

< 논문 >

## 분극방향과 재료분포의 연속적 근사방법을 고려한 압전형 액추에이터의 구조설계

임영석\* · 민승재<sup>†</sup> · 유정훈\*\*

(2006년 2월 3일 접수, 2006년 5월 31일 심사완료)

### Structural Design of Piezoelectric Actuator Considering Polarization Direction and Continuous Approximation of Material Distribution

Young Seok Lim, Seungjae Min and Jeonghoon Yoo

**Key Words :** Topology Optimization(위상최적설계), Piezoelectric Actuator(압전형 액추에이터), Polarization Direction(분극방향), Homogenization Design Method(균질화설계법), Simple Isotropic Material with Penalization(밀도법), Continuous Approximation of Material Distribution(재료분포의 연속적 근사)

#### Abstract

In this paper, the polarization of piezoelectric materials is considered to improve actuation since the piezoelectric polarization has influences on the performance of the actuator. The topology design of compliant mechanism can be formulated as an optimization problem of material distribution in a fixed design domain and continuous approximation of material distribution (CAMD) method has demonstrated its effectiveness to prevent the numerical instabilities in topology optimization. The optimization problem is formulated to maximize the mean transduction ratio subject to the total volume constraints and solved using a sequential linear programming algorithm. The effect of CAMD and the performance improvement of actuator are confirmed through Moonie actuator and PZT suspension design.

#### 1. 서론

압전형 액추에이터는 입력전압에 대하여 압전 소자의 변위를 출력변위로 변환하고 증폭시키는 기구이다. 이는 소비 전력, 발열량과 소음이 적고 빠른 응답속도의 실현 및 소형 경량화가 가능하다는 장점을 갖고 있어 출력 변위를 제어하는 단순한 경우에서부터 압전재료가 연결된 지능형 구조물 설계나 밸브 제어와 같은 복잡한 경우까지 적용이 가능하다. 따라서 최근 기계-전기 복합시스템에서 압전형 액추에이터가 널리 사용되고 있다.

압전형 액추에이터 설계에 있어서 연구자들의 관심은 출력 변위를 증폭시키는 것이다. 초소형 구조물인 MEMS 구조설계에 있어서 나노미터의 출력변위 증가는 곧 액추에이터의 제어 가능한 범위증가를 의미하므로 전압소비를 최소화 하면서도 구조적 성능을 향상시키기 위한 연구가 진행되고 있다. Sun 과 Zhang<sup>(1)</sup>은 압전재료와 연결된 구조물에서 액추에이터의 길이와 위치의 변화에 따른 결과를 확인하고 액추에이터의 성능이 때로는 인장과 압축보다 전단변형일 때 향상됨을 확인하였다. Benjeddou 등<sup>(2)</sup>은 압전재료와 연결된 보의 이론적 해와 유한요소해석에 의한 수치해가 일치함을 보여주었다. 한편 Silva 등<sup>(3,4)</sup>과 Chae 와 Min<sup>(5)</sup>은 평균변환량과 평균굴성의 비를 최대화 함으로써 탄성 구조물의 유연성과 강성을 고려한 압전형 액추에이터를 균질화설계법<sup>(6)</sup>을 이용하여 설계하였다. Givert 와 Austin<sup>(7)</sup>은 압전재료 분극방향의 회전에 따른 효과<sup>(8)</sup>를 확인하고 분극방향을 설계변수

\* 한양대학교 대학원 기계설계학과

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : seungjae@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0457 FAX : (02)2298-4634

\*\* 회원, 연세대학교 기계공학부

로 추가하여 위상최적화를 수행하였고, 분극방향에 따라서 액추에이터의 성능이 향상됨을 입증하였다. 그러나 밀도법을 사용하여 이론적 배경이 미약하고 수치적 불안정성 문제<sup>(9,10)</sup>를 해결하기 위해 파라미터값의 설정이 필요한 필터링 방법<sup>(11,12)</sup>을 이용하여 최적화를 수행하였다.

따라서 본 논문에서는 복합재역학 이론에 근거한 균질화설계법을 활용하여 컴플라이언트 메커니즘 설계<sup>(13,14)</sup>를 수행하였고 입력전압의 증가 없이 출력변위를 증가시키기 위해서 압전재료의 분극방향을 고려한다. 또한 수치적 불안정성을 해결하는 방법으로 재료분포의 연속적 근사(CAMD)방법<sup>(15,16)</sup>을 균질화설계법에 적용하여 제작 가능한 최적구조형태를 도출한다. 또한 밀도법에 분극방향과 CAMD 방법을 고려한 결과와 본 논문에서의 수행 결과를 비교하여 설계방법에 따른 압전형 액추에이터의 구조설계 효과도 확인하고자 한다.

## 2. 분극방향을 고려한 압전재료의 유한요소해석

### 2.1 유한요소 정식화

본 연구에서 위상최적설계를 수행하기 위해서는 압전소자와 연결구조물의 거동해석이 필요하므로 2차원 4절점 압전 유한요소를 사용하여 일반적인 정식화를 유도하였다. 압전형 액추에이터가 첫 번째 공진주파수보다 낮은 주파수에서 작동하도록 설계하여 관성에 의한 영향을 무시할 수 있으므로 정적해석으로 모델링하였다. 선형 압전소자를 모델링한 유한요소해석은 다음과 같은 연성시스템 방정식의 해를 구하는 문제와 동일하다.<sup>(17)</sup>

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{u\phi}^T & -\mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{Q} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{K}_{uu}, \mathbf{K}_{u\phi}, \mathbf{K}_{\phi\phi}$ 는 각각 강성, 압전, 유전행렬을 나타내며,  $\mathbf{F}, \mathbf{Q}, \mathbf{U}, \phi$ 는 각각 절점에서의 하중, 전하량, 변위 및 전기포텐셜을 나타낸다.

### 2.2 PZT 분극방향의 회전

압전재료의 구성방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e}^T \mathbf{E} \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e} \mathbf{S} + \epsilon^S \mathbf{E} \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{T}$ 는 응력 텐서,  $\mathbf{S}$ 는 변형률 텐서,  $\mathbf{D}$ 는 기적 변위 텐서,  $\mathbf{E}$ 는 전기장 텐서,  $\mathbf{c}^E$ 는 일정한 전압에서의 굴성상수,  $\mathbf{e}$ 는 압전상수,  $\epsilon^S$ 는 일정한 변형률에서의 유전을 상수를 나타낸다. 본 연구에서는 Fig. 1 과 같이 2 차원 좌표축 1-3 방향만을 고려

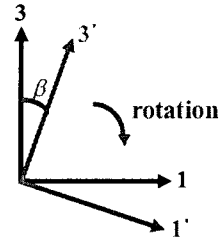


Fig. 1 Two dimensional rotation of coordinate system

하므로 2 방향의 변형률과 전기장은 식 (4)와 같이 가정할 수 있고, 따라서 압전재료의 구성방정식인 식 (2)과 식 (3)은 식 (5)와 같이 단순화시킬 수 있다.

$$S_{22} = 0, \quad S_{12} = 0, \quad S_{23} = 0, \quad \text{and} \quad E_2 = 0 \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{33} \\ T_{13} \\ D_1 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & -e_{31} \\ c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & -e_{33} \\ 0 & 0 & c_{44} & -e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & e_{15} & \epsilon_1 & 0 \\ e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & \epsilon_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{33} \\ 2S_{13} \\ E_1 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

일반적인 압전재료의 상수값들은 3 방향을 분극방향으로 고정시켜 구해진 값이다. 그러므로 분극방향이 3 방향이 아닌 임의의 방향일 경우에는 그에 상응하는 재료상수값을 구해야 할 필요가 있다. Fig. 1 과 같이 임의의 각  $\beta$  만큼 좌표축이 회전하게 되면 회전된 좌표축을 1'-3'로 정의하고 좌표축에 대한 구성방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{T}' = \mathbf{c}' \mathbf{S}' - \mathbf{e}'^T \mathbf{E}' \quad (6)$$

$$\mathbf{D}' = \mathbf{e}' \mathbf{S}' + \epsilon' \mathbf{E}' \quad (7)$$

여기서 식 (6)과 식 (7)은 식 (5)와 비교하여  $\beta$  만큼 회전된 좌표계에서 표현된 물리량들을 의미하고, 변환행렬을 이용하면 이들의 관계를 정의할 수 있다.  $\mathbf{D}'$ 와  $\mathbf{E}'$ 는 1 차 텐서이고,  $\mathbf{T}'$ 와  $\mathbf{S}'$ 는 2 차 텐서이므로 각각의 경우에 맞는 변환행렬은 다음과 같다.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{T}_e = \begin{bmatrix} \cos^2 \beta & \sin^2 \beta & \cos \beta \sin \beta \\ \sin^2 \beta & \cos^2 \beta & -\cos \beta \sin \beta \\ -2\cos \beta \sin \beta & 2\cos \beta \sin \beta & \cos^2 \beta - \sin^2 \beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

1 차 텐서  $\mathbf{D}'$ 와  $\mathbf{E}'$ 는 원 좌표축과의 관계를 고

려하여 다음과 같이 표현한다.

$$D' = \Lambda D \text{ and } E' = \Lambda E \quad (10)$$

2 차 텐서  $T'$  와  $S'$  도 같은 방법으로 표현하면 다음과 같다.

$$S' = T'_\varepsilon S \text{ and } T' = T'_\sigma^{-T} T \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)을 식 (6)과 식 (7)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 구성방정식을 얻는다.

$$T = T'_\sigma c' T'_\varepsilon S - T'_\sigma e' \Lambda E = cS - e^T E \quad (12)$$

$$D = \Lambda^T e' T'_\varepsilon S + \Lambda^T \epsilon' \Lambda E = \epsilon S + \epsilon E \quad (13)$$

식 (12)와 식 (13)에서 새롭게 정의된 재료상수값  $c, e, \epsilon$  는  $\beta$  만큼 회전된 분극방향에서의 재료상수값을 나타낸다. 여기서 새로 정의된 구성방정식을 이용하여 압전소자의 유한요소해석을 수행한다.

### 3. CAMD 를 이용한 압전형 액추에이터 설계

#### 3.1 CAMD 방법

위상최적설계 분야는 설계영역의 완화방법에 따라서 크게 균질화설계법(HDM: Homogenization Design Method)<sup>(6)</sup>과 밀도법(SIMP: Simple Isotropic Material with Penalization)<sup>(18)</sup>으로 나눌 수 있다. 두 방법 모두 설계영역의 이산화로 인해 요소 각각은 독립적인 밀도값을 갖고 요소들이 공유하는 절점에서의 밀도값들은 불연속적이다. 이런 불연속적인 분포가 바둑판 모양과 같은 수치적 불안정 문제의 주 원인이라고 판단되어 요소와 요소 사이의 불연속성을 개선하고자 형상함수를 이용하여 절점 밀도값들을 보간하고 요소 밀도값을 결정함으로써 인접하는 요소들의 밀도값들은 연속적으로 표현한 방법을 CAMD (Continuous Approximation of Material Distribution) 방법이라고 한다.

설계영역을 무수히 많은 다공질체로 가정하고 각각의 미시구조의 특성으로부터 거시적으로 균질화된 복합재료의 물성을 구하는 균질화설계법에서 미소 셀은 Fig. 2(a)와 같다. 여기에 CAMD 방법을 적용시키기 위해서 미소 셀은 Fig. 2(c)와 같은 honeycomb 형태의 균질화된 재료의 등방성을 갖는다고 가정한다. 육각형 요소의 구멍크기를 나타내는  $r^h(x)$  는 다음과 같이 나타낸다.

$$r^h(x) = \sum_{j=1}^n N_j(x) R_j \quad (14)$$

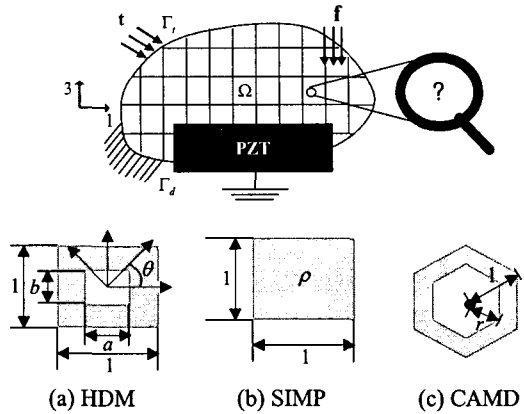


Fig. 2 A structure with composite microstructure

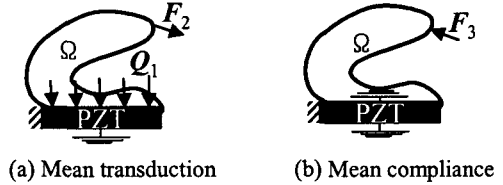


Fig. 3 Load cases

여기서  $n$  은 절점의 총 수,  $h$  는 이산화된 유한요소의 크기를 나타낸다.  $R_j$  는 한 요소를 둘러싼 절점에서 미소셀의 구멍크기를 나타내고, 이  $R_j$  를 형상함수  $N_j(x)$  로 보간함으로써 미소셀을 대표하는 육면체 요소의 구멍크기인  $r^h(x)$  값을 계산한다.

밀도법에서는 Fig. 2(b)처럼 이산화된 각각 요소의 밀도를 설계변수로 사용한다. 밀도법에 CAMD 방법을 적용시키기 위해서 설계변수를 기존 요소의 밀도값이 아닌 절점의 밀도값  $P_j$  로 재정의하여 나타내면 다음과 같다. 즉 절점의 밀도값들을 형상함수를 통해 보간하여 요소와 요소 사이에서 연속적인 요소의 밀도값  $\rho^h(x)$  를 계산한다.

$$\rho^h(x) = \sum_{j=1}^n N_j(x) P_j \quad (15)$$

#### 3.2 평균변환량 및 강성의 정식화

입력전압과 출력변위와 관련된 에너지량인 평균변환량<sup>(3,4)</sup>과 강성의 정식화를 위하여 Fig. 3 과 같은 두 가지 경우의 하중조건을 고려하였다. Fig. 3(a)는 압전 재료에 경계전하량  $Q_1$  이 작용하는 경우 압전소자의 반응에 대해 출력방향으로 단위하중  $F_2$  를 가한 경우이다. 입력 전하량에 대한 출력부분으로의 평균변환량( $L_1(U_2, \phi_2)$  or  $L_2(U_1, \phi_1)$ )은

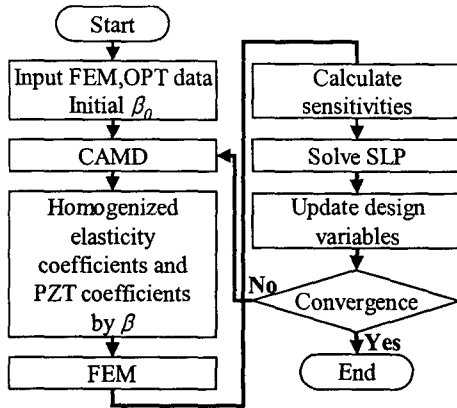


Fig. 4 Flowchart of optimization algorithm

다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 L_1(\mathbf{U}_2, \phi_2) &= \{\mathbf{U}_2\}^T \{\mathbf{F}_1\} + \{\phi_2\}^T \{\mathbf{Q}_1\} \\
 &= \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_2 \\ \phi_2 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{\phi u} & -\mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \phi_1 \end{Bmatrix} \\
 &= \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_1 \\ \phi_1 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{\phi u} & -\mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_2 \\ \phi_2 \end{Bmatrix} \\
 &= \{\mathbf{U}_1\}^T \{\mathbf{F}_2\} + \{\phi_1\}^T \{\mathbf{Q}_2\} = L_2(\mathbf{U}_1, \phi_1)
 \end{aligned} \tag{16}$$

Fig. 3(b)는 액추에이터 구동 시 출력부분의 반력을 고려하기 위한 것으로 출력방향과 반대 방향으로 단위하중( $\mathbf{F}_3 = -\mathbf{F}_2$ )을 가한다. 이때 압전소자의 입력부분은 접지시킨 상태( $\mathbf{Q}_3 = 0$ )를 유지한다. 이와 같은 하중조건을 고려하여 평균굴성식을 나타내면 다음과 같고 강성의 척도로써 사용된다.

$$\begin{aligned}
 L_3(\mathbf{U}_3, \phi_3) &= \{\mathbf{U}_3\}^T \{\mathbf{F}_3\} + \{\phi_3\}^T \{\mathbf{Q}_3\} \\
 &= \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_3 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{uu} & \mathbf{K}_{u\phi} \\ \mathbf{K}_{\phi u} & -\mathbf{K}_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_3 \\ \phi_3 \end{Bmatrix} \\
 &= \{\mathbf{U}_3\}^T \{\mathbf{F}_3\}
 \end{aligned} \tag{17}$$

### 3.3 최적화문제의 정의

본 연구에서는 액추에이터의 유연성을 증가시켜 출력변위를 증가시키고 반력에 대한 강건한 구조를 얻기 위해 강성을 최소화하고자 한다. 평균굴성을 최소화한다는 것은 강성의 최대화를 의미하므로 평균변위량과 평균굴성의 비를 최대화함으로써 강건한 구조이면서 출력변위를 증폭시키는 액추에이터를 설계하고자 한다. 구속조건은 하중에 대한 평형방정식과 체적구속조건이고 최적화 문제는 다음과 같이 정의할 수 있다.

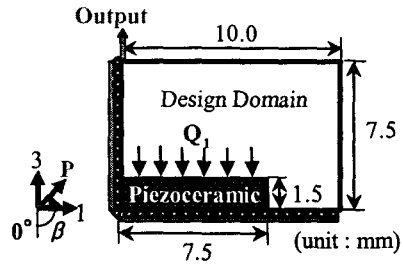


Fig. 5 Design domain of Moonie actuator

$$\begin{aligned}
 \max_{r_i(\rho_i)} & \frac{L_2(\mathbf{U}_1, \phi_1)}{L_3(\mathbf{U}_3, \phi_3)} \\
 \text{subject to} & \\
 & L_2(\mathbf{U}_1, \phi_1) = \mathbf{F}_2^T \mathbf{U}_1 + \mathbf{Q}_2^T \phi_1 \\
 & \quad = \mathbf{F}_1^T \mathbf{U}_2 + \mathbf{Q}_1^T \phi_2 \\
 & L_3(\mathbf{U}_3, \phi_3) = \mathbf{F}_2^T \mathbf{U}_2 + \mathbf{Q}_2^T \phi_2 \\
 & \sum_{i=1}^n (1-r_i) \Omega_i \leq \Omega^m \quad \left( \sum_{i=1}^n \rho_i \Omega_i \leq \Omega^m \right) \\
 & 0 \leq r_i \leq 1 (\leq \rho_i \leq 1), i=1, \dots, n \\
 & 0 \leq \beta \leq 360
 \end{aligned} \tag{18}$$

여기서  $\Omega^m$ 는 전체 재료량을 나타내고 Fig. 4는 최적화 과정의 순서도이다.

## 4. 예제를 통한 비교 및 고찰

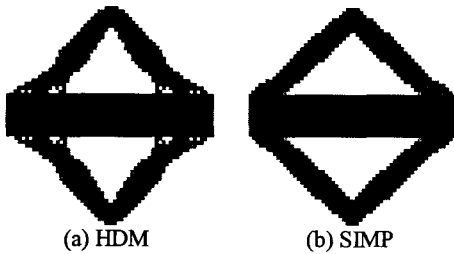
본 연구에서는 분극방향을 설계변수로 추가하여 CAMD 방법을 적용한 밀도법과 균질화설계법으로 위상최적화를 수행하고 압전형 액추에이터의 성능을 향상시키는 방안을 제안하였다. 제안한 방법을 Moonie 액추에이터 설계와 Swing Arm 형태 액추에이터의 PZT 지지부 설계에 적용하여 그 타당성을 검증하고자 한다. 압전소자 부분은 제조과정의 어려움을 고려하여 비설계영역으로 설정하였다.

### 4.1 Moonie 액추에이터 설계

입력전압에 따라 압전소자의 변위를 출력방향 변위로 변환하고 증폭시키는 유연성 액추에이터 (Flextensional Actuator) 중에서 Moonie 액추에이터는 가장 대표적인 기구이며, 오랜 시간 동안 설계자의 경험과 노력으로 이미 최적형상이 알려져 있다. Moonie 액추에이터의 설계영역과 하중조건은 Fig. 5와 같고 설계영역은 대칭조건을 고려하여 1/4 영역으로 설정하여 1200개의 4절점 유한요소로 이산화하였다. 목표 체적은 설계영역의 20%로

**Table 1** Material properties of PZT5 and structure

Piezoceramic	PZT5	Structure	
$c_{11}^E (10^{10} \text{N/m}^2)$	12.1	E(Pa)	100
$c_{13}^E (10^{10} \text{N/m}^2)$	7.52	$\nu$	0.3
$c_{44}^E (10^{10} \text{N/m}^2)$	2.30		
$e_{13}^E (\text{C/m}^2)$	-5.4		
$e_{33}^E (\text{C/m}^2)$	15.8		
$e_{15}^E (\text{C/m}^2)$	12.3		
$\epsilon_{11}^S / \epsilon_0$	1650		
$\epsilon_{33}^S / \epsilon_0$	1700		



**Fig. 6** Optimal topologies of Moonie actuator reflected about 3 and 1 axes

지정하였고, 반력은 출력 부분의 반대방향으로 단위 하중만큼 설정하였다. 입력전하량은  $Q_1 = 4\mu\text{C}/\text{m}^2$  이며, 압전재료와 설계영역 재료의 물성값은 Table 1 과 같다. Nishiwaki<sup>(4)</sup>는 분극방향이 3 방향으로 고정된 압전재료 상수값으로 균질화설계법을 이용하여 압전형 액추에이터 설계를 수행하였다. 본 논문에서는 분극방향이 180° 회전되었을 경우 ( $\beta_0 = 180^\circ$ ) 와 같은 재료상수값으로 밀도법과 균질화법을 통해 위상최적화를 수행하여 Fig. 6 과 같은 최적형상을 얻었다. Table 2 는 밀도법으로 분극방향을 고려하였을 경우와 여기에 CAMD 방법을 적용하여 얻은 최적형상이다. 밀도법만으로 구해진 최적형상은 초기분극방향을 나타내는  $\beta_0$  에 따라서 5 개의 지역해로 수렴하는 것을 알 수 있었고  $\beta_0$  가 135°~270°인 경우는 하나의 최적값으로 수렴하였다. Moonie 액추에이터는 분극방향이 180°일 때 최대출력변위를 갖는다고 알려져 있으므로  $\beta_0$  가 최적해 근처의 값으로 최적화를 수행하면 이미 알려진 최적형상으로 수렴함을 알 수 있다.  $\beta_0$  가 0°와 45°인 경우는 최적 분극방향을 찾지 못하고 지역해로 수렴했는데 이는 입력전압방향과 분극방향에 따른 압전재료의 압축작용으로 인해 최적형상과 다른 형상이 계산된 결과라고 판단된다. 밀도법에 CAMD 방법을 적용시킨 결과에서도 균질화설계법과 마찬가지로  $\beta_0$  에 따라서 4 개의 최적형상을 얻

**Table 2** Optimal topologies of Moonie actuator according to  $\beta_0$  in SIMP

$\beta_0$	SIMP	SIMP using CAMD
0°		
45°		
90°		
135°		
180°		
225°		
270°		
315°		

**Table 3** Polarization and performance of Moonie actuator relative to starting polarization in SIMP

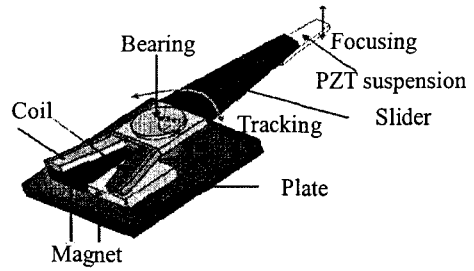
$\beta_0$	SIMP			SIMP using CAMD		
	Obj	Disp	$\beta_{final}$	Obj	Disp	$\beta_{final}$
0°	0.04	2.048	31.05°	0.07	0.361	62.07°
45°	0.11	0.352	89.02°	0.78	0.700	190.07°
90°	0.93	1.044	192.60°	0.94	1.237	192.25°
135°	1.02	1.042	193.03°	1.02	1.028	192.91°
180°	1.02	1.024	192.64°	1.02	1.022	192.64°
225°	1.00	1.043	192.85°	1.02	1.018	192.87°
270°	0.99	1.135	191.96°	1.01	1.076	192.66°
315°	1.01	1.115	193.54°	0.97	1.018	194.08°
$\beta_{fixed}$	1	1	180°	1	1	180°

**Table 4** Optimal topologies of Moonie actuator according to  $\beta_0$  in HDM

$\beta_0$	HDM			HDM using CAMD		
	Obj	Disp	$\beta_{final}$	Obj	Disp	$\beta_{final}$
0°	0.13	0.789	19.06°	-	-	-
45°	0.68	0.591	185.27°	0.78	0.884	193.77°
90°	0.93	0.843	192.69°	0.92	0.994	194.26°
135°	1.02	1.029	193.05°	0.98	0.974	193.78°
180°	1.00	1.027	193.22°	1.01	1.053	193.61°
225°	1.02	1.012	193.07°	1.01	1.099	192.97°
270°	1.01	1.088	193.11°	0.96	1.032	195.06°
315°	0.92	0.859	191.35°	0.93	0.950	194.81°
$\beta_{fixed}$	1	1	180°	1	1	180°

**Table 5** Polarization and performance of Moonie actuator relative to starting polarization in HDM

$\beta_0$	HDM			HDM using CAMD		
	Obj	Disp	$\beta_{final}$	Obj	Disp	$\beta_{final}$
0°	0.13	0.789	19.06°	-	-	-
45°	0.68	0.591	185.27°	0.78	0.884	193.77°
90°	0.93	0.843	192.69°	0.92	0.994	194.26°
135°	1.02	1.029	193.05°	0.98	0.974	193.78°
180°	1.00	1.027	193.22°	1.01	1.053	193.61°
225°	1.02	1.012	193.07°	1.01	1.099	192.97°
270°	1.01	1.088	193.11°	0.96	1.032	195.06°
315°	0.92	0.859	191.35°	0.93	0.950	194.81°
$\beta_{fixed}$	1	1	180°	1	1	180°



**Fig. 7** Swing arm type actuator

었다.  $\beta_0$ 가 0°, 45°, 90°인 경우 밀도법에서는 바둑판 모양이 생성되는 반면 CAMD 방법을 적용한 밀도법에서는 이러한 수치적 불안정성이 제거됨을 확인할 수 있었다. Table 3에 정리한 결과를 살펴보면 최적 분극방향은 초기값에 상관없이 거의 192°로 수렴하는 것을 알 수 있고, 출력변위도 증가하였다. 밀도법으로 수행한 결과에서 출력변위는 270°에서 13.5%, 315°에서 11.5% 향상되었고, 여기에 CAMD 방법을 적용하면 출력변위가 90°에서 23.7% 향상되었지만 0°와 45°에서는 감소한 결과를 얻었다. 때로는  $\beta_0$ 에 따라서 기존의 설계보다 좋지 않은 결과를 얻기도 하였다.

Table 4는 균질화설계법으로 분극방향을 고려한 경우와 여기에 CAMD 방법을 적용한 경우 수렴한 최적형상을 비교한 것인데 초기 분극방향에 따라서 5개의 최적형상으로 수렴한 결과를 통하여 Moonie 액추에이터 설계문제가 초기 분극방향에 민감한 것으로 판단된다. 초기 분극방향이 135°~270°인 경우는 하나의 최적형상으로 수렴하였고 출력변위 또한 향상되었다. 최적 분극방향은 초기값이 0°와 45°를 제외한 경우에 193°로 수렴하였다. 초기 분극방향에 따라서 때로는 기존설계의 성능보다 좋지 않은 결과를 얻었고 분극방향을 고려했을 때 효과도 밀도법에 비해 크지 않았다. 초기 분극방향이 0°, 45°, 90°, 315°일 때는 바둑판 모양이 생성되는데 이를 방지하고자 균질화설계법에 CAMD 방법을 적용하여 얻은 형상에서는 그 효과를 확인할 수 있었다. 초기분극방향이 0°인 경우는 수렴하지 못했으나 0°인 경우를 제외한 모든 경우에 192°~195°사이의 최적값으로 수렴하였다. 분극방향의 초기값이 180°~270°에서 출력변위는 향상되었고, 특히 225°일 때 9.9%의 성능향상을 확인하였다. 복합재역학에 근거한 균질화설계법으로 최적 분극방향을 고려함으로써 밀도법과는 다른 최적형상을 얻었다.

#### 4.2 PZT 지지부 설계

Fig. 7은 하드 디스크 드라이브(HDD)를 구성하는 Swing Arm 형태 액추에이터를 나타내는데, 이 액추에이터는 회전방향을 움직이는 트래킹 제어와

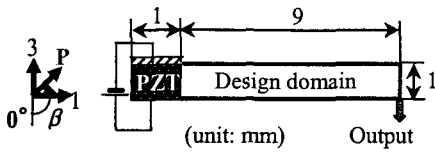


Fig. 8 Design domain of PZT suspension

슬라이더와 연결된 헤더의 상하작용인 포커싱을 제어하는 기능을 수행한다. 본 연구에서는 압전형 액추에이터만 고려하므로 PZT 지지부만을 설계영역으로 제한하여 Fig. 8 과 같이 하중조건과 구속조건을 단순화시켜 최적화를 수행하였다. 압전재료 영역은 비설계 영역으로 설정하였고, 설계영역은 3600 개의 4 절점 유한요소로 이산화하였다. 압전재료 상수값은 Table 1 에서와 같은 PZT5 를 사용하였고 압전재료의 연결 구조물의 물성값은  $E = 200 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.3$  으로 설정하였다. 입력전하는  $Q_1 = 1\mu\text{C}/\text{m}^2$  로 설정하였고, 하중은 압전소자의 출력부분에 단위하중을 가하였으며 출력부분의 반력에 대해 출력방향과 반대방향으로 단위하중을 설정하였다. 이 예제는 위상최적설계 방법을 수행하는데 있어서 바둑판 모양이 심하게 발생한 경우로 이러한 수치적 불안정성을 제거하고자 CAMD 방법을 적용하였다. PZT 지지부 설계문제는 최적 분극방향이 알려져 있지 않기 때문에 먼저 분극방향을 인장이 일어나는  $180^\circ$ 와 전단변형이 일어나는  $270^\circ$ 로 고정시켜 밀도법과 균질화설계법으로 각각 위상최적화를 수행하였다. 각각의 최적형상과 최대출력변위를 기준으로 분극방향을 고려했을 때 최적형상과 최대출력변위를 비교한다. Fig. 9 는 고정된 분극방향으로 얻은 최적형상이고, Fig. 10 은 밀도법과 균질화설계법으로 초기분극방향에 따라서 얻은 최적형상이다. 먼저 Fig. 9 와 Fig. 10 에서 밀도법으로 구한 최적형상을 비교하면 Fig. 10 에서 압전재료와 구조물이 연결된 부분에서 고정된 분극방향의 결과인 Fig. 9(c)와 비슷함을 알 수 있다. 즉 초기분극방향에 상관없이 하나의 최적형상으로 수렴함을 확인할 수 있다. 균질화설계법으로 최적형상을 구한 결과에서도 분극방향을 설계변수로 고려하여 얻은 최적형상들은 Fig. 9(d)와 비슷하였다. Table 6 의 수치적인 결과를 살펴보면 최적분극방향은 밀도법에서  $272^\circ$ , 균질화설계법에서  $275\sim 277^\circ$ 를 얻었고 하나의 최적값으로 수렴함을 알 수 있다. 분극방향을 설계변수로 고려하여 얻은 최적형상의 출력변위는  $270^\circ$ 로 고정된 분극방향으로 최적화한 결과보다는 큰 향상 효과를 보지 못했다. 하지만  $180^\circ$ 로 고정된 분극방향으로 얻은

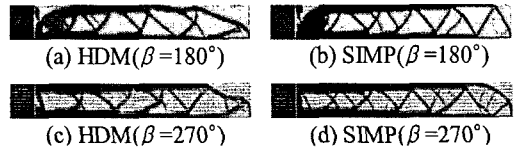


Fig. 9 Optimal topologies of PZT suspension with fixed polarization

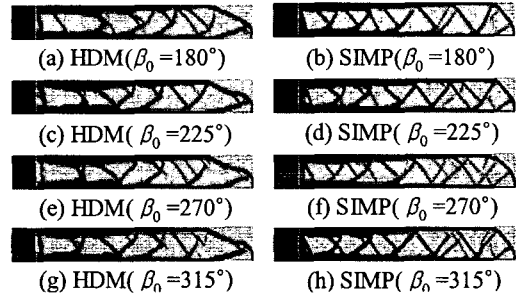


Fig. 10 Optimal topologies of PZT suspension relative to starting polarization

Table 6 Polarization and performance of PZT suspension

$\beta_0$	HDM using CAMD			SIMP using CAMD		
	Disp	Disp	$\beta_{final}$	Disp	Disp	$\beta_{final}$
$180^\circ$	3.70	1.004	$276.0^\circ$	2.60	1.002	$272.7^\circ$
$225^\circ$	3.71	1.007	$275.7^\circ$	2.60	1.002	$272.7^\circ$
$270^\circ$	3.72	1.010	$277.4^\circ$	2.60	1.002	$272.8^\circ$
$315^\circ$	3.71	1.006	$277.3^\circ$	2.60	1.002	$272.6^\circ$
$180^\circ(\beta_{fixed})$	1	-	$180^\circ$	1	-	$180^\circ$
$270^\circ(\beta_{fixed})$	-	1	$270^\circ$	-	1	$270^\circ$

결과보다는 밀도법에서 260%, 균질화설계법에서 371%향상되었다. 이는 지능형 구조물 설계와 같이 구속조건과 경계조건이 복잡한 경우 최적 분극방향을 시행착오를 통해서 구해야 하므로 최적 분극방향을 찾는 것만으로도 매우 큰 효과를 볼 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 컴플라이언트 메커니즘 설계에 압전소자의 분극방향을 설계변수로 추가하여 출력변위가 향상된 압전형 액추에이터를 설계하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법을 구현하고 액추에이터 구조설계에 적용하여 고찰한 결론은 다음과 같다.

(1) 최적분극방향을 고려하였을 때 밀도법과 균질화설계법을 적용하여 수렴한 최적형상을 비교 분석하였고, 균질화설계법에서도 효과적임을 확인

하였다. 그러나 수치적 불안정한 현상들이 발생하여 재료분포의 연속적인 근사(CAMD)방법을 압전형 액추에이터 설계에 적용하여 그 효과를 확인하였다.

(2) 복잡한 경계조건에 의해 최적방향이 알려져 있지 않은 설계의 경우 기존의 실험을 통해 최적방향을 알아낸 것과 다르게 직접 최적값을 찾아준다는 점에서 큰 효과가 있다고 생각된다.

(3) 위상최적설계 시 설계자가 추가된 구속조건의 파라미터값 설정 없이 제작 가능한 최적형상을 도출하도록 설계변수를 요소에서 절점으로 바꿈으로써 밀도법과 균질화설계법에서 수치적 불안정성 문제를 해결하는데 효과적임을 입증하였다.

(4) 향후 위상최적설계방법으로 구조물의 최적설계 시 CAMD 방법이 다양한 분야에서 활용될 것으로 기대된다.

### 후 기

이 연구는 한국과학기술원 지정 최적설계기술 연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

- (1) Sun, C. T. and Zhang, X. D., 1995, "Use of Thickness-shear Mode in Adaptive Sandwich Structures," *Smart Materials and Structures*, Vol. 4, pp. 202~206.
- (2) Benjeddou, A., Trindade, M. A. and Ohayon, R., 1997, "A Unified-Beam Finite Element Model for Extension and Shear Piezoelectric Actuation," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 8, pp. 1012~1025.
- (3) Silva, E. C. N. and Kikuchi, N., 1998, "Optimization Methods Applied to Material and Flextensional Actuator Design Using the Homogenization Method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 159, pp. 49~77.
- (4) Silva, E. C. N., Nishiwaki, S. and Kikuchi, N., 2000, "Topology Optimization of Flextensional Actuators," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 47, pp. 657~671.
- (5) Chae, J. and Min, S., 2004, "Structural Design of Piezoelectric Microactuator Using Topology Optimization," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 28, No. 2, pp. 206~213.
- (6) Bendsoe, M. P. and Kikuchi, N., 1988, "Generating

- Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 71, pp. 197~224.
- (7) Gibert, J. M. and Austin, E. M., 2004, "Inclusion of Piezoelectric Polarization in the Design of a Flextensional Actuator," *Smart Materials and Structures*, Vol. 5383, pp. 183~193.
- (8) Huber, J. E. and Fleck, N. A., 2001, "Multi-Axial Electrical Switching of a Ferroelectric: Theory Versus Experiment," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 49, pp. 785~811.
- (9) Sigmund, O. and Petersson, J., 1998, "Numerical Instabilities in Topology Optimization: A Survey on Procedures Dealing with Checkerboards, Mesh-Dependencies and Local Minima," *Structural Optimization*, Vol. 16, pp. 68~75.
- (10) Díaz, A. R. and Sigmund, O., 1995, "Checkerboard Patterns in Layout Optimization," *Structural Optimization*, Vol. 10, pp. 40~45.
- (11) Sigmund, O., 1994, "Design of Material Structures Using Topology Optimization," Ph.D. thesis, Department of solid Mechanics, Technical University of Denmark.
- (12) Bourdin, B., 2001, "Filters in Topology Optimization," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 50, pp. 2143~2158.
- (13) Nishiwaki, S., Frecker, M., I., Min, S. and Kikuchi, N., 1998, "Topology Optimization of Compliant Mechanisms Using the Homogenization Method," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 42, pp. 535~559.
- (14) Nishiwaki, S., Min, S., Yoo, J. and Kikuchi, N., 2001, "Optimal Structural Considering Flexibility," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 190, pp. 4457~4504.
- (15) Matsui, K. and Terada, K., 2004, "Continuous Approximation of Material Distribution for Topology Optimization," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 59, pp. 1925~1944.
- (16) Lim, Y. S., Min, S., Yoo, J., Terada, K. and Nishiwaki, S., 2006, "Comparative Studies on Topology Optimization Using Continuous Approximation of Material Distribution," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 30, No. 2, pp. 164~170.
- (17) Naillon, M., Coursant, R. H. and Besnier, F., 1983, "Analysis of Piezoelectric Structures by a Finite Element Method," *Acta Electronica*, Vol.25, pp. 341~362.
- (18) Bendsoe, M. P., 1989, "Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem," *Structural Optimization*, Vol. 17, pp. 193~202.