulation results would be apply for piezoelectric applications such as valve and pump, fluidic control systems.

Key Words : fluid flow simulation, piezoelectric valve, finite element method, MLCA, diaphragm deflection

1. 서 론

최근 급격한 성장을 보이고 있는 바이오 메디컬 분야에서 극미량의 가스 및 유체를 제어하는 유체 제어시스템(Fluidics Control System) 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 약물전달시스템이나 μ -TAS(Total Analysis System)와 같은 고도의 정밀성을 요하는 유압기기에서는 정확하면서도 높은 재현성을 가지는 유체제어시스템이 필요하다. 이와 같은 소형의 집적화된 미세유체소자는 극소량 단위의 정확한 흐름조절 및 반응제어가 필수적이므로, 유체제어 시스템의 핵심 구성요소인 밸브 및 펌프의 내부 유동현상을 정확히 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다.

지금까지 연구되고 있는 밸브 및 펌프의 종류는 액추에이터의 구동방식에 따라 압전(Piezoelectric)형, 정전(Electrostatic)형, 열공압(Thermopneumatic)형, 형상기억합금(Shape Memory Alloy)형, 전자기(Electromagnetic)형 등으로 나눌 수 있다. 정전형은 수 ms의 고속응답이 가능하지만 100 V 이상의 고

전압으로 구동되며 열공압형은 자체온도 상승에 따른 응답속도가 저하되는 단점을 각각 가지고 있다. 또한, 형상기억합금형과 전자기형은 응답속도가 느리고 제작공정이 복잡하다는 문제점이 있다. 반면 압전형의 경우, 응답속도가 빠르고 구동력이 크기 때문에 유체분사력이 강하고 10 μ m 이하의 정밀변위가 가능하다. 또 장(場) 또는 계의 영향을 받지 않아 유체의 변질이 일어나지 않는다는 장점을 가지고 있어 소형분석 시스템이나 약물전달기기 등에 가장 적합한 구동원으로써 많은 연구가 진행되고 있다.

현재까지 압전체 중에서도 압전박막을 이용한 밸브 및 펌프가 연구되고 있었으나 압전박막의 경우, 극미세제어를 필요로 하는 유체제어시스템 등에 적용가능한 응답속도를 가지고 있지 못하며 변위정밀도와 발생력, 공진주파수가 낮은 문제점을 가지고 있기 때문에, 향후 우수한 열순실 특성 및 변위 정밀도가 우수하고 동작시간이 짧은 MLCA(Multilayer Ceramic Actuator)를 구동부로 사용한 유체기기가 크게 각광받을 것으로 예상된다[1].

한편 적층형 압전밸브 내부에서 유체 이동시 유속 흐름이나 손실이 가장 심한 부분이 밸브 시트부이다. 그러나, 밸브 시트의 경우, 초소형 면적이면서 챔버 내부형상의 굴곡이 가장 심해 다이어프램의 방향전환시 밸브 동작 및 유동 변형에 대한 정밀한 실험 및 측정이 어려운 문제점을 가지고 있다[2].

따라서, 본 논문에서는 적층형 압전밸브 제작의 선행공정으로서, 유한요소법을 이용하여 밸브 시트부의 기하학적 형상 및 압력에 따른 챔버내 유속의 선형성을 평가하였다. 그리고 밸브 구동시 챔버와 시트를 통과하는 유체가 난류를 가지지 않고 완전한 laminar flow를 형성하면서 유속의 선형성을 가질 수 있는 최적의 시트 형상을 설계하여 적층형 압전밸브 제작에 적용하고자 한다.

2. 설 계

본 연구에서는 적층형 압전밸브 내부에서 유속 분포와 유체 거동의 수치해석을 위해 상용 FEM 프로그램인 ANSYS/FLOTRAN을 사용하였다. 압전밸브의 모델이 유체 출구를 중심으로 대칭구조이므로 그림 1과 같이 전체 시트 구조의 1/2만을 나타낸 2-D 모델로 해석을 수행하였다. 이 시뮬레이션에서는 첫째, 밸브 시트부가 완전히 구속되어 있는 상태(steady state)로 가정하였고 둘째, 중력에 의한 영향을 무시하였으며 셋째, 유체가 밸브 시트에 도달할 때까지 laminar flow를 유지한다고 가정하였다[3]. 표 1은 적층형 압전밸브의 시트부 설계조건을 나타낸 것이다.

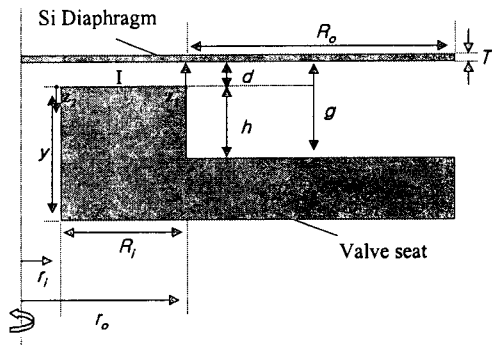


그림 1. 설계된 적층형 압전밸브 시트 단면도.
Fig. 1. Cross section scheme of designed multilayer type piezoelectric valve seat.

표 1. 적층형 압전밸브 설계 조건.

Table 1. Design parameters of multilayer type piezoelectric valve seat geometry.

Items		Size(μm)	
Outlet length		y	510
Chamber height	Seat height	h	102.65
	MLCA deflection	d	0-3.4
	Max. gap	g	0-106.65
Seat radius		R_i	7-42
Chamber length		R_o	840
Si diaphragm thickness		T	150
Valve seat	Inner radius	r_i	18
	Outer radius	r_o	25-60
N_2 properties	density (kg/m^3)	ρ	1.2507
	viscosity ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{sec}$)	μ	17.7

3. 결과 및 고찰

해석에 사용된 기계적·물리적 물성값은 벌크 재료의 값을 사용하였다. 계산에 사용된 영률은 170 Gpa, 프와송 비는 0.3, 기체의 밀도는 $1.2507 \text{ kg}/\text{m}^3$, 점성계수는 $17.7 \text{ kg}/\text{m} \cdot \text{sec}$ 이다. 해석모델은 Max. element가 5696개인 2차원 Axisymmetric 요소를 사용하였으며, 그림 2와 같이 밸브 시트부의 메쉬를 형성한 후 DC 전압을 0-30 V 인가하여 시트 면적과 Si 다이어프램의 변위에 따른 유속특성을 해석하였다.

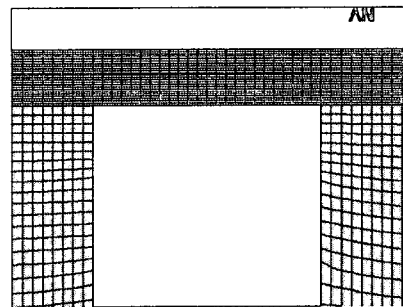


그림 2. 적층형 압전밸브 시트부 메쉬 형성.
Fig. 2. Mesh generation result around multilayer type piezoelectric valve seat.

Si 다이어프램의 변위는 MLCA에 DC 전압을 인가함으로써 발생하며, 이때 Si 다이어프램의 변위는 MLCA의 인가전압 30 V에서 최대 3.4 μm 까지 증가한다[4]. 그림 3은 입구압력 1.2 atm에서의 Si 다이어프램 변위 크기에 따른 유속특성곡선을 나타낸 것이다. 10 V 이하의 인가전압에서는 1 μm 이하의 Si 다이어프램 변위가 발생하면서 유속이

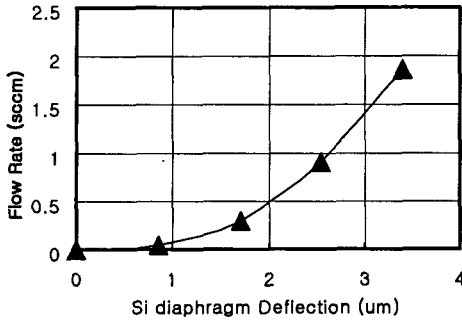
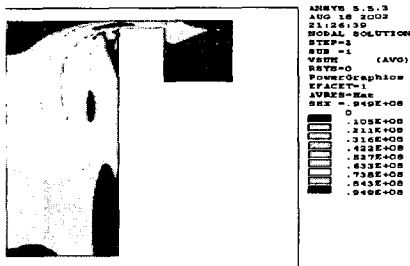
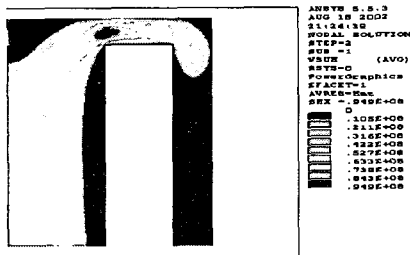


그림 3. Si 다이어프램 변위에 따른 출구방향 유속 특성(입구압력 1.2 atm).

Fig. 3. Valve flow rate as a function of various Si diaphragm deflection($P_{in}=1.2$ atm).



(a)



(b)

그림 4. (a) Si 다이어프램 변위 1 μm 및 (b) 3.4 μm 에서의 시트부 유속분포.

Fig. 4. Velocity contours in valve seat with Si diaphragm deflection (a) 1 μm and (b) 3.4 μm .

거의 흐르지 않다가 MLCA에 20 V 이상의 전압이 인가되면 밸브 시트와 Si 다이어프램 사이의 간격이 2 μm 이상 넓어지면서 유속이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 4는 Si 다이어프램의 변위에 따른 시트부 유속분포를 윤곽지수로 나타낸 그림이다. 그림 4(a)와 같이 1 μm 이하의 Si 다이어프램 변위에서 유속이 흐르지 못한 것은 밸브 표면의 관성력이 질소 기체의 점성력을 지배하기 때문에 유속이 흐르지 못하는 것으로 생각된다. 따라서 Si 다이어프램의 변위가 2 μm 이상 발생했을 때 그림 4(b)와 같이 유체가 laminar flow를 형성하면서 안정한 밸브 구동이 가능함을 알 수 있다.

그림 5는 입구압력 1.2 atm에서 밸브 시트의 면적에 따른 유속특성을 나타낸 것이다. 그림에서 밸브 시트의 면적이 증가할수록 출구를 통과하는 유량이 1.12 sccm까지 현저히 작아짐을 알 수 있다. 이는 시트의 면적이 너무 넓을 경우, 밸브 입구에서부터 laminar flow를 유지하던 유체가 표면장력에 의해 유체 고유의 에너지를 상실하면서 손실수두가 커지기 때문으로 생각된다. 따라서 본 시뮬레이션을 바탕으로 Si 다이어프램의 변위를 3.4 μm , 시트면적을 14 μm^2 로 설계하여 출구 시트부의 유속분포를 시뮬레이션하였다.

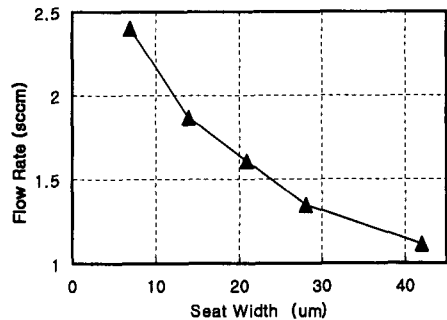


그림 5. 시트 면적에 따른 압전밸브의 유속특성.

Fig. 5. Piezoelectric valve flow rate at different seat width.

그림 6는 적층형 압전밸브의 Si 다이어프램 변위를 3.4 μm , 시트 면적을 14 μm^2 로 최적 설계한 후, 1.2 대기압에서의 출구 및 시트부 유속분포를 시뮬레이션한 해석 모델이다. MLCA에 DC 30 V를 인가할 때 3.4 μm 의 변위가 발생하는 Si 다이어프램이 개방되면서 그림 6(a)와 같은 윤곽지수에서 볼 수 있듯이 층류저층 생성과 함께 완전한

laminar flow가 형성됨을 알 수 있다. 또한 그림 6(b)와 같이 반경 18 μm 인 출구방향 중심부에서 가장 빠른 유속이 형성되는 것을 확인할 수 있다.

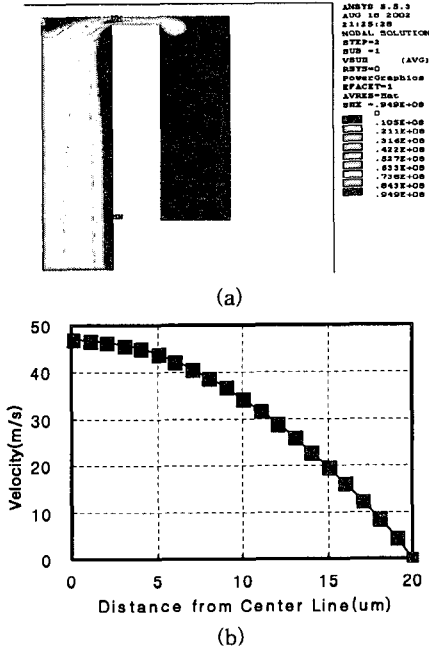


그림 6. (a) 출구와 시트부 유속 윤곽지수 및 (b) 채널 중심에서의 유속분포 ($\mu\text{m/s}$).
 Fig. 6. (a) Velocity contours in flow region and (b) Velocity profile in channel ($\mu\text{m/s}$).

그림 7은 챔버내 입구압력에 따른 적층형 압전 밸브의 유속특성을 나타낸 그래프이다. 입구쪽 압력이 증가할수록 출구방향의 유속이 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. 이는 압력이 높아지더라도 시트부를 중심으로 한계 Reynolds 수를 유지하고 있으며, 유속이 포화하거나 난류가 발생하지 않

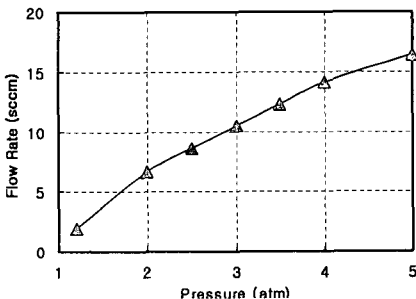


그림 7. 입구압력에 따른 마이크로 밸브 유속특성.
 Fig. 7. Valve flow rate measured at different absolute pressure.

음을 보여주는 것이다. 따라서 본 연구에서 해석된 설계조건을 사용할 경우, 4.0 atm 이상의 고압에서도 사용할 수 있는 적층형 압전밸브 제작이 가능함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 적층형 압전밸브를 제작하기 위한 선행연구과제로써, ANSYS/FLOTRAN을 사용하여 밸브 시트부와 Si 다이어프램을 설계하였다. 그리고 밸브의 실제 유체 흐름과 유속분포를 분석하기 위해 시트의 면적과 Si 다이어프램의 변위를 조절하면서 유속의 선형성 및 고압에서도 laminar flow를 형성할 수 있는 최적의 시트 형상을 설계하였다. 해석결과, 압전밸브 시트 면적 14 μm , Si 다이어프램의 변위 3.4 μm 에서 완전한 laminar flow를 형성하는 것을 확인하였다. 또한 입구압력을 5 atm까지 증가시켰을 경우 최대 16 sccm의 유량이 흐르는 것을 확인하였다.

따라서, 본 연구에서 해석한 적층형 압전밸브 최적 설계조건은 차후 MLCA를 이용한 미세유체소자용 능동형 밸브 제작시 유용하게 적용 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환인 '차세대 소재성형 기술개발사업단'의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] I. Chakraborty, W. Tang, D. Bame, T. Tang, "MEMS micro-valve for space applications", Sensors and Actuators, Vol. A 83, p. 188-192, 2000.
- [2] J. Ulrich, R. Zengerle, "Static and dynamic flow simulation of a KOH-etched microvalve using the finite-element method", Sensors and Actuators, Vol. A 53, p. 379-384, 1996.
- [3] X. Yang, "A MEMS valve for the MIT microengine", Master's Thesis of Berkeley University in California, 2001.
- [4] 김재민, 정귀상, "MEMS용 MLCA와 Si 기판의 양극접합에 관한 연구", 제 5회 한국 MEMS 학술대회 논문집, p. 113-117, 2003.