

# 하이브리드 방법을 이용한 자동차 루프의 진동제어

## Hybrid Damping Treatment for Vibration control of an Automotive Roof using Viscoelastic and Piezoelectric material

나정기\*·문성진\*·김찬묵\*\*·강영규\*\*\*

Jung-kee Na, Sung-Jin Moon, Chan-mook Kim and Young Kyu Kang

**Key Words :** viscoelastic material(점탄성재료), smart material(지능재료), automotive roof(자동차 루프), passive constrained layer damping(수동구속감쇠), Active Vibration Control(능동진동제어)

### ABSTRACT

Hybrid method is used to suppress vibration of an automotive roof surface. The hybrid method proposed in this paper is implemented experimentally using both viscoelastic and piezoelectric material. The piezoelectric material is used to control the vibration of automotive structure for lower range of frequencies and the experiment of vibration control using viscoelastic material has been carried out suppress vibrations of high frequency range mark. At first the plate controlled by using hybrid method has been implemented to verify the performance for suppressing vibration. Then the experiment has been applied to the automotive roof structure.

### 1. 서론

인간 생활에서 생활의 일부분처럼 여겨질 정도로 자동차는 인간과 가까이 있다. 최근 자동차는 운송수단의 도구에서 벗어나 작업공간과 휴식공간으로 그 영역이 점점 넓어지고 있는 추세이다. 그리고 자동차에 대한 성능과 품질에 대한 소비자들의 관심이 높아지면서 자동차에 대한 요구들이 증가하는 추세이다. 그러한 요구들 중에 진동은 사람에게 불쾌감 또는 불안감을 줄 수 있으며, 구조물에 변형과 파손을 야기 시킬 수 있는 요인이다.

구조물에 진동을 억제 시키는 방법중에 수동구속감쇠 방법과 능동진동제어 방법이 있다. 수동구속감쇠는 구조물에 강성의 변화없이 진동과 소음을 저감시킨다. 특히 고주파 대역에서 탁월한 성능을 발휘하는 장점이 있지만, 특정한 대역에 국한 된다는 단점이 있다. 반면, 능동진동제어방법은 원하는 주파수 대역을 설정하여 제어 할 수 있는 장점이 있지만, 비용이 많이 들고 구조가 복잡한 단점이 있다. 이와 같이 수동구속감쇠와 능동진동제어방법의 장·단점을 이용한다면 구조물의 진동과 소음 저감시 보다 좋은 결과를 얻을 수 있다.<sup>(3)</sup>

수동구속감쇠방법은 손실계수가 큰 점탄성(VEM ;

Viscoelectric Material)를 이용하고, 능동진동제어방법은 단위 면적당 발생력이 우수하고 정밀도와 반응속도가 뛰어나며, 감지기(sensor), 작동기(actuator)특성을 가지고 있는 압전재료(PZT;Piezoceramic)인 지능재료(smart material)를 주로 이용한다.<sup>(2)</sup>

본 논문에서는 수동구속감쇠역할을 하는 점탄성재료(VEM)와 능동진동제어역할을 하는 지능재료(smart material)를 이용하여 자동차 루프(automotive roof)의 진동감쇠 효과에 대해서 알아보고자 한다.

### 2. 수동제어 / 능동제어개념

#### 2.1 수동제어 개념

수동제어란 방진재를 시스템(system)의 최적위치에 설치하여 진동을 줄이는 방법을 말한다. 그렇지만, 특정한 주파수 범위에만 효과가 크기 때문에 설계상에 정확도가 요구된다. 본 논문에서도 수동구속감쇠방법중 하나인 점탄성재료(VEM)를 사용하였다. 점탄성재료는 탄성과 점성특성을 갖는 재료로서, 고무와 같은 고분자 재료에서는 금속재료와는 달리 내부댐핑의 영향이 크기 때문에 탄성과 점성을 모두 고려하여야 한다. 탄성은 외부에너지를 스프링에서와 같이 저장하는 역할을 하며, 점성은 재료내부에서 마찰등에 따라서 외부에너지를 열에너지로 소산시키는 특성을 가지고 있다. 제진구조에는 인장, 압축 변형에 의해 진동 에너지가 소산되는 2 층 감쇠구조로 된 비구속감쇠(unconstrained layer damping)와 전단변형에 의해 진동 에너지가 소산되는 3 층 감쇠구조로 된 구속

\* 국민대학교 자동차공학전문대학원 석사과정

E-mail : memethethe@hanmail.net  
Tel : (02) 919-0514, Fax : (02) 910-4718

\*\* 국민대학교 기계자동차공학부 교수

... (주)금호타이어

감쇠(constrained layer damping)가 있다.

점탄성 재료는 상당히 큰 값의 내부감쇠를 가지므로 내부감쇠를 주는데 사용한다. 또한 진동제어에 이용할 때 그 재료는 전단 또는 직접 변형을 받게 된다.

점탄성 재료의 응력-변형률의 선형 모델의 관계식(1)은 다음과 같다.

$$\sigma + \alpha \frac{d\sigma}{dt} = E\varepsilon + \beta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1)$$

$\alpha = \beta = 0$  이 되면 Hooke's law 이 된다. 응력과 변형률이 조화진동을 한다면,

$$\sigma = \sigma_0 e^{j\omega t}, \quad \varepsilon = \varepsilon_0 e^{j\omega t} \text{ 이면,}$$

응력-변형률 관계식(2)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_0 = \frac{1 + j\omega\beta}{1 + j\omega\alpha} E\varepsilon_0 \quad (2)$$

식(2)에서 실수부와 허수부를 분리하면,

$$\sigma_0 = (E' + jE'')\varepsilon_0 = E'(1 + j\eta)\varepsilon_0 = E' \dot{\varepsilon}_0 \quad (3)$$

식(3)으로 표현된다. 여기서  $E'$ 는 저장 탄성율로 에너지보존항이고,  $E''$ 은 손실탄성율로 에너지 손실항이다.  $\eta = E''/E'$ 로 loss factor 이다.  $E'$ ,  $E''$  그리고  $\eta$ 는 주파수와 온도에 따라 변한다. 본 실험은 상온상태에서 실험을 수행하였다.<sup>(4)</sup>

## 2.2 능동진동제어 개념

능동제어는 시스템의 진동을 센서(sensor)를 이용하여 측정하고 그 측정된 신호를 토대로 최적 피드백 게인(feedback gain)을 구하여 구동기(actuator)로 신호를 보내서 적절한 제어력을 가하게 함으로써 진동을 제어하는 방법이다. Fig. 1은 능동제어에 대한 개략도를 나타낸 것이다.

본 논문에서 사용한 반속도 되먹임제어(Negative Velocity Feedback control)방법을 이용한 폐회로(closed-loop)이다.

선형 압전재료의 물성치에 대한 기계적 특성과 전기적 특성을 나타낸 구성방정식은 식(4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} D \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon^T & d \\ d_t & S^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ T \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $D$ 는 전기변위(electric displacement,  $C/m^2$ )이며, 센서에서 발생하는 전하량( $Q$ )과 관계가 있다.  $E$ 는 전기장(electric field,  $V/m$ ),  $S$ 는 변형률(strain),  $T$ 는 압전재료의 변형으로 인한 응력(stress, Pa)이다.  $\varepsilon$ 는 유전상수(dielectric constant,  $F/m$ ),  $s$ 는 컴플라이언스(compliance)이다.<sup>(1),(5)</sup>

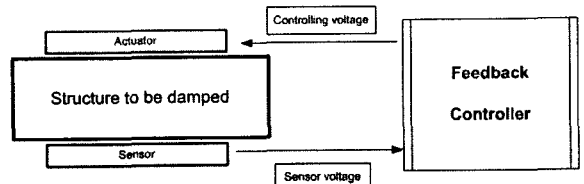


Fig. 1 Configuration of a smart structure with integrated sensor and actuator

## 3. 실험장치 구성 및 실험방법

### 3.1 평판(plate)실험

실험에서 사용한 시편은 크기가  $300 \times 207 \times 2$  (mm)인 알루미늄 평판(plate)이다. 능동제어 실험을 하기 위해서 사용한 압전세라믹은 Fuji 세라믹스사의 C-82 로 그 크기는  $50 \times 20 \times 0.5$  (mm)이다.<sup>(6)</sup> 점탄성패치는 헨켈홍성의 HSTM 203H 을 사용하였으며, 크기와 위치에 따라서 Case1, Case2 로 나누어 실험을 하였다.

Case1 의 크기는  $80 \times 50 \times 1$  (mm)이고, Case2 는  $50 \times 25 \times 1$  (mm)이다. 점탄성층의 전단변형을 증가시켜 감쇠량을 증가 시키기 위해서 점탄성 패치의 구속층으로 시편과 동일한 재질인 알루미늄 박판( $80 \times 50 \times 0.07$  mm,  $50 \times 25 \times 0.07$  mm)을 사용하였다. 평판(plate)의 가진 진동원은 Signal Analyzer(HP 3565A multichannel signal analyzer)을 이용한 정현파(swept sine; 10~420 Hz)를 발생시켰으며, 전압조절을 하기 위해서 압전세라믹 전용증폭기(SVR 500-3)를 사용하였다. 감지기로는 ONOSOKI 의 Gap sensor(VS-201)와 Detector(VS-102)를 사용하여 주파수 응답 함수(FRF)를 측정하였다.

본 실험은 지능구조물을 이용하여 1, 3 차 진동 모드를 제어하는데 목적이 있다. 이를 위해서 FEM(MSC-Nastran, 103)해석을 통하여 Fig. 2 와 같이 제진재(VEM)와 압전체(PZT)의 부착위치를 선정하였다. 가진은 압전체(PZT)를 이용하여 평판(plate)을 가진하였다.

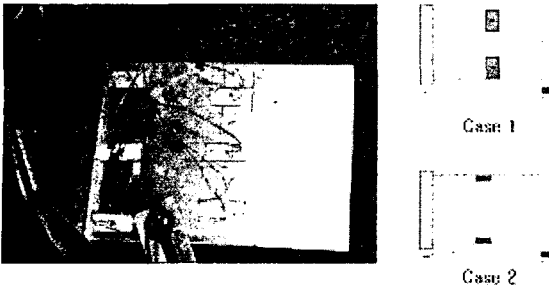


Fig. 2 Placement of PZT and VEM

### 3.2 자동차 루프(automotive roof) 실험

본 논문에서 사용한 시편은 크기가 1480×1130×0.8 (mm)인 자동차 루프(automotive roof)를 사용하였다. Fig. 3 과 같이 양단 자유상태(free-free)로 하였으며, Signal Analyzer(HP 3565A multichannel signal analyzer)을 이용하여 정현파(swept sine; 10~420 Hz)가 진을 설정하여 B&K 사의 가진기(B&K 4805)로 가진한다. 응답신호는 단축가속도(B&K 4393)를 사용하여 주파수 응답함수(FRF)를 측정하였다. 압전체(PZT)의 위치와 개수, 제진재(VEM)의 위치와 크기는 FEM(MSC-Nastran, 103)해석을 분석하여 결정하였다.

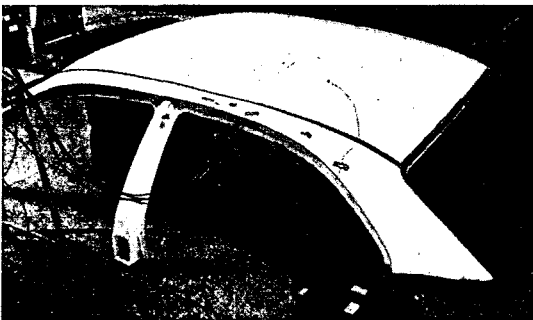


Fig. 3 Schematic of automotive roof

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 평판(plate) 실험결과

Fig. 4 는 평판(plate)과 평판에 압전체(PZT)를 부착한 능동진동제어 실험 결과를 보여주고 있다. 관심 진동모드를 1 차, 3 차로 선정하였고 이에 맞는 위치에 압전체(PZT)를 부착하여 실험을 하였다. Fig. 4 와 같이 1 차주파수(18.8Hz)와 3 차주파수(116Hz)는 -11.7dB 와 -10dB 감소함으로써 능동진동제어가 되는지를 확인 할 수 있었다. 그러나 210Hz~320Hz 대역에서 원하지 않는 현

상인 스펠오버(spillover)가 발생하였다.

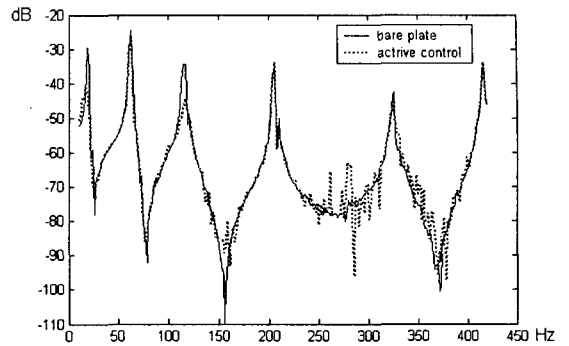


Fig. 4 FRFs of plate with active control

Fig. 5 는 제진재(VEM)를 Case1, Case2 로 구분하여 수동구속감쇠의 효과를 보여주고 있다. Case2 의 경우 4 차주파수(206Hz)에서는 -4.3dB 감소됨을 알 수 있다. 6 차주파수(416Hz)에서는 Case1, Case2 가 동일하게 -6.8dB 감소하였다.

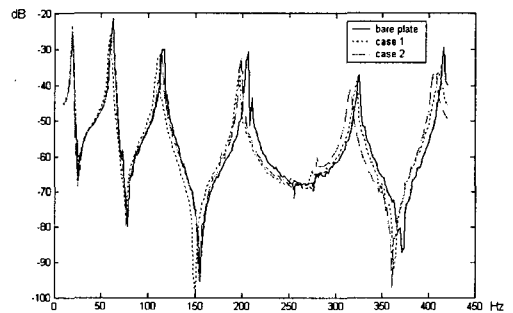


Fig. 5 FRFs of plate for the positions of VEM

Fig. 6 의 실험은 수동구속감쇠(Case1, Case2)와 능동진동제어제어를 동시에 수행한 결과이다.

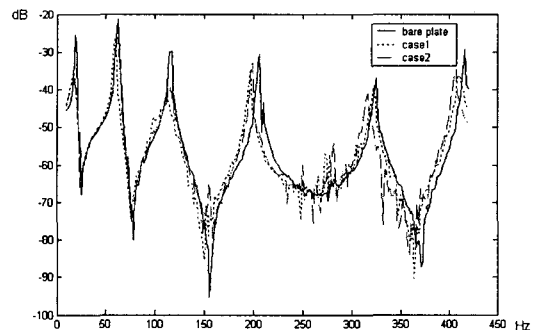


Fig. 6 FRFs of plate with VEM and active control

Fig. 6 에서 보면 수동구속감쇠의 기능과 능동진동제어의기능이 각각 이루어짐을 알 수 있다.

Case1 은 Case2 의 경우보다 3 차, 4 차 그리고 6 차 주파수에서 보다 좋은 감쇠효과를 보여주고 있다.

#### 4.2 자동차 루프(automotive roof)실험결과

아래의 Fig. 7 은 압전세라믹(PZT)을 부착하여 능동진동제어 실험을 수행한 것이다. 저주파수 대역에서 평판(plate)과 같이 뚜렷한 효과는 나타나지 않지만, 66.5Hz 에서 감쇠가 됨을 확인 할 수 있었다.

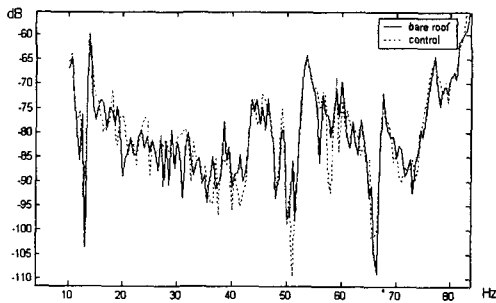


Fig. 7 FRFs of automotive roof with active control

Fig. 8 은 제진재(VEM)를 부착한 수동구속감쇠효과를 보여주고 있다. 162Hz 에서 뚜렷한 감쇠효과 (-16dB)가 나타남을 확인 할 수 있다.

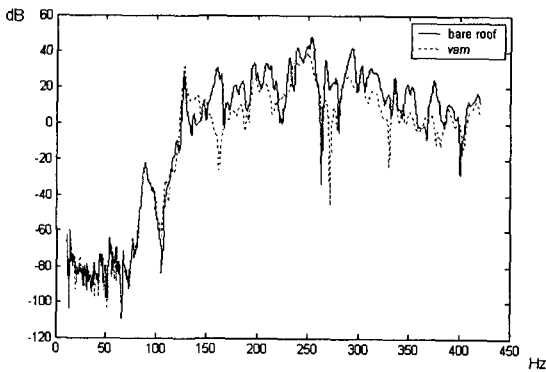


Fig. 8 FRFs of automotive roof with VEM

Fig. 9 는 bare roof 와 하이브리드방법을 이용한 진동제어를 보여주고 있다. 제진재를 이용한 방법과 하이브리드방법을 이용한 진동제어 효과가 유사함을 Fig. 10 에서 확인 할 수 있다. 또한 162Hz, 272Hz, 330Hz 에서 dB 가 큰 폭으로 감소함을 확인하였다.

그러나 10~100Hz 에서 하이브리드방법을 이용한

경우에 약간의 진동감쇠효과를 보여주고 있다.

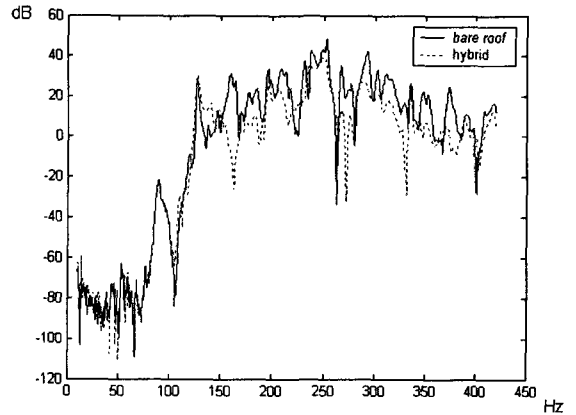


Fig. 9 FRFs of automotive roof for hybrid method

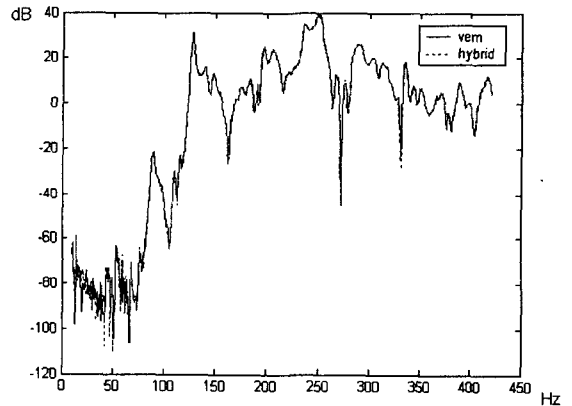


Fig. 10 FRFs of automotive roof with VEM and hybrid

## 5. 결론

본 논문은 하이브리드 방법을 통한 구조물의 진동제어 결과에 대해서 정리해 보았다.

(1) 수동구속감쇠의 성능이 뛰어나도 저주파 대역에서는 진동을 감쇠하기가 어렵다는 것을 실험 결과를 통하여 확인 할 수 있었다. 그러므로 저주파 대역을 제어하기 위한 방법으로 능동진동제어 방법을 적용하여 진동감쇠를 수행하였다.

(2) 수동구속감쇠방법을 이용한 경우에는 제진재 위치와 크기에 따라 진동감쇠 효과가 변하는 것을 관찰 할 수 있었고, 자동차루프(automotive roof)에서는 162Hz 에서부터 감쇠효과를 확인하였다.

(3) 능동진동제어방법으로 원하는 진동모드를

제어 할 수 있었다. 평판(plate)만을 고려한 경우 1 차주파수(18.8Hz) -11.7dB 감쇠되고 3 차주파수(116Hz)는 -10dB 감쇠 되었다. 자동차 루프(automotive roof)는 66.5Hz 에서 -6dB 감쇠 되었다.

(4) 수동구속감쇠나 능동진동제어 방법 한 가지 만 사용하는 일반적인 방법으로 진동제어를 하는 것보다 하이브리드 방법을 사용하였을 때, 진동제어효과가 동시에 발생하여 보다 많은 진동모드를 제어 할 수 있었다.

### 참고문헌

(1) S. S. Rao, and M. Sunar, 1994, "Piezoelectricity and its use in disturbance sensing and control of flexible structures : A survey", Appl. Mech. Rev, Vol.47, No.4, pp.113 ~ 123

(2) 강영규 등, 1999, "압전세라믹/작동기와 점탄성재료를 이용한 지능판의 진동제어", 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.217~221.

(3) 박철휴 등, 2003, "전기적-기계적 수동감쇠기를 이용한 빔의 진동제어", 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 651 ~ 657.

(4) 최 현등, 1997, "점탄성재료의 동적 특성 측정에 관한 연구", 제 7 권 제 6 호, 한국소음진동공학회, pp. 937~943.

(5) IEEE Standard on Piezoelectricity

(6) Fuji ceramics, Piezoelectric ceramics, "Electric Machinery Energy converting Elements with Wide Application Area".