

MEMS용 MCA/Si diaphragm 구조의 변위해석

김재민, 이종춘*, 윤석진**, 정귀상

동서대학교, 경남정보대학*, 한국과학기술연구원**

Deflection Analysis of MCA/Si diaphragm for MEMS

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

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

Abstract

MCA deflection control is a important technology for the development of MEMS applications. In this study, deflection analysis at the MCA/Si diaphragm was investigated by Finite Element Method. Analysis of Si diaphragm combined with MCA has been implemented into the ANSYS (Solid5 and Solid45). On the basis of this structure, deflection versus MCA number of layers has been modelled and MCA/Si contact area characteristics with different diaphragm conditions were analyzed. Consequently, it is expected that fabrication technology of MCA/Si diaphragm could be usefully applied for the fabrication process of high-performance piezoelectric MEMS devices.

Key Words : MCA, Si diaphragm, Finite Element Method, MEMS, Deflection

1. 서 론

압전 액추에이터는 현재 정밀 위치제어에 사용되어온 공기압식, 유압식 방법보다 구동력이 크고 동작속도가 빠르며 전기-기계적 변환에 따른 구동 효율이 좋기 때문에 압력센서, 마이크로 밸브 및 펌프, 유량제어기(MFC: mass flow controller)와 같은 마이크로 센서 및 액추에이터 구동 등에 광범위하게 응용되고 있다. 특히 최근에는 정밀계측 산업, 우주항공분야 및 MEMS(micro electro mechanical system) 제작에 이르기까지, 10 μ m 이하의 고정밀 제어가 가능한 압전 액추에이터를 구동부로 사용하기 위한 연구개발이 활발하게 진행 중이다. 압전 액추에이터 중에서도 unimorph 및 bimorph에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 압전박막은 극미세제어를 필요로 하는 유체 제어시스템 등에 적용가능한 응답속도(>1 kHz)를 가지고 있지 못하며 변위정밀도와 발생력, 공진 주파수가 낮은 문제점을 가지고 있기 때문에, 향후 변위 정밀도가 우수하고 동작시간이 짧은 MCA (multilayer ceramic actuator)를 센서 및 전자부품에 사용하기 위한 연구가 확대될 것으로 보인다[1].

한편 MCA를 MEMS 및 정밀계측부품의 구동부로 사용하기 위해서는 MCA와 그 지지부로 사용하게 될 Si 다이어프램의 변위를 정확하게 측정하고 제어하는 것이 무엇보다도 중요하다. MCA/Si 다이어프램의 변위량은 일반적으로 MCA의 적층수, 다이어프램의 면적과 두께에 따라 증가 또는 감소하게 되므로, 실질적으로 소자의 출력특성에 결정적인 영향을 줄뿐만 아니라 소자의 크기도 좌우할 수 있는 중요한 인자이다. 하지만 MCA/Si 다이어프램 구조의 변위특성 분석은 시간, 비용 및 장비확보 면에서 직접적인 측정에 많은 어려움을 가진다.

따라서, 본 논문에서는 MCA/Si 다이어프램 구조를 마이크로 센서 및 정밀계측부품의 압전 구동부로 사용하기 위하여, 범용 해석 소프트웨어인 ANSYS를 사용하여 MCA/Si 다이어프램 구조의 시뮬레이션을 통한 설계를 수행하였다. MCA 적층수에 따른 MCA/Si 다이어프램 구조의 변위량을 이론값과 비교하고 분석하였으며, Si 다이어프램의 면적 및 두께조건을 달리하여 MCA에 접합된 Si 다이어프램의 중심부 변위량을 해석하였다.

2. 설 계

본 연구에서는 MCA/Si 다이어프램의 해석 수월을 위하여 상용 FEM 프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 해석을 수행한 MCA/Si 다이어프램 구조는 첫째, 다이어프램의 모든 측면과 MCA의 상부가 고정되어 있다고 가정하였으며, 둘째, MCA 외부전극의 경우 두께 및 그 존재 유무가 MCA 변위 및 응력 해석에 영향을 거의 주지 않기 때문에 본 시뮬레이션에서는 별도의 설계를 하지 않았다 [2]. 마지막으로 MCA 내부의 PZT/PZT 계면 또는 MCA/Si 다이어프램 계면은 항상 접합되어 있는 상태로 가정하였다. 설계한 모든 PZT plate는 200 μm 두께의 5 \times 5 mm^2 규격으로 설계하였으며, Si 다이어프램은 Boron이 도핑된 p-type (100) 기판으로 각각 Solid5와 Solid45 요소 물성치를 사용하였다. 그림 1은 MLA 층수를 10층, Si 다이어프램의 면적을 10 \times 10 mm^2 , 두께를 200 μm 로 설계한 후, Max. element를 6155개로 매쉬 형성 및 구속조건을 수행한 3차원 모델이다.

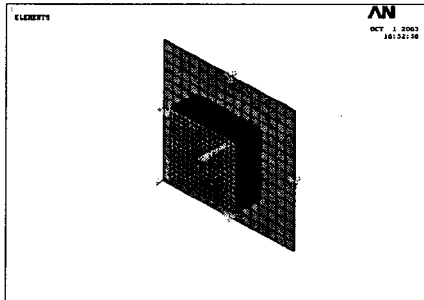


그림. 1. MCA/Si diaphragm 구조 매쉬 형성.

Fig. 1. Mesh generation result in MCA/Si diaphragm.

MCA에 100 V가 인가되었을 때 액추에이터는 상부가 구속되어 있으므로, Si 다이어프램과 결합되어 있는 하부만 변위가 발생하게 된다. 적층계수를 고려하여 변위량을 이론적으로 산출할 경우 그 수식은 다음과 같다.

$$\Delta L = \alpha \times N \times d_{33} \times V \quad (1)$$

여기서 α 는 전계강도 상수이며 N 은 적층계수, d_{33} 은 압전정수이다. Si 다이어프램과 결합된 MCA의 적층수를 1~20 층까지 가변한 후, MCA에 100 V의 전계를 인가하여 적층수에 따른 변위특성 및

Si 다이어프램의 변위 분포도를 분석하였다.

표 1은 본 연구의 시뮬레이션에 사용된 압전 세라믹인 Tokin 사의 MCA(5 \times 5 \times 20 mm^3) 재료정수를 나타낸 것이다.

표 1. MLA 재료정수

Table 1. Material constant of MLA

Materials	재료정수	MCA
Physical properties	Density (10^3 kg/m^3)	8.0
	e_{33} (C/m^2)	26.1
Piezoelectric constants	e_{31} (C/m^2)	-14
	e_{15} (C/m^2)	20.7
	ϵ_{33}^t (10^{-8} F/m)	4.81E-8
Dielectric constants	ϵ_{11}^t (10^{-8} F/m)	4.43E-8
	c_{11}^t (10^{10} N/m^2)	1.09
Elastic constants	c_{12}^t (10^{10} N/m^2)	5.80
	c_{33}^t (10^{10} N/m^2)	9.00
	c_{13}^t (10^{10} N/m^2)	5.40
	c_{44}^t (10^{10} N/m^2)	2.20
	c_{66}^t (10^{10} N/m^2)	2.50

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 먼저 MCA의 적층수에 따른 MCA/Si 다이어프램 구조의 변위량을 이론값과 비교하고 분석하였다.

그림 2는 MCA 적층수를 달리하여 Si 다이어프램의 변위특성을 분석한 것이다. Si 다이어프램의 두께를 150 μm , 10 \times 10 mm^2 면적으로 고정시키고 MCA의 층수를 1층에서 6층까지 가변한 후, 전압을 100 V 인가하여 시뮬레이션하였을 때 그림과 같이 0.107~0.802 μm 까지 변위량이 거의 선형적으로 증가하였다. 그러나 Si 다이어프램이 MCA와 결합되어 있는 부분의 경우, MCA가 5층 이하였을 때는 변위량이 전체적으로 일정하지 않다가 6층 이상부터 MCA와 결합된 Si 다이어프램 후면의 변위가 정밀해짐을 윤곽지수로 알 수 있다. 따라서 MCA가 unimorph 및 bimorph에 비하여 극미세 정밀제어 및 계측을 요구하는 전자기계부품에 훨씬 적합함을 알 수 있다.

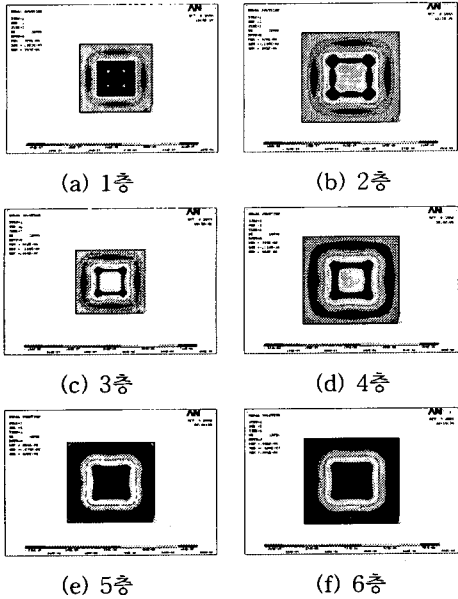


그림 2. MCA 적층수에 따른 Si 다이어프램 변위 특성.

Fig. 2. Deflection characteristics of the Si diaphragm as a function of the number of layers.

MCA 적층수에 따른 Si 다이어프램 변위량의 이론값과 해석값을 비교한 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 이론값과 해석값 모두 MCA의 적층수에 비례하여 거의 선형적으로 변위량이 증가

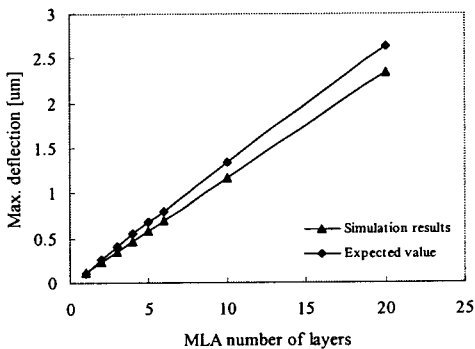


그림 3. MCA 적층수에 따른 Si 다이어프램 최대 변위 비교분석.

Fig. 3. Comparison of the deflection characteristics of Si diaphragm with number of layers between simulation and expected value.

하고 있으며, 이론값이 해석값보다 약간 커지는 이유는 재료정수의 차이 및 시물레이션간 Si 다이어프램과의 결합으로 인한 변위량 감소에서 발생하는 것이라 생각된다.

Si 다이어프램 두께에 따른 MCA/Si 다이어프램 구조의 후면 및 결합계면간 변위특성을 그림 4에 나타내었다. MCA의 층수를 10층으로 고정시키고 Si 다이어프램의 두께를 100~550 μm로 가변하였을 때, 300 μm까지의 두께에서는 MCA 결합계면의 변위를 일정하게 유지하다가 그 이상의 두께에서는 변위의 선형성을 가지지 못함을 알 수 있다. 특히 그림 (c)와 (d)의 윤곽지수에서 알 수 있듯이 Si 다이어프램의 두께 500 μm부터 MCA와 Si 표면 사이에 균열이 발생하면서 변위량이 급격히 감소함을 알 수 있다.

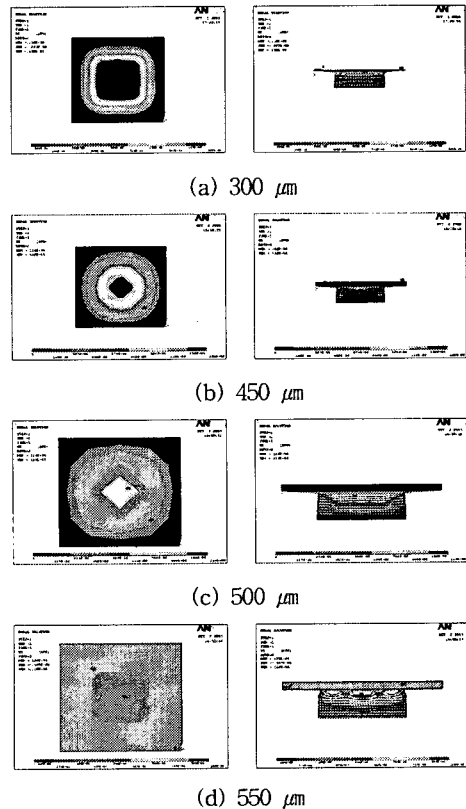


그림 4. Si 다이어프램 두께에 따른 MCA/Si 다이어프램 계면 해석.

Fig. 4. Simulation at the contact area in the MCA/Si diaphragm with different Si diaphragm thickness.

그림 5는 Si 다이어프램의 두께 증가에 따른 최대 변위량은 나타낸 것이다. 그림에서 두께가 증가할수록 Si 다이어프램의 변위량은 1.36 μm 로 일정하게 유지하다가 450 μm 의 두께부터 변위가 0.241 μm 까지 급격히 감소함을 알 수 있다. 그러나 앞서 보고하였던 실제측정에서는 Si 다이어프램 두께 300 μm 부근에서 변위량이 급격히 감소하였으며, 이와 같은 차이는 시뮬레이션에서 사용한 MCA와 Si의 물성치 차이에서 기인한 것으로 추정된다[3].

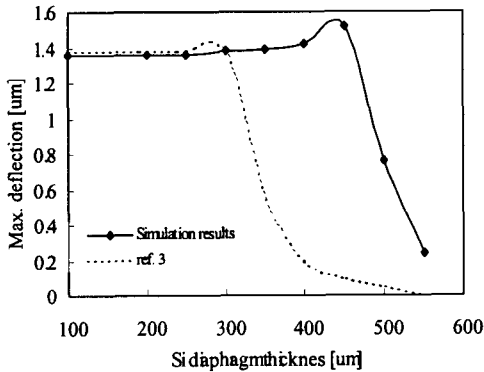


그림 5. Si 다이어프램 두께에 따른 변위량 분석.
Fig. 5. Max. deflection characteristics at the center with different Si diaphragm thickness.

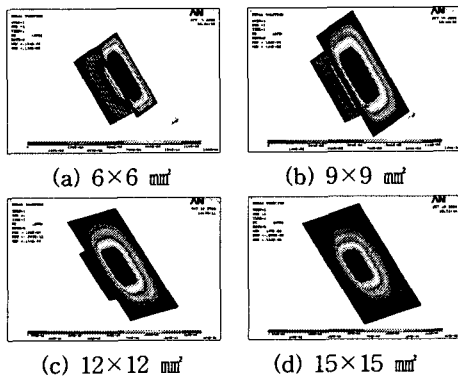


그림 6. Si 다이어프램 직경에 따른 변위량 해석.
Fig. 6. Deflection results with Si diaphragm diameter.

그림 6은 Si 다이어프램 면적에 따른 변위특성을 나타낸 것이다. 모든 시뮬레이션은 MCA를 10 층으로 설계하였으며, 다이어프램의 면적은 6×6 mm²에서 15×15 mm²까지 증가시키며 해석하였다. 변

위 해석결과, Si 다이어프램의 면적이 증가하더라도 MCA와 결합된 부분의 윤곽직수에는 큰 변화가 없었으며, 면적에 따른 변위량은 전체적으로 1.33~1.34 μm 로서 큰 차이를 보이지 않았는데 이는 L. Cao 등의 변위측정결과와 일치하였다[4].

4. 결 론

본 연구에서는 상용 FEM 프로그램인 ANSYS를 사용하여 MCA/Si 다이어프램의 변위특성을 분석하였다. MCA의 적층수에 따른 MCA/Si 다이어프램 구조의 변위량을 분석하고 Si 다이어프램의 면적 및 두께조건을 달리하여 MCA에 접합된 Si 다이어프램의 중심부 변위량을 해석하였다. 해석결과, MCA 적층수가 증가할수록 MCA/Si 결합계면간 변위정밀도가 우수하였으며 Si 다이어프램의 두께가 얇을수록 마이크로 센서 및 액추에이터 그리고 MEMS의 구동부로서 고신뢰도의 MCA 변위제어가 가능함을 알 수 있었다. 결론적으로 본 연구결과를 MCA/Si 다이어프램 제조공정에 적용할 경우, 마이크로 밸브 및 펌프, 약물전달시스템, 유량조절기와 같은 고성능 MEMS 및 전자기계부품 제조공정에 대단히 유용하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] 김용혁, 박수창, 최명규, 김재호, "적층형 압전 액추에이터의 제조 및 압전특성", 전기전자재료학회지, vol. 3, no. 4, p. 271-278, 1990.
- [2] 홍재일, 류주현, 박창엽, "적층형 압전 액추에이터의 2차원모델 해석에 관한 연구", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, p. 307-310, 1998.
- [3] 김재민, 정귀상, "MEMS용 MLCA와 Si 기판의 양극접합에 관한 연구", 제 5회 한국 MEMS 학술대회 논문집, p. 113-117, 2003.
- [4] L. Cao, S. Mantell and D. Polla, "Design and simulation of an implantable medical drug delivery system using microelectrochemical systems technology", Sensor and Actuators A, vol. 94, p. 117-125, 2001.