

자동차 도어의 진동 저감을 위한 제진재 설계에 관한 연구

A Study on Damping Material Design for Vibration Suppression of the Automotive Door

정명근*·김찬목**·사중성***·박종오****

Myung-Keun Jung, Chan-Mook Kim, Jong-Sung Sa, Jong-O Park

Key Words : Automotive Door(자동차 도어), Damping Material(제진재), Loss Factor(손실계수), Vibration Suppression(진동 저감), Strain Energy(변형 에너지), Damping Effects(제진 효과), DOE(실험계획법).

ABSTRACT

In automotive industry, all passenger vehicles are treated with damping materials to reduce structure borne noise. The effectiveness of damping treatments depends upon design parameters such as choice of damping materials, locations and size of the treatment. Generally, the CAE method uses modal strain-energy information of the bare structural panels to identify flexible regions, which in turn facilitates optimization of damping treatments with respect to location and size. This paper proposes a design of the damping material with a CAE(Computer Aided Engineering) methodology based on finite element analysis and DOE(Design Of Experiments) to optimize damping treatments.

1. 서론

진동제어 방법의 하나로 널리 응용되고 있는 진동감쇠 제어기술은 급속한 산업화에 따른 불필요한 진동이나 소음을 효과적으로 줄이기 위하여 광범위하게 연구되고 있다. 그 중 점탄성 물질은 사용상의 편의성과 경제성 등의 장점 때문에 항공기와 자동차의 내외벽등 산업분야에 있어 폭 넓게 사용되고 있다. 일반적으로 구조물에 점탄성 재료를 이용하여 감쇠를 증가시키는 방법은 구조물의 표면에 하나의 점탄성 재료층만을 부착하는 비구속층 감쇠처리 방법(unconstrained-layer damping treatment, UCLDT)과 이에 금속층으로 된 구속층을 적층하여 점탄성재료의 자유층을 덮는 구속층 감쇠처리 방법(constrained-layer damping treatment, CLDT)이 있다. 전자의 방법은 점탄성층이 굽힘변형에 의하여 감쇠효과를 가지는 반면에 후자의 방법은 굽힘변형은 물론 전단변형에 의해서도 감쇠효과를 가진다. 따라서, 구속층 감쇠처리 방법은 대개 비구속층 감쇠 처리보다 높은 감쇠효과를 가진다⁽¹⁻⁴⁾.

본 연구에서는 구속 감쇠처리 된 제진재 설계의 절차를 보이고자 한다. 먼저, 설계변수의 하나인

제진재 적용 위치 결정을 위해 일반적으로 이용되는 모달 변형 에너지(modal strain energy)개념을 도입한 CAE(computer aided engineering)방법⁽⁵⁾을 통하여 제진재 적용 위치를 선정하였고, 제진재 크기 및 두께에 대한 설계변수 선정을 위해 직교 배열표(orthogonal array table)를 이용한 실험계획법(design of experiments : DOE)⁽⁹⁾을 적용하였다.

2. 자동차 Door 의 해석 및 실험

본 연구에 적용된 도어는 총 22 개의 박판(shell) 모델로 구성된 도어 어셈블리(door assembly)모델로 Fig.1 에 나타난 것과 같이 프론트 도어(front door) 운전자 쪽이다. 총 8181 개의 판 요소(CQUAD4 & CTRIA3)를 사용하였고 점 용접 부위는 두 판의 용접 점을 강체요소(RBE2)로 결합하는 일반적인 방법을 사용하였다. 그리고 도어 사이드 빔(Side Intrusion Beam)의 본딩(bonding) 부분은 접합부분의 면적을 고려하여 스프링요소(CELAS1)로 모델링하였다. 유한요소 모델링과 해석은 상용 소프트웨어인 ALTAIR-HYPER MESH, MSC-PATRAN, 및 MSC-NASTRAN⁽¹⁰⁾을 사용하였다.

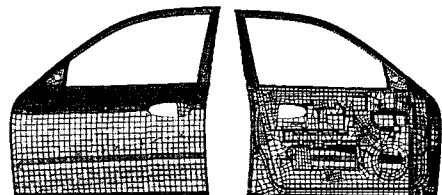


Fig.1 FE model of front door

* 국민대학교 자동차공학전문대학원 석사과정
E-mail : leonjmk@hanmail.net
Tel : (02) 919-0514, Fax : (02) 910-4718
** 국민대학교 자동차공학전문대학원 교수
*** 서일 대학 자동차과
**** (주) 헨켈 흥성

자동차 도어 실험의 경계 조건은 Fig.2 와 같이 자유단 상태로 하였으며, 버스트 랜덤(Burst Random)가진에 의한 각 부위의 진동 신호를 측정 하였으며 다채널 신호분석기(LMS CADA-X), B&K 사의 가진기(B&K 4805)와 가속도계(B&K 4506)를 사용하였다(Table 1). 한 지점에서 가진을 하고, 3 개 지점에서 가속도계를 사용하여 주파수 응답함수(FRF)와 코히런스(coherence)를 측정하였다. 실험 시 평균 측정 횟수(averaging)는 50 회 실시 하였으며, 응답지점 수는 83 개 이고, 각각 3 축 가속도계를 사용하였다.

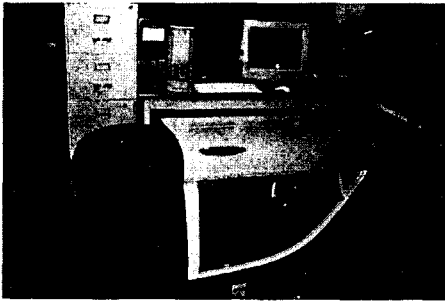


Fig.2 Experimental set-up for modal test

Table 1 Apparatus of automotive door test

Apparatus	Model
FFT analyzer	LMS CADA-X
Exciter	B&K 4805
Charge Amplifier	B&K 2626
Power Amplifier	B&K 2707
Accelerometer	B&K 4506

3. 제진재 위치 선정

본 연구에서 사용한 제진재(damping material)는 실제 차량에 사용되고 있는 현켈 흥성의 고 비중 제품인 HSTM203H 를 사용하였고 제진재는 Fig.3 의 (b)와 같은 형태로 적용하였다.

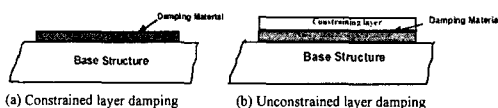


Fig.3 Sketch of constrained layer and unconstrained layer damping

제진재를 어떤 위치에 부착하는 것이 가장 합리적인가 하는 문제는 제진재를 사용하는 이유에 근거하여 접근하는 것이 타당할 것이다. 이에 따라 본 연구에서는 자동차 도어가 진동할 때 각 해당 모드에서의 변형 에너지(strain energy) 분포 상태를 이용한다. 변형 에너지에 대한 고려는 제진재의 제진 원리에 기초한다. 즉 제진재는 구조물에 부착되어 구조물이 진동할 경우 진동 변위에 따른 변형을 반복하게 된다. 이러한 과정에서 제진재는 주기적인 변형을 일으키며, 변형에 따른 운동 에너지가 열에너지로 변환되어 진동 에너지를 소산 시키게 된다. 따라서 변형 에너지가 집중되는 지점을 중심으로 제진재를 부착하는 것이 진동을 억제하기 위해 타당성이 있다고 판단할 수 있다⁽⁵⁻⁸⁾.

제진재 위치에 따른 제진 효과를 분석하고 제진재 적용 위치 선정을 위하여 자동차 도어에 대해 MSC-Nastran 의 Normal Mode(Sol 103)해석을 수행하고 Fig.4 와 같이 관심주파수 대역인 100~200 Hz 에서 변형에너지 분포를 확인하였다. 해석 결과, 제진재 적용 위치 선정을 위하여 Fig.5 와 같이 도어 사이드 빔을 기준으로 두께 2mm 의 제진재를 25cm x 9cm , 25cm x 15cm 의 크기로 각각 윗부분(case1)과 아래부분(case2)에 부착하여 실험을 하였다. 그 결과는 Fig.6 과 같이 case1 에 비해 case2 의 제진 효과가 우수함을 볼 수 있다.

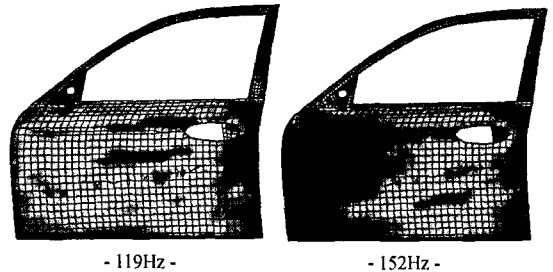


Fig.4 Strain energy distribution of automotive door



Fig.5 Position of damping material on an automotive door

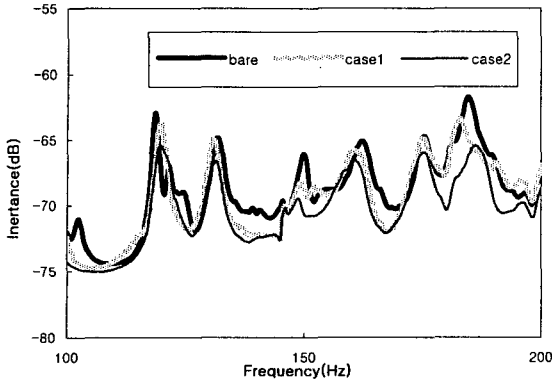


Fig.6 Comparison of FRFs according to damping material (Case1 & Case2)

4. 제진재 크기 및 두께 선정

4.1 실험계획법

실험계획법(Design of Experiment)은 제품의 특성에 영향을 미치는 여러 가지 인자를 선정하고 이들의 관계를 알아보기 위한 실험을 실시하여 제품의 최적 제조조건을 경제적으로 찾아내는 기법이다. 즉, 이것은 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 실시하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 분석하면 최소의 실험횟수로 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라 할 수 있다.

실험실이나 제조현장에서 실험을 할 경우에 실험결과에 영향을 주는 많은 인자들이 존재하게 된다. 그리고, 각 인자들은 여러 개의 값을 가질 수 있다. 예를 들어, 결과에 영향을 주는 인자(factor)가 n 이고, 각 인자에 대하여 2 수준만을 고려하고 각각의 조합에 대하여 1 회 씩의 실험만을 할 지라도 요인배치법(factorial design)을 사용하게 되면 $m=2^n$ 회의 실험을 요구한다.

본 연구에서 이용하고자 하는 3-수준 직교 배열표(orthogonal array table)는 일반적으로 다음과 같이 표현된다⁽⁹⁾.

$$L_{3^m} (3^{(3^m-1)/2}) \quad (1)$$

여기서 m 은 2 이상의 정수를 의미하며, 3^m 은 실험의 크기, $(3^m-1)/2$ 은 열의 수를 나타낸다. 3-수준계의 가장 작은 직교 배열표는 $m=2$ 의 $L_9(3^4)$ 이다. $m=3, 4$ 일 때에는 $L_{27}(3^{13}), L_{81}(3^{40})$ 이 된다.

특성치에 영향을 미치는 요인을 찾기 위해서는 주로 2^형 실험계획이 많이 사용되지만, 수준수가 반드시 3 개이어야 하거나, 인자가 현재의 조건보다 큰 쪽이 좋은가, 작은 쪽이 좋은가가 명확하지 않을 때, 3^형의 실험이 사용되고 3-수준계의 직교 배열표가 사용된다.

4.2 제진재 형상 설계

제진재 형상 설계는 3-수준 직교 배열표를 이용하여 DOE 모델의 손실계수(Loss Factor) 값으로 제진 효과를 비교하여 사이즈(size)를 선정하였다. 형상설계의 기준은 초기모델(initial model)을 기본으로 제진 효과는 현재의 수준을 유지하되 제진재의 사이즈(size)는 현재 이하로 줄이는 것으로 선정하였다.

Table 2 Orthogonal array table for DOE

	DV1	DV2	DV3	DV4
1	0	0	0	0
2	0	1	1	1
3	0	2	2	2
4	1	0	1	2
5	1	1	2	0
6	1	2	0	1
7	2	0	2	1
8	2	1	0	2
9	2	2	1	0

형상 설계 변수에 대한 3-수준 직교 배열표를 Table 2 에 나타하였다. DV1~DV3 의 값은 각각 제진재 크기 및 두께를 나타내는 값으로, 그 값은 2 가 되는 쪽이 제진재 사이즈가 줄어드는 모델이고, DV4 는 초기모델 기준으로 제진재 사이즈를 줄일 경우 제진재 위치의 기준점 이다. 각 설계변수의 실제 값은 Fig.7 에서 제진재 가로방향 길이 DV1 는 15~25cm, 마찬가지로 세로방향 길이 DV2 는 5~15cm, 제진재 두께 DV3 는 1~2mm 이고 제진재 위치의 기준점 DV4 는 A, B, C 로 선정하였다.



Fig.7 Design variable for damping material size

각각의 DOE 모델은 앞서 선정된 제진재 적용위치(case2)에 적용하여 도어 모달 실험(modal test)을 실시하였고, 각 설계변수의 민감도 해석을 위해 Shainin의 다변수 차트⁽¹¹⁾ 개념을 도입하여 민감도를 분석하였으며, 결과를 Fig.8에 나타내었다. 각 수준에 대해서 특성치의 변화가 선형적으로 감소하는 양상을 보이며 제진재의 사이즈 및 위치 기준점의 변화가 특성치에 영향이 있음을 확인할 수 있었다. Fig.8의 민감도 분석 결과, DOE 모델에 존재하지 않는 새로운 모델(new model)을 생성하였다(Table 3). Fig.9는 이렇게 생성된 새로운 모델을 나타낸다.

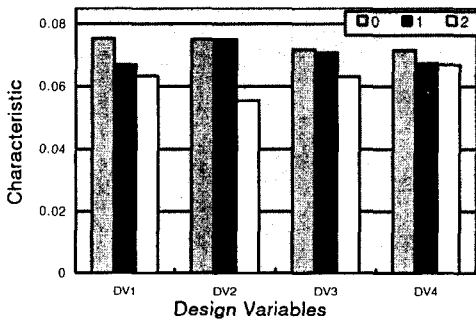


Fig.8 Sensitivity for characteristic

Table 3 New combination of design variables

	DV1	DV2	DV3	DV4
New Model	0	1	1	0



Fig.9 Damping material of the new model

새로운 모델의 무게는 96g인데, 188g인 초기 모델의 무게에 비해 49%정도 가벼워 졌음을 알 수 있다. 새로운 모델을 도어에 적용하여 이전과 동일한 조건에서 실험을 수행하였으며, 초기 모델과의 비교를 통해 새로운 모델의 제진 효과를 확인하였다(Fig.10).

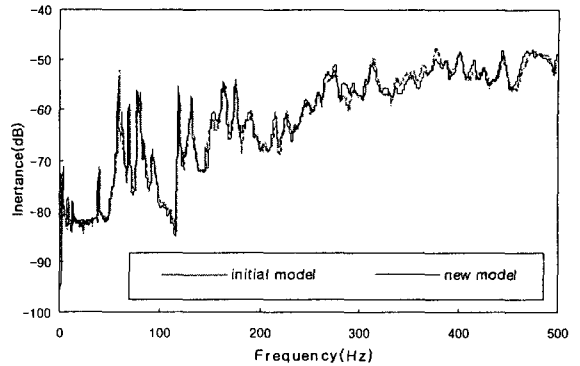


Fig.10 Comparison of FRFs according to viscoelastic patches (Case1 & Case2)

5. 결론

본 연구에서는 자동차 도어의 제진재 설계 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) CAE 방법을 이용한 해석과 실험계획법을 이용하여 자동차 도어 어셈블리 모델의 제진재 설계의 효과적인 방법을 제시하였다.
- (2) 변형 에너지 개념을 도입한 CAE 방법을 통하여 제진재 적용 위치를 선정하였다.
- (3) 직교배열표를 이용한 실험계획법을 적용하여 제진재 크기 및 두께를 선정하였다.
- (4) 일반적으로 CAE 방법만을 사용하여 구하는 제진재 형상보다 본 연구에서 설계된 형상은 49% 무게 감소 효과를 얻었다.
- (5) 보다 정교한 설계를 위해 반응표면 모델을 생성하여 순차적 근사 최적화를 수행하여야 한다.

후기

본 논문은 2004년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Rao, M. D., 2003, Recent Applications of Viscoelastic Damping for Noise Control in Automobiles and Commercial Airplanes, Journal of Sound and Vibration, Vol 262, pp. 457~474.

- (2) 김사수 등, 1997, “점탄성 적층보의 동적 특성 평가와 굽힘진동 감쇠를 위한 최적설계”, 추계학술대회 논문집, 대한조선학회, pp. 526~529.
- (3) 이준근 등, 1992, “점탄성재료의 진동감쇠특성에 관한 연구”, 추계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회.
- (4) 박용순 등, 1997, “점탄성층을 삽입한 3 층 적층보의 진동감쇠특성에 관한 연구”, 한국소음진동공학회, pp.511~519.
- (5) Subramaian, S., and Surampudi, R., and Thomson, K. R., and Vallurupalli, S., 2003, Optimization of Damping Treatment for Structure Borne Noise Reduction, SAE Noise and Vibration Conference and Exposition, paper 2003-01-1592.
- (6) 장동연 등, 2004, “자동차 판넬 진동-소음 저감을 위한 제진재 최적 위치 설계”, MSC Korea User's Conference.
- (7) 이정균 등, 2004, “수동구속감쇠층을 갖는 자동차 루프의 진동특성에 대한 실험적 연구”, 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 613~617.
- (8) Nashif, A. D., 1985, Vibration Damping, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (9) 박성현, 2004, 현대실험계획법, 민영사.
- (10) MSC/NASTRAN, Quick Reference Guide, THE MacNeal-Schwendler Corporation.
- (11) Krottmaier, J., 1993, Optimizing Engineering Designs, McGraw-Hill, Inc., Europe.