

분포형 압전 필름 감지기와 압전 세라믹 작동기를 이용한 보의 진동 제어

°박 근영¹, 유 정규², 김 승조³

Vibration Control of Beam using Distributed PVDF sensor and PZT actuator

Keun-Young Park, Jung-Kyu Ryu, and Seung-Jo Kim

Abstract

Distributed piezoelectric sensor and actuator have been designed for efficient vibration control of a cantilevered beam. Both PZT and PVDF are used in this study, the former as an actuator and the latter as a sensor for our integrated structure. For the PZT actuator, the position and size have been optimized. Optimal electrode shape of the PVDF sensor has been determined. For multi-mode vibration control, we have used two PZT actuators and a PVDF sensor. Electrode shading of PVDF is more powerful for modal force adjustment than the sizing and positioning of PZT. Finite element method is used to model the structure that includes the PZT actuator and the PVDF sensor. By deciding *on* or *off* of each PZT segment, the length and the location of the PZT actuator are optimized. Considering both of the host structure and the optimized actuators, it is designed that the active electrode width of PVDF sensor along the span of the beam. Actuator design is based on the criterion of minimizing the system energy in the control modes under a given initial condition. Sensor is designed to minimize the observation spill-over. Modal control forces for the residual(uncontrolled) modes have been minimized during the sensor design. Genetic algorithm, which is suitable for this kind of discrete problems, has been utilized for optimization. Discrete LQG control law has been applied to the integrated structure for real time vibration control. Performance of the sensor, the actuator, and the integrated smart structure has been demonstrated by experiments.

1. 서론

최근 들어 압전 재료가 능동 진동 제어의 감지기, 작동기로 흔히 쓰이고 있다. 이 중 압전 세라믹(PZT)과 압전 필름(PVDF)의 사용이 가장 많다. PZT는 PVDF에 비하여 큰 작동력을 낼 수 있는 장점으로 인하여 상대적으로 더 많은 연구가 행해졌다. PZT 감지기, 작동기에 대한 연구는 주로 대상 구조물의 효율적인 진동 제어를 위한 PZT의 위치나 크기 설정[1]에 대하여 이루어졌다. 이에 비하여 PVDF에 대한 연구는 전극 형상을 이용하여 원하는 성능을 가지는 감지기, 작동기를 설계

하는 데에 관심이 집중되어 왔다. Lee는 1 차원 구조물에서 전극의 폭을 이용하여 특정 모드만을 감지, 작동할 수 있는 모달 감지기, 작동기(modal sensor, actuator)[2]를 제안하였다. 이 모달 감지기, 작동기는 Bailey 등이 제안한 분포형 감지기, 작동기[3]의 일종이라고 할 수 있다.

본 연구는 작동기로서는 PZT를 사용하고 감지기로서는 PVDF를 사용하여 다수의 모드를 제어하는 것에 목적을 두고 있다. 작동기 설계는 genetic algorithm[4]을 이용하여 원하는 모드들에 대하여 제어 효과를 최대화하는 방향으로 이루어졌다. 한편 감지기 설계의 경우 복수의 제어 대상 모드를 감지하면서 제어 모드에 인접한 비제어 모드들에 스필 오버[5]가 일어나지 않도록 하였다. 압전 감지기, 작동기를 포함한 구조물을 유한 요소법을

1 : 정희원, 현대자동차(주) 승용 1 연구소

2 : 서울대학교 항공우주공학과 대학원

3 : 정희원, 서울대학교 항공우주공학과

사용하여 모델링하고, 쇠적화 기법을 사용하여 감지기, 작동기를 설계하였다. 설계된 감지기, 작동기를 시편으로 제작하여 실험을 통하여 성능을 확인하였다.

2. 시스템 모델

압전 감지기, 작동기를 포함하는 구조물을 유한 요소법을 사용하여 모델링하였다. 각 요소별로 Fig. 1과 같은 자유도를 가진다. 여기에서 w 는 수직 방향의 변위, $\theta = \frac{\partial w}{\partial x}$, u 는 수평 방향의 변위이고, 전단 변형은 무시한다. u 는 PZT를 한 쪽에만 부착하였을 경우와 같이 비대칭인 경우를 위하여 도입한다. 변위와 변형률을 아래와 같이 보간하면,

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_z \end{bmatrix} = N u \quad (1)$$

$$\varepsilon_x = B u$$

시스템의 질량과 강성 행렬은 다음과 같다.

$$M = b \int_L \rho N^T N dx dz \quad (2)$$

$$K = b \int_L Y B^T B dx dz$$

여기에서 b , t , L 은 각각 보의 폭, 두께, 길이이고, ρ 는 질량 밀도, Y 는 Young's modulus이다.

i 번째 PZT에 의한 작동력은

$$B_{PZT}^{(i)} = b \int_t \int_L e_{31} B^T / t^{(i)} dx dz \quad (3)$$

이다. PZT의 크기와 위치를 연속적인 변수로 사용하는 대신에 Fig. 2와 같이 보 구조물에 가상의 PZT 조각을 분포시킨 후, 각 조각의 on, off를 결정하여 압전 작동기를 설계한다. 이 때 on인 영역은 PZT를 부착하고, off인 영역은 PZT를 부착하지 않는다. 이 조각들이 이루는 작동기에 의한 작동력은 다음과 같다.

$$B_{PZT} = \sum_i S_{PZT}(i) B_{PZT}^{(i)} \quad (4)$$

여기에서 $S_{PZT}(i) = \begin{cases} 1, & \text{if the PZT segment is on.} \\ 0, & \text{if the PZT segment is off.} \end{cases}$

예를 들어 Fig. 2에서와 같이 조각 ①, ②, ③은 on으로, ④는 off로 결정되었다면, 압전 작동기는 영역 ①, ②, ③에 부착되고, 이 작동기에 의한 작동력은

$$B_p = 1 \times (B_p^{(1)} + B_p^{(2)} + B_p^{(3)}) + 0 \times B_p^{(4)} \quad (5)$$

위의 S_{PZT} 가 압전 작동기 설계 시에 설계 변수로 쓰이고, 따라서 작동기 설계는 각 조각의 on, off를 결정하는 이산화된 문제이다.

다음으로 PVDF의 경우에는 압전 감지기의 전극 형상이 설계 변수로 쓰인다. 이를 위하여 전극 형상을 Fig. 3과 같이 하나의 유한 요소에 대하여 4개의 전극 폭(S_1, S_2, S_3, S_4)으로 보간한다. 이 전극의 폭은 보 구조물 전체의 폭인 b 를 넘을 수 없고, 전극 폭이 음수인 경우는 그 부분만이 부호가 반대로 극화(poling)된 경우이다. 실제로 부분적으로 반대로 극화시키기는 어려우므로 그 부분만 압전 필름을 뒤집어서 부착한다.

즉 PVDF 감지기의 유효전극 폭 $b(x)$ 를 아래와 같이 보간하면,

$$b(x) = N_s S \quad (6)$$

이 감지기에 의한 작동력은

$$B_{PVDF}^{(i)} = N_s S \int_t \int_L e_{31} B^T / t^{(i)} dx dz = HS \quad (7)$$

이다. 여기에서 S 는 이산화된 압전 감지기의 전극 형상을 나타내는 벡터이다. Reciprocity에 의해서 변형 u 에 의하여 이 감지기에 발생하는 전하량은

$$q = B_{PVDF}^T u = (HS)^T u \quad (8)$$

이다.

이상으로부터 압전 작동기와 감지기를 부착한 전체 시스템은 다음과 같다. 압전 감지기의 끝단에는 전하 증폭기(charge amplifier)가 부착되어 있다.

$$M \ddot{u} + K u = B_{PZT} V_{PZT} \quad (9)$$

$$y_{ca} = \frac{1}{C_a} B_{PVDF}^T u$$

여기에서 V_{PZT} 는 압전 작동기에 가해진 전압, y_{ca} 는 전하 증폭기의 출력, $1/C_a$ 는 전하 증폭기의 이득이다. 위의 시스템은 몇 개의 저차 모드들로 모드 축약(modal reduction)이 되어서 제어기 설계에 사용된다. 이 때에 고려된 제어 모드(control mode)들과 인접한 잔류 모드(residual mode)들이 능동 제어에 의해서 불안정해지는 스플 오버(spill-over)가 발생할 수 있으므로 이에 대한 고려가 감지기 설계 시에 요구된다.

3. 쇠적화

수치해석과 실험을 위한 시편의 형상 및 사용된 물성치는 각각 Fig. 4 및 Table 1과 같다. PVDF, PZT 및 주 구조물의 두께는 각각 $254\mu m$, $52\mu m$, $3mm$ 이다. 이 보의 1차와 2차 모드가 제어 모드로 선택되었다. 보 전체를 20개의 유한 요소로 나누었으므로 PZT 작동기의 설계 변수는 20개이고,

PVDF 감지기의 설계 변수는 $20 \times 3 + 1 = 61$ 개이다.

3.1 PZT 작동기 설계 및 결과

전술한 바와 같이 작동기 설계는 각 조각의 on, off를 결정하는 이산화된 문제로 genetic algorithm이 최적화 기법으로 사용되었다. 성능 지수로 다음과 같이 페루프 시스템의 에너지가 사용되었다.

$$J = E(0) / \int_0^{\infty} (\dot{\eta}_c^T \dot{\eta}_c + \eta_c^T \Lambda_c \eta_c + \rho V_{PZT}^T V_{PZT}) dt \quad (10)$$

여기에서 $E(0)$ 은 시스템의 초기 에너지, η_c 는 제어 모드로 이루어진 벡터, $\Lambda_c = \text{diag}(\omega_1^2, \dots, \omega_n^2)$, ρ 는 제어 신호에 대한 가중치이다. 위의 초기 에너지를 각 모드별로 조절함으로써 각 모드에 가중치를 줄 수 있다. 즉 초기 조건이 1 차 모드로만 이루어져 있다면 설계된 결과는 1 차 모드에 대하여 위의 성능 지수에 의거해 최대의 효과를 발휘하는 작동기가 된다.

설계 결과의 한 예로 Fig. 4의 형상은 압전 작동기의 길이를 전체 길이의 1/4로 제한하고 두 개의 압전 작동기를 부착, 1 차와 2 차 모드에 대하여 같은 양의 초기 에너지를 주었을 때의 설계 결과이다. 즉 설계 결과로 다음과 같은 배치가 얻어진다.

$$S_{PZT} = \underbrace{111111}_{\text{Actuator\#1}} \underbrace{011111}_{\text{Actuator\#2}} 000000000$$

3.2 PVDF 감지기 설계 및 결과

압전 감지기 설계시에는 전술한 스필 오버에 대한 고려가 추가된다. 즉 다음과 같이 제어 대상 모드(1 차 및 2 차)에 대해서는 모드별 제어력을 최대화하고, 인접한 비제어 모드들(3-5 차)에 대해서는 모드별 제어력을 최소화한다.

$$J = -\min(|\Phi_c^T B_{PVDF}|) + \max(|\Phi_u^T B_{PVDF}|) \quad (11)$$

여기에서 $\Phi_c^T B_{PVDF}$ 및 $\Phi_u^T B_{PVDF}$ 는 제어 모드 및 비제어 모드에 대한 모드별 제어력으로 reciprocity에 의해서 해당 모드에 대한 제어력이 를 경우 그 모드에 대해 감지기에 발생하는 전하량도 커지게 된다. 즉 제어를 원하는 모드에 대해서는 감지기의 출력이 가능한 한 크면서 인접한 비제어 모드에 대해서는 가능한 한 작은 신호가 나오도록 최적화를 수행한다. 최적화 방법으로는 SQP가 사용되었다. 제어 모드를 한 모드만 취하고 비제어 모드를 다른 모든 모드로 한 경우가 모달 감지기라고 할 수 있다. Fig. 5는 설계 결과로 얻어진 감지

기의 전극 형상을 나타낸다. Table 2의 모드별 제어력 표를 보면 감지기의 경우 3-5 차 모드의 제어력이 1, 2 차 모드에 비하여 현저히 작다는 것을 알 수 있다.

4. 실험 및 결과

설계된 압전 감지기, 작동기의 특성을 확인하여 Fig. 6과 같은 실험을 수행하였다. 사용한 전하 층 폭기의 이득은 후 10^8 Volt/Farad이고, 알리아싱(aliasing)을 막기 위하여 차단 주파수(cut-off frequency) 380Hz의 Butterworth 필터를 사용하였다. 충격 해머(impact hammer)로 정해진 위치를 타격한 후 이에 대한 PVDF 감지기의 반응의 전달 함수를 개루프 및 페루프에 대하여 구하였다. 제어 법칙으로는 LQG를 사용하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 개루프 및 페루프의 전달 함수와 시간 응답들이다. 우선 개루프의 반응으로부터 1 차 및 2 차 모드에 비하여 3 차 모드의 감지기 출력이 20dB 정도 작다는 것을 볼 수 있다. 또, 능동 제어에 의하여 1 차 및 2 차는 20에서 30 dB 정도로 감소하였고 3 차 모드에 스필 오버가 일어나지 않는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 PZT를 작동기로, PVDF를 감지기로 사용하여 진동 제어를 행하였다. 작동기는 genetic algorithm을 이용하여 위치 및 크기를 결정하였고, 감지기는 SQP를 사용하여 전극의 형상을 결정하였다. 실험 결과를 통해서 설계된 감지기가 비제어 모드로부터의 신호를 효과적으로 차단하며, 감지기, 작동기 설계 결과의 타당성을 확인할 수 있었다.

6. 참고 문헌

1. S. Devasia, T. Meressi, B. Paden, and E. Bayo, "Piezoelectric Actuator Design for Vibration Suppression: Placement and Sizing," *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol.16, No.5, 1993, pp.859-864.
2. C.K. Lee, "Piezoelectric Laminates : Theory for Distributed Sensors and Actuators," *Intelligent Structural Systems*, edited by H.S. Tzou, G. L. Anderson, Kluwer Academic Publishers, 1992, pp. 75-

- 167.
3. T. Bailey and J.E. Hubbard, Jr., "Distributed Piezoelectric Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam," *J. Guidance, Control, and Dynamics*, Vol.8, No.5, 1985, pp.605-611.
 4. David E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search,*
 - Optimization & Machine Learning, Addison-Wesley, 1989.
 5. Mark J. Balas, "Feedback Control of Flexible Systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-23, No. 4, 1978, pp. 673-679.

Table 1 Material properties used

	Density (Kg/m ³)	Young's Modulus (GPa)	d ₃₁ (m/V)
PZT	7700	61	171e-12
PVDF	1780	3	23e-12
AL2024-T3	2767.5	72.3	N/A

Table 2 Modal forces per unit voltage of actuator and sensor design results

	PZT Actuator #1	PZT Actuator #2	PVDF Sensor
1st Mode	1.34e-2	6.90e-3	-1.27e-4
2nd Mode	-4.01e-2	5.45e-2	-3.07e-4
3rd Mode	3.00e-2	-8.41e-2	9.39e-9
4th Mode	-5.18e-2	1.80e-1	1.57e-8
5th Mode	1.61e-1	-3.07e-1	-1.57e-8

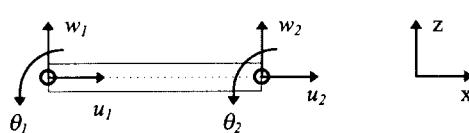


Fig. 1 DOFs at a nodal point

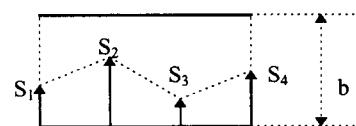


Fig. 3 Interpolation of the electrode width

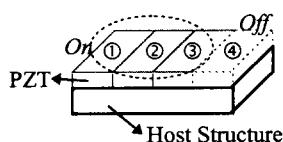


Fig. 2 A beam structure with PZT segments

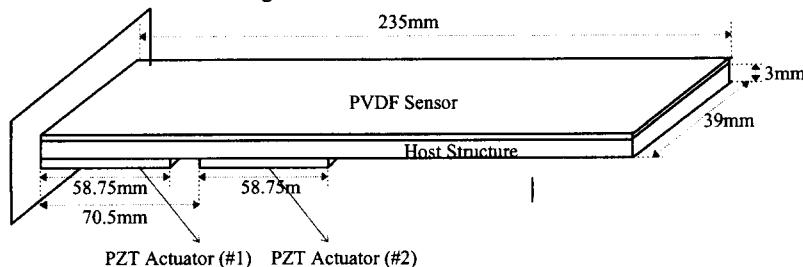


Fig. 4 Dimension of the specimen used and actuator design result

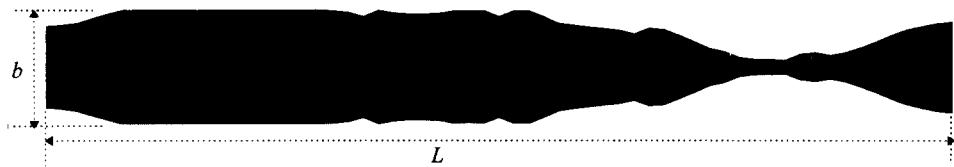


Fig.5 Electrode shape of the sensor design result

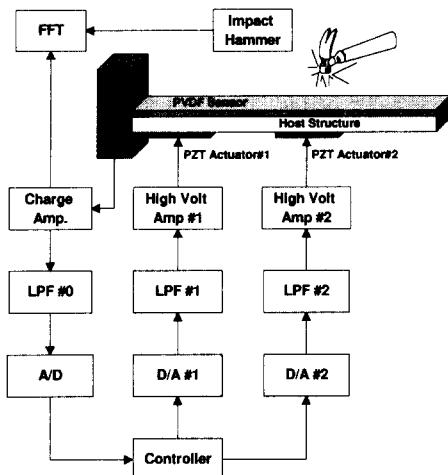


Fig. 6 Experimental Setup

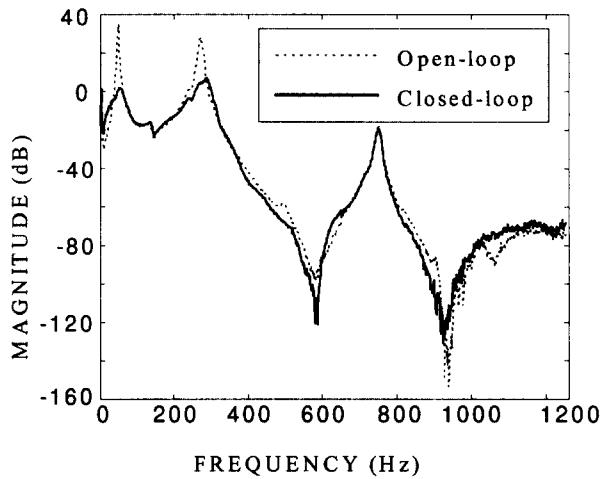


Fig. 7 Open-loop and Closed-loop Transfer Function

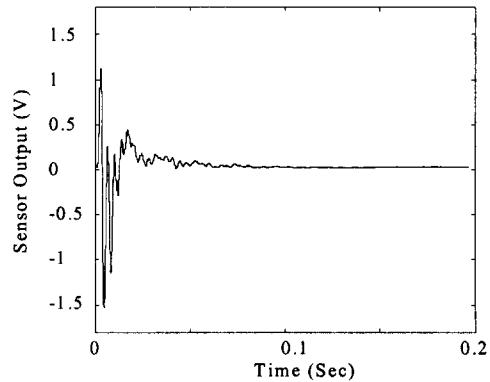
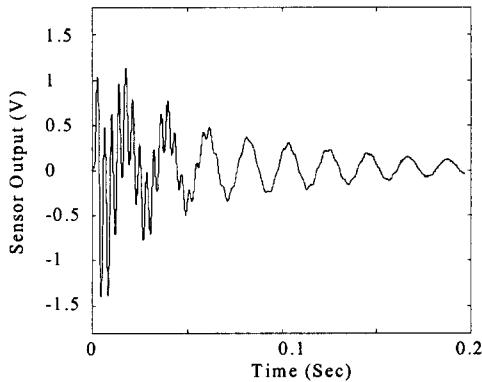


Fig. 8 Open-loop and Closed-loop time response