

# 압전세라믹을 이용한 지능구조물의 제작 및 성능실험

°허석\*, 꺾문규\*\*

## Making of Smart Structures by means of Piezoceramics and its performance tests

Seok Heo and Moon Kyu Kwak

### Abstract

This paper is concerned with the making of smart structures by means of piezoceramic wafers and its performance tests. It is also concerned with the implementation of the PPF controller by using the quad operational amplifier, which includes the charge and bridge amplifiers. The problems regarding the implementation of the piezoceramic sensors and actuators are discussed. The experimental process for smart structures is explained in detail. The technology demonstration which can show the effectiveness of smart structure technology is built up. Experimental results will follow.

### 1. 서론

지능 구조물은 분포된 감지기와 작동기, 그리고 이들을 이용하여 진동제어를 성취할 수 있는 마이크로 프로세서를 자체적으로 보유한 구조물을 가리킨다. 개념적으로는 구조물 자체가 능동적으로 상황에 대처할 수 있는 구조물을 의미한다. 이들 재료들은 구조물의 표면에 부착되거나 부재 형태로 삽입되어 감지기 또는 작동기의 역할을 수행한다. 전통적으로 구조물의 감지장치로 사용되어 왔던 스트레인 게이지(strain gage)나 가속도계 외에 압전폴리머(polymeric piezoelectric polyvinylidene fluoride, PVDF)가 이론적으로만 구현되었던 분포 감지기로서의 역할을 담당하게 되었고 부저나 스

피커로 사용되던 압전세라믹 또한 감지기로써 사용될 수 있음을 알게 되었다. 압전폴리머와 압전세라믹은 복합재료의 층안에 삽입할 수 있어 구조물과 감지기 및 작동기가 하나로 된 지능 구조물의 제작이 가능하게 되었다. 이외에 감지기와 작동기로써 여러 가지 형태의 재료가 사용되고 있는데 형상기억합금, electrostrictive materials, magnetostrictive materials, fiber optics, electro-rheological fluids 등이 대표적이며 간편성과 효율성을 고려할 때 압전세라믹을 많이 사용하고 있다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 재료의 극성 방향과 같은 방향으로 외부 전압을 걸어 주면 극성축 방향으로의 인장변형이 일어나고 그 수직방향으로는 수축을 한다. 외부의 전압방향을 역으로 하면 변형의 방향도 모두 반대로 된다.

\*동국대학교 기계공학과 대학원

\*\*동국대학교 기계공학과 교수

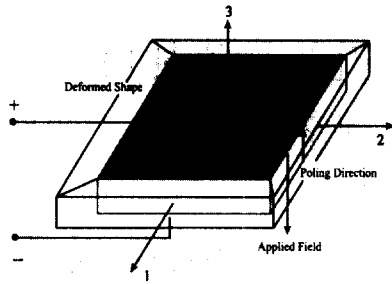


Fig. 1 Piezoelectric Actions from Applied Voltages

이를 Fig 2 에서 개략적으로 보여주고 있다.

Fig. 3 은 기계적인 에너지를 가하여 재료를 변형시키면 전기 에너지가 발생하는 현상을 보여주고 있다.

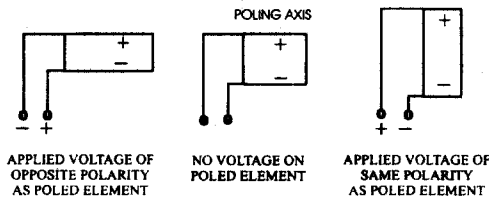


Fig. 2 Piezoelectric Actions from Applied Voltages

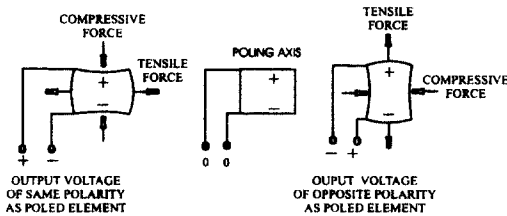


Fig. 3 Piezoelectric Voltages from Applied Forces

그러므로 압전재료(Piezoelectric Material)는 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 변환할 수 있어 작동기로 사용할 수 있고 반대로 기계적인 변형을 전기적인 신호로 변환할 수 있어 감지기로도 사용할 수 있다. 압전재료 중 가장 보편적으로 사용되는 재료는 압전세라믹 판이다. 압전세라믹을 감지

기나 작동기로 사용하는 경우 세라믹 자체가 부서질 수 있고 또한 과도한 하중이 구조물에 걸렸을 경우 작동기나 감지기 자체가 파손될 수 있다는 가능성이 있어 압전세라믹의 부착 시 특별한 주의가 요구된다.

압전재료에 가하여지는 전압과 수직응력에 의하여 발생하는 수직 변형도와 전하 밀도의 관계는 일반적으로 식(1)과 같이 표현하고 있다.[1]

$$\epsilon_p = S_{pq}^E \sigma_q + d_{ip} E_i : p, q = 1, \dots, 6 \quad (1)$$

$$D_i = d_{iq} \sigma_q + \epsilon_{ik}^0 E_k : i, k = 1, 2, 3$$

여기서  $\epsilon_p$  : 수직 변형도 (normal strain)

$\sigma_p$  : 수직 응력도 (normal stress)

$E_i$  : 전기장 (electric field)

$D_i$  : 전하 밀도

(charge density or electric displacement)

$d_{ip}$  : 압전 변형 상수

(piezoelectric strain constants)

$\epsilon_{ik}^0$  : 부전도 계수

(dielectric permittivity matrix)

즉, 변형도와 전하 밀도는 압전재료에 가하여지는 응력과 전기장의 크기에 비례함을 의미한다. 예를 들어, 두께가  $h_3$  인 압전재료에서 3축 방향으로만 전압이 작용하고 외부 응력은 없을 경우, 1축 방향으로 발생하는 변형도는 식(2)와 같이 표현된다.

$$\epsilon_1 = d_{31} E_3 = \frac{d_{31} V}{h_3} \quad (2)$$

이 부착 변형도는 압전재료의 탄성계수와 면적이 곱하여지면, 압전재료가 어떠한 주 구조물에 부착되었을 경우, 구조물을 변형시키는 작동력이 된다.

압전세라믹은 박판형태로 제공되는데 이 것을 구조물에 경화용 에폭시를 이용하여 접착한다. 압전세라믹이 충격에 약한 구조로 되어 있어 취급에 주의를 하여야 한다. 경화용 에폭시는 시중에 5분, 90분, 6시간 등 여러 종류가 유통되고 있는데 본 실험실에서는 90분 에폭시를 사용하였다. 압전세라

믹판을 구조물에 접착하는 경우 재사용이 불가능하기 때문에 작동기와 감지기의 위치 선정에 주의하여야 한다.

압전세라믹을 부착할 대상인 구조물은 알루미늄, 강판, 또는 탄소섬유 복합재료로 이루어질 수 있는데 이 경우 표면이 전기적으로 도체이기 때문에 전기적인 문제가 발생할 수 있다. 일반적으로 압전세라믹 작동기의 경우 접착부분이 구조물과 전기적 성질을 공유하게 만들고 공유부분을 접지로 활용하였다. 감지기는 구조물과 접지를 공유하게 되면 작동기의 접지와도 연결이 되어 폐회로 제어 시스템을 구성하였을 때 감지기에서 구조물의 변형을 측정하지 못해 감지기로서의 역할을 할 수 없기 때문에 구조물과 전극을 분리해 사용하였다.

특히 구조물을 복합재료로 만드는 경우 절연성이 우수한 유리섬유 프리프레그 1장을 적층하여 한 면을 부도체로 만들고 이 면에 압전세라믹을 접착하여 감지기와 작동기를 구조물로부터 격리하는 방법이 적당하다. 이때 접착면의 전극을 위해 통전 에폭시와 동테이프를 사용하였다.

일반적으로는 두 개의 압전세라믹 평판을 구조물의 양면에 부착하고 이를 연결하여 하나의 작동기로 사용하는 것이 작동기의 힘을 배가하고 구조물의 대칭성을 유지하는 좋은 방법이다. 압전세라믹 감지기의 감도가 좋기 때문에 상대적으로 작은 압전세라믹 판을 사용하고 반대편에 같은 크기의 압전세라믹 판을 부착하여 구조물의 진동 성능 시험판으로 사용하는 것이 바람직하다.

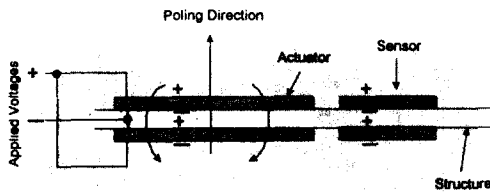


Fig. 4 Bonding of Piezoceramic Actuators and Sensors

Fig. 4는 복합재 외팔보에 두 개의 압전세라믹 작동기를 부착하고 한 개의 작동기로 동작하도록 연결하는 방법을 보여주고 있는데 이 경우 극방향으

로 전압이 가해졌을 때 Fig. 4 에서 보듯이 윗면의 압전세라믹 판은 인장을 하고, 아래 면의 압전세라믹 판은 압축을 하게 되어 전체적으로 굽힘이 유발할 수 있다.

Fig. 5 는 이런 방식으로 제작된 지능 구조물의 개략도를 보여주고 있다.

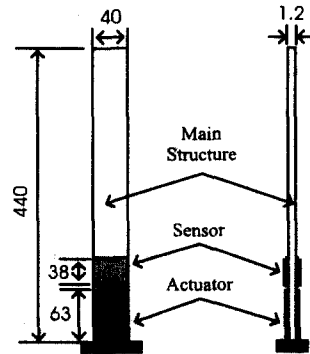


Fig. 5 Schematic of Smart Structure.

압전재료가 구조물과 결합된 시스템에 대한 해석은 Crawley등[3,4], Hanagud등[5]의 연구 결과를 참조하기 바람에 이외에도 여러 가지 경우에 대한 모델화기법과 제어기법에 관한 연구결과 [6,7,8]를 참조하기 바란다.

## 2. 제어기 설계 및 제작

압전세라믹 판을 복합재 보에 부착하여 만든 간단한 지능구조물에 대하여 능동진동제어의 성능을 손쉽게 보여줄 수 있는 제어기를 제작하였다.

먼저 압전세라믹 감지기의 전하신호를 전압으로 변환하기 위한 전하앰프가 필요한데 이를 위하여 OP Amp를 이용하여 Fig.6과 같은 회로를 구성하였다. 전하앰프는 사실상 고주파통과필터로서 주파수 특성을 조사하기 위해서 전하앰프의 입력단자에 압전세라믹 감지기를 직렬연결하고 FFT 신호분석기를 사용하여 주파수 특성을 구하면 된다. Fig. 6은 사용된 전하앰프 회로도이다. 전하앰프에 대한 입력력 관계식은 (3)과 같다. 실제회로에서는  $R_c$  는 10 M $\Omega$ ,  $C_c$  는 10 nF 이 사용되었다.

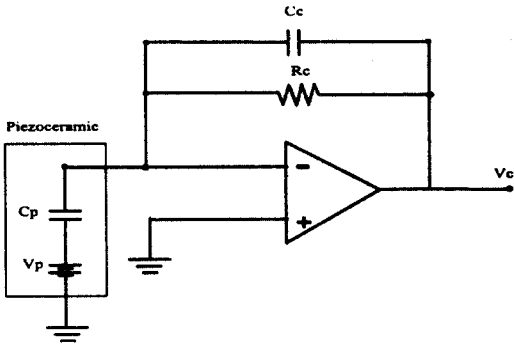


Fig. 6 Charge Amplifier

$$V_c = -\frac{C_p}{C_c} \frac{S V_p}{S + 1/R_c C_c} \quad (3)$$

전하앰프를 통해서 나온 출력 값은 PPF 제어기로 입력되는데 PPF 제어기는 실제로 저주파수 통과 필터와 동일한 형태로 이루어져 있다. PPF 제어기의 적용은 저주파수 통과 필터의 필터주파수를 구조물의 고유 진동수에 맞추어 90도 위상각을 줄수 있게 되어 능동감쇠효과를 줄 수 있게 된다. Fig. 7은 PPF 제어기 회로, 즉 저주파수 통과 필터를 나타낸다. 앞에서 설명한 지능구조물의 고유진동수에 맞추고 약간의 변화를 줄수 있게 만들기 위하여  $R_1$  은 5 M $\Omega$ ,  $R_2$  는 1 M $\Omega$  trimpot,  $C_1$  은 100 nF,  $C_2$  는 1 nF을 사용하였다. Fig. 7의 회로에 대한 입출력의 관계식은 (4)와 같이 유도된다.

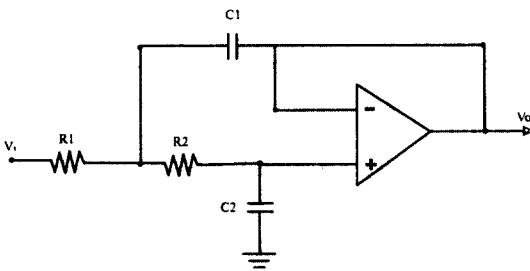


Fig. 7 Low-pass Filter (PPF controller)

$$V_o = \frac{V_i}{C_1 R_1 C_2 R_2} \times \frac{1}{S^2 + \frac{C_2(R_1 + R_2)}{C_1 R_1 C_2 R_2} S + \frac{1}{C_1 R_1 C_2 R_2}} \quad (4)$$

저주파수 통과 필터에서 나온 출력 값은 압전세라믹 작동기를 구동하는데 있어 전압값이 작기 때문에 증폭앰프를 이용하여야 한다. 그러나 본 실험에서는 압전세라믹을 부착한 지능구조물이 고압을 사용하지 않아도 되는 구조물이기 때문에 OP Amp를 이용하여 Fig. 8과 같은 간단한 브릿지 앰프 회로를 구성하였다. 실제 회로에 사용된 저항값  $R_1$  은 1 k $\Omega$ ,  $R_2$  는 10 k $\Omega$ ,  $R_3$  는 100  $\Omega$ ,  $R_4$  는 10 k $\Omega$  이며 유도된 브릿지 앰프의  $V_{b1}$ 과  $V_{b2}$ 에 대한 관계식은 (5)와 같다.

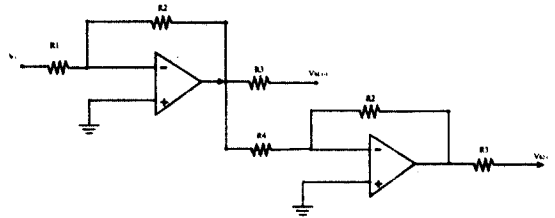


Fig. 8 Bridge Amplifier

$$V_{b1} = -\frac{R_2 R_4 + (R_2 + R_4) R_3}{R_1 R_4} V_i$$

$$V_{b2} = \frac{R_2^2 + R_2 R_3}{R_1 R_4} V_i \quad (5)$$

위에서 설명한 회로들을 살펴보면 4개의 OP Amp가 필요함을 알 수 있는데 OP Amp 칩 중 4개의 OP Amp를 포함한 LM324 칩을 사용하면 한 개의 칩으로 구현할 수 있다. Fig. 9는 OP Amp 하나로 구성되어 있으며 최소한의 면적으로 어디에나 부착이 가능한 smart patch를 보여주고 있다.

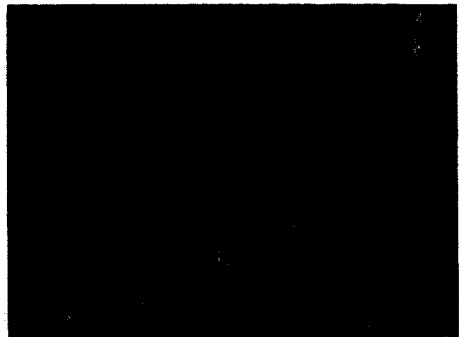


Fig. 9 Control Patch

참고로 LM324 칩을 사용하는 경우 전원은  $\pm 15V$ 이다. 본 실험에서는 9V 전원 4개를 사용하여  $\pm 18V$ 를 사용하였는데 이 경우 압전세라믹에 제공되는 최대 전압차는  $\pm 36V$ 가 될 수 있다.

Fig. 10은 압전세라믹 작동기와 감지기를 부착한 복합재 외팔보와 제어기 회로를 연결하고 스위치와 아크릴 케이스에 담은 데모 시스템을 보여주고 있다. 이 데모 시스템을 이용하여 능동진동제어 효과를 손쉽게 설명할 수 있었다.



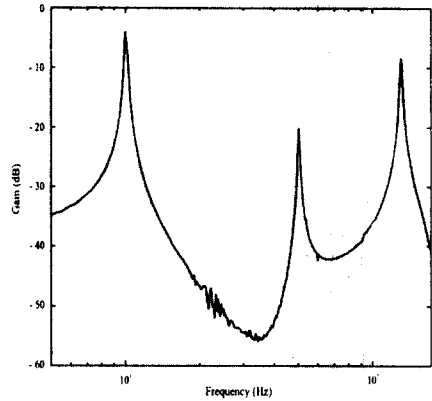
Fig. 10 Smart Structure Demo

### 3. 지능 구조물의 성능 실험

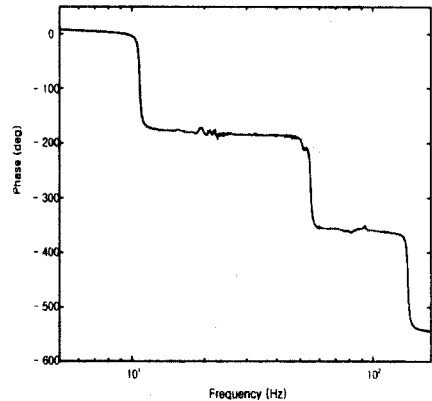
지능구조물의 성능실험을 위해서는 몇가지 선행 실험이 필요하다. 먼저 구조물과 압전세라믹의 도전성을 검사해야 하는데 멀티미터를 사용하면 손쉽게 구조물과 감지기, 구조물과 작동기의 통전여부를 확인할 수 있다. 본 연구에서 제작한 지능구조물 데모 시스템에서 감지기는 구조물/작동기와는 통전이 되어서는 절대 안된다. 왜냐하면 그라운드를 공유하게 되면 감지기로서의 역할을 하지 못하기 때문이다.

여분의 압전세라믹 감지기와 OP Amp를 이용한 Adder 회로를 사용하여 앞에서 언급한 지능구조물

의 진동 특성을 조사하였다. HP35670A Dynamic Sygnal Analyzer를 이용하여 구조물의 주파수 응답을 알아본 결과 외팔보의 작동기와 감지기 사이의 주파수 응답 곡선은 Fig. 11과 같다. 실험결과로부터 압전세라믹 감지기와 작동기를 포함한 외팔보의 고유진동수가 각각 10Hz, 50.5Hz, 130.75Hz임을 알 수 있었다. 또한 대수감소율 실험을 통하여 보의 감쇠계수,  $\xi=0.01$ 로 추정되었다.



(a) Magnitude



(b) Phase

Fig. 11 Frequency Response Curve

Fig. 12는 구조물의 1초간의 가진에 의한 자유진동 뒤에 제어가 작동한 경우를 보여주고 있다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 능동진동제어 효과가 확실하게 나타남을 알 수 있다. 앞에서 제작한 지능구조물을 이용하여 손쉽게 학생들과 연구원들에게 능동진동제어의 현실성과 제어기 설계의 가능성을

설명할 수 있었다.

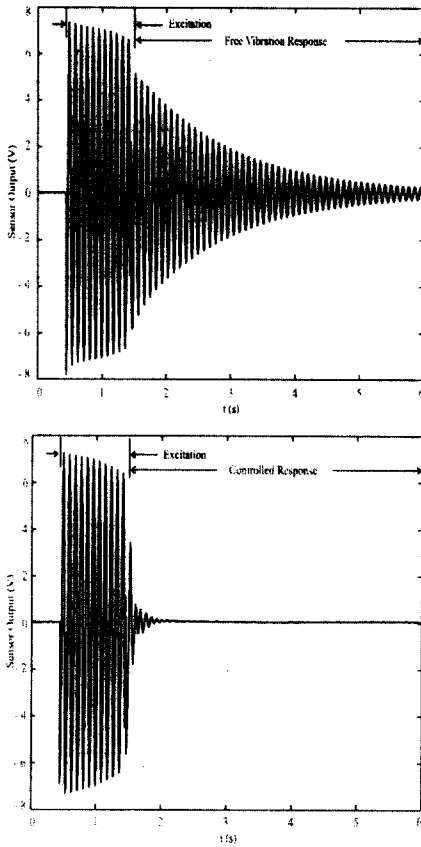


Fig. 12 Free Vibration and Controlled Responses

#### 4. 토의 및 결론

본 논문에서는 지능구조물의 개념 설명을 위하여 간단한 데모 시스템을 제작하는 과정과 제작상의 문제점, OP Amp를 이용한 제어기 설계 방법, 압전세라믹 감지기와 작동기를 부착하는데 있어 주의할 점 등이 설명되었다. 데모 시스템은 앞으로 능동진동제어 효과를 설명하는데 있어 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

외팔보 형태의 지능구조물은 실제로 진동제어를 하는데 매우 효과적이어서 좀더 다른 형태의 데모 시스템을 구현할 필요가 있다. 또한 디지털 회로를 장착한 데모 시스템을 제작할 필요가 있는데 현재

여러 가지가 모색 중에 있다. 동국대학교 지능제어 실험실은 다채널 전하앰프, 다채널 증폭앰프, 디지털 제어기를 구현할 수 있는 다채널 DSP 보드를 구비하고 있으며 앞으로 많은 연구자들의 이용을 바란다.

#### 참고 문헌

- [1] M.J.Brennan, M.J.Day, S.J.Elliott, and R.J.Pinnington, "Piezoelectric actuators and sensors," Symposium, 5-8 Sep. University of Bath, UK, 1994.
- [2] Kwak, M.K., Ra, W.-K., and Yoon, K.-J., "Active Vibration Suppression of a Smart Grid Structure by the Multiple Positive Position Feedback Control," Asia-Pacific Vibration Conference '97, Nov. Kyongju, Korea, pp. 1271-1276, 1997.
- [3] Crawley, E.F. and de Luis, J., "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," AIAA Journal, Vol. 25, No. 10, pp. 1373-1385, 1987.
- [4] Crawley, E.F. and Anderson, E.H., "Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1, No. 1, pp. 4-25, 1990.
- [5] Hanagud, S., Obal, M.W., and Calise, A.J., "Optimal Vibration Control by the Use of Piezoceramic Sensors and Actuators," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 15, No. 5, pp. 1199-1206, 1992.
- [6] Fanson, J.L and Caughey, T.K., "Positive Position Feedback Control for Large Space Structures," Proceedings of 28th Structural Dynamics Conference, Monterey, CA, pp. 588-598, 1987.
- [7] Poh, S. and Baz, A., "Active Control of a Flexible Structure Using a Modal Positive Position Feedback Controller," Journal of Intelligent Systems and Structures, Vol. 1, 1990.
- [8] 박문규, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어," 한국소음진동공학회지, 제 5권 제 3호, 1995, pp. 292-302.