

압전 작동기 거동해석을 위한 유한요소 모사

이흥식[†] · 조종두^{*}

Finite Element Analysis of A Piezoelectric Actuator

Heungshik Lee , Chongdu Cho

Key Words : Piezoelectric actuator(압전 작동기), Finite Element(유한 요소), ANSYS(상용 유한 요소 해석프로그램)

Abstract

Mechanical behavior of a piezoelectric actuator is studied as a preceding research for the manufacturing of three - dimensional micro-structures. It is needed to examine the simulation of a piezoelectric actuator according to applied direction of voltage, by researching displacement characterization of piezoelectric material through piezoelectric theory. To this end, finite element modeling is employed to study the response of a piezoelectric material under the various input voltages. Where the actuator is simulated by use of ANSYS. To avoid direct contact piezoelectric material with working fluid, silicon, polymer, etc., the actuator is modeled with nickel fixed diaphragm.

	기호설명	$[s^E]$	일정한 전기장에서의 컴플라이언스(compliance)행렬 $[m^2 / N]$
$\{T\}$	응력 벡터 $[N / m^2]$	$[c^D]$	일정한 전기적 변위에서의 강성행렬 $[N / m^2]$
$\{D\}$	전기적 변위 벡터 $[C / m^2]$	$[c^E]$	일정한 전기장에서의 강성행렬 $[N / m^2]$
$\{S\}$	변형률 벡터	$[e]$	응력/전기장 관련 압전 상수 행렬 $[C / m^2]$
$\{E\}$	전기장 벡터 $[N / C]$	$[e]^T$	응력/전기장 관련 압전 상수의 전치행렬 $[C / m^2]$
$[d]$	변형률/전기장 관련 압전 상수 $[C / N]$	$[\epsilon^S]$	일정한 변형률에서의 유전상수 $[F / m]$
$[d]^T$	변형률/전기장 관련 압전상수의 전치행렬 $[C / N]$	$[\epsilon^T]$	일정한 응력에서의 유전상수 $[F / m]$
$[s^D]$	일정한 전기적 변위에서의 컴플라이언스(compliance)행렬 $[m^2 / N]$	$[g]$	변형률/전압 관련 압전 상수 $[m^2 / C]$

[†] 인하대학교 기계공학과 대학원
E-mail : js-heung@hanmail.net
TEL : (032)860-7321 FAX : (032)868-1716

^{*} 인하대학교 기계공학과

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 MEMS에 대한 관심이 높아지면서 3 차원 마이크로 구조물의 설계와 제작 방법들이 지속적으로 연구되고 있다. 습식/건식 식각(wet/dry etching), 플라즈마 식각(plasma etching)^[1], 방사광 가속기 X-선을 이용한 LIGA 공정^[2] 등이 이미 개발되어 이용되고 있으나 이와 같은 제작 공정들은 패턴 기술(patterning technique)을 기초로 하기 때문에 3 차원 구조물을 제작하는데 있어서 많은 어려움이 있다. 이러한 문제점을 극복하고자 sheet laminating method, laser sintering method, 광조형(SLA, Stereolithography) 등이 개발되었으나, 아직은 정확성과 구조적인 면에서 많은 한계를 가지고 있다.

본 논문에서는 3 차원 마이크로 구조물 생성을 위한 한 방법으로 압전 작동방식을 제시하였다. 이것은 압전 소자(piezoelectric material)의 거동에 의해 액화된 금속(또는 비금속)을 분사하는 방법으로 잉크젯 프린터 헤드 구동 원리와 같다. 압전 소자의 변위를 해석하기 위해서는 미소재료의 물성 및 거동특성, 미소영역에서의 물리적 현상의 이해와 전기-기계 복합시스템의 모델링과 작동 시뮬레이션 기법 등이 필요하며 이를 위해서는 상당한 경험과 노력을 요하게 된다. 그래서 초기 설계차원에서부터, 구조설계, 마스크 및 공정설계, 제작, 시험에 이르기 까지 소요되는 인력과 경비를 절감하고 설계주기를 단축 시키기 위한 노력이 많이 시도되고 있으며 최근 컴퓨터의 하드웨어의 발달로 인해 이러한 문제가 어느 정도 해소되어 가고 있다. 본 논문에서도 프로그램을 이용하여 압전 현상을 보다 효율적으로 해석하였다.

압전 재료는 일반적으로 크기가 작고 응답속도가 빠르며 방향성이 있다. 이러한 성질을 이용하여 압전재료는 센서, 작동기, 변환기, 지능형 구조물 등에 널리 사용된다.

2. 이론적인 연구

2.1 압전 재료 특성

압전 재료는 세라믹 입자를 소결하고 형상을 만든후 적정 온도에서 고전압을 가하면, 산만하게 분포되어있던 쌍극자(dipole)들이 양(+) 또는

음(-)의 방향으로 재배열되어 분극현상(polarization)을 유발한다. 이렇게 분극된 압전 재료에 응력을 가하면 쌍극자간의 거리를 변화시켜 분극에 영향을 미치며, 재료가 압축됨에 따라 발생한 분극의 영향으로 결정 양단의 전류밀도가 증가하게 된다. 이때 전극 양단이 분리되어 있으면 전압차가 발생되며, 양단의 전극이 접촉되어있으면 전류가 흐르게 된다. 반대로, 압전 재료에 전기장을 인가하는 경우, 전극 양단에 전류밀도가 증가하게 되고, 압전 재료내의 음전하는 양의 전극쪽으로, 양전하는 음의 전극쪽으로 끌리게 되며, 이로 인해 쌍극자 간의 거리와 결정의 길이도 변하게 된다. 이와 같이 압전 재료에 응력이 가해져서 전하가 발생하게 되는 현상을 압전 효과(direct piezoelectric effect)라고 하며, 이와 반대로 그에 상응하는 변형이 발생하는 것을 역 압전 효과(converse piezoelectric effect)라고 한다. 기계적인 응용에 대한 압전 효과를 나타내는 대표적인 상수로는 전기-기계 연성 계수(electromechanical coupling coefficient) k 가 있으며 식 (2-1) 과 같다.

$$k^2 = \frac{\text{Mechanical energy stored}}{\text{Electrical energy applied}} = \frac{\text{Electrical energy stored}}{\text{Mechanical energy applied}} \quad (2-1)$$

2.2 지배 방정식

압전 재료의 전기적, 기계적 관계는 다음과 같이 표현된다.^[3]

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (2-2)$$

$$S = s^E T + dE \quad (2-3)$$

압전 재료는 분극방향(poling direction)을 3으로, 분극 방향에 수직인 두 방향을 1,2로 하는 장방형(transversely isotropic)성질을 가지며, 탄성계수 행렬 s 는 다음과 같이 나타내어진다.

$$[s] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11} - s_{12}) \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

압전 상수(piezoelectric constant) 행렬 d 는

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

로 나타내지며, 유전상수(permittivity)는 다음과 같다.

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

압전 구성방정식 (2-2)와 (2-3) 에서 최소 포텐셜 에너지 원리를 이용한 시스템의 운동 지배방정식을 구하면 다음과 같다.^[4]

$$[M_{uu}]\{\ddot{u}\} + [K_{uu}]\{u\} + [K_{u\Phi}]\{\Phi\} = F_B + F_S + F_P \quad (2-7)$$

$$[T_{u\Phi}^T]\{u\} + [K_{\Phi\Phi}]\{\Phi\} + [K_{u\Phi}]\{\Phi\} = Q_S + Q_P \quad (2-8)$$

여기서 ,

$$[M_{uu}] = \iiint N_u^T N_u dV \quad : \text{질량행렬}$$

$$[K_{uu}] = \iiint B_u^T c^E B_u dV \quad : \text{강성행렬}$$

$$[K_{u\Phi}] = \iiint B_u^T d^t B_\Phi dV \quad : \text{압전 결합행렬}$$

$$[K_{\Phi\Phi}] = \iiint B_\Phi^T \epsilon^S B_\Phi dV \quad : \text{절연강성행렬}$$

- F_B : 체적력(body force)
- F_S : 표면력(surface force)
- F_P : 점하중(point force)
- $Q_S + Q_P$: 전기적 표면력

2.3 압전재료의 거동 특성

압전 재료 내부의 분극(polarization)은 (-)전하에서 (+)전하 방향으로 형성이 되고, 전기장은 (+)전하에서 (-)전하방향으로 작용되기 때문에 분극 방향과 전기장 방향이 같아지게 되면 서로 다른 극

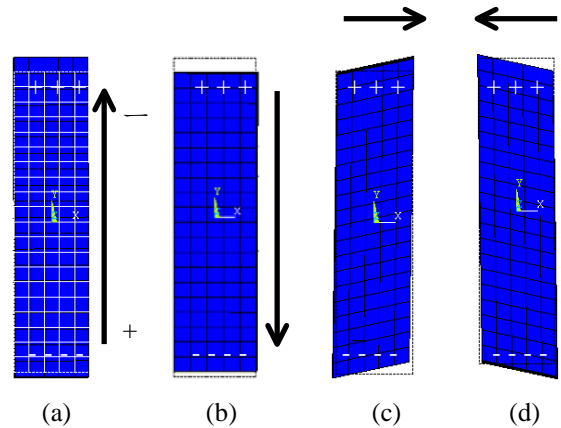


Fig. 1 Translation of Piezoelectric material

성이 같은 위치에 있게 되어 서로 인력이 작용하게 된다. 그래서 압전 재료는 양쪽으로 늘어나는 거동을 보이게 된다. 이것을 Fig.1 (a) 에 나타내었고, 전기장이 반대방향으로 가해진 경우를 (b) 에 나타내었다. 또한 분극의 방향과 전기장의 방향이 서로 수직일 때에는 전단 변형의 거동을 일으키게 되며, 이것을 (c) 와 (d)에 나타내었다. Fig. 1 의 압전재료 내부에 표시된 (+)와 (-)는 분극(polarization)을 나타내며, 화살표시는 가해진 전기장의 방향을 의미한다.

3. 압전 작동기의 모델링 및 경계조건

3.1 압전 작동기의 물성치

압전 작동기로 사용되어지는 PZT-4 의 물성값은 Table 1 ,과 같다. 이것을 ANSYS를 이용하여 해석

Table 1. Property of PZT-4

강성 행렬 (Elastic stiffness)[N/m^2]	$c_{11} = 13.9 \times 10^{10}$ $c_{12} = 7.78 \times 10^{10}$ $c_{13} = 7.43 \times 10^{10}$ $c_{33} = 11.5 \times 10^{10}$ $c_{44} = 2.56 \times 10^{10}$
압전 상수 (Piezoelectric constants) [C/m^2]	$e_{31} = -5.2$ $e_{33} = 15.1$ $e_{15} = 12.7$
유전 상수 (Permittivity constants)[F/m]	$\epsilon_{11} = 6.46 \times 10^{-9}$ $\epsilon_{33} = 5.62 \times 10^{-9}$
밀도 (Density)[kg/m^3]	7700

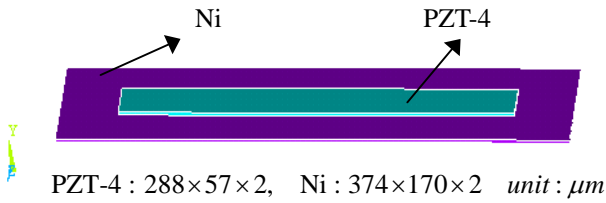


Fig. 2 Model of Piezoelectric Actuator

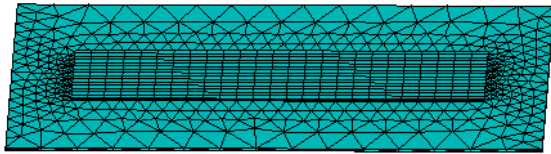


Fig. 3 Finite Element Model of Piezo-Actuator

하고자 할 때에는 압전 상수와 유전 상수를 분극 방향에 맞추어 입력해 주어야 한다. 본 논문에서는 분극 방향을 y 축 방향으로 맞추었으며 다음과 같이 물성치를 입력하였다.

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & -5.2 & 0 \\ 0 & 15.2 & 0 \\ 0 & -5.2 & 0 \\ 12.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12.7 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} 6.46 \times 10^{-9} & 0 & 0 \\ 0 & 5.62 \times 10^{-9} & 0 \\ 0 & 0 & 6.46 \times 10^{-9} \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

압전 재료가 직접 유체와 맞닿게 되면 성능과 수명이 저하 되므로 Ni 박판이 붙어있는 PZT-4 를 모델링 하였고^[5], 각 형상치수는 [가로×세로×두께]로 표시하였다.^[6] 상용 유한 요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 유한 요소 모델을 제작하였으며 (Fig.3 참조) 압전 재료에는 연성 요소인 Solid 5 를, Ni 박판에는 많은 양의 처짐을 적용할 수 있는 Solid 186 을 사용하였다. 니켈 박판의 밀도는 8490 [kg / m³] 이고, 탄성계수(Young's modulus)는 180[GPa], 포아송 비(poisson's ratio)는 0.31 이다.

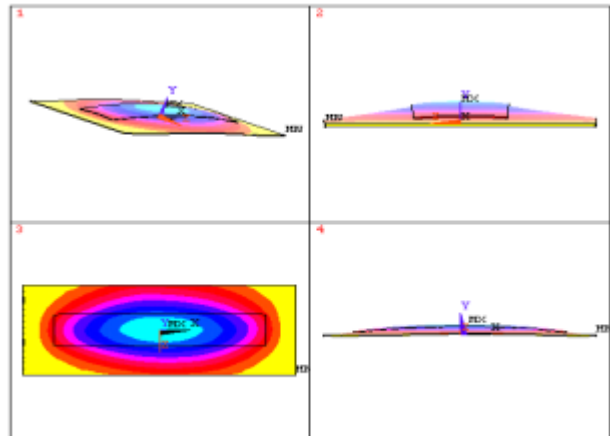


Fig. 4 Simulation of Translation of Piezo-actuator

3.2 해석 모델을 위한 경계조건

PZT-4 는 Ni 박판에 완전히 붙어있다고 모델링 되었기 때문에 Ni 박판의 양 끝면(x 면)을 구속하여 주어 압전 재료의 변형에 의한 작동기의 거동현상을 얻을 수 있게 하였다. 또한 입력 전압을 과도 해석으로 수행하여 초기 0.4μsec 동안의 시간에 걸쳐 최종 전압에 까지 이르게 하였고, 입력전압은 실제 사용되어지고 있는 20V~ 60V 범위 안에서 해석되어졌다. 모델링 과정에서 PZT-4 의 분극 방향을 y 축 방향으로 지정하였기 때문에 전기장 방향도 y 축 방향, 혹은 그 반대방향이 되도록 하였다.

4. 유한요소 해석

유한 요소 해석을 통하여 인가된 전압에 따른

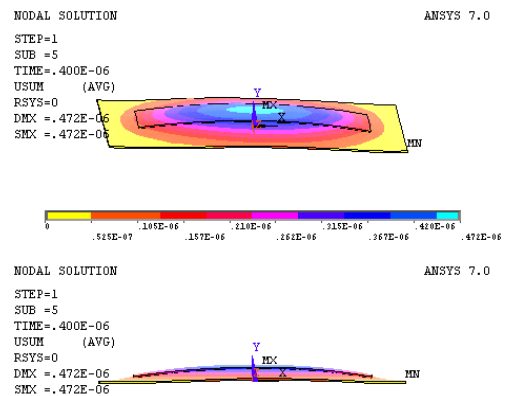


Fig. 5 Translation analysis of Piezo- Actuator (40V)

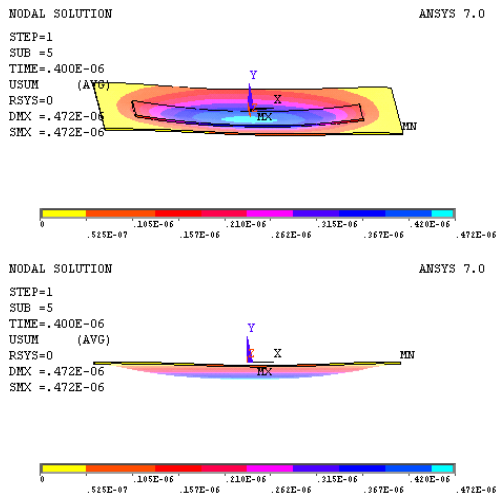


Fig. 6 Translation analysis of Piezo- Actuator (-40V)

결과값을 후처리 과정(general-post process)을 통해 얻어 낼 수 있으며, 본 논문에서는 변위량에 대한 거동을 해석해 보았다. (Fig. 4 참조) Fig. 4 는 전압이 가해진 압전 작동기의 후처리 과정을 통해 거동현상이 시뮬레이션 된 것을 보여준다. 2 번 그림 (오른쪽 위)은 왼쪽 측면에서, 3 번은 위에서, 4 번은 정면에서 본 변형후의 형상이다.

4.1 압전 작동기의 변위량 해석

압전 작동기에 다양한 전압을 가하여, 압전 작동기의 변위의 방향과 변위 크기를 유한 요소 해석을 통해 얻어내었다. 또한 외부에서 가해주는 전압을 20Volt 에서 60Volt 까지 전기장의 크기와 방향을 바꾸어 가면서 해석하였으며, Fig. 5 와 Fig. 6 는 40Volt 와 - 40Volt 에서의 변위를 나타낸 것이다. 변위량 분포에서 노란색쪽이 변위가 적은 부분이고, 하늘색쪽이 변위가 많은 부분이다. 변위해석을 통해 각 전압에서 나타나는 작동기의 최대 변위(displacement) 값을 구해낼 수 있다.

Table 2. Max. displacement values under each Volts.

Input Voltage [V]	Maximum Displacement [μm]	Input Voltage [V]	Maximum Displacement [μm]
20	0.17	-20	-0.17
30	0.35	-30	-0.35
40	0.47	-40	-0.47
50	0.59	-50	-0.59
60	0.71	-60	-0.71

5. 해석 결과 및 고찰

압전 작동기의 모델링과 유한요소 해석을 통하여 20V 에서 60V 까지 각각의 전압이 가해질 때의 변형량을 나타내었다. (Table 2 참조) 같은 전압일 때에는 전기장의 방향과 상관없이 동일한 변위값을 나타내었고, 가해진 전압이 높아질수록 변위는 선형적으로 크게 나타났다.

이 결과들은 박막재료를 Ni 이 아닌 다른 재료를 사용했을 때에도 해석이 가능함을 나타내며, 다른 PZT 재료를 사용할 때에도 인가된 전압에 따른 변위량을 예측하여 응용설계 할 수 있음을 보여준다.

6. 결론

본 논문에서는 압전 작동기를 이용한 3 차원 마이크로 구조물 제작 장치를 설계하기 위해, 압전 작동기의 전압에 따른 거동과 변위량을 유한 요소 해석하였다. 유한 요소 해석을 통해 얻어낸 압전 작동기의 변위 데이터는 작동기 내부의 체적의 변화를 계산할 수 있었다. 본 연구의 결과를 응용하면 3 차원 마이크로 구조물 제작을 위한 작동 유체의 분사량을 최적으로 결정할 수 있을 것이다.

후속 연구로서 본 연구실에서는 압전 작동기의 거동과 작동유체의 연성효과를 해석하기 위해서 압전 작동기에 의한 체적 변화와 체적 변화에 따른 유체의 토출량의 관계를 정량적으로 규명하는 연구를 진행하고 있다.

후 기

이 논문은 2003 년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Jullian W. Gardner , Vijay K. Varadan , Osma O. Awadelkarim , 2001 , *Microsensors MEMS and Smart Devices* , John Wiley & Sons Ltd , Baffins Lane , pp. 9~34.
- (2) Ehrefeld W. , 1990 , “The LIGA process for Microsystems,” , *Micro System Technologies* , Vol. 90 , No. 521-7.
- (3) Jeahwan Him , Bumjin Ko , Joong-Keun Lee and Chae-Chon Cheong , 1999 , “Finite element modeling of a piezoelectric smart structure for the cabin noise problem,” *Smart Mater. And Struct.* , Vol. 8 , pp. 380~399.
- (4) Reinhard Lerch , 1990 , “Simulation of Piezoelectric Devices by Two-and Three-Dimensional Finite Elements,” *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency control*, Vol. 37 , No. 2 , pp.233-247.
- (5) Ping-Hi Chen , Hsin-Yah Peng , Hsin-Yi Liu , S.-L. Chang, T.-I. Wu , Chiang-Ho Cheng , 1999 , “Pressure Response and droplet ejection of a piezoelectric inkjet printhead ,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 41 , pp. 235~248
- (6) M.V. Gandhi and B. S. Thompson , *Smart Materials And Structures* , Chapman & Hall , pp.175~191.