

자동차 루프의 진동제어를 위한 제진재의 위치 및 두께에 대한 실험적 연구

이 정 균^{*1)} · 김 찬 목²⁾ · 사 종 성³⁾

국민대학교 자동차공학전문대학원생¹⁾ · 국민대학교 자동차공학전문대학원²⁾ · 서일대학 자동차과³⁾

An Experimental Study on Placements and Thickness of Damping Material for Vibration Control of Automotive Roof

Jeongkyun Lee^{*1)} · Chanmook Kim²⁾ · Jongsung Sa³⁾

¹⁾Student, Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

²⁾Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

³⁾Dept. of Automotive Engineering, Seoil College, Seoul 131-702, Korea

(Received 19 January 2005 / Accepted 31 July 2005)

Abstract : This paper presents an experimental study on vibration characteristics of an automotive roof with damping material. The goal of the study is to extract modal parameters (natural frequency, loss factor, and mode shape) of automotive roof with damping materials treatment. To determine the effective positions and thickness of the damping material on a roof, vibration tests have been carried out for six cases; an aluminum plate with damping material on maximum strain energy positions, and an aluminum plate with damping material on nodal lines. From the result of aluminum plate, it is found that the damping material should be placed on the location with maximum strain energy part. For the automotive roof, patches of constrained damping material, which has two different density, have been attached to the positions of the maximum strain energy with four kinds of thicknesses. This paper shows that the proper positioning of the damping material is very important and the effective thickness is about twice that of the roof panel.

Key words : Automotive roof(자동차 루프), Vibration characteristics(진동 특성), Loss factor(손실계수), Damping material(제진재), Passive vibration control(수동진동제어), Constrained layer damping(구속 감쇠층)

1. 서 론

가전제품이나 수송기계와 같은 기계구조물의 가동 시 발생하는 진동현상은 상품성을 저하시키고, 내구수명을 단축시키는 악영향을 가져올 수 있기 때문에 우선적으로 개선시켜야 한다. 특히 보(beam)와 넓은 평판 요소들의 결합으로 이루어진 자동차 차체(body)는 외부의 작은 가진으로도

큰 진동현상을 유발시킬 수 있으므로 적극적인 감쇠대책이 강구되어야 한다. 이러한 감쇠대책으로는 차체의 설계를 변경하거나 보강재 등을 적용시키는 방안도 있겠지만, 보다 현실적인 방안으로는 진동현상이 심한 구조물의 표면에 손실계수(loss factor)가 큰 제진재를 직접 부착시키는 수동적인 진동제어기법(passive vibration control)이 효과적이라 할 수 있다. 물론, 구조물의 박막에 작동기(actuator)를 부착시키는 능동적인 진동제어기법(active vibration control)도 가능하겠지만, 제어기

*To whom correspondence should be addressed.
leejeongkyun@sky.korea.com

의 부착 및 생산단가의 상승과 같은 현실적인 어려움이 있다. 제진재를 이용한 진동감쇠기법은 적용이 간단하고, 넓은 주파수와 온도조건에서도 우수한 감쇠력을 갖는 이점으로 인하여 지난 30여년간 활발히 연구되어 왔다.¹⁾ 특히 제진재를 이용한 구조설계는 전체 구조물의 강성에 큰 변화를 주지 않으면서 구조물의 진동 및 소음을 현저히 줄일 수 있고 경제적으로 비용이 적게들 뿐만 아니라, 성능 면에서도 우수하기 때문에 구조물의 과도한 소음 및 진동을 제어하기 위하여 산업 현장이나 자동차 등에 널리 사용되고 있다. 구조물 표면에 제진재를 부착하여 진동을 저감 시키는 방법은 구속 감쇠 기법(constrained layer damping, CLD)을 이용한 방법과 비구속 감쇠 기법(unconstrained layer damping, UCLD)을 이용하는 방법이 있다. 일반적으로 구속형 제진재는 에너지 감쇠효율이 크지만 비구속형 제진재는 저비용으로 제진 처리를 할 수 있기 때문에 자동차의 플로어, 트렁크 등에 많이 쓰이고 있다.^{2-6,11,12)} 본 연구에서는 제진재 적용을 통한 진동감쇠효과를 확인하기 위해서 알루미늄 사각평판을 통한 해석과 실험결과를 기초로 하여, 부분 모델인 자동차 루프에 제진재를 적용할 때 고려해야 하는 위치선정 및 제진재의 두께변화에 따른 자동차 루프의 진동감쇠효과를 파악하고자 한다.

2. 제진재의 적용

본 연구에서 고려한 제진재(damping material)는 실제 차량에 사용되고 있는 (주)헨켈 흥성의 고비중 제품(모델명:HSTM203H)과 저비중 제품(모델명:HSTM203)이다. 제진재는 Fig. 1과 같은 형태를 가지며, 구속층은 0.07mm 두께의 알루미늄 박판을 사용하였다.⁷⁾

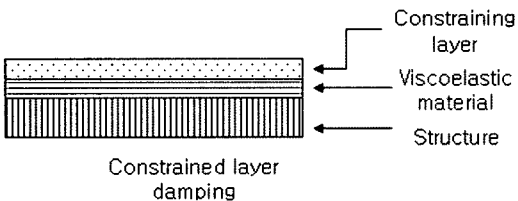


Fig. 1 Sketch of constrained layer

제진재의 효과를 높일 수 있는 적용위치를 파악하기 위한 검증단계로 알루미늄 사각평판을 채택하여 유한요소해석을 이용한 진동특성 및 제진재의 적용효과를 파악 하였다. 제진재 적용 위치는 평판에서 변형 에너지(strain energy)가 최대인 경우와 노달 라인(nodal line)부분을 중점적으로 검토하였다.^{8,9)} 이러한 검토결과를 자동차 루프에 응용하여 제진재 적용에 따른 효과적인 진동감쇠효과를 얻고자 한다.

2.1 알루미늄 사각평판의 유한요소해석과 실험

제진재의 효과적인 적용 위치를 파악하기 위해서 가로 300mm, 세로 200mm, 두께 2mm인 알루미늄 사각평판을 대상으로 유한 요소법을 통한 해석결과(normal mode, Sol 103)를 기초로, 변형 에너지가 최대인 지점과 모드 형상의 노달 라인에 제진재를 적용하여 충격 시험방법으로 진동감쇠 효과를 파악하였다.

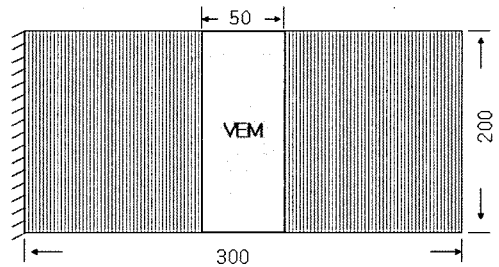


Fig. 2 Position of damping material on an aluminum plate

제진재는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 가로 50mm, 세로 200mm의 크기로 유한요소해석 결과에 의한 최대 변형에너지 분포 면적을 측정하여 전체 평판 면적의 1/6크기로 부착하였다.

2.2 자동차 루프의 모델 선정

시험적용 대상은 선정하기 위해 Fig. 3에 나타난 BIW, BIW + GLASS, ROOF TRIM MODEL 등 3가지 경우를 각각 유한요소해석을 통하여 1, 2, 3, 4의 지점에서 각각의 주파수 응답함수를 비교하였다.

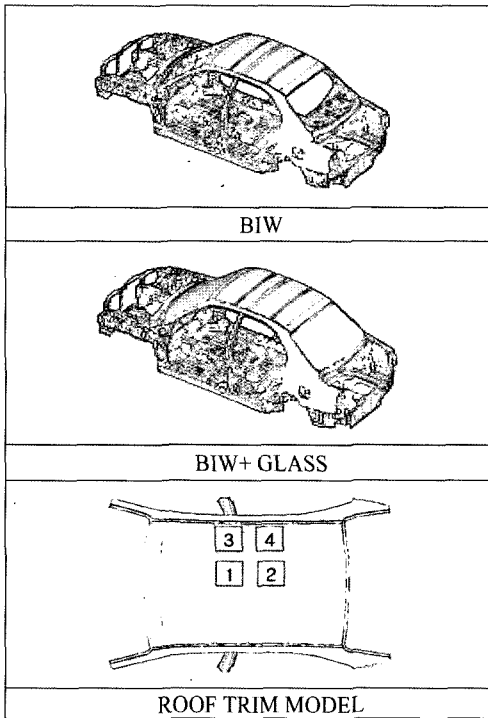


Fig. 3 FE Model of each Case

2.3 자동차 루프의 유한요소해석과 실험

본 연구에 적용된 자동차 루프는 전방 루프레일 (roof - rail), 후방 루프레일과 3개의 보우 루프(bow - roof)로 구성된 부분 모델로 총 17개의 박판(shell) 모델로 구성되었다. Fig. 5에 나타난 것처럼 박판은 CQUAD4와 CTRIA3의 판 요소를 사용하였고, 점 용접 부위는 두 판의 용접점을 강체 요소(RBE2)로 결합하는 일반적인 방법을 사용하였다. 그리고 보우 루프의 본딩(bonding) 부분은 접합부분의 면적을 고려하여 스프링요소(CELAS1)로 모델링 하였다. 유한 요소모델링과 해석은 상용 소프트웨어인 ALTAIR-HYPER MESH, MSC-PATRAN과 MSC-NASTRAN을 사용하였다.

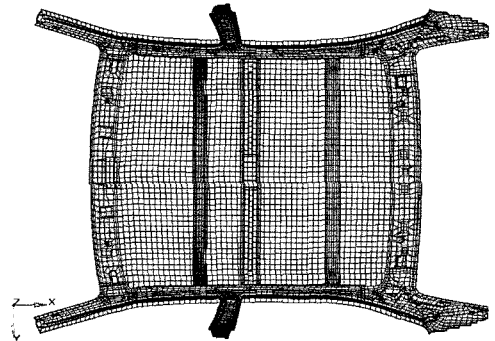


Fig. 5 FE model of automotive roof

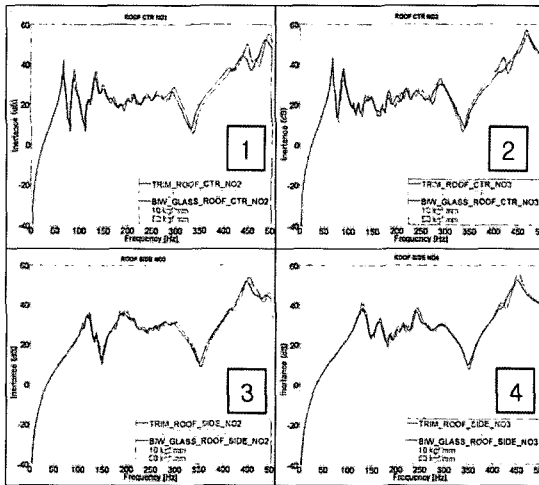


Fig. 4 FRFs of FE Model of each Case

Fig. 4의 주파수 응답함수에서 알 수 있듯이 BIW, BIW + GLASS, ROOF TRIM MODEL의 4지점의 저주파수(0~300Hz)에서 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다. 따라서 ROOF TRIM MODEL이 실험시간, 해석 시간 및 정도 측면에서 타당함을 알 수가 있다.

가로 2077mm, 세로 1528mm, 두께 0.75mm인 자동차 루프에 제진재가 없는 경우와 두께 1.5mm 제진재에 0.07mm 알루미늄 구속재가 부착된 경우를 각각의 적용위치에 대해서 주파수 응답함수(FRF)를 비교하였다. 또한, 제진재의 두께(0.8, 1.0, 1.5, 2.0mm)에 대해서도 모두 4가지 형태로 각각 실험을 하였으며, 자동차 루프의 경계 조건은 Photo. 1과 같이 양단 자유상태로 하였다. 진동 가진은 버스트 랜덤(Burst Random)에 의한 각 부위의 진동 신호를 측정하였으며, 다채널 신호분석기(LMS CADA-X)와 B&K 사의 가진기(B&K 4805) 및 가속도계(B&K 4506)를 사용하였다. 한 지점에서 가진을 하고, 5개 지점에서 가속도계를 사용하여 주파수 응답함수(FRF)와 기여도(Coherence)를 측정하였다. 각 부위의 평균 측정 횟수(averaging)는 50회씩 실시하였으

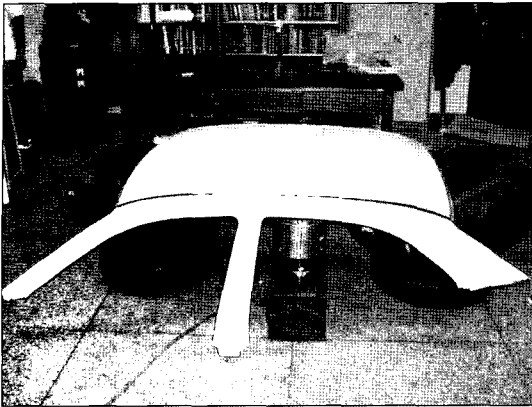


Photo. 1 Experimental set-up for modal test

며, 측정지점의 수는 45개이며 각각 3축 가속도계를 사용하였다. 제진재는 총 4개로 그 크기와 형상은 FEM 결과에 의한 최대변형에너지(Max. Strain energy)가 나타나는 부위와 동일하게 직사각형으로 제작하여 적용하였다.

Table 1 Apparatus of automotive roof test

Apparatus	Model
FFT analyzer	LMS CADA-X
Accelerometer	B&K 4506
Exciter	B&K 4805
Amplifier	B&K 2626

3. 제진재의 적용 및 검증

알루미늄 사각 평판의 해석 및 제진재 적용에 따른 진동감쇠효과를 검증하고, 이를 기초로 자동차 루프에서 제진재의 부착위치를 선정하고, 실험을 통해 제진재 적용 효과를 확인 하였으며,¹⁰⁾ 선정된 위치에 0.8, 1.0, 1.5, 2.0mm 4가지의 두께를 적용하여 두께에 대한 제진 효과를 검증 하였다.

루프 판넬의 기준으로 판넬 두께의 1배, 1.5배, 2배, 2.5배 증가시켜 실험을 하였다. 여기서 단순 구조물(Beam)에 두께별로 적용한 결과 제진재의 두께가 2~3배 이상이 되었을 때 진동감쇠효과가 차이를 없음을 확인 하였다.

3.1 알루미늄 사각평판의 제진재 적용 결과

알루미늄 사각평판의 유한요소해석을 통하여 변

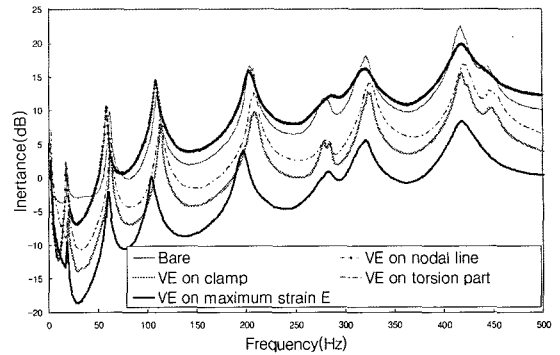


Fig. 6 Comparison of FRFs for different damping material locations

형 에너지의 분포 및 진동형태를 파악한 후, 최대 변형에너지가 위치하는 부위, 굽힘 진동의 노달 라인, 고정부위, 비틀림 진동의 노달 라인 등을 중심으로 각각 제진재를 부착하여 진동감쇠효과를 파악하였다. Fig. 6은 진동감쇠효과를 보여주는 주파수 응답 함수(FRF)를 보여준다. 그 결과, 비틀림 모드의 노달라인에 붙인 경우, 1차 굽힘 모드의 스트레인 에너지/ 노달라인 부분(on clamp)에 붙인 경우, 2차 굽힘 모드의 최대변형에너지가 분포하는 부위에 부착한 경우 순으로 진동감쇠효과가 파악되며, 3차 굽힘 모드의 노달라인에 붙인 경우는 오히려 역효과를 나타남을 확인하였다.

3.2 자동차 루프의 제진재 적용 결과

자동차 루프의 유한요소해석결과를 참고하면, 관심 주파수인 50~200Hz 영역에서 3개의 보우 루프 프레임 사이에서 변형 에너지가 집중되고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 7). 알루미늄 사각평판의 실험결과로부터 진동형태보다는 변형 에너지를 기준으로 제진재를 부착시키는 방안이 진동감쇠측면에서 더욱 효과적임을 파악하였으므로, Fig. 8과 같이 패치형태의 제진재를 루프에 적용시켰다.

적용된 제진재의 두께는 각각 0.8mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm 등이며, 구속재는 0.07mm의 두께를 갖는 알루미늄 박판 이용하여, 제진재가 적용되지 않았을 때부터 적용된 제진재의 두께를 늘려가면서 진동특성 변화를 파악하였다.

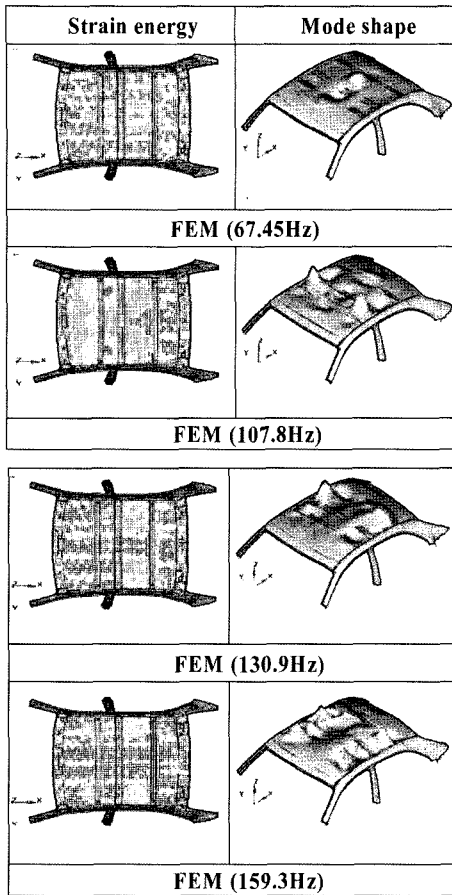


Fig. 7 Strain energy distribution and mode shape of a roof

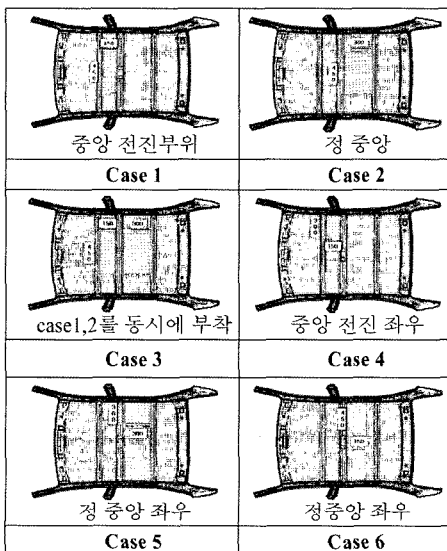


Fig. 8 Position of damping materials on an automotive roof

자동차 루프의 제진재 적용결과는 Case 3의 경우가 다른 경우에 비해서 90Hz이상의 영역에 걸쳐 우수한 제진 효과가 나타남을 알 수 있다(Fig. 9~10). Case 4, 5, 6은 루프 사이트에 각각 2개씩 대칭적으로 제진재를 적용한 경우이며, 각 부착 조건마다 제진재의 고비중 제품과 저비중 제품을 사용하여 실험 하였다(Fig. 9~12).

실험 결과인 Fig. 9~12을 검토하여 가장 제진 성능이 좋은 Case 3, 5의 경우를 선정하였고, 동일한 위치에서 고비중 제품(모델명:HSTM203H)과 저비중 제품(모델명:HSTM203)을 각각 적용하였으나 제진 성능에는 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다. 그리고 Case7은 case 3,5의 위치에 제진재의 적용면적을 약 1/2로 축소시켰을 때의 실험 결과로 Fig. 13~14와 같다.

그 결과, 제진재의 부착면적은 작고 부착 위치는 많아 졌지만, 제진 성능 면에서도 10 ~ 200Hz에서는 약 5~10dB 정도 낮게 측정되고 200Hz이상에서는

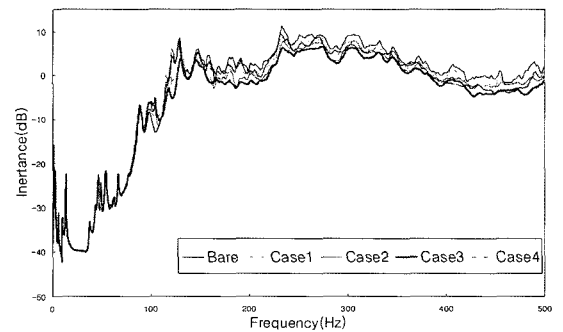


Fig. 9 Comparison of vibration level for different positions of the damping material (고비중)

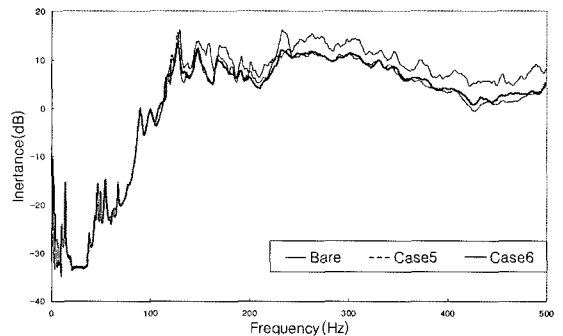


Fig. 10 Comparison of vibration level for different positions of the damping material (저비중)

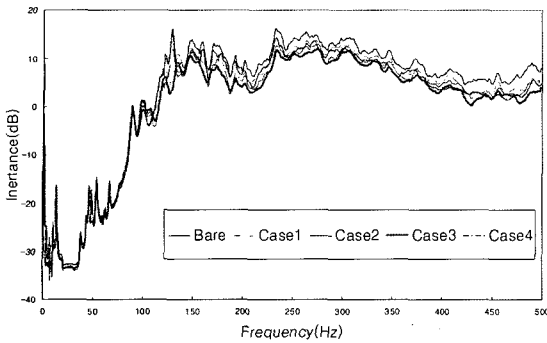


Fig. 11 Comparison of vibration level for different positions of the damping material (저비중)

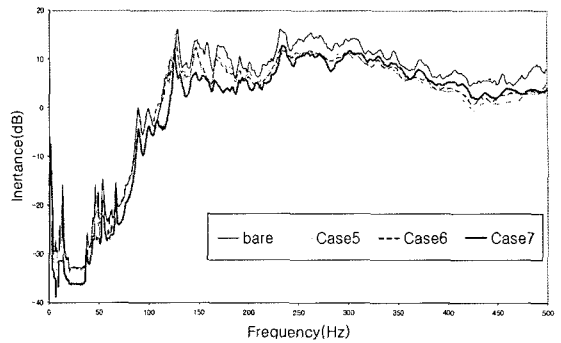


Fig. 13 Comparison of vibration level for different positions of the damping material (고비중)

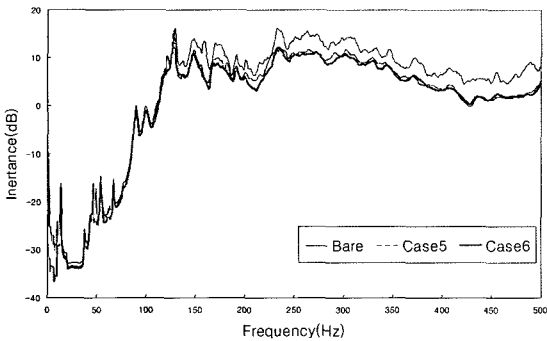


Fig. 12 Comparison of vibration level for different positions of the damping material (저비중)

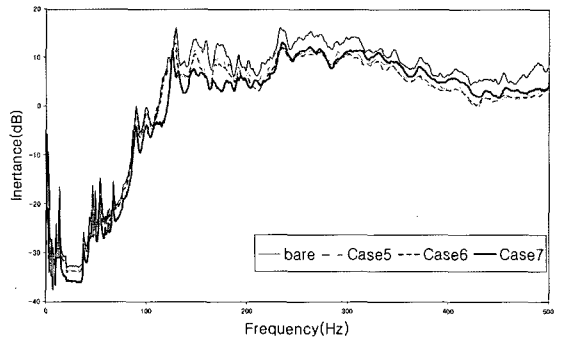


Fig. 14 Comparison of vibration level for different positions of the damping material (저비중)

Case 3, 5의 결과보다 2~3dB 높지만 제진재가 적용되지 않을 경우보다는 전 주파수 영역에서 5~10dB 낮게 측정되었다.

또한, Case7의 위치에 각각 0.8mm, 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm의 제진재를 적용시켜서 두께에 따른 제진 성능을 비교하였다. 그 결과 Fig. 15와 같이 주파수 응답함수를 비교해 보면 미소한 진동레벨의 변화가 있지만 전체적인 진동 특성에 있어서는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

Table 2 고비중과 저비중의 특성 비교

	비중	질량(Case7)
고비중	2.16 g/cm ³	1.38 kg
저비중	1.65 g/cm ³	1.05 kg

일반적으로 제진재의 두께가 두꺼워질수록 제진 성능이 좋아지지만, 자동차 루프 자체의 판넬이 얇아서 제진재의 두께를 두껍게 하는 데 한계가 있다.

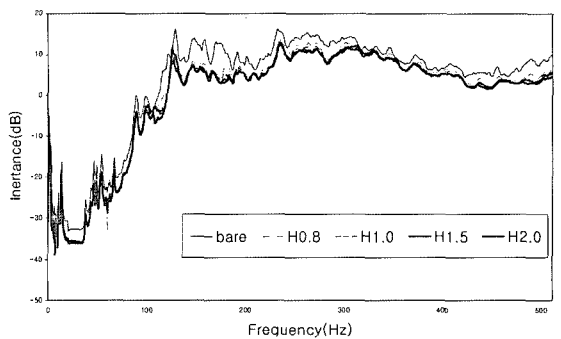


Fig. 15 Comparison of FRFs for different thickness of the damping material

따라서 자동차 루프의 두께를 고려하여 다양한 두께의 제진재를 적용시켜 본 결과, 제진재의 두께는 루프판넬의 약 2배가 효과적임을 알 수 있었다.

4. 결론

제진재를 이용하여 자동차 루프 구조물의 진동특

성에 대한 연구를 수행 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단순 형상의 사각평판에 제진재를 적용시켜 제진 성능의 타당성을 입증하고 효과적인 부착 위치를 결정하였다.
- 2) 평판에서 변형 에너지가 최대가 되는 지점에 제진재를 부착하였을 때 제진 효과가 가장 우수하였으며, 유한요소해석(FEM)을 이용한 최대변형 에너지 개념이 제진재의 효과적인 위치설정에 좋은 기준이 될 수 있음을 확인하였다.
- 3) 해석결과에 따른 최대 변형에너지의 위치에 제진재를 부분 모델 자동차 루프에 직접 적용한 결과, 관심 주파수 영역인 50 ~ 200Hz에서 우수한 제진 효과가 얻어짐을 확인하였다.
- 4) 고비중 제품(모델명:HSTM203H)과 저비중 제품(모델명:HSTM203)을 비교 실험한 결과, 제진 성능에 있어서 큰 차이를 보이지 않음을 확인할 수 있었다. 반면에 고비중대신 저비중 제품을 사용하게 되면 약 23%의 질량감소효과를 얻을 수 있었다.
- 5) 자동차 루프에 두께가 다른 제진재를 붙여서 실험한 결과 제진재의 두께가 루프판넬의 두께에 2배정도로 하였을 때 가장 효과적임을 알 수 있었다.

References

- 1) B. Baker and B. Wyerman, "Automotive Noise and Vibration Control Practices in the New Millennium," SAE 2003-01-1589, 2003.
- 2) Y. K. Kang, "Vibration Characteristics of Laminated Composite Beams with Passive Constrained Layer Damping," Transactions of KSNVE, Vol.12, No.12, pp.964-969, 2002.
- 3) B. C. Nakra, "Vibration Control in Machines and Structures using Viscoelastic Damping," Journal of Sound and Vibration, Vol.211, No.3, pp.449-465, 1998.
- 4) D. H. Lee and W. S. Hwang, "Length Optimization for Unconstrained Visco-elastic Damping Layer of Beams," Proceedings of KSNVE Annual Autumn Conference, pp.665-671, 2003.
- 5) W. J. Hwang and J. M. Park, "Vibration Damping Analysis of Viscoelastic and Viscoelastically Damped Structures," Transactions of KSNVE, Vol.10, No.1, pp.64-73, 2000.
- 6) H. He, Q. Zhang and R. J. Fridrich, "Vehicle Panel Vibro-Acoustic Behavior Damping," SAE 2003-01-1406, 2003.
- 7) I. Y. Shen and Y. H. Perter, "Thickness Deformation of Constrained Layer Damping : An Experimental and Theoretical Evaluation," Journal of Vibration and Acoustics, Vol.123, pp.213-221, 2001.
- 8) Y. K. Kang and C. M. Kim, "Placement of Passive Constrained Layer Damping for Vibration Control of Smart Plate," Proceeding of KAMES 2002 Joint Symposium, KSNVE 02F003, 2002.
- 9) A. D. Nashif, D. I. G. Jones and J. P. Henderson, Vibration Damping, John Wiley & Sons, 1985.
- 10) J. K. Lee, C. M. Kim, Y. K. Kang, J. S. SA and S. K. Hong, "An Experimental Study on Vibration Characteristics of Automotive Roof with Passive Constrained Layer Damping," Proceedings of KSNVE Annual Spring Conference, pp.613-617, 2004.
- 11) S. W. Kang and J. M. Lee, "Noise Reduction of an Enclosed Cavity by Means of Air-gap Systems," Int. J. Automotive Technology, Vol.5, No.3, pp.209-213, 2004.
- 12) K. H. Ko, S. J. Heo and H. Kook, "Evaluation of Road-induced Noise of a Vehicle Using Experimental Approach," Int. J. Automotive Technology, Vol.4, No.1, pp.21-30, 2003.