

# 인터페이스 회로의 이득 최적화를 통한 분포형 모달 변환기의 설계

°김지철<sup>1</sup>, 황준석<sup>2</sup>, 유정규<sup>3</sup>, 김승조<sup>4</sup>

## Design of Distributed Modal Transducer by Optimizing Gain-weights of Interface Circuit

Jichul Kim, Joon-Suk Hwang, Jung-Kyu Ryou, Seung Jo Kim

### ABSTRACT

A modal transducer in two-dimensional structure can be implemented by varying the distributed transducer's gain spatially. In this paper, a method based on finite element method is developed for optimizing spatial gain distribution of PVDF transducer to create the modal transducer for specific modes. Using this concept, one can design the modal transducer in two-dimensional structure having arbitrary geometry and boundary conditions. As a practical means for implementing this continuous gain distribution without repoling the PVDF film, the gain distribution is approximated by optimizing gain-weights of interface circuit. The whole spatial area of the PVDF film is divided into several electrode segments and the signals from each segment are properly weighted and summed by interface circuit. This corresponds to the approximation of a continuous function using discrete values. The electrode partition is optimized using the genetic algorithm. Gain-weights are optimized using the simplex search method. A modal sensor for first to fourth modes of aluminum plate is designed using PVDF film with gain-weighted interface circuit. Various lamination angles of PVDF film are taken into consideration to utilize the anisotropy of the PVDF film. Performance of the optimized PVDF sensor is demonstrated by numerical simulations..

### 1. 서론

최근 들어 구조물의 진동 제어에 필요한 감지기 및 작동기로서 압전 재료는 그 효율성을 인정 받고 있다. 이 중 얇고 유연한 형태의 압전 필름은 분포형 변환기에 실용적으로 활용 가능하다.

구조물의 진동제어 시 하드 웨어의 한계 및 모델링의 오차를 고려하여 특정한 몇 개의 모드만을 제어하게 되는데, 이 때 비제어 모드에 의한 스피얼 오버가 진동 제어 폐회로 시스템의 불안정을 유발시킬 수 있다[1]. 스피얼오버에 의한 역효과를 극복하기 위하여 공간 영역에서의 모달 감지기 개념이 도입되었다[2]. 모달 감지기를 사용하는 경우 제어 모드로부터의 신호만을 감지하게 되므로 관측 스피얼오버를 방지할 수 있다.

구조물의 진동을 감지하거나 구조물을 작동시

키는데 사용되는 변환기는 이산형과 분포형으로 나눌 수 있다. 이산형 변환기를 이용하여 모달 감지기를 구현하기 위해서는 많은 양의 신호 처리가 필요한데 이는 신호의 위상 지연을 수반하게 된다. 이러한 위상 지연은 제어 시스템의 강건성을 해치게 된다. 반면 분포형 변환기(Distributed Transducer)는 피측정 구조물에 대하여 알고 있는 구조 특성을 최대한 반영하여 공간 상에서 신호처리를 행한다는 측면에서 이산형 변환기에 비해 장점을 가지고 있다.

Lee[3]는 압전 필름을 이용한 분포형 변환기의 개념을 정립하고 구조물의 모드 형상간의 직교성을 이용하여 1차원 구조물에서 분포형 모달 감지기를 구현할 수 있음을 실증하였다. Burke와 Hubbard[4]는 압전 필름의 공간상 이득 분포가 평판 구조물의 진동제어에 미치는 영향을 고찰하였다. 이들 연구에서는 구조물의 동적 변형 형상의 엄밀해 또는 급수해가 필요하므로 대상 구조의 형상과 경계조건에 많은 제약을 받게 된다. Ryou, Park과 Kim[5]은 압전 필름의 전극 형상 및 적층 각을 최적화하여 2차원 구조물에서 모달 감지기를

- 1: 서울대학교 항공우주공학과 대학원
- 2: 서울대학교 항공우주공학과 대학원
- 3: 국방과학연구소
- 4: 정회원, 서울대학교 항공우주공학과

근사화하였다.

본 연구에서는 임의의 형상 및 경계 조건을 갖는 2차원 구조물에서의 모달 감지기 구현을 위해 요구되는 최적이득분포를 유한요소법을 이용하여 구하는 방법을 제시하였고, 계산된 최적이득분포를 실제 구조물에 적용하는 실용적인 방법으로서 압전 필름의 공간상 영역분할 및 각 영역에 대한 인터페이스 회로의 이득의 최적화를 통한 모달 감지기 설계를 수행하였다.

## 2. 구조물의 유한요소 모델

임의의 형상 및 경계 조건을 갖는 2차원 구조물에서 모달 감지기 구현을 위해 필요한 최적이득분포를 구하기 위해 유한요소법을 도입하였다. 주 구조물 및 압전 변환기로 구성된 2차원 평판 구조물을 4개의 절점을 갖는 사각형 Kirchhoff 평판 요소를 이용하여 모델링하였다. 각 절점 당 1개의 수직 변위와 2개의 회전각( $w, \theta_x, \theta_y$ )을 자유도로 고려하였고, 압전 층의 이득분포는 각 요소마다 일정한 값( $P^{(e)}$ )을 갖도록 모델링하였다.

평판 요소 내에서의 변위는 식 (1)과 같이 각 절점에서의 자유도를 이용하여 보간된다.

$$w(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^4 f_i w_i + \sum_{i=1}^4 g_i \theta_{xi} + \sum_{i=1}^4 h_i \theta_{yi} \quad (1)$$

위 식에서  $f_i, g_i, h_i$ 는 Hermite 보간함수이다. 평판 내에서의 일반화된 변위(generalized displacement)와 일반화된 변형률(generalized strain)은 각각 식 (2)와 식 (3)과 같이 보간된다.

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial w}{\partial x} & -\frac{\partial w}{\partial y} & w \end{bmatrix}^T = \mathbf{H}^{(e)} \mathbf{U} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} & -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} & -2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{bmatrix}^T = \mathbf{B}^{(e)} \mathbf{U} \quad (3)$$

여기서 위 첨자  $e$ 는 해당 요소를 나타낸다. 위 식으로부터 시스템의 질량과 강성 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{M} = \sum_e \int_{S^{(e)}} \mathbf{H}^{(e)T} \mathbf{I} \mathbf{H}^{(e)} dS^{(e)} \quad (4)$$

$$\mathbf{K} = \sum_e \int_{S^{(e)}} \mathbf{B}^{(e)T} \mathbf{D} \mathbf{B}^{(e)} dS^{(e)} \quad (5)$$

여기서  $\mathbf{I} = \text{diag}(I_2, I_2, I_0)$ ,  $\mathbf{D}$ 는 적층판의 굽힘 강성(bending rigidity)이다.

2차원 구조물의 표면에 위치한 압전 감지기에 유도되는 전하량  $q$ 는 식 (6)과 같다.

$$q(t) = -z \int_S p(x, y) \left[ \bar{e}_{31} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \bar{e}_{32} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2\bar{e}_{36} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] dS \quad (6)$$

여기서  $\bar{e}_j$ 는  $xy$ -좌표계에서의 압전 상수,  $S$ 는 유효 전극의 면적이고  $p(x, y)$ 는 압전 필름의 이득분포이

다.  $w(x, y, t)$ 는 수직 방향 변위이고,  $z$ 는 증립면에서 압전 감지기의 중심면까지의 수직거리이다.

식 (6)은 다음과 같이 이산화된다.

$$\begin{aligned} q &= z \sum_e \int_{S^{(e)}} \left[ -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] \begin{bmatrix} \bar{e}_{31} \\ \bar{e}_{32} \\ \bar{e}_{36} \end{bmatrix} p(x, y) dS^{(e)} \\ &= \sum_e \mathbf{U}^{(e)T} \left[ z \int_S \mathbf{B}^{(e)T} \mathbf{e} dS \right] \mathbf{P}^{(e)} \\ &\equiv \sum_e \mathbf{U}^{(e)T} \mathbf{Q}^{(e)} \mathbf{P}^{(e)} \equiv \mathbf{U}^T \mathbf{Q} \mathbf{P} \end{aligned} \quad (7)$$

위 식에서  $\mathbf{P} = [P^{(1)} P^{(2)} \dots P^{(n)}]$ 는 각 요소의 이득을 원소로 가지는 벡터이다. 모달 좌표계로의 변환을 통해 식 (7)은 다음과 같이 각각의 모드에 의해 유도되는 전하들의 합으로 표현된다. 자유도 벡터  $\mathbf{U}$ 를 모달 좌표계로 변환함에 있어 진동 특성에 중요한 영향을 미치는  $N$ 개의 저차 모드만을 고려하는 모드 축약 기법(modal reduction)을 사용하였다.

$$q(t) = \mathbf{U}^T \mathbf{Q} \mathbf{P} = \sum_{k=1}^N [\boldsymbol{\phi}_k^T \mathbf{Q} \mathbf{P}] \eta_k(t) \quad (8)$$

다음과 같이  $k$ 번째 모드에 의해 유도되는 전하  $q_k$ 를 정의하자.

$$q_k = \boldsymbol{\phi}_k^T \mathbf{Q} \mathbf{P} \quad (9)$$

식 (8)은 다음과 같이 행렬의 형태로 나타낼 수 있다.

$$q(t) = \sum_{k=1}^N q_k \eta_k(t) = \mathbf{B}_S^T \boldsymbol{\eta}_R \quad (10)$$

여기서  $\mathbf{B}_S = [q_1, \dots, q_N]^T$ ,  $\boldsymbol{\eta}_R = [\eta_1, \dots, \eta_N]$ 은 모달 좌표이고 아래 첨자  $\mathbf{R}$ 은 모드 축약을, 아래 첨자  $\mathbf{S}$ 는 감지기를 의미한다.

압전 감지기와 작동기 사이에는 reciprocity가 성립하여[3], 특정 감지기에서  $k$ 번째 모드에 의해 발생하는 전하량이  $q_k$ 라면 이 감지기를 작동기로 사용하였을 때  $k$ 번째 모드에 대한 단위 전압당 작동력도  $q_k$ 이다. 따라서 모달 좌표계에서 구조물의 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}}_R + \mathbf{c}_R \dot{\boldsymbol{\eta}}_R + \boldsymbol{\Lambda}_R \boldsymbol{\eta}_R = \mathbf{B}_a^T V_a \quad (11)$$

위 식에서  $\mathbf{c}_R = \text{diag}(2\zeta_1 \omega_1, \dots, 2\zeta_N \omega_N)$ 이고,  $\boldsymbol{\Lambda}_R = \text{diag}(\omega_1^2, \dots, \omega_N^2)$ 이다.  $\mathbf{B}_a = [q_1, \dots, q_N]^T$ 는 식 (9) 및 압전 필름의 reciprocity에 의해 정의되는 단위 전압 당 모달 작동력 벡터이고,  $V_a$ 는 압전 작동기에 가해지는 전압 신호이다.

## 3. 최적 이득 분포

모드 축약시 고려하는  $N$ 개의 모드 중  $j$ 번째 모드로부터의 신호만을 감지하는 모달 감지기로 작동하기 위해 요구되는 최적이득분포  $\mathbf{P}$ 를 구하는 문제는 다음과 같은 구속된 최적화 문제로 표현된다.

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad |q_j|^2 = q_j^T q_j \\ & \quad = \mathbf{P}^T \mathbf{Q}^T \boldsymbol{\Phi}_j^T \boldsymbol{\Phi}_j \mathbf{Q} \mathbf{P} \\ & \text{subject to} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\Phi}_R^T \mathbf{Q} \mathbf{P} = 0$$

위 식에서  $\boldsymbol{\Phi}_R = [\boldsymbol{\phi}_1, \dots, \boldsymbol{\phi}_N]$ 은  $j$  번째 모드 벡터만을 제외한  $N-1$  개의 모드 벡터로 이루어진 모달 행렬이다. 그런데, 식 (12)의 구속 조건을 만족하는 이득분포  $\mathbf{P}$ 는 행렬  $\boldsymbol{\Phi}_R^T \mathbf{Q}$ 의 영공간(null space) 안에 존재하게 되므로  $\mathbf{P}$ 는 식 (13)과 같이 영공간의 저차의 선형조합으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{P} = \sum_{i=1}^m \boldsymbol{\phi}_i \alpha_i = \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\alpha} \quad (13)$$

여기서

$$\begin{aligned} m &= \text{nullity of } \boldsymbol{\Phi}_R^T \mathbf{Q} \\ \boldsymbol{\Psi} &= [\boldsymbol{\phi}_1, \dots, \boldsymbol{\phi}_m] = \text{basis of } N(\boldsymbol{\Phi}_R^T \mathbf{Q}) \\ \boldsymbol{\alpha} &= [\alpha_1, \dots, \alpha_m] \end{aligned} \quad (14)$$

식 (13)과 같이  $\mathbf{P}$ 를 표현하면  $\mathbf{P}$ 는 항상 식 (12)의 구속조건을 만족하게 되므로 구속조건이 있는 최적화 문제 (12)을 식 (15)와 같은 구속조건이 없는 최적화 문제로 변환할 수 있게 된다.

$$\text{maximize} \quad \boldsymbol{\alpha}^T \boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{Q}^T \boldsymbol{\Phi}_j^T \boldsymbol{\Phi}_j \mathbf{Q} \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\alpha} \quad (15)$$

여기서  $\mathbf{P} = \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\alpha}$ 의 크기에 제한을 두지 않으면 위 최적화 문제에서  $\boldsymbol{\alpha}$ 의 크기가 증가할수록 목적함수의 값도 증가하므로 다음과 같은 제한 조건을 둔다.

$$\|\mathbf{P}\|^2 = \boldsymbol{\alpha}^T \boldsymbol{\Psi}^T \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\alpha} = 1 \quad (16)$$

식 (15)와 식 (16)으로 이루어진 구속 조건이 있는 최적화 문제의 해는 Rayleigh의 정리[6]로부터 식 (17)의 고유치 문제를 풀어서 얻을 수 있는 최대 고유치  $\lambda_{\max}$ 에 해당하는 고유 벡터  $\boldsymbol{\alpha}_{\max}$ 이다.

$$(\boldsymbol{\Psi}^T \mathbf{Q}^T \boldsymbol{\Phi}_j^T \boldsymbol{\Phi}_j \mathbf{Q} \boldsymbol{\Psi}) \boldsymbol{\alpha} = \lambda (\boldsymbol{\Psi}^T \boldsymbol{\Psi}) \boldsymbol{\alpha} \quad (17)$$

식 (13)으로부터 식 (12)로 표현되는 최적화 문제의 해, 즉  $j$  번째 모드에 대한 모달 감지기로 작동하기 위해 요구되는 최적이득분포  $\mathbf{P}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{P} = \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\alpha}_{\max} \quad (18)$$

다중 모드에 대한 모달 감지기는 목적이 되는 각각의 모드에 대한 최적이득분포를 위의 방법으로 구한 후 각각의 최적이득분포를 적절히 선형결합함으로써 구현할 수 있다.

이와 같이 유한요소법을 이용하면 임의의 형상 및 경계 조건을 갖는 2 차원 구조물에서 모달 감지기 구현을 위해 필요한 분극강도분포를 계산할 수 있다.

#### 4. 유한개의 이득을 이용한 모달 변환기 설계

식 (18)에 의해 계산된 최적이득분포를 실제 압

전 변환기에 구현하는 방법으로는 압전 필름을 재분극(repoling)하여 분극강도분포를 조절하는 방법이 있으나, 이는 실제 구현하기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 2 차원 구조물에서 모달 감지기를 구현할 수 있는 실용적인 방법으로 일정한 분극강도분포를 가지는 압전 필름의 공간상 영역분할과 각 영역으로부터의 신호에 대한 이득 및 압전 필름의 적층각을 최적화하여 모달 감지기를 설계하는 방법을 제안하였다. 이는 수학적으로 연속적인 값을 가지는 함수를 몇 개의 이산화된 값으로 근사화하는 과정으로 설명할 수 있다.

#### 4.1 최적화 과정

Fig. 1 과 같이 알루미늄과 압전 필름으로 구성된 평판 구조물의 1-4 차 모드에 대한 모달 감지기를 압전 필름의 적층각은  $0^\circ$ 로 고정된 상태에서 전극 형상 및 각 영역에 대한 이득을 최적화하여 설계하였다.

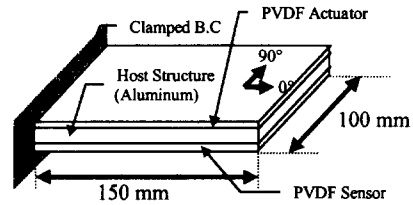


Fig. 1 Construction of specimen

모드축약 시 저차의 8 개 모드만을 고려하였다. 최적화 과정에서 사용된 성능지수는 식 (19)와 같다.

$$PI = \frac{\min(\boldsymbol{\Phi}_c^T \mathbf{Q} \mathbf{P})}{\max(\boldsymbol{\Phi}_{uc}^T \mathbf{Q} \mathbf{P})} \quad (19)$$

위 식에서  $\boldsymbol{\Phi}_c^T \mathbf{Q} \mathbf{P}$ ,  $\boldsymbol{\Phi}_{uc}^T \mathbf{Q} \mathbf{P}$ 는 각각 제어 모드인 1-4 차 모드들과 비제어 모드인 5-8 차 모드로부터 유도되는 전하량이다.

다음과 같은 최적화 과정을 통해 위 성능지수를 최대화 하였다.

##### Step 1

식 (18)을 이용하여 1-4 차 모드에 대한 모달 감지기를 구현하기 위한 최적이득분포를 구한다.

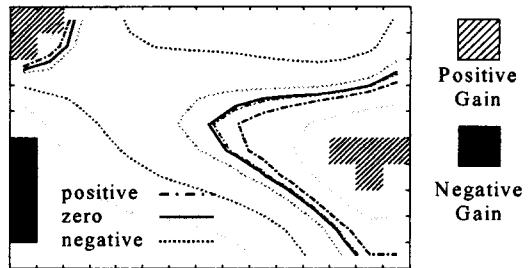


Fig. 2 Optimal gain distribution and initial selection of segments

계산된 최적이득분포를 Fig. 2에 등고선도로 나타내었다.

**Step 2**

설계시 사용되는 이득의 개수에 따라 최적이득 분포로부터 영역의 초기형상 및 각 영역에 대한 이득의 초기값을 결정한다. 본 연구에서는 양, 음 및 0의 세 개의 이득을 사용하였다. 적절한 초기 영역의 설정을 위하여 최적이득분포로부터 양의 값을 갖는 부분의 평균이득  $m_p$ 와 표준편차  $\sigma_p$ 를 구하였고, 음의 이득분포를 갖는 영역에 대하여도 마찬가지로  $m_n$ 와  $\sigma_n$ 을 구하였다. 양의 이득이 적용되는 영역은 최적이득분포가  $m_p+2\sigma_p$ 보다 큰 부분을, 음의 이득이 적용되는 영역은 최적이득분포가  $m_n-2\sigma_n$ 보다 작은 영역을 각각의 초기영역으로 설정하였다. 또한 양의 이득의 초기값은  $m_p$ 으로, 음의 이득의 초기값은  $m_n$ 으로 결정하였다. 각 영역의 초기형상은 Fig. 2에 나타내었고, 각 영역에 대한 초기이득비(양의 이득 과 음의 이득의 비율) 및 각 모드별 유도 전하량은 Table 1과 같다.

**Step 3**

초기영역에 속하지 않는 부분, 즉 각 초기영역의 경계에 위치한 영역이 어느 쪽에 포함될지를 선택하여 영역분할을 결정한다.

**Step 4**

Step 3에서 결정된 각 영역에 대해 성능지수 식 (19)를 최대화 하도록 각각의 이득을 최적화한다. 이득의 최적화시 사용한 알고리즘은 **simplex search method**이고, 초기치는 Step 2에서 계산한 값을 사용한다. 양과 음의 이득을 사용하는 경우 두 이득의 절대적 크기보다 두 이득의 비가 중요하므로 양의 이득은 1로 고정하고 음의 이득만을 변화시켜가며 최적 이득을 결정하였다.

**Step 5**

Step 3에서 초기영역에 포함되지 않은 부분을 어느 영역에 포함시킬지를 결정함에 있어 다양한 조합이 가능하다. 따라서 초기영역으로부터 Step 3와 Step 4를 반복하며 성능지수를 최적화하는 영역 분할 및 그에 해당하는 최적이득을 구한다. 다양한

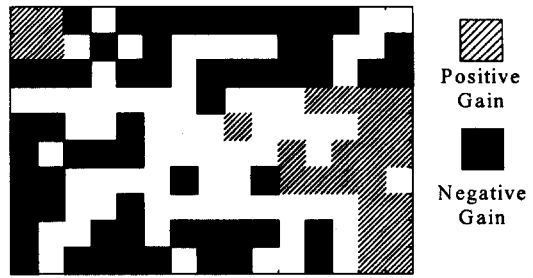


Fig. 3 Optimized segments partition for mode 1-4 sensor (Lamination angle 0°)

영역분할로부터 최적영역분할을 찾는 과정에는 이러한 조합문제에 적합한 유전자 알고리즘[7]을 사용하였다.

Fig. 3은 위의 방법을 통해 최적화된 모달 감지기의 영역분할이고, Table 1에 각 영역에 대한 최적화된 이득비 및 각 모드별 유도 전하량을 나타내었다.

**4.2 적층각의 효과**

압전필름은 전기적으로 이방성이므로, 같은 형상의 변형에 대하여 유도되는 전하량의 분포는 압전필름의 적층각에 따라 변하게된다. 따라서 적층각에 따라 최적화된 모달 감지기의 영역분할 및 이득도 변하게된다. Table 2에 적층각을 각각 15°, 30°, 45°로 고정한 후 4.1절의 최적화 과정을 통해 얻은 각 압전 감지기의 성능지수, 모드별 유도 전하량 및 이득비를 나타내었다. (0°에 관한 결과는 Table 1 참조)

Table 1과 2로부터 적층각이 15°일때 가장 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있다. Fig. 4에 적층각이 15°인 경우의 최적화된 영역분할을 나타내었다

가장 좋은 성능을 보이는 적층각 15°의 경우에 대하여 수치 모사를 통해 주파수 응답 특성을 확인하였다. Fig. 5는 Fig. 4에 표시된 부분을 충격 가진하는 경우 최적화된 감지기의 주파수 응답함수이다.

Table 1. Performance of initial and optimized modal sensor

	Initial	Optimized
mode 1	1.8103e-8	2.2254e-4
mode 2	1.0342e-7	1.7382e-4
mode 3	-1.0388e-7	4.8023e-4
mode 4	3.2104e-7	3.7312e-4
mode 5	-2.3203e-7	1.5149e-6
mode 6	4.0385e-8	-1.1508e-6
mode 7	6.2847e-7	1.5149e-6
mode 8	1.7470e-7	4.5790e-7
Performance Index	0.028805	114.74
Gp/Gn	-0.74416	-0.68035

Table 2. Performance of optimized modal sensors

Lamination angle	15°	30°	45°
mode 1	1.5824e-4	6.5262e-5	6.3261e-5
mode 2	1.2894e-4	1.2659e-4	7.8065e-5
mode 3	1.0445e-4	3.1479e-4	8.0847e-5
mode 4	1.6595e-4	2.4542e-4	1.4379e-4
mode 5	3.7834e-7	-2.8890e-7	-2.2802e-7
mode 6	-4.5403e-7	5.1082e-7	1.1613e-6
mode 7	4.5403e-7	5.1082e-7	-9.7319e-7
mode 8	-7.7882e-8	1.4350e-7	-1.1613e-6
Performance Index	230.05	127.76	54.47
Gp/Gn	-2.1247	-0.9424	-1.0119

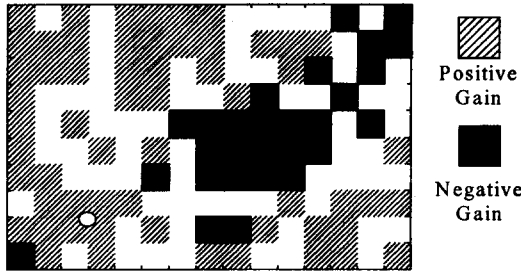


Fig. 4 Optimized segments partition for mode 1-4 sensor (Lamination angle 15°)

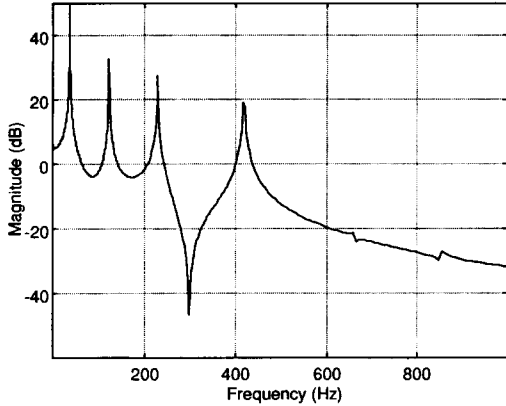


Fig. 5 Frequency response of optimized sensor (Lamination angle = 15°)

위 주파수 응답함수로부터, 설계된 모달 감지기가 1-4 차 모드로부터의 신호에는 잘 반응하는 반면 5 차 이상의 모드로부터의 신호에는 거의 반응하지 않음을 알 수 있다.

#### 4.3 인터페이스 회로

앞 절에서 계산된 최적이득을 실제 구현하기 위하여 0의 이득이 적용되는 부분은 유효전극을 제거하였고, 양의 이득 및 음의 이득이 필요한 부분은 각각 전기적으로 연결한 후 압전필름의 외부에 연결된 인터페이스 회로를 이용하였다. Fig 6은 인터페이스 회로의 구성도이다.

Fig. 6에서  $i$  번째 영역에서 발생하는 전하  $q_i$ 는 전하 증폭기를 통하여 전압 신호로 변환되고, 이

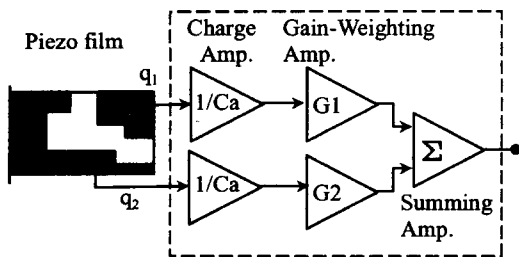


Fig. 6 Interface circuit

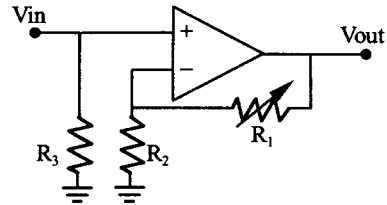


Fig. 7 (a) Non-inverting amplifier

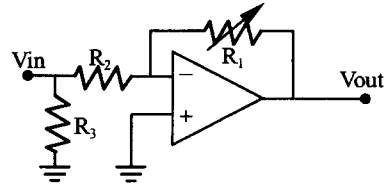


Fig. 7 (b) Inverting amplifier

신호에 다시 전압 증폭기에 의해 모달 감지기를 구현하기 위해 필요한 이득이 가해진다. 양의 이득이 필요한 영역에는 Fig. 7 (a)와 같은 비반전(non-inverting) 증폭기의 가변저항  $R_1$ 의 크기를 조절하여 원하는 이득을 가할 수 있고, 이 때 이득은 식 (20)과 같이 표현된다.

$$V_{out} = (1 + R_1/R_2)V_{in} \quad (20)$$

음의 이득이 필요한 영역에는 Fig. 7 (b)와 같은 반전(inverting) 증폭기의 가변저항  $R_1$ 을 조절하여 원하는 이득을 가할 수 있고, 이 때 이득은 식 (21)과 같다.

$$V_{out} = (-R_1/R_2)V_{in} \quad (21)$$

인터페이스 회로의 구성 예로서, Table 2의 적층각이 15°인 경우 필요한 이득비를 실제 구현하기 위하여 Table 3과 같이 두 전압 증폭기를 설정하였다. 여기서 입력 임피던스인 저항  $R_3$ 는 10M $\Omega$ 으로,  $R_2$ 는 100k $\Omega$ 으로 고정하였다.

Table 3 Gain-weighting amplifier setup

	Amplifier 1	Amplifier 2
Type	non-inverting	inverting
R1	70 k $\Omega$	80 k $\Omega$
Gain	1.7	-0.8
Gp/Gn	-2.125	

#### 5. 결론

임의의 형상 및 경계 조건을 갖는 2차원 구조물에서의 모달 변환기 구현을 위해 요구되는 이득 분포를 유한요소법을 이용하여 구하는 방법을 제시하였다. 2차원 구조물에서 모달 감지기를 구현할 수 있는 실용적인 방법으로 압전 필름의 공간상 영역분할과 각 영역으로부터의 신호에 대한 이득 및 압전 필름의 적층각을 최적화하여 모달 감지기

를 설계하는 방법을 제안하였다. 이는 수학적으로 연속적인 값을 가지는 함수를 몇 개의 이산화된 값으로 근사화하는 과정으로 설명할 수 있다. 영역 분할의 최적화에는 유전자 알고리즘을 이용하였고, 이득의 최적화에는 simplex search method 를 이용하였다. 최적화된 이득은 압전필름의 외부에 연결된 인터페이스 회로를 통해 구현하였다.

설계된 모달 변환기의 성능을 수치 모사를 통해 확인하였으며, 앞으로 실험을 통하여 모달 변환기의 성능을 확인할 예정이다.

## 6. 참고 문헌

- [1] M. J. Balas, "Feedback Control of Flexible Systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.23, No.4, 1978, pp. 673-679.
- [2] L. Meirovitch, and H. Baruh, " The Implementation of Modal Filters for Control of Structures," *Journal of Guidance and Control*, Vol.8, No.6, 1985, pp.707-716.
- [3] C.-K. Lee, "Piezoelectric Laminates: Theory and Experiments for Distributed Sensors and Actuators," *Intelligent Structural Systems*, edited by H. S. Tzou and G. L. Anderson, Kluwer Academic Publishers, 1992, pp.75-167.
- [4] S.E. Burke, and J.E. Hubbard, Jr., "Distributed Transducer Vibration Control of Thin Plates," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol.90, No.2, 1991, pp. 937-944.
- [5] J.-K. Ryou, K.-Y. Park, and S.-J. Kim, "Electrode Pattern Design of Piezoelectric Sensors and Actuators Using Genetic Algorithms," *AIAA Journal*, Vol.36, No.2, pp. 227-233.
- [6] G. Strang, *Linear Algebra and It's Application*, Harcourt Brace & Company, 1988.
- [7] D.E. Goldberg, *Genetic Algorithm in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.