# MEMS

# Development of Finite Element Model for Dynamic Characteristics of MEMS Piezo Actuator in Consideration of Semiconductor Process

# 김동운†·송종형\*·안승도\*\*·우기석\*\*\* Dong Woohn Kim, Jonghyeong Song, Seungdo An and Kisuk Woo

Key Words : SOM(Spatial optical modulator), piezo actuator (압전 작동기), residual stress(잔류 응력), 반도체 공정 (semiconductor process), natural frequency(고유진동수), MEMS

#### ABSTRACT

For the purpose of rapid development and superior design quality assurance, sophisticated finite element model for SOM(Spatial Optical Modulator) piezo actuator of MOEMS device has been developed and evaluated for the accuracy of dynamics and residual stress analysis. Parametric finite element model is constructed using ANSYS APDL language to increase the design and analysis performance. Geometric dimensions, mechanical material properties for each thin film layer are input parameters of FE model and residual stresses in all thin film layers are simulated by thermal expansion method with psedu process temperature. 6<sup>th</sup> mask design samples are manufactured and 1<sup>st</sup> natural frequency and 10V PZT driving displacement are measured with LDV. The results of experiment are compared with those of the simulation and validate the good agreement in 1<sup>st</sup> natural frequency within 5% error. But large error over 30% occurred in 10V PZT driving displacement because of insufficient PZT constant d<sub>31</sub> measurement technology.

#### 1.서 론

최근까지 주로 고해상도 디스플레이용 광소자의 현에 많이 이용된 광 MEMS, MOEMS (Micro Opto Electro Mechanical Systme)는 광, 전기, 자기, 기계 야가 서로 연성되어 동작하는 실리콘 칩 형태의 소형 작동기를 설계, 제조하는 기술을 일컫는다. 광 MEMS 작동기 중 가장 유명한 제품은 Texas Instruments 사에서 개발한 반사형 소자, DMD(Digital Mirror Display)이다. 이 제품은 각각 +10 도, 0 도, -10 도의 각도로 움직일 수 있는 2 차 원으로 배열된 한 쌍의 미세 거울로 입사된 빛을 반사하면서 광의 진로를 변경하여 디스플레이 화 면을 구성한다<sup>(1)</sup>. 구조가 복잡하여 수율등에 어려 움이 있는 반사형 소자와 다르게 회절(Diffraction) 형 소자는 형태가 단순하고 속도가 빠른 장점이 대표적인 회절형 광 MEMS 작동기로서 있다. GLV (Grating Light Valve)가 개발되어 SONY 사의 초고해상도 프로젝션 디스플레이에 적용되었다<sup>(2)</sup>. GLV 는 양단고정보 형태의 다수의 리본과 전극이 일렬로 배열되어 전압이 인가되면 해당 전극의 리 본은 정전기력에 의하여 입사광 파장의 1/4 거리 만큼 하부 전극으로 이동하게 된다. 이 때 빛의 회절에 의한 소멸 간섭으로 회절광의 강도가 커지 면서 디스플레이 한 픽셀의 0.1 신호의 스위칭이 가능하게 된다. 그러나, GLV 는 정전기력으로 구

<sup>↑</sup> 교신저자; 정회원, 삼성전기 OMS 사업부 MD 선행개발 E-mail:dongwoohn.kim@samsung.com Tel:+82-31-210-6282

<sup>\*</sup> 삼성전기 중앙연구소 SMD 랩

<sup>\*\*</sup> University of Michigan

<sup>\*\*\*</sup> LG 전자 소재부품 연구소

동되므로 Fab 제조 공차에 따라 리본과 전극이 붙 어버리는 문제(stiction)가 발생하기 쉽다. 이러한 단점을 극복하고 보다 빠른 응답 특성을 갖는 광 MEMS 소자로서 SOM (Spatial Optical Modulator) 압 전 작동기가 제안되었다<sup>3)</sup>. SOM 압전 작동기는 저 압화학증착(LPCVD), 식각(etching), 진공증착 (sputtering) 등 반도체 제조 공정을 통하여 제작되 므로, 샘플 제작 및 공정 안정화에 많은 시간이 소모된다. SOM 압전 작동기의 개발기간을 단축하 고 설계 품질을 확보하기 위하여 반도체 공정 단 계별 잔류응력을 모사할 수 있는 정밀한 유한요소 모델을 개발하고 그 정확성을 평가하였다.

#### 2. SOM 압전 작동기

#### 2.1 SOM chip의 구조

SOM chip은 Fig. 1 (a)에 나타낸 바와 같은 1차원 절 광 변조기로서 GLV와 같은 동작원리를 가지고 다. 일련의 반도체 공정을 통하여 입사된 빛이 원하 는 형태로 회절될 수 있도록 리본에 회절 구조를 갖 는 양단 지지보 형태의 다층 박막 소자를 실리콘 웨 이퍼 상에서 만든다. 일렬로 배치된 각 리본은 그 에 적층된 PZT(lead zirconate titanate) 박막에 의하여 구동되어 주어진 초기변위(Gap Height, 이하 G/H)에 1/4 λ 거리 만큼 바닥면으로 이동한다. 이렇게 모 리본들을 원하는 패턴으로 제어하여 Fig. 2 와 같이 차와 1차 회절 모드를 이용한 고해상도 디스플레이 1차원 회절 광 변조 기능을 수행한다.



(a) SOM chip and ribbon array structure



(b) SOM piezo actuator of each ribbon part Figure 1 Schematic of SOM chip and piezo actuator



Figure 2. Cross section of SOM chip

#### 2.2 SOM chip 제조 공정

SOM chip을 만들기 위해서는 반도체 제조와 동일 한 복잡한 공정을 거치지만 Fig. 3에 단순하게 분류 하여 나타내었다. 절연막(SiO<sub>2</sub>)이 증착된 Si 웨이퍼 상에, 양단 지지보 형태를 만들기 위한 Si 희생층, SiN층, SiO2층, 하부전극(Pt)층, PZT 층, 상부전극(Pt) 층을 차례로 증착시키는 성막 공정(a), 양단 부분을 제외한 PZT 박막층 및 전극층을 식각하는 식각 공 정(b), 절연층을 증착하고, 리본을 형성하는 리본 형 성 공정(c), Al 반사층, 금속 배선을 만들고, 리본 하 부 Si 희생층을 식각하여 구조물을 릴리즈 하는 마 무리 공정(d)으로 전체 공정이 이루어 진다.

Fig. 3 (a)와 같은 성막 공정에서 각 박막 층별 재 질의 차이에 따른 열팽창 계수의 차이와 결정 격자 부정합(lattice mismatch) 등에 의한 잔류 응력이 발생 하게 된다.<sup>(4)</sup> 발생하는 잔류 응력의 크기는 박막 증 착 공정의 조건에 의하여 결정된다. 각 층별 잔류 응력의 크기와 방향에 따라 마무리 릴리즈 공정 후 리본의 변형량 및 형태가 결정될 것이다. 또한 박막 에 존재하는 잔류응력은 stress stiffening 현상을 일으 키는 것으로 알려져 있다.<sup>(5)</sup> 그러므로, 초기 G/H를 설계 사양에 맞게 결정하기 위하여 각 층별 잔류 응 력의 크기를 조절해야 한다.



(c) Ribbon formation

(d) Al layer sputtering and structure release

Figure 3. MEMS fabrication process for SOM chip

#### 2.3 SOM 압전 작동기의 설계

SOM chip의 회절 효율을 높이고, 응답 속도를 빠 르게 하기 위하여 SOM 압전 작동기의 1차 고유진 동수와 압전 구동 변위를 목표 성능 이상으로 설계 해야 한다. 또한 초기 G/H 역시 목표 회절 효율에 맞게 제한되어야 한다. 목표 성능을 달성하기 위한 설계 변수는 박막 두께, 리본 폭, 리본 길이 등과 같 은 기하학적 치수, 박막 층별 기계적 물성, 압전 박 막의 물성(압전 상수) 등이 있다. Fig. 4에는 SOM 압 전 작동기의 1/2 모텔(좌우 대칭)에 대한 설계 변수 로서 주요 치수들을 나타내었다.



Figure 4. Design variables of SOM piezo actuator

목표 성능에 영향을 주는 공정 변수는 박막 층별 잔류응력이 대표적이라고 볼 수 있으며, 웨이퍼 상 에 TEG(Test Element Group)를 설계 제작하여 측정할 수 있다. SOM 압전 작동기 개발을 위하여 정확한 잔류 응력의 측정이 요구되므로, Si 웨이퍼 상에 목 표 두께의 박막 층을 증착한 뒤 전체 웨이퍼의 굽힘 변형량을 측정하여 이로부터 잔류 응력을 추정하였 다. Table 1은 이렇게 측정된 각 박막의 잔류 응력 을 보여주고 있다.

# 3. SOM 압전 작동기의 유한요소해석

### 3.1 SOM 압전 작동기의 유한요소모델

상용 유한요소해석 도구인 ANSYS를 사용하여 SOM 압전 작동기의 박막 층별 잔류응력과 릴리즈 마무리 공정 후 잔류응력에 의한 초기 변형 및 G/H 를 구현하였다. ANSYS는 강력한 프로그래밍 언어 인 APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 활용 하여 단계별 해석이 가능하고, MEMS 구조물 해석 에 필요한 연성해석 기능이 뛰어나다. SOM 압전 작동기의 다층 박막 구조의 잔류응력 형성 및 정확 한 변형량, 고유 진동수 계산을 위하여 ANSYS에서 제공하는 stress stiffening 옵션과 element birth and death 기술을 적용하였다.

박성균<sup>(6)</sup> 등은 ANSYS를 사용하여 다층 박막 구 조 MEMS 압전 작동기의 유한요소해석을 수행하였 으나, 반도체 공정 상에서 발생하는 잔류응력은 고 려하지 않았다. 잔류 응력의 구현 방법에는 ANSYS 각 요소에 직접 응력 성분 값을 입력하는 방법도 있 으나, 공정 조건에 가깝도록 구현하려면 각 박막 층 별로 상이한 열팽창계수를 이용하는 열변형 방법이 있다.<sup>(7)</sup> 각 공정 단계별로 실험적으로 구한 잔류응력 값이 생성될 수 있는 온도를 구하여 가상 공정 온도 로 정의한 뒤 Fig. 5의 예와 같은 방법으로 박막 층 별 잔류 응력을 구현하였다. Si 웨이퍼 상에 PZT 박 막을 졸-젤법으로 적층하는 경우를 예로 든다면 다 음과 같은 네단계의 가정을 통하여 가상 공정 온도 를 이용한 잔류응력의 구현이 가능하다.

 Si 웨이퍼를 가상 공정 온도로 열변형시킨다.
 (Si 웨이퍼 주위 온도를 가상 공정 온도로 올리거나 내린 후 요소의 온도를 0으로 정의한다.)

2) PZT 박막을 가상 공정 온도로 생성한다.(PZT 박막을 생성하고, 요소의 온도를 가상 공정 온도로 정의한다.)

3) 주위 온도를 0으로 돌아가게 한다. (주위 온도 를 초기 요소 온도와 같게 하면 Si 웨이퍼는 초기 상태로 돌아가고, PZT 박막에는 잔류응력이 발생한 다.)

4) Si 웨이퍼의 일부를 식각한다.(Si 웨이퍼의 일부 를 없애면, PZT 박막은 잔류응력에 의하여 구조적 변형이 일어난다.) 박막의 증착(생성) 또는 식각(소멸)은 element birth and death 기술을 이용하여 구현하였다.



Figure 5. Design variables of SOM piezo actuator

Table 1은 측정된 각 박막의 잔류 응력과 가상공 정 온도를 이용하여 열팽창에 의하여 생성된 모델 의 잔류 응력을 보여주고 있다

		[Unit : $\times 10^6$ N/m <sup>2</sup> ]
Layer	Experiment	Simulation
SiN	100	94.00
Bottom Pt	902	831.2
PZT	283~373	128.8
Top Pt	902	813.50
SiO <sub>2</sub>	-323~-359	-211.6
AL	-36~-209	-108.5

 Table 1 Residual stress in each layer

SOM 압전 작동기는 대칭 구조이므로 Fig.6(a)에 나타낸 바와 같은 전체 구조의 1/4만 모델링한 후 대칭 경계조건을 적용한다. 사용된 ANSYS 요소는 Solid5 구조-전기 연성 요소이고, Fig.6(b)와 같은 직 육면체 메쉬로 유한요소모델을 만들었다. 압전 박 막층을 제외한 모든 박막 층별 물성치를 Table 2에 나타내었다.



(b) Multi layer part of FE model Figure 6. FE model of SOM piezo actuator

Table 2 Material	properties of thin film layer
------------------	-------------------------------

Property	Si Subst.	SiN	Pt	SiO <sub>2</sub>	Al
Density [Kg/m3]	2,330	3,440	21,440	2,200	2,700
E [GPa]	130	250	170	75	70
Poission's Ratio	0.278	0.278	0.38	0.278	0.33
CTE [10 <sup>-6</sup> /°K]	2.6	2.8	8.8	1.0	23.2
Thickness [µm]		0.4	0.12	0.4	0.05

PZT 박막은 상하로 전극이 배치되어 높이방향(z) 으로 분극화(poling)되며, 전압이 인가되면 길이방향 (x)으로 늘어나거나 줄어들면서 리본을 상하로 움직 이게 한다. 그러므로, SOM 압전 구동기에서는 PZT 박막의 압전 상수 d<sub>31</sub> 값이 가장 중요하다. 유한요 소모델에서는 PZT 박막 역시 3차원 구조로 모델링 하며, 압전 거동 방정식은 다음과 같은 변형률-전하 간 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$S = s_E T + d^T E$$
$$D = d T + \varepsilon_T E$$

여기서, S: 변형률(strain) T: 응력(stress) [N/m<sup>2</sup>] D: 전하밀도(charge density)[C/m<sup>2</sup>] E: 전계(electric field) [V/m] s<sub>E</sub>: 콤플라이언스 행렬 [m<sup>2</sup>/N] d: 압전 상수 행렬 [m/V] ɛ<sub>T</sub>: 유전율 행렬 [F/m] z방향으로 분극화를 한 후 각 행렬들은 다음과 같 이 나타낼 수 있다.<sup>(8)</sup> [s<sub>11</sub> s<sub>12</sub> s<sub>13</sub> 0 0 0]

$$s_{E} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11} - s_{12}) \end{bmatrix}$$
$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$\varepsilon_{T} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{1} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{1} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{3} \end{bmatrix}$$

웨이퍼상에 TEG을 설계 제작하여 측정한 d<sub>31</sub>값은 -193.8±35.4 ×10<sup>6</sup> µm/V 이다. 이외에 일반적인 PZT 박막의 물성치를 Table 3에 나타내었다.

#### **Table 3** Material properties of PZT thin film layer

Density [Kg/m3]	7,500
E [GPa]	77.0
Poission's Ratio	0.3
CTE [10 <sup>-6</sup> /°K]	2.0
Thickness [µm]	0.5

측정된 물성치를 토대로 유사한 PZT 박막의 물성 행렬을 구하면 다음과 같다.<sup>(9)</sup>

S<sub>11</sub>= 12.987, S<sub>12</sub>= S<sub>13</sub>= -3.506, S<sub>44</sub>= 39.41 m<sup>2</sup>/N, d<sub>31</sub> = -194, d<sub>33</sub> = 180 m/V, 상대 유전율  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 =$ 1400

### 3.2 SOM 압전 작동기의 유한요소해석

Fig.4에 나타낸 설계 변수들을 입력 변수로 사용 하여 솔리드 모델부터 작성할 수 있는 시뮬레이션 DOE가 가능한 유한요소모델을 이용하여 Table 4와 같이 대표적인 설계 변수들에 대한 초기 G/H, 1차 고유진동수, 10V 구동변위를 구하였다. Table 4의 6 차 마스크 설계안으로 샘플을 제작하고 그 중 양품 12개에 대하여 LDV(Laser Doppler Vibrometer)로 구동 변위(초기G/H와 10V 구동변위의 차이값) 및 1차 고 유진동수를 측정하였다. 이 측정치의 평균값과 시뮬 레이션 결과를 비교하여 Table 5에 나타내었다.

샘플 측정 데이터는 산포가 있으나, 시뮬레이션 결과는 중앙값만 존재한다. 김용우<sup>(10)</sup> 등은 집중질 량계로 정의한 MEMS 자이로스코프의 설계변수에 가우시안 분포 함수를 도입하여 설계변수의 산포가 성능의 분포에 미치는 영향을 평가하였다. 같은 방 식으로 본 모델의 설계변수 산포의 영향을 살펴볼 수 있다.

Table 4 Major design variables of 6<sup>th</sup> mask

Major design variables	6 <sup>th</sup> mask
LDPZ(PZT thin film length) [µm]	20.0
BL(Bridge length) [12m]	151
TSiN(SiN thin film thickness) [µm]	0.4
WH (Hall width) [µm]	15



(a) Initial G/H due to residual stress



(b) 10V driving displacement



(c) 1<sup>st</sup> bending mode shapeFigure 7. Simulation result of SOM piezo actuator

Table 5 Comparison between the results of simulation	
and experiments	

Result	1 <sup>st</sup> natural frequency [Hz]	10V Driving displacement[,,m]	
Experiment*	593.9 (9.80)	305.3 (15.24)	
Simulation	615.1	203.2	
Error [%]	3.57	33.4	

Result of experiment: average (standard deviation)

#### 3.결 론

빠른 응답 특성과 우수한 신뢰성을 갖는 광 MEMS 소자로서 제안된 SOM (Spatial Optical Modulator) 압전 작동기의 개발기간을 단축하고 설 계 품질을 확보하기 위하여 반도체 공정 단계별 잔 류응력을 모사할 수 있는 정밀한 유한요소모델을 개발하고 그 정확성을 평가하였다.

상용 FEA 툴인 ANSYS의 APDL을 사용하여 기하 학적 치수, 박막 층별 기계적 물성, 잔류응력 구현을 위한 가상 공정 온도를 설계 변수로 입력이 가능한 높은 자유도의 유한요소모델을 구축하였다. 측정된 박막 층별 잔류 응력을 구현하고, ANSYS의 stress stiffening 기능과 element birth and death 기술을 적용 하여 실제 릴리즈 공정 후 압전 작동기 리본부의 변 형을 정확하게 모사하였다. 6차 마스크 설계안에 대한 샘플을 제작하여 LDV로 1차 고유 진동수와 10V 구동 변위를 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교 하였다. 1차 고유 진동수는 5% 이하의 정확도로 일 치하였으나, 구동 변위는 30% 이상의 에러가 발생 하였다. 이는 졸-겔 코팅법으로 서브 마이크론 두 께의 PZT 박막을 제작함에 따라 TEG가 아닌 실제 압전 작동기의 압전상수를 In-situ measuring해야만 정확한 값을 구할 수 있기 때문이다. 보다 정확한 압전 물성을 확보한다면, 개발된 압전 작동기의 Parametric FE Model을 이용하여 설계 최적화 및 공 정 산포 분석 등을 수행할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

(1) M.C. Paek, G.P. Han, Y.Y. Kim, Y.J. Sohn, T.Y. Kim, K.I. Cho, 2001, Technical Overview of Optical MEMS in Information and Telecommunication, Electronics and Telecommunications Trends, Vol. 16, No. 4, pp. 23~40.

(2) Jahja I. Trisnadi, Clinton B. Carlisle and Robert Monteverde, 2004, Overview and applications of Grating Light Valve<sup>™</sup> based optical write engines for high-speed digital imaging, Proceedings of SPIE Vol.5348, pp.52~64

(3) Heung Woo Park, Yeong Gyu Lee, Chang Su Park, Ohk Kun Lim, etc., 2008, Fine-Pitch MOEMS Packaging for Novel Spatial Light Modulators, 58th, pp.773~778.

(4) Tai-Ran Hsu and Nansheng Sun, 1998, Residual Stresses/Strains Analysis of MEMS, Technical Proceedings of the 1998 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, pp.82~87

(5) Stephen D. Senturia, "Microsystem Design", KAP, 3<sup>rd</sup> Printing 2001, pp551~554.

(6) Sung K. Park, Young H. Kim and Sung K. Ha, 2002, Analysis of Dynamic Behavior of Piezoelectric Atomic Force Microscope Cantilever, KSNVE, Volume 12, No. 3, pp.187~194

(7) ANSYS, inc., 2012, ANSYS Mechanical APDL Coupled-Field Analysis Guide, pp.257~263

(8) T.L. Jordan, Z. Ounaies, 2001, Piezoelectric Ceramics Characterization, ICASE NASA Langley Research Center

(9) ニュ-ケラスシリ-ズ 編集委員會 編,

壓電 セラミクスの應用

(10) Yong Woo Kim and Hong Hee Yoo, 2009, Analysis on Effects of Design Variable Uncertainty on the Performance of MEMS Gyroscope Based on Sample Statistics, 2009 Fall Conference of KSNVE, pp.119~123