

# 유전 알고리즘을 이용한 다중모드 감지기를 위한 전극의 형상 설계

박철휴<sup>†</sup> · 이기문<sup>\*</sup> · 박현철<sup>\*\*</sup>

## Electrode Shape Design for Multi-Mode Sensors Using Genetic Algorithm

Chul Hue Park, Kimoon Lee and Hyun Chul Park

**Key Words :** Shape Design(형상설계), Genetic Algorithm(유전알고리즘), Multi-mode Sensor(다중모드센서)

### Abstract

This paper presents a new shape design method for the multi-mode sensor that can detect selected multiple modes for the active vibration control of mechanical structures. The structure used for this study is an isotropic cantilever beam type with a PVDF (polyvinylidene fluoride) which is bonded onto the structure as a sensor. Characteristic behaviors of the sensor are related with the electrode shapes of PVDF. The shape optimization problem is solved by defining a new multi-objective function and using the genetic algorithm. Resulting electrode shape functions have good performances to detect the multiple vibration modes. The results of analytical simulations are compared with those of experiment works. The results agree well each other. Hence, the obtained experimental results give evidence for the validity of the presented theoretical analysis of the electrode shape design problem.

### 1. 서 론

구조물에 작동기나 감지기를 장착할 때, 제어적인 관점에서 보면 작동기나 감지기를 구조물에 어느 위치(placement)에 추가하느냐에 따라 가제어성(controllability)과 가관측성(observability) 등이 달라지게 된다. 또한 폐루프(closed loop) 제어에 있어서, 부적절한 작동기와 감지기의 위치 선정은 잉여현상(spillover)[1]등을 유발해 폐루프 제어기의 불안정성(instability)을 야기시키기도 한다. 보(beam)와 같은 구조물의 경우 잉여현상을 없애기 위한 가장 좋은 방법으로 보 자체의 고유의 진동 특성인 모드 형상 함수(mode shape function)를 이용하는 방법이 있다. 압전체를 감지기 또는 작동기로 사용할 경우 압전체의 모양을 2차 미분 모드 형상 함수와 같게 하면 우리가 원

하는 모드만을 제어하거나 감지하는 것이 가능하게 되어서 잉여현상을 방지할 수 있게 된다. Lee와 Moon[2]는 압전 감지기와 작동기가 부착된 보에 대해 모델링한 후에 실험을 수행하였다. 압전 폴리머의 전극형상(electrode shape)이 일종의 공간적 필터(spatial filter) 역할을 한다는 사실이다. 이러한 연구를 기반으로 Hsu[3]등은 보의 음장제어를 수행하였다. Sumali[4] 등은 같은 크기의 압전 폴리머의 배열을 보에 부착시켜서 전기적으로 이득(gain)을 서로 다르게 주고 조정해서 각각의 모드를 개별적으로 감지하는 연구를 수행하였다.

본 논문에선 보 구조물의 두 개 이상의 모드를 감지할 수 있는 다중모드 압전 폴리머 감지기의 전극의 모양을 찾는 문제를 총모드 가관측성을 다변수 다목적함수를 갖는 최적화 문제로 변환한 다음 유전 알고리즘을 이용한 경험적인 탐색 방법을 통해서 설계하는 방법을 제시한다. 여기서 제시한 방법의 정확성을 검증하기 위하여 등방성 알루미늄 외팔보에 압전 폴리머가 부착되어 두개의 층으로 이루어진 실험시편을 이용하여 실험을 수행하였으며, 실험결과를 통해 최적설계로 구한 다중모

<sup>†</sup> 포항공과대학교 기계공학과

E-mail: drparkch@postech.ac.kr

TEL: (054)279-2962 FAX : (054)279-5899

<sup>\*</sup> 포항공과대학교 기계공학과 대학원

<sup>\*\*</sup> 포항공과대학교 기계공학과

드 전극 형상감지기의 성능이 일치함을 확인 하였다.

## 2. 모달 감지기 모델링

### 2.1 모델링

본 연구에서 사용된 시편은 PVDF 와 알루미늄 으로 되어있는 정방성 보로 구성된 2 개의 층 (layer)으로 Fig. 1 에 나타나 있다. PVDF 는 윗면과 아래 면에 두개의 전극을 가지는데, 아래 전극은 접지(ground)로 사용되므로 모두 덮여있고, 위의 전극은 원하는 감지기의 성능을 위해서 다양한 모양을 가진다는 것을 알 수 있다. 이론적인 모델링 을 위해서 베르누이-오일러(Bernoulli-Euler) 보 로 가정하였고, 두 개의 층은 완전하게 붙어있고, 접착층의 두께는 매우 얇다고 가정하고 무시한다.

압전체가 패치로 부착된 보 시스템의 운동방정 식을 유도하기 위해서 에너지 방법중의 하나인 해 밀턴 원리 (Hamilton's Principle)를 이용하였으며, 이 원리를 적용하기 위해서는 먼저 주어진 구 조물의 운동 에너지(kinetic energy)와 위치 에너 지(potential energy)를 구하면 다음과 같다.

$$T = \int_0^L \frac{\gamma}{2} \left( \frac{\partial W}{\partial t} \right)^2 dx \quad (1)$$

여기서,  $W$ 는 보의 횡방향 변위(transverse displacement)이고, 공간변수  $x$ 와 시간변수  $t$ 의 함수이다. 여기서  $\gamma$ 은 단위 길이당 질량으로 식 (2)와 같다.

$$\gamma = \rho_s w_s t_s + \rho_b w_b t_b \quad (2)$$

( $\rho_s, w_s, t_s$ )는 PVDF 층의, ( $\rho_b, w_b, t_b$ )는 보의 밀도, 너비, 두께를 의미한다. 횡방향 하중  $f$ 가 작용할 때의 위치 에너지는 식 (3)과 같다.

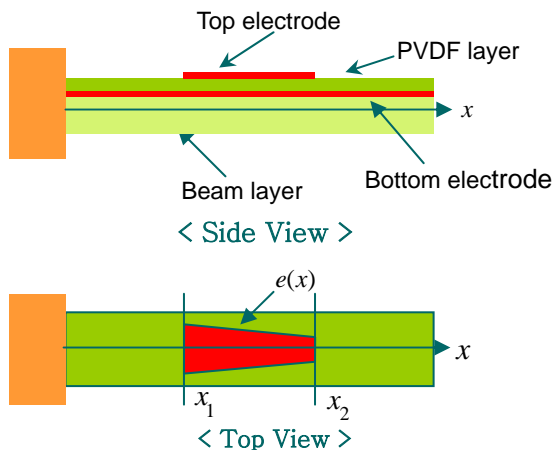


Fig. 1 PVDF-Cantilever Sensor Structure

$$\Pi = \int_0^L \int_{-H/2}^{H/2} \int_0^{\tilde{w}(z)} \int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon dy dz dx - \int_0^L f(x,t)W(x,t)dx \quad (3)$$

$\sigma$  와  $\varepsilon$  는 길이방향 응력(axial stress)과 변형률 (axial strain) 이며, 응력과 변형률의 관계는 식 (4)와 같다.

$$\sigma_b = E_b \varepsilon_b, \quad \sigma_s = E_s \varepsilon_s, \quad \varepsilon = z \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}. \quad (4)$$

중립면의 좌표를 구하게 위해서 중립면의 좌표 도 심을 구하는 식 (5)로 계산한다.

$$\tilde{z} = \frac{\sum \tilde{z}A}{\sum A} = \frac{[\tilde{z}_s \times w_{seq} \times t_s] + [\tilde{z}_b \times w_b \times t_b]}{[w_{seq} \times t_s] + [w_b \times t_b]} \quad (5)$$

$w_{seq}$  는 PVDF 층의 등가 너비이고,  $\tilde{z}_s$  와  $\tilde{z}_b$  는 구 조물의 맨 밑바닥을 0으로 했을 때의 각 층의 중립면의  $z$ 좌표이다. 이 값을 기준으로 각 층의 윗 면과 아랫면의 좌표를 구해서 적분하면 식 (6)과 같이 된다.

$$\Pi = \int_0^L \left[ \frac{D}{2} \left( \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right)^2 - f(x,t)W(x,t) \right] dx \quad (6)$$

$$\text{여기서 } D = \frac{1}{3} \left\{ E_b \bar{w}_b (Z_{ub}^3 - Z_{lb}^3) + E_s \bar{w}_s (Z_{us}^3 - Z_{ls}^3) \right\}$$

이제 여기서 구한 운동에너지와 위치에너지를 식 (7)의 해밀턴 원리[5]에 대입하면,

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (T - \Pi) dt = 0 \quad (7)$$

압전 감지기가 부착된 시스템의 운동방정식을 구 할 수가 있다.

$$\gamma \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( D \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) - f(x,t) = 0, \quad 0 \leq x \leq L \quad (8)$$

### 2.2 모달 운동방정식

주어진 제차(homogeneous) 편미분 방정식을 풀기 위해서 공간 변수와 시간 변수에 대해서 해를 가정하고 변수 분리하고

$$W(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} w_i(x) \eta_i(t) \quad (9)$$

다음의 모드 형상 함수의 직교성을 고려하면,

$$\int_0^L \gamma w_k(x) w_i(x) dx = \delta_{ki}$$

$$\int_0^L w_k(x) D \frac{\partial^4 w_i(x)}{\partial x^4} dx = \omega_i^2 \int_0^L \gamma w_k(x) w_i(x) dx = \omega_i^2 \delta_{ki} \quad (10)$$

구조물의 모달 방정식을 구할 수 있다.

$$\ddot{\eta}_i(t) + 2\xi_i \omega_i \dot{\eta}_i(t) + \omega_i^2 \eta_i(t) = N_i(t) \quad (11)$$

여기서  $N_i(t)$  모달 하중이며 다음과 같다.

$$N_i(t) = \int_0^L w_i(x) f(x, t) dx$$

$$= \int_0^L w_i(x) \delta(x - EP) dx \times u(t) = w_i(EP) u(t) \quad (12)$$

### 2.3 감지기 방정식

보의 변형으로 인해서 발생하는 전하(Charge)는 다음 식으로 표현된다 [6].

$$Q = \frac{K_{31}^2}{g_{31}} z_h \iint \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} dx dy \quad (13)$$

여기서  $z_h$  는 중립을 기준으로 PVDF의 윗면의 좌표값이고,  $K_{31}$  는 길이 방향의 변형률에 의한 두께 방향의 전기-기계적 연성 계수(electro-mechanical coupling constant)이다.  $g_{31}$  는 압전 응력 계수이다. 감지기 전압은 식 (13)을 압전체의 정전용량  $C_p$  으로 나눠 주면 구할 수 있다.

$$V(t) = \frac{t_s K_{31}^2}{p \times (\text{area}) \times g_{31}} z_h \sum_{i=1}^{\infty} \iint \frac{\partial^2 w_i(x)}{\partial x^2} dx dy \eta_i(t)$$

$$= \frac{t_s K_{31}^2}{p \times (\text{area}) \times g_{31}} z_h \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^L \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} e(x) dx \eta_i(t) \quad (14)$$

이 때  $e(x)$ 는 전극의 모양이 길이 방향에 따라서만 변하는 함수이다.

### 2.4 상태공간변환

앞에서 구한 모달 식을 감지기 관점에서 분석하거나, 제어 이론을 적용하기 쉽게 하기 위해서 상태 공간 식으로 변환한다. 모달 방정식 (11)의 항을 이항하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\eta}_i(t) = -\omega_i^2 \eta_i(t) - 2\xi_i \omega_i \dot{\eta}_i(t) + N_i(t) \quad (15)$$

상태 변수로는 식 (16)와 같이 모달 변위와 모달 속도를 사용하면,

$$X = [\eta_1(t) \quad \dot{\eta}_1(t) \quad \eta_2(t) \quad \cdots \quad \eta_n(t) \quad \dot{\eta}_n(t)]^T, \quad (16)$$

$$\dot{X} = [\dot{\eta}_1(t) \quad \ddot{\eta}_1(t) \quad \dot{\eta}_2(t) \quad \cdots \quad \dot{\eta}_n(t) \quad \ddot{\eta}_n(t)]^T.$$

상태 공간식으로 식 (17)와 같이 행렬형태로 표현된다.

$$\dot{X} = AX + Bu(t)$$

$$V = CX \quad (17)$$

여기서  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_1^2 & -2\xi_1 \omega_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega_n^2 & -2\xi_n \omega_n \end{bmatrix},$

$$B = [0 \quad w_1(EP) \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \quad w_n(EP)]^T,$$

$$C = \frac{t_s K_{31}^2}{p \times (\text{area}) \times g_{31}} z_h$$

$$\times \left[ \int_0^L \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} e(x) dx \quad 0 \quad \int_0^L \frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2} e(x) dx \quad \cdots \quad \int_0^L \frac{\partial^2 w_n}{\partial x^2} e(x) dx \quad 0 \right].$$

이 모델링 결과를 이용해서 감지기의 성능을 제어 이론을 이용해서 표현할 수 있고, 감지기의 성능이 변함에 따라 주파수 응답 함수의 변화를 보드(bode) 선도를 이용해서 볼 수 있다.

## 3. 최적화 설계

2 개 이상의 모드를 선택해서 감지할 수 있는 감지기의 전극의 형상을 최적화 문제로 변환하여 설계할 수 있다.

### 3.1 총 모드 가관측성

최적화 문제에서 각 모드의 감지 정도를 나타내는 지수로 총 모드 가관측성이 사용되었다 [7]. 시스템 행렬 A, 입력 행렬 B, 출력 행렬 C가 주어졌다고 하면 감지기의 특성과 관계 있는 A와 C 행렬 만을 이용해서 구할 수 있다. 먼저 A 행렬의 고유 벡터를 구한다.

$$Aq = \Lambda q \quad (18)$$

여기서  $\Lambda$  는 고유치 행렬이고  $q$ 로 고유벡터 이루어진 행렬이다. 이 때  $q$  행렬의  $i$ 번째 열과 C 행렬의  $j$ 번째 행인  $c_j$  를 이용해서 총 모드 가관측성을 식 (19)로 정의 되어진다.

$$h_{ji} = \|c_j\| \cos \phi_{ji} = \frac{|c_j^T q_i|}{\|q_i\|} \quad (19)$$

3.2 변수 선정 및 목적 함수 설계

최적화 문제의 설정을 위해서 먼저 사용될 변수와 목적 함수를 설계해야 한다. 전극의 형상함수  $e(x)$  [식 (17)]를 표현하기 위해서 본 연구에서는 조각(segmented) 감지기를 이용한다. 조각감지기란 모양이 직사각형인 전극을 하고 있는데, 먼저 보의 전구간을 길이방향으로 균등한 가로 길이를 가지고, 각 조각감지기의 너비방향으로의 세로 길이를 다르게 해서, 최종적으로 나오는 신호는 이 감지기들의 신호의 합으로 표현된다고 할 수 있다. 이 때 감지기들의 세로 길이가 의미하는 것은 감지기가 있는 위치에서 신호의 가중치를 의미하고, 이 값이 최적화 문제의 변수로 설정 된다. 만약  $N$ 개의 조각 감지기를 사용할 때, 각 조각 감지기의 세로 길이인  $s_j$ 들이 변수가 되는 것이다. 이렇게 해서 합한 전하는 다음과 같이 표현된다.

$$Q(x,t) = \sum_{j=1}^{i=N} \left[ \frac{K_{31}^2}{g_{31}} z_h s_j \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^L \frac{\partial^2 w_i(x)}{\partial x^2} [H(x-x_{j1}) - H(x-x_{j2})] dx \right] \eta_i(t)$$

$$= \sum_{j=1}^{i=N} \left[ \frac{K_{31}^2}{g_{31}} z_h s_j \sum_{i=1}^{\infty} \left[ \frac{\partial w_i(x_{j2})}{\partial x} - \frac{\partial w_i(x_{j1})}{\partial x} \right] \right] \eta_i(t) \quad (20)$$

여기서  $H(x)$ 는 조각감지기의 특성을 고려하기 위한 히비사이드 계단 함수(Heaviside step function)이다. 그리고  $x_{j1}$ 은  $j$ 번째 조각 감지기의 왼쪽 좌표이고,  $x_{j2}$ 는 오른쪽 좌표이다.

목적함수는 앞에서 정의된 각 모드의 감지지수인 총 모드 가관측성의 함수를 이용하여 식 (21)과 같은 여러개의 모드 감지 지수로 만들어진 하나의 목적함수를 제안한다.

$$J = \frac{\sum Sgmo_i(\bar{S}) \times \prod Sgmo_i(\bar{S})}{\sum NSgmo_j(\bar{S}) \times \prod NSgmo_j(\bar{S})} \quad (21)$$

여기서 Sgmo는 감지하고 싶어하는 모드의 총 모드 가관측성을 말하고, NSgmo는 감지하지 않기를 원하는 모드의 모드 가관측성이다.

4. 유전자 알고리즘

앞에서 정의된 최적화 문제를 풀기 위해서 경험적인 탐색 방법 중의 하나인 유전 알고리즘을 이용하기로 한다[8,9]. 알고리즘에서 변수로 사용되는 개체의 염색체는 앞에서 정의된 각 조각 감지기의 세로 길이가 되어서, 염색체의 길이는 조각 감지기의 수와 같게 된다.

4.1 재생산 연산자

먼저 진화의 제일 첫 세대에서 각각의 개체는 정해진 범위 내에서 난수발생기를 이용해서 초기 값을 정하게 된다. 다음으로 목적함수의 값을 적

합도(fitness)라는 새로운 값으로 바뀌서 비교한다. 사용된 개체 선택 방법으로는 구배법과 유사한 선택 방법을 이용했다. 특정 세대에서  $M$ 개의 개체중  $l$ 번째 개체를 표현하면,

$$\bar{S}_i(k) = [s_{i1} \ s_{i2} \ \dots \ s_{ij} \ \dots \ s_{iN}] \quad (22)$$

이때  $k$ 는 이전 세대를 의미한다 그 개체 중에서 최적의 적합도 함수의 값과 최적의 개체를  $b$ 번째 개체라고 했을 때 다음과 같이 표현한다.

$$\bar{S}_b(k) = \arg \max_{1 \leq i \leq M} [f_i(k)]$$

$$f_b(k) = \max_{1 \leq i \leq M} [f_i(k)] \quad (23)$$

다음으로 선택되어질 개체의 염색체는 최적값과 근접하게 변형되어서 선택되어진다. 개체를 나타내는 벡터의 형태로 다시 표현하면

$$\bar{S}_i(k+1) = (1 - \zeta_i(k)) \bar{S}_i(k) + \zeta_i(k) \bar{S}_b(k)$$

$$\zeta_i(k) = g_{pi} \frac{[f_b(k) - f_i(k)]}{f_b(k)} \quad (24)$$

위 식을 살펴보면 기존의 개체와 최적의 개체의 선형 결합으로 표현하게 된다는 것을 알 수 있다. 이 때  $g_{pi}$ 는 사용자가 적절히 조절하는 값이다.

4.2 교배 연산자

교배과정은 두개의 선택된 개체에서 발생하게 되는데, 교배 방법은 아래 그림과 같이 변형된 1점 교배로 먼저 왼쪽 염색체에서 서로 교환될 교배점을 난수 발생기로 정하게 되고, 염색체의 교배점에서의 불연속성을 줄여주기 위해서 교배점 앞에 있는  $j$ 번째 염색체의 값을 식 (25)과 같이 바꾸어준 후에 오른쪽 그림과 같이 염색체가 변경된다.

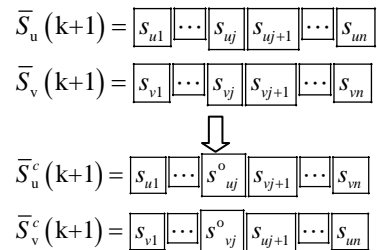


Fig. 2 교배 연산자

$$s_{uj}^o = \nu s_{vj} + (1 - \nu) s_{uj}$$

$$s_{vj}^o = \nu s_{uj} + (1 - \nu) s_{vj} \quad (25)$$

이때  $\nu$ 는 1보다 작은 임의의 값으로 설정해준다.

### 4.3 돌연변이 연산자

이러한 교배의 과정을 거친 후에는 역시 돌연변이 확률에 아래 그림과 같이 주어진 그림 왼쪽의  $i$ 번째 개체의  $j$ 번째 염색체에서 돌연변이를 일으켜서 오른쪽의 개체로 바꿔주는데, 식 (26)을 이용해서 돌연변이된 염색체의 값이 구해진다.

$$\bar{S}_i(k+1) = [s_{i1} \ s_{i2} \ \dots \ s_{ij} \ \dots \ s_{in}]$$

$$\Downarrow$$

$$\bar{S}_i^m(k+1) = [s_{i1} \ s_{i2} \ \dots \ s_{ij}^x \ \dots \ s_{in}]$$

Fig. 3 돌연변이 연산자

$$s_{ij}^x = \begin{cases} s_{ij} + \Delta(K, s_{ij}^{(U)} - s_{ij}), & \text{when } \tau = 0 \\ s_{ij} - \Delta(K, s_{ij} - s_{ij}^{(L)}), & \text{when } \tau = 1 \end{cases} \quad (26)$$

여기서  $\tau$ 는 발생하는 난수에 따라 0 이면 변수의 상한값을, 1 이면 변수의 하한값을 이용하게 된다.  $y$ 는 이 값이 가질 수 있는 최대값이다. 그리고  $\Delta(K, y)$ 는

$$\Delta(K, y) = y \cdot r \cdot \left(1 - \frac{K}{T_G}\right)^d \quad (27)$$

$T_G$ 는 총 세대수이고,  $K$ 는 현재 세대를 말하고,  $d$ 는 사용자에게 의해 적절히 선택되어지는 값이다.

## 5. 실험시편 구성 및 실험 방법

### 5.1 실험시편

감지기의 성능을 검증하기 위해서 전극이 얇게 모두 입혀진 PVDF 을 유전자 알고리즘을 이용하여 최적화한 모양으로 올려내어 보 구조물에 붙여서 실험 시편을 제작하였다. 유전자 알고리즘의 기본 설정 값들은 먼저 변수의 수는 450 개로 했고 각 세대당 개체의 수는 100 개, 최대 진화 세대의 수는 2000 으로 했다. 유전 연산자와 관계된 설정 값들로는 구배를 이용한 선택에 사용되는 식 (24)의  $g_{pi}$ 는 1.7 을 사용하였다. 교배 확률로는 0.9, 돌연변이 확률로는 0.1 을 사용하였다.

Fig. 4 는 인접한 두 개의 모드인 1 차와 2 차를 감지하는 시편이다. 알루미늄 보에 대한 기본적인 물성치인 탄성계수는  $6.8E10$  Pa, 밀도는  $2700$  kg/m<sup>3</sup>, 포아송비는 0.33 이다.

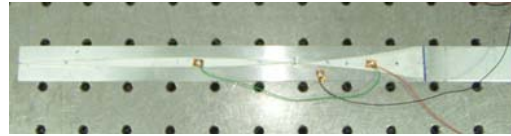


Fig. 4 최적화된 실험시편

그리고 시편의 크기는  $0.237 \times 0.02 \times 0.001$  m 이다. PVDF의 기본적인 물성치인 탄성계수는  $0.2E10$  Pa, 밀도는  $1800$  kg/m<sup>3</sup>, 압전응력상수는  $216E-3$  (m/m)/(C/m<sup>2</sup>), 전기적-기계적 변환상수는 12%이고, 커패시턴스의 투과는  $106E-12$  F/m 이다.

### 5.2 실험장치 및 방법

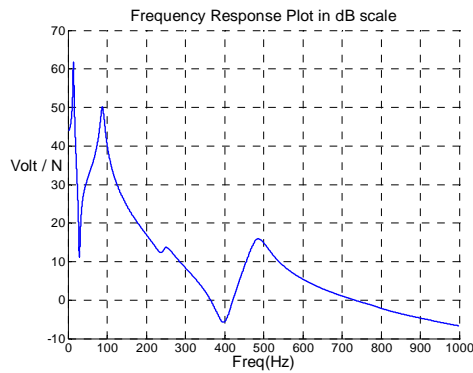
실험은 먼저 보를 가진 시키기 위해서 진동원으로 TIRA사의 Vib5200 Type 전동식 가진기 (electro-dynamic exciter)가 사용 되었다. PVDF 감지기에서 나오는 신호를 주파수 분석하기 위해서 HP3566A인 FFT Analyzer가 사용되었다. FFT 자체에서 모든 모드를 가진할 수 있게 랜덤 (random)신호가 발생하게 되고, 이 신호는 가진기와 FFT로 들어가게 된다. 그리고 이러한 가진으로 인해 보에서 나오는 신호는 FFT에 입력으로 들어가게 되어서 최종적으로 10번의 반복실험을 통해서 노이즈를 제거해서 주파수 분석을 하게 된다. Fig. 5 은 간단한 실험 장치 사진이다.



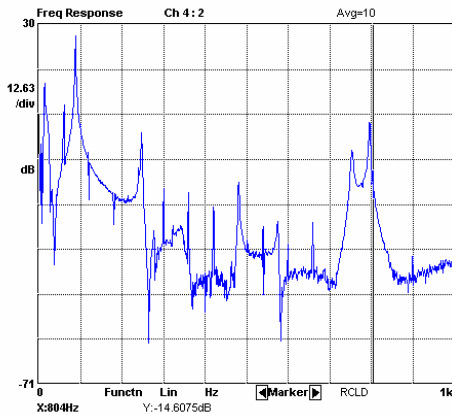
Fig. 5 Test specimen setup.

## 6. 결과 및 고찰

앞의 실험 장치를 통해서 제작된 시편의 [1+2] 모드 감지기에 대한 주파수 응답 그래프를 각각 시뮬레이션과 실험 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 주파수 대역은 0 Hz 에서 1000 Hz 로 보의 5 차 모드까지 고려하여 모델링 되었다. 각 모드의 고유 진동수는 보의 고유진동수인 14.28Hz, 89.5Hz, 250.58Hz, 491.03Hz, 811.76Hz 와 거의 비슷했는데, 이는 PVDF 의 두께가 미치는 영향이 적다는 사실을 알 수 있다.



(a)



(b)

**Fig. 6** FRF of the [1+2] optimized mode sensor.  
(a) analytical (b) experimental result.

인접한 두개의 모드인 1 차와 2 차를 감지하는 감지기에 대한 성능 비교를 위해서 각 모드의 진폭을 살펴보았다. 각 모드의 진폭은 1 차 부터 5 차까지의 진폭은 13.54dB, 26.83dB, -0.32dB, -14.30dB, 2.65dB 이다. 1 차와 2 차 모드의 진폭이 다른 모드에 비해 크기는 약 30dB, 작게는 약 13dB 의 뚜렷한 차이를 보인다는 사실을 알 수 있다. 그러나 이론적인 결과와 비교해볼 때 실험결과에서 5 차 모드의 진폭이 다소 높게 나타남을 알 수 있는 데 이는 시편 제작시에 나름대로 정확하게 모양을 올려낼려고 노력했지만 정확한 모양으로 만들어지지 않았던 점이 원인이 될 수 있으며, 오차가 적은 모양으로 올려내어 졌다고 하더라도 PVDF 조각을 붙이는 과정에서 다른 오차가 생겨서 감지기의 성능에 영향을 줄 수도 있다고 생각된다.

## 7. 결 론

본 논문에선 PVDF 가 부착된 외팔보 형태의 다중 모드 압전 폴리머 감지기의 전극의 모양을 찾는 문제를 총모드 가관측성을 다변수 다목적함수를 갖는 최적화 문제로 변환한 다음 유전 알고리

즘을 이용한 경험적인 탐색 방법을 통해서 설계하는 방법을 제시했다. 여기서 제시한 방법의 정확성을 검증하기 위하여 등방성 알루미늄 외팔보에 PVDF 부착된 실험시편을 이용하여 실험을 수행하였으며, 실험결과를 통해 최적설계를 통하여 구한 다중모드 전극 형상감지기의 성능이 일치함을 확인 하였다. 그러므로 본 논문에서 제시한 감지기는 실제 진동제어 시스템이나 MEMS 구조물등 다중 모드 감지기로 사용된다면 좋은 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- (1) Balas M. J., 1978, "Feedback Control of Flexible Systems," *IEEE Trans. Auto. Contr.*, Vol. 23, pp. 673-679.
- (2) Lee C. K. and Moon F. C., 1990, "Modal sensors/actuators", *J. Appl. Mech. Am. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 57, pp. 434-441.
- (3) Hsu, C., Lin C. and Gaul, L., 1998, "Vibration and Sound Radiation Controls of Beams Using Layered Modal Sensors and Actuators," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 7, pp. 446-455.
- (4) Sumali, H., Meissner, K., Cudney H., 2001, "A Piezoelectric Array for Sensing Vibration Modal Coordinates," *Sensors and Actuators A*, Vol. 93, pp. 123-131.
- (5) Meirovitch, L., 1997, *Principles and Techniques of Vibrations*, Prentice-Hall, Inc. NJ.
- (6) Pota H. R. and Alberts T. E., 1995, "Multivariable Transfer Functions for a Slewing Piezoelectric Laminated Beam," *Trans. of the ASME J. of Dyn. Syst. Meas. And Contr*, Vol. 117, pp. 352-359.
- (7) Hamdan A. M. and Nayfeh A. H., 1989, "Measure of Modal Controllability and Observability for First- and Second-order Linear System", *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 12(3), pp. 421-428.
- (8) Goldberg D. E., 1989, *Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley.
- (9) K. G. Jin, 2002, *Genetic Algorithms and Their Applications*, Kyo Woo Sa.