

유한요소법을 이용한 버클링 마이크로 밸브의 유동특성 해석 및 최적 설계

김재민, 이종춘*, 정귀상, 윤석진**

동서대학교, 경남 정보대학교*, 한국과학기술연구원**

Analysis of Flow Characteristics and Optimum Design of a Buckling Microvalve Using the Finite Element Method

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

Dongseo Univ., Kyungnam Information College*, Korea Institute of Science and Technology**

Abstract

This paper reports on the fluid flow simulation results of an active microvalve. The mechanical and fluidic analysis are done by finite element method. The designed structure is normally closed microvalve using buckling effect, which is consist of three separate structures; a valve seat die, an actuator die and a small piezoelectric 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 microvalve. Thus, it is expected that our simulation results would be apply for constructing integrated chemical analyzing system or drug delivery system.

Key Words : microvalve, fluid flow simulation, finite element method, buckling effect, valve seat

1. 서 론

최근 급격한 성장을 보이고 있는 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 시장에서 극미량의 가스 및 유체를 제어하는 미세유체소자(micro-fluidic device) 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 그 중에서도 인간의 건강 및 복지 증진에 대한 욕구가 커지면서 생명공학 및 의료소자와 관련하여 인체내 약물 주입을 위한 약물전달 시스템(drug delivery system) 혹은 화학분석 시스템(chemical analysis system) 등의 구현을 위한 많은 연구가 수행되고 있다. 이와 같은 소형의 집적화된 미세유체소자는 극소량 단위의 정확한 흐름조절 및 반응제어가 필수적이므로, 유체제어 시스템의 핵심 구성요소인 마이크로 밸브의 내부 유동현상을 정확히 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다.

현재 개발되고 있는 마이크로 밸브 중에서 다이어프램의 변위를 이용해 유체의 방향을 전환시키는 버클링 마이크로 밸브의 경우, 압전(piezoelectric)형[1,2], 열공압(thermopneumatic)형[3], 정전(electrostatic)형, 형상기억합금(SMA)형, 전자기(electromagnetic)형 등 밸브 구동용 액츄에이터를 사용한 대부분의 능동형 마이크로 밸브에 적용가능한 장점을 가지고 있다. 하지만 지금까지 버클링 효과를 응용하는 많은 연구가 밸브 다이어프램의 형상 최적화 및 구동원의 변위특성 향상에 집중되고 있기 때문에 수 $\mu\text{l}/\text{min}$ 단위의 극미세 유량을 제어하는 마이크로 밸브 제작시 난류나 유체 부손실, cavitation 발생에 대한 정확한 원인 규명이 아직까지 이루어지지 못하고 있다[4-6].

한편 버클링 마이크로 밸브 내부에서 유체 이동시 유속 흐름이나 손실이 가장 심한 부분이 밸브 시트

부이다. 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[7].

따라서, 본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 밸브 시트부의 기하학적 형상에 따른 정밀 유동특성 분석 및 압력에 따른 챔버내 유속의 선형성을 평가하였다. 그리고 밸브 구동시 챔버와 시트를 통과하는 유체가 난류를 가지지 않고 완전한 laminar flow를 형성하면서 유속을 일정하게 유지할 수 있는 최적의 시트 형상을 설계하여 마이크로 밸브 제작연구에 적용하고자 한다.

2. 설 계

본 연구에서는 밸브 내부에서 유속 분포와 유체 거동의 수치해석을 위해 상용 FEM 프로그램인 ANSYS/FLOTRAN을 사용하였다. 마이크로 밸브의 모델이 유체 출구를 중심으로 폭 방향에 대해 대칭 구조이므로 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 throat area에 도달할 때까지 laminar flow를 유지한다고 가정하였다. 표 1의 원형 밸브 시트 설계조건과 Navier-Stoke's 정리를 이용하여 압력에 따른 유속을 구간별로 다음과 같이 계산할 수 있다[8].

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \quad (1)$$

이 때, area I에서의 경계조건은 다음 식과 같다.

$$V r_1(z_1=0) = 0$$

$$V r_1(z_1=h) = 0$$

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial z_2} + \mu \frac{1}{r_2} \left[\frac{\partial}{\partial r_2} \left(r \frac{\partial V z_2}{\partial r_2} \right) \right] \quad (2)$$

또 area II의 경계조건은 다음과 같이 표기된다.

$$\frac{\partial V z_2}{\partial r_2} (r_2=0) = 0$$

$$V z_2(z_2=0) = 0$$

여기서 r_1 은 밸브 시트 방향의 면적이며 r_2 는 출구방향 면적이다. (1), (2)에서 얻어진 이론값과 유한요소법에 의한 시뮬레이션을 통하여 버클링 마이크로

로 밸브의 챔버 내부와 입출구의 압력변화 및 시트 구조변경에 따른 유동의 선형성을 평가하였다.

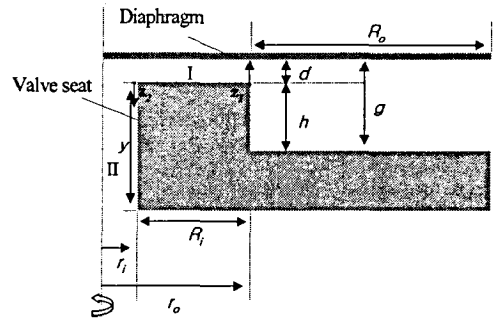


그림 1. 설계된 마이크로 밸브 시트 단면도.

Fig. 1. Cross section scheme of designed micro-valve seat model.

표 1. 마이크로 밸브 시트 형상 설계 조건.

Table 1. Design parameters of microvalve seat geometry.

Items		Size(μm)	
Outlet length		y	510
Chamber height	Seat height	h	102.65
	Actuation gap	d	0-3.4
	Max. gap	g	0-106.65
Seat radius		R_i	7-42
Chamber length		R_o	840
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 Axi-symmetric 요소를 사용하였으며 그림 2와 같이 밸브 시트부의 메쉬를 형성한 후 시트 면적과 다이어프램의 변위에 따른 유속특성을 해석하였다.

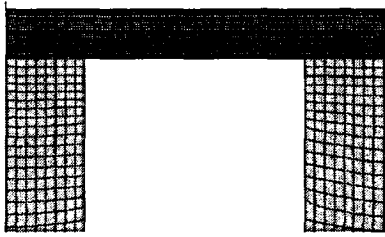


그림 2. 밸브 시트부에서의 메쉬 형성.
Fig. 2. Mesh generation result around valve seat.

그림 3은 입구압력 1.2 atm에서의 밸브 다이어프램 변위 크기에 따른 유속특성곡선을 나타낸 것이다. 1 μm 이하의 다이어프램 개방시에는 유속이 거의 흐르지 않다가 원형 밸브 시트와 다이어프램 사이의 간격이 2 μm 이상 넓어질수록 유속이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 다이어프램의 변위가 너무 미세할 경우, 밸브 표면의 관성력이 질소 기체의 점성력을 지배하기 때문에 유속이 흐르지 못하는 것으로 생각된다. 따라서 밸브 시트부 제작시 다이어프램의 변위 크기가 유속의 선형성에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

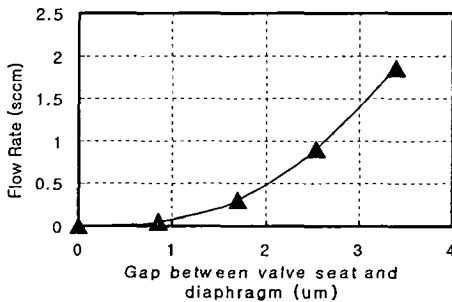


그림 3. 밸브 시트와 다이어프램 간격 변화에 따른 출구방향 유속특성(입구압력 1.2 atm).
Fig. 3. Valve flow rate at different gap distance between seat and diaphragm($P_m=1.2 \text{ atm}$).

그림 4는 입구압력 1.2 atm에서 원형 밸브 시트의 면적에 따른 유속특성을 나타낸 것이다. 그림에서 밸브 시트의 면적이 넓을수록 출구를 통과하는 유량이 현저히 작아짐을 알 수 있다. 이는 시트의 면적이 너무 넓을 경우, 밸브 입구에서부터 laminar flow를 유지하면서 이동하던 유체가 통로 형상변화에 의한 유체 고유의 에너지를 상실하면서 손실수두가 커지기 때문으로 생각된다.

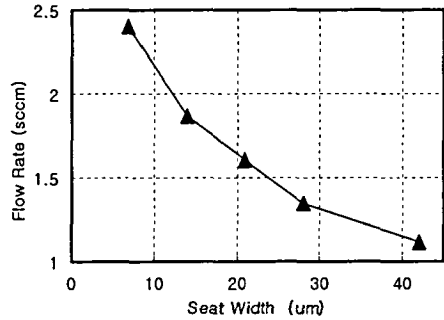


그림 4. 시트 면적에 따른 밸브의 유속특성.
Fig. 4. Valve flow rate at different seat width.

그림 5와 6은 이전 해석의 연구결과를 바탕으로, 밸브 다이어프램의 변위를 3.4 μm , 시트 면적을 14 μm 로 최적 설계한 후, 1.2 대기압에서의 출구 및 시트부 유속분포를 시물레이션한 해석 모델이다. 3.4 μm 의 변위를 가지는 다이어프램 개방시 반경 18 μm 인 출구방향 중심부에서 가장 빠른 유속이 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 윤곽 지수에서 볼 수 있듯이 층류저층 생성과 함께 완전한 laminar flow가

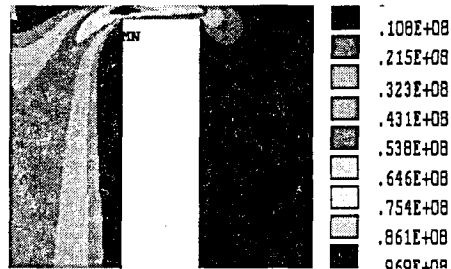


그림 5. 출구 및 시트부 유속분포($\mu\text{m/s}$).
Fig. 5. Velocity($\mu\text{m/s}$) contours in flow region.

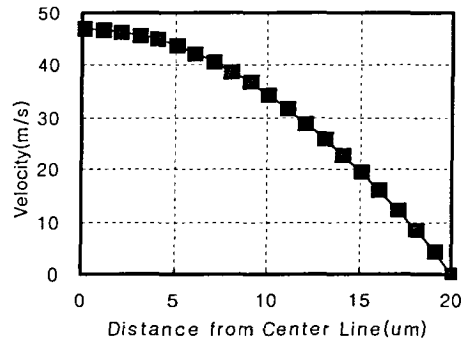


그림 6. 채널내 출구 중심에서의 유속분포.
Fig. 6. Velocity profile downstream in channel.

형성됨을 알 수 있다.

그림 7은 챔버내 입구압력에 따른 마이크로 밸브의 유속특성을 나타낸 그래프이다. 입구쪽 압력이 증가할수록 출구방향의 유속이 지수함수의 형태로 증가함을 확인할 수 있다. 이는 압력이 높아지더라도 시트부를 중심으로 한계 Reynolds 수를 유지하고 있으며, 유속이 포화하거나 난류가 발생하지 않음을 보여주는 것이다. 따라서 본 연구에서 해석된 설계 조건을 사용할 경우, 4.0 atm 이상의 고압에서도 사용할 수 있는 버클링 마이크로 밸브의 제작이 가능함을 알 수 있다.

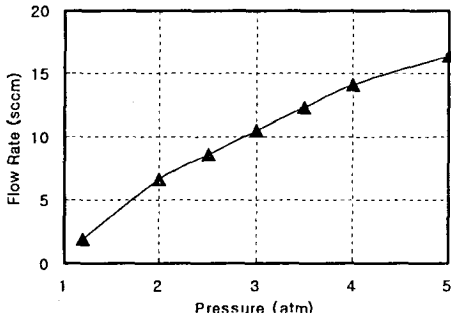


그림 7. 입구압력에 따른 마이크로밸브 유속특성.

Fig. 7. Valve flow rate measured at different absolute pressure.

4. 결론

본 연구에서는 버클링 마이크로 밸브를 제작하기 위한 선행연구과제로써, ANSYS/FLOTRAN을 사용하여 밸브 원형 시트부와 다이어프램을 설계하였다. 그리고 밸브의 실제 유체 흐름과 유속분포를 분석하기 위해 시트의 면적과 다이어프램의 변위를 조절하면서 유속의 선형성 유지 및 고압에서도 laminar flow를 형성할 수 있는 최적의 시트 형상을 설계하였다. 해석결과, 밸브 시트 면적과 다이어프램의 변위량은 유체의 에너지 손실 및 점성력 변화를 유발함으로써 유속에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 다이어프램의 변위가 너무 작고 밸브 시트의 면적이 너무 넓은 경우 유체가 출구를 통과하지 못하거나 난류를 형성함을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서 해석한 마이크로 밸브 최적 설계조건은 차후 버클링 동작을 이용한 미세유체소자용 능동형 마이크로 밸브 제작시 유용하게 적용가

능할 것으로 기대된다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] M. Stehr, S. Messner, H. Sandmaier, R. Zengerle, "The VAMP - a new device for handling liquids or gases", *Sensors and Actuators*, Vol. A 57, p. 153, 1996.
- [2] J. Mueller, I. Chakraborty, S. Vargo, C. Marese, V. White, D. Bame, "Towards micro-propulsion systems on-a-chip: initial results of component feasibility studies", *Aerospace Conference Proc. IEEE*, Vol. 4, p. 149, 2000.
- [3] T. Lisec, S. Hoerschelmann, H. Quenzer, B. wagner, W. Benecke, "Thermally driven micro-valve with buckling behaviour for pneumatic applications", *Micro Electro Mechanical Systems, Proc., IEEE Workshop on*, p. 13, 1994.
- [4] W. Schomburg, C. Coll, "Design optimization of bistable microdiaphragm valves", *Sensors and Actuators*, Vol. A 64, p. 259, 1998.
- [5] I. Chakraborty, W. Tang, D. Bame, T. Tang, "MEMS micro-valve for space applications", *Sensors and Actuators*, Vol. A 83, p. 188, 2000.
- [6] B. Wagner, H. Quenzer, S. Hoerschelmann, T. Licce, M. Juerss, "Micromachined bistable valves for implantable drug delivery systems", *Engineering in Medicine and Biology Society, 18th Annual International Conference of the IEEE*, Vol. 1, p. 254, 1996.
- [7] 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, 1996.
- [8] X. Yang, "A MEMS valve for the MIT microengine", *A master's thesis of berkeley university in california*, p. 79, 2001.