

압전재료 센서 액추에이터를 이용한 자동차루프의 능동진동제어 Active Vibration Control of An Automotive Roof using Piezoelectric Sensor and Actuator

문성진* 김찬목** 강영규***

Sung-Jin moon, Chan-Mook Kim and Young Kyu Kang

Key Words : Piezoelectric Material(압전재료), Active Vibration Control(능동진동제어), Negative Velocity Feed-back control(반속도되먹임제어), Automotive Roof(자동차루프).

ABSTRACT

In this paper, we have studied on the active vibration control of an automotive roof in passenger car's structure using piezoelectric material as the actuator and sensor attached on the surface of the automotive roof. As a control algorithm, negative velocity feedback control method is used in the study and the position of the sensor is almost attached on the nearest position of maximum normal stresses occurring while the roof is vibrating due to disturbance or exciting. Also, the actuator is attached on the other side mostly collocated to the sensor. The optimum positions have the maximum stresses of the roof which have been found in the result of the finite element analysis using Nastran software, As the fundamental experiments, a beam and plate have also been implemented to verify the performance of vibration suppression. Finally the experiment of the roof has been carried out and The roof experiment has just given a possibility to an active vibration control of the automotive structure still not applied for passenger cars.

1. 서론

이미 항공우주공학분야에서는 지능형 구조물 (smart structure or intelligent structure) 형태로 사용환경에서 외란(disturbance) 등에 구조물 스스로가 적응을 할 수 있는 능력을 가지는 구조물이 활용되고 있다. 반면, 자동차공학분야에서는 지능형구조물응용이 아직 미비하다. 비록 항공우주공학분야에서 기본구조물(plate or beam)을 지능형구조물의 형태로 구성하여 많은 연구를 진행하였지만, 곡면이 있는 구조물(shell)에서는 충분한 연구가 진행되지 못하고 있다. 특히 곡면이 많은 자동차 바디구조물에 대해 지능형구조물의 형태를 적용하기에는 많은 어려움이 있는 동시에 승용차라는 자동차시장의 특수성 때문에 생산단가의 상승 등으로 자동차산업보다 고부가가치 산업인 항공우주공학과 달리 개발여건이 미미한 상황이다.

특히 지능형구조물의 한 분야로써 동적 특성(dynamic characteristics, dampingratio, etc) 등을 향상시키려는 목적으로 구조물의 진동을 감쇠력(damping force)을 증가시켜 우수한 진동감쇠 효과를 발휘할 수 있는 능동진동제어(active vibration control)방법이 사용되지만, 현재 자동

차구조물에 많이 쓰이고 적용하는데 있어서 비교적 비용/효과가 우수한 점탄성재료(viscoelastic material)나 폴리머(polymer)를 사용한 수동진동제어(passive vibration control)방법이 활용되고 있다.⁽¹⁾ 일반적으로 저주파수대역(0~60Hz)에서는 질량부과 효과만이 나타나고 중고주파수대역에서만 우수한 에너지 소산력(energy dissipation)을 가지고 있지만, 또한 온도와 주파수에 의존하는 특성을 가지고 있는 점탄성재료를 사용하기에 적용환경에 민감하다.^(1,2) 따라서 능동진동제어방법이 생산단가 상승문제만 해결한다면 수동진동제어방법 적용영역외(중고주파수영역)에서는 우수한 특성을 발휘, 단점을 보완할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 저주파수대역에서의 수동진동제어방법의 단점을 보완하기 위한 방법으로 능동진동제어방법을 제시하고, 간단히 반속도되먹임제어(negative velocity feedback)알고리즘을 이용, 압전재료(piezoelectric material)을 이용한 센서/액추에이터를 설계하여 빔과 플레이트의 제어모드에 대해 능동진동제어실험을 수행하였으며 최종적으로 곡면형상을 가지는 자동차루프의 능동진동제어실험을 수행하였다.

2. 압전재료 센서액추에이터

2.1 압전재료의 구성방정식

압전재료(piezoelectric material)의 순방향압전효과와 역방향압전효과를^(3,4) 기계적 특성과 전기적 특성을 조합한 구성방정식으로 나타내면 각각 식(1)

* 국민대학교 자동차공학전문대학원 석사과정

E-mail : moonssi9945@hotmail.com
Tel : (02) 919 -0514, Fax : (02) 910-4718

** 국민대학교 기계자동차공학부 교수

*** (주) 금호타이어

과 (2)와 같다.

$$\{D\} = [e] \{S\} + [\epsilon^s] \{E\} \quad (1)$$

$$\{T\} = [C^E] \{S\} - [e]^T \{E\} \quad (2)$$

D 는 전기적 변위(electric-displacement)로 센서에서 발생하는 전하량(Q)과 관계가 있으며, T 는 응력을 나타낸다.

2.2 센서, 액츄에이터를 포함한 플레이트
플레이트의 평면을 x-y 좌표로 설정시 ϵ_{zz} 를 무시하고 맴브레인변형률을 포함시키면 변형률은 식(3)과 같고 응력은 식(4)로 표현된다.⁽⁴⁾

$$S_{ij} = S_{ij}^o + z \times k_{ij} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{Y}{1-\mu^2} \left[(S_{11}^o + \mu S_{22}^o) + z(k_{11} + \mu k_{22}) \right] \\ \sigma_{22} &= \frac{Y}{1-\mu^2} \left[(S_{22}^o + \mu S_{11}^o) + z(k_{22} + \mu k_{11}) \right] \\ \sigma_{12} &= \frac{Y}{2(1+\mu)} (S_{12}^o + z k_{12}) \end{aligned} \quad (4)$$

액츄에이터의 작동력을 발생시키는 역압전효과 항을 첨가하면 식(5)와 같다.

$$S_{ij} = S_{ij}^o + z \times k_{ij} - d_{ki} \times E_k \quad (5)$$

횡단면 전단과 관성에 의한 변형이 제외된 5 개 자유도를 갖고 전체 분포형 압전재료가 붙여있는 얇은 플레이트(Kirchhoff)⁽⁴⁾의 횡방향진동에 관한 방정식은 식(6)과 같다.

$$\rho h \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} + D \left(\frac{\partial^4 u_3}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 u_3}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 u_3}{\partial y^4} \right) = F_3 \quad (6)$$

압전액츄에이터의 작동력을 포함시킨 폐회로(closed-loop)는 식(7)와 같다.

$$\begin{aligned} \rho h \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} + D \left(\frac{\partial^4 u_3}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 u_3}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 u_3}{\partial y^4} \right) \\ = \frac{\partial^2 M_{xx}^a}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_{yy}^a}{\partial y^2} + F_3 \end{aligned} \quad (7)$$

(6)(7)에서 액츄에이터의 작동력에 의한 모멘트항이 추가됨을 알 수 있다.

또한, 2 개의 단방향 자유도를 가지고 두계방향으로만 전기장을 부여하는 압전재료의 변형으로 인한 단위폭당 작동모멘트와 맴브레인작동력은 각각 (8), (9)식과 같다.

$$N_{ii}^a = e_{3i} E_h t \quad (8)$$

$$M_{ii}^a = r_j^a e_{3i} E_h t \quad (9)$$

e 는 piezoelectric constant, E 는 young's modulus, r 은 호스트구조물(플레이트)의 중립면과 압전재료의 중심면과 사이의 거리이고 E_h 는 부과되는 전기장이다.

압전재료를 포함한 유한요소정식화 식은 식(10)과 같고 도달좌표계로 변환한 식은(11)과 같다^(5,6).

$$M \ddot{q} + C \dot{q} + Kq = F_{ext} + F_c \quad (10)$$

$$\ddot{\eta}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{\eta}_i + \omega_i^2 \eta_i = \overline{F}_{ext} + \overline{F}_c \quad (11)$$

3. 실험방법

본 실험에서는 압전재료(Fuji-ceramics,model:C-82)⁽¹²⁾를 센서와 액츄에이터로 이용한 능동진동제어실험으로 외팔보와 플레이트, 자동차루프에 새로 실험을 수행하였으며, 제어알고리즘으로는 간단한 반속도피드백제어를 하였고, 위치설정에는 FE-analysis 를 하여 제어모드를 선정하여 센서와 액츄에이터의 위치를 결정하였다[appendix 1~3 참고].

3.1 데이터획득(data acquisition) 및 FFT

데이터획득장치로 NI 사의 MDAQ-6052E 를 사용하여 A/D ch 16 개중 2 개, D/A ch 2 개중 2 개를 이용하여 시그널데이터를 입출력하였다. 사용된 프로그램은 labview7.0 을 이용하여 작성하였으며, appendix 5 와 같다. 외란 및 노이즈를 제거하기위한 별도의 필터(low-pass filter)를 사용하지 않았으며 대신에 평균(running sum averaging)방법을 이용하여 시그널콘디셔닝을 하였다. 평균방법으로 인한 진폭(amplitude)과 Nyquist frequency, cut-off 주파수를 고려하여 충분한 샘플링주파수를 5000Hz 로 하였으며, Fig.1 에서처럼 GAP sensor(VS-021)과 GAP detector(VS-102)사용하여 변위신호를 측정하였으며, FFT analyzer(HP-35655A)를 이용하여 FRF 를 구하였고, 가진으로 압전재료를 클램프 모서리근처에 부착시켜서 정현파(swept-sine)를 10~400Hz 범위내에서 최소 0.5Hz 의 해상도 단위로 증가 발생시켜서 압전재료 전용앰프(SVC500-3)을 이용, 증폭하여 가진 소스로 사용하였다. 자동차루프의 경우 exciter 로 가진하고 가속도계(B&K type 4393)로 응답신호로 받았다 (Fig2).

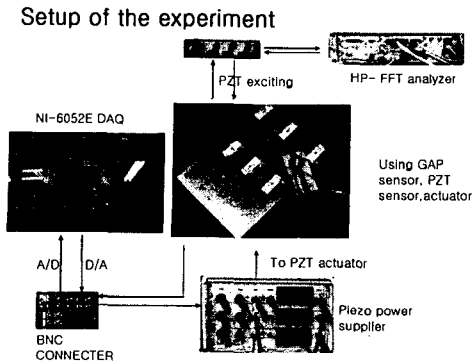


Fig.1 Experimental setup of the cantilever plate.

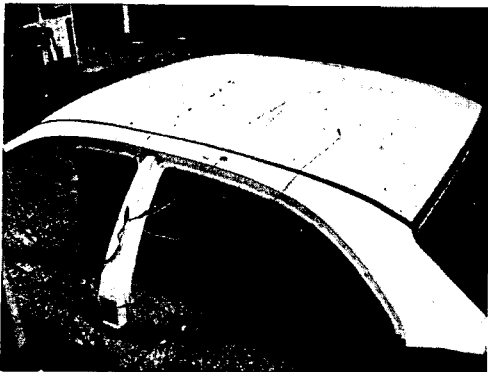


Fig.2 Experimental setup of the automotive roof.

3.2 압전재료의 부착 및 신호판별

본 실험에서는 에폭시(epoxy)종류의 접착재료를 사용하지 않고 순간접착제(loctite401)을 사용하여 감쇠인자를 최소화하기 위한 작업으로 접착제를 얇게 도포하여 부착하였다. 데이터 획득을 하기전에 하나의 공진주파수로 가진신호를 D/A channel을 이용하여 발생 가진시키면 압전센서의 신호와 GAP sensor의 변위신호를 비교한 결과 속도(strain rate)신호로 판별되었고, 제어게인(control-gain)을 곱하여 반속도되먹임제어알고리즘을 구현하였다.[appendix6 참고]

4. 실험결과 및 고찰

4.1 빔,플레이트

빔의 경우에서 appendix1에 나와 있는 것처럼 x-방향 인장/압축변형률이 최대인 지점에 센서를 부착, 1 차모드를 제어모드로⁽⁷⁾ 설정하여 최적제인

으로 실험한 결과 appendix7에서 12~13dB의 피크치의 감소를 볼 수 있었다.

플레이트의 경우 역시 인장/압축변형률이 최대로 발생하는 지점에 센서와 액츄에이터를 부착했으며 1,3 차모드를 제어모드로 설정하여 각각 최적의 제어게인으로 각각 센서 1개와 액츄에이터를 사용한 case1과 1 차모드에서 액츄에이터 3개를 사용한 case2를, 1, 3 차모드에 각각 액츄에이터 3개를 사용한 case3를 실험하였다(Fig3). 액츄에이터의 숫자를 변화시켜서 실험을 한 결과 작동력의 증가만큼 진동제어작동력의 증가되어서, case2가 case1보다 1,3 차제어모드에서 dB 피크감소폭이 더 큰 것을 Fig.7에서 볼 수 있다. 또한 case3는 case2보다 dB 피크감소폭이 큰 것을 Fig.8에서 볼 수 있다. Appendix2에서 FE-analysis 결과를 바탕으로 센서와 액츄에이터를 각각의 1,3 차제어모드와 중복이 되지 않는 위치에 부착하였기에[appendix 4 참고] case1,2,3에서 비제어모드에 대한 스페illo버(spill over)현상⁽⁷⁾은 Fig.7,8에 나타나지 않았다. 제어게인을 변화시켜가면서 플레이트의 능동진동 제어실험에서는 제어게인에 비례해서 1,3 차제어모드의 dB 피크감소폭이 감소함을 Figure9에서 볼 수 있었다. 또한 3dB half power bandwidth로 modal damping ratio를 계산해보면 증가함을 알 수 있었다(Fig4,5).



Fig.3 Arrangement of the piezoelectric actuators and sensors.

다음으로 Fig.2와 같이 빔,플레이트 실험결과를 기준으로 자동차루프의 능동진동 제어실험을 하였다. 센서, 액츄에이터의 위치는 Fig.6과 같다.

100Hz 이하영역 여러모드에서 최대인장/압축응력 분포가 중첩되는 위치에 압전센서와 액츄에이터를 부착하여 100Hz 이하영역을 제어모드를 설정하였으며[appendix3,4 참고], Fig.10에서 보는 것 같이

동강성(dynamic stiffness)이 좋은 100Hz 이하에서 최대 5dB 피크감소 결과를 얻었고 100Hz~230Hz 영역의 결과는 Fig.11 과 같다.

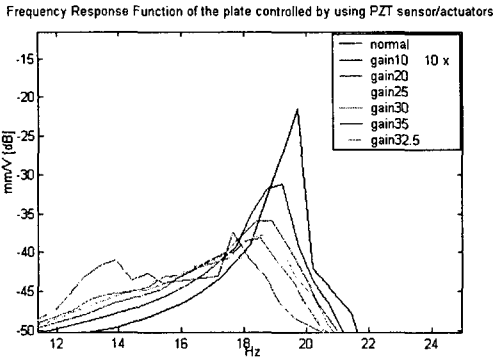


Fig.4 Zoomed FRFs of the automotive roof for the 1st mode.

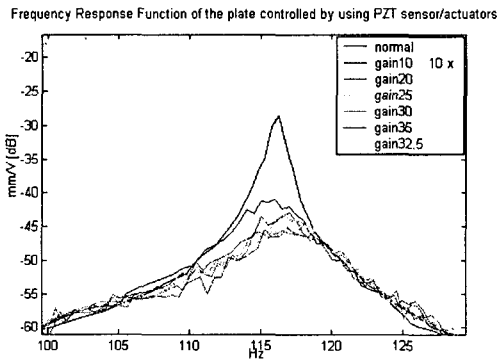


Fig.5 Zoomed FRFs of the automotive roof for the 3rd mode.

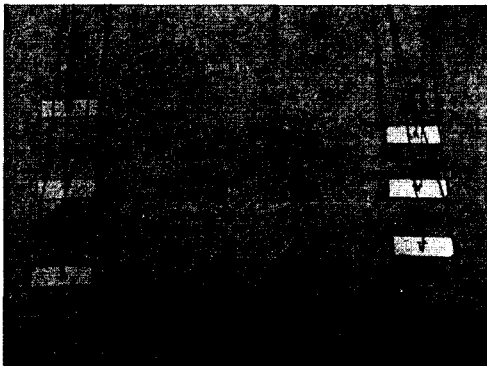


Fig.6 Arrangement of the piezoelectric actuators and sensors in the middle of the automotive roof surface.

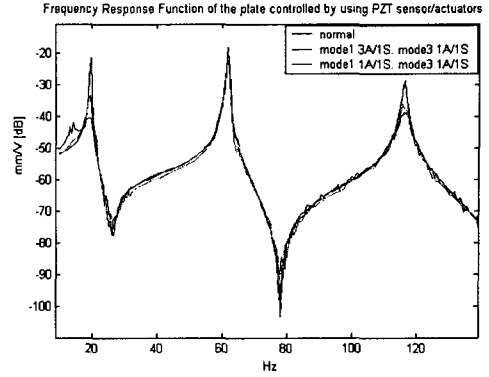


Fig.7 FRFs of the controlled plate for case1 and case 2

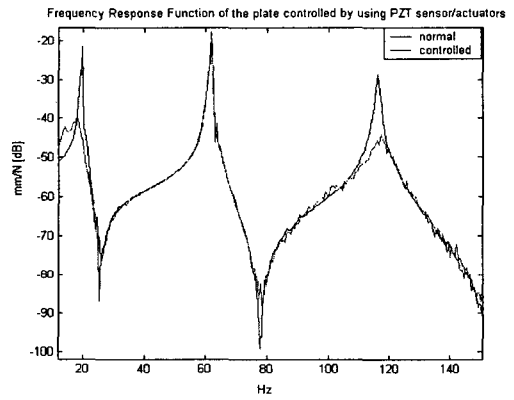


Fig.8 FRF of the controlled plate for case3.

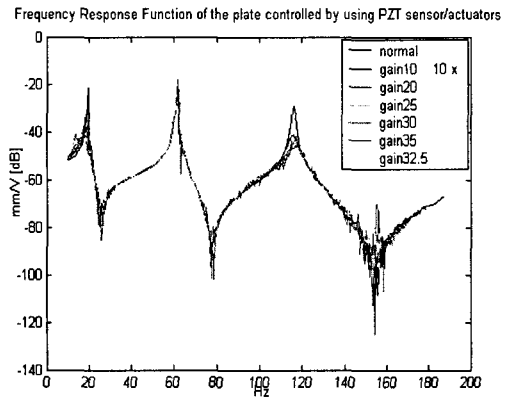


Fig.9 FRFs of the controlled plate for various gain.

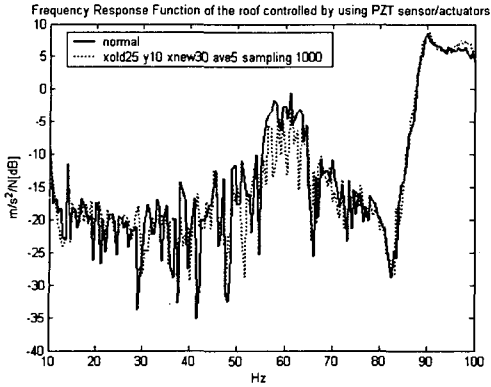


Fig. 10 FRFs of the controlled automotive roof.

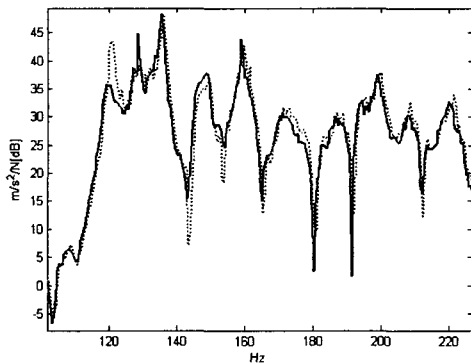


Fig11. FRFs of the controlled automotive roof in 100Hz~230Hz band.

5. 결론

압전재료를 센서와 액츄에이터로 사용하여 빔과 플레이트, 자동차루프구조물에 적용한 능동진동실험을 수행하였다.

빔의 경우에는 1 차모드에 적용한 결과 12~13dB의 피크치 감소를 얻었으며, 플레이트의 경우 1,3 차 모드에서 액츄에이터의 숫자를 증가시킨 결과 각각 3 개의 액츄에이터, 2 개의 센서를 사용하여 20dB, 18dB의 피크치가 감소하여 modal damping ratio가 액츄에이터의 숫자에 비례해서 증가하였고, 또한 제어계인을 증가함에 따라서 modal damping ratio가 증가하였다.

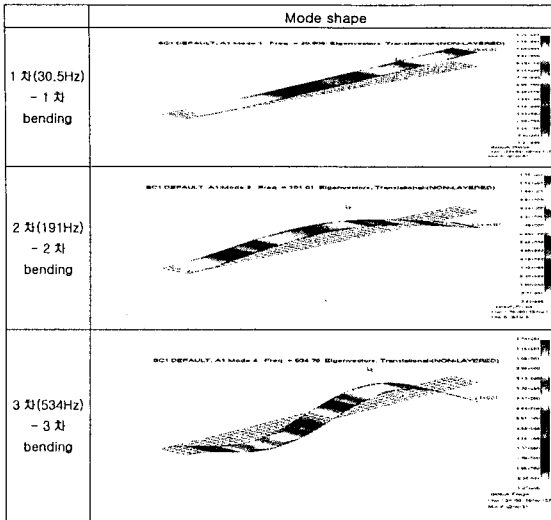
자동차루프의 경우 100Hz 이하 모드를 제어모드로 설정하여 실험한 결과 이 영역의 동강성(dynamic stiffness)이 상대적으로 강하여 빔,플레이트의 1/3 정도(5dB) 피크치가 감소하였다.

후 기

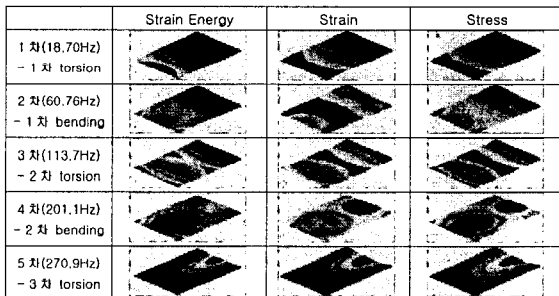
간단한 되먹임속도제어알고리즘으로 능동진동제어를 구현하였으나 자동차루프의 경우 구조물의 강성이 주파수에 따라 상대적으로 다르기 때문에 제어계인의 좀더 세밀한 고찰이 필요하다.

참고문헌

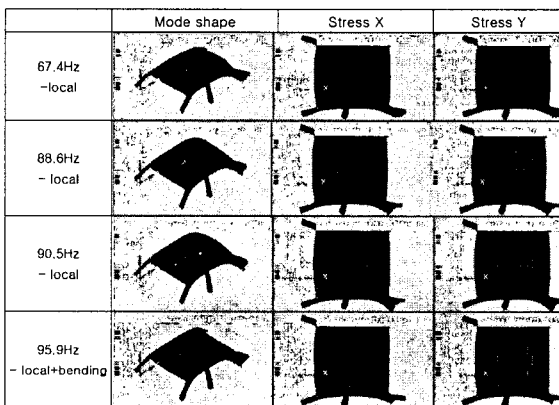
- (1) Anab Akanda and Gregory M. Goetichius., "Representation of Constrained/Unconstrained Layer Damping Treatment in FEA/SEA Vehicle System model: a simplified Approach." SAE Noise and Vibration Conference 1999.
- (2) S. Subramanian, R. Surampudi, K.R. Thomson and S. Vallurupalli., "Optimization of Damping Treatment for Structure Borne Noise Reduction." SAE Noise and Vibration Conference 2003.
- (3) IEEE Standard on Piezoelectricity
- (4) H.S Tzou "Piezoelectric Shell: Distributed Sensing and Control of Continua" chapter 2,4,6. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.
- (5) "Prediction and Measurement of Modal Damping of Laminated Composite Beams with Piezoceramic Sensor/Actuator.", Young Kyu Kang, Hyuun Chul Park, Woonbong Hwang and Kyung Seop Han., journal of INTELLIGENT MATERIAL SYSTEMS and STRUCTURES. Vol 7 No1 pp25~32, JAN 1996.
- (6) 지능 복합재 구조의 진동제어 특성에 관한 유한 요소 해석, 한재홍, 이인 (한국과학기술원).
- (7) G. Schulz and G. Heimbolf "Dislocated Actuator/Sensor Position and Feedback Design for Flexible Structures." J.GUIDANCE Vol 6, No.5 SEPT-OCT 1983.
- (8) 압전재료를 이용한 복합재 보의 최적진동제어 이창배, 한재홍, 이인 (한국과학기술원)
- (9) K. Xu, P. Warnitchai, T. Igusa., "Optimal Placement and Gains of Sensors and Actuators for Feedback Control." J.GUIDANCE Vol 17, No.5 SEPT-OCT 1994.
- (10) Edward F. Crawley, "Intelligent Structures for Aerospace: A Technology Overview and Assessment."
- (11) Edward F. Crawley AND Javier de Luis, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures."
- (12) FUJI ceramics, PIEZOELECTRIC CERAMICS "ELECTRIC-MACINERY ENERGY CONVERTING ELEMENTS WITH WIDE APPLICATION AREA."



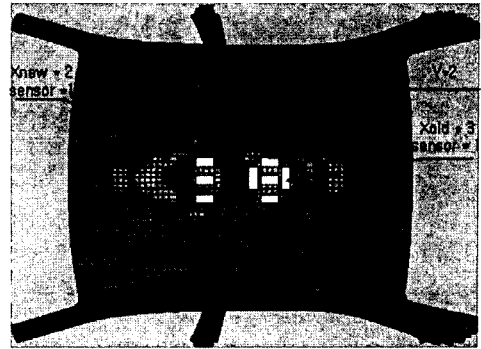
Appendix 1. Finite element analysis(nastran sol:103) of the cantilever beam to determine positions of the piezoelectric sensor/actuators.



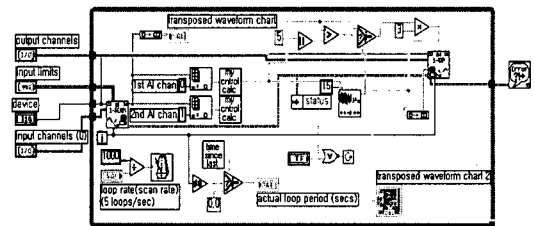
Appendix 2. Finite element analysis of the cantilever plate to determine positions of the piezoelectric sensor/actuators.



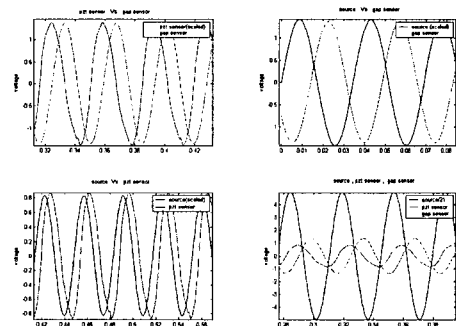
Appendix 3. Finite element analysis of the automotive roof to determine positions of the piezoelectric sensor/actuators in automotive roof.



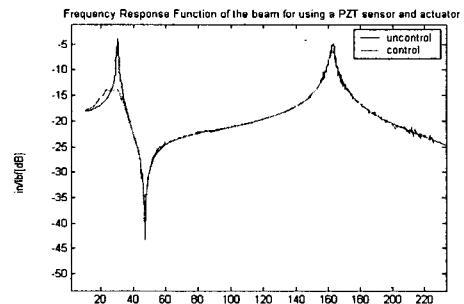
Appendix 4. schematic of the active vibration control of the automotive roof using PZT sensor/actuators.



Appendix 5. NI labview7.0 control block diagram for the negative velocity feedback control.



Appendix 6. Identification of the piezoelectric sensor signal for the negative velocity feedback.



Appendix 7. FRFs of the cantilever beam controlled by using PZT sensor/actuators.