

## 허니컴 샌드위치판의 투과손실 개선에 관한 실험적 연구

### An Experimental Study to Improving the Sound Transmission Loss of Honeycomb Sandwich Plates

유 영 훈\*, 양 보 석\*\*  
Y. H. Yu, B. S. Yang

#### ABSTRACT

The sound insulation capacity of honeycomb sandwich plates which have relatively higher strength ratios to weight is poorer than those of uniform and another sandwich plates. Therefore, improvement of the sound insulation capacity of the honeycomb sandwich plate which has a merit of lightness is required to use it in automobile and rapid rail road industries. In this study, to improving the sound insulation capacity of the honeycomb sandwich plate, the sound transmission loss of the structure is experimentally investigated by adding a viscoelastic damping layer. The effective add position and thickness of the layer were investigated from the viewpoints of both sound transmission loss and improved sound transmission loss over the frequency range from 800Hz to 10kHz.

주요기술용어 : Honeycomb Sandwich Plate(허니컴 샌드위치판), Viscoelastic Damping Material (점탄성제진재), Sound Transmission Loss(투과손실), Improved Sound Transmission Loss(개선된 투과손실), Sound Intensity Method(음향인텐시티법)

#### 1. 서 론

허니컴형상의 코어(core)를 갖는 샌드위치판은 구조적으로 가벼운 것에 비해 높은 강성을

얻을 수 있는 장점을 갖고 있기 때문에 우주항공, 선박 및 건축산업등에서 구조용 재료로 널리 사용되고 있다. 최근에는 자동차를 비롯한 고속철도 운송산업에서도 연료비 규제의 강화와 차량의 고속화 및 경제성을 높이기 위한 경량화가 요구되고 있다. 또한, 전기자동차의 경우는 차체의 경량화가 필수적이어서 허니컴형상의 코어를

\* 정회원, 목포해양대학교 기관공학부  
\*\* 부경대학교 기계공학과

갖는 샌드위치판이 주목을 받고 있다. 그러나, 허니컴 샌드위치판(이하, 허니컴판이라 부름)은 경량으로 고강성을 얻을 수 있는 장점이 있는 반면, 치음성능에 있어서는 단일 판이나 다른 샌드위치형상의 구조물에 비교하여 떨어지기 때문에 투과손실의 개선이 요망된다.

허니컴판의 투과손실을 개선하기 위한 방법으로는 코어의 치수 및 재질을 변경하여 코어의 강성을 변화시키는 방법과 허니컴판의 표면판 및 코어부분에 제진층을 첨가하는 방법 등에 관한 연구가 있다.<sup>1)~4)</sup>

Lang<sup>1)</sup>와 Ford<sup>2)</sup>는 샌드위치판의 투과손실이 낮게 얻어지는 주파수영역을 사용주파수범위의 영역 밖으로 이동시키기 위해 코어의 재료를 선택하여 샌드위치판의 강성을 변화시키는 방법으로 사용주파수 영역에서의 투과손실을 개선하는 방법을 제안하고 있다.

久我<sup>3)</sup>는 허니컴판의 중간에 제진성능이 높은 발포형의 플라스틱판을 코어부분에 첨가하여 투과손실을 개선하는 방법을 제안하고 있다. 이 방법은 허니컴코어를 두께방향으로 둘로 나누어 제진층을 삽입하는 것으로 비교적 높은 강성이 요구되지 않는 건축용의 벽으로는 사용 가능성이 높으나 고강성이 동시에 요구되는 구조물(예로서, 자동차 혹은 고속열차등의 바닥판 및 외판)에는 적절한 개선방법이 되지 못한다.

Jefferson<sup>4)</sup>은 허니컴판의 양면에 제진층과 구속판을 차례로 적층하여 판의 진동저감에 의해 투과손실을 개선하는 방법을 제안하였다. 그러나, 제진층의 첨가에 의한 진동제어는 탄성판의 전체 면적에 걸쳐 제진층을 구속하기 보다는 비구속형으로 부분적으로 도포하는 것이 제작비는 물론 경량화에 있어서도 효과적인 방법으로 알려져있다.<sup>5),6)</sup>

본 연구는 허니컴판의 투과손실을 개선하기 위한 기초적인 연구로 다음과 같은 3단계의 실험을 수행하여 검토하였다. 첫째, 허니컴코어의 높이가 다른 3종류의 허니컴판과 균일평판에 대한 치음성능을 투과손실로써 비교하여 본 연구의 필요성을 확인하였다. 둘째, 표면판(face plate)에 점탄성제진층을 균일하게 도포하는 방법을 이용

하여 투과손실의 개선효과를 조사하였다. 셋째, 허니컴판의 투과손실을 효과적으로 개선하기 위해 표면판에 점탄성제진층을 부분적으로 도포하는 방법을 이용하여 치음성능의 개선효과를 조사하였다.

## 2. 투과손실의 개선과 평가방법

### 2.1 투과손실(STL : Sound Transmission Loss)

벽판의 치음성능을 나타내는 투과손실은 판으로 분리되어진 2개의 방에서 얻어지는 음장에 대한 에너지의 비율에 의해 산출된다. 따라서 허니컴판이 소음을 차단하는 정도를 나타내는 투과손실은 입사에너지( $P_i$ )에 대한 투과에너지( $P_t$ )의 비율인 음향투과율(sound transmission coefficient :  $\tau$ )로써 다음 식과 같이 정의된다.

$$\tau = P_t / P_i \quad (1)$$

여기서,  $P_i$ 는 판에 입사하는 에너지이며 음원실을 확산음장으로 하면, 입사에너지는 다음과 같이 얻을 수 있다.<sup>7)</sup>

$$P_i = \frac{ESC}{4} \quad (2)$$

여기서,  $E$ 는 음원실의 에너지밀도,  $S$ 는 허니컴판의 전면적,  $c$ 는 음속을 나타낸다. 그리고 판을 투과하는 에너지( $P_t$ )는 음향인텐시티(sound intensity)의 합으로 다음 식과 같이 얻어진다.

$$P_t = \sum_{j=1}^n (I_j \cdot S_j) \quad (3)$$

여기에서  $n$ 은 음향인텐시티를 측정하기 위한 판의 분할수를 나타낸다.

투과손실은 음향투과율의 역수를 이용하여 다음 식으로 정의된다.

$$STL = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{\tau} \right) \quad (4)$$

$$= 10 \log_{10}(Ec) + 10 \log_{10} \left\{ \frac{S}{4 \sum_{j=1}^n (I_{jS})} \right\}$$

확산음장에서는 음원실 내부의 음향에너지 밀도( $10 \log_{10} Ec$ )가 평균 음압레벨 ( $\overline{L}_P$ )과 동일하므로 음향 투과손실(STL)은 다음 식으로 얻어진다.<sup>7)</sup>

$$STL = \overline{L}_P + 10 \log_{10} S - 10 \log_{10} \sum_{j=1}^n (I_{jS}) - 6.02 \quad (5)$$

## 2.2 제진재에 의한 투과손실의 개선

제진재의 도포에 의해 개선되는 투과손실(ISTL : Improved Sound Transmission Loss)은 제진층이 부가되어진 허니컴판의 투과손실과 제진재가 도포되지 않은 허니컴판의 투과손실의 차에 의하여 구하여진다. 즉, 개선된 투과손실(ISTL)은 다음 식과 같이 정의한다.

$$ISTL = STL_{damp} - STL_{bare} \quad (6)$$

여기서  $STL_{damp}$ 는 제진재가 도포되어진 경우의 투과손실을,  $STL_{bare}$ 는 제진재가 도포되지 않은 허니컴판의 투과손실을 보인다. 따라서 식(6)과 식(5)로부터 개선된 투과손실(ISTL)은 다음 식과 같이 얻어진다.

$$ISTL = (\overline{L}_P_{damp} - \overline{L}_P_{bare}) + 10 \log_{10} \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{(I_j \cdot S_j)_{bare}}{(I_j \cdot S_j)_{damp}} \right\} \quad (7)$$

## 3. 실험

### 3.1 실험장치 및 측정장치

투과손실의 측정에 사용되어진 무향실(용적  $7 \times 7 \times 8m^3$ )과 측정장비의 개략도를 그림 1에 보

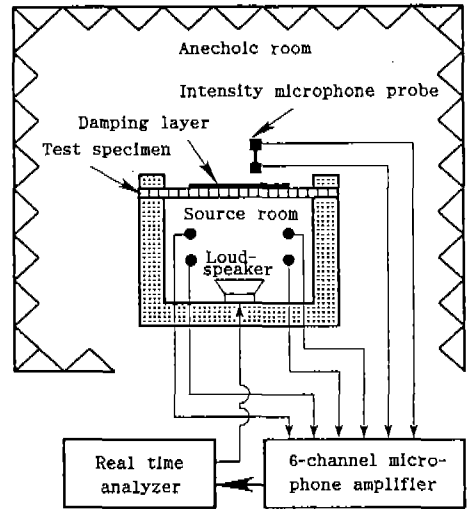


Fig. 1 Anechoic room and experimental set-up

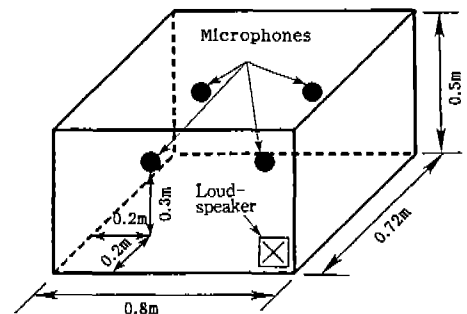


Fig. 2 Schematic diagram of the sound source room

인다. 그림에서는 시험용판이 음원실 상면의 벽으로 고정되어진 형상을 보이고 있다.

그림 2는 무향실에 설치된 음원실의 크기와 내부에 설치된 음원스피커(loudspeaker) 및 마이크로혼(microhorn)의 위치를 보인다. 음원실에 설치된 음원스피커로부터 잔향되어 허니컴판에 입사되는 에너지는 음원실의 내부에 설치된 마이크로혼의 음압으로 얻어진다. 음원실 내부의 음압은 그림 2에서 보이는 바와 같이 음원실에 대칭적으로 설치되어진 4개의 마이크로혼(B&K, No.4178)을 이용하여 1/3 옥타브밴드의 중심주

파수(중심주파수의 범위;800Hz~10kHz)로 측정한다. 여기서 1/3 옥타브밴드의 하한 중심주파수는 음원실을 확산음장으로 하는 경우 음원실의 크기로부터 결정되어지는 최저 중심주파수이다.

허니컴판으로부터 방사되는 에너지는 음향인텐시티법을 이용하여 각각 분할된 면적의 중심 위치에서 동일한 주파수영역에서 측정되었다. 음압 및 음향인텐시티의 측정에 사용된 장비는 직경 12.7mm(1/2inch)의 마이크로폰(B&K, No. 4178)과 이것의 한 쌍에 12mm의 스페이스를 삽입한 음향인텐시티 전용측정기(B&K, No. 3520)와 실시간 주파수분석기(B&K, No. 2123)를 이용하였다.

### 3.2 허니컴판과 점탄성제진재

본 연구에 이용한 허니컴판은 알루미늄 합금(Al5052)으로 제작되어졌으며, 허니컴판을 구성하는 표면판(face plate) 및 허니컴코어(honey-comb core)의 기계적성질을 표 1에 보인다<sup>9)</sup>. 그림 3의 (a), (b)는 각각 허니컴판의 횡단면과 허니컴코어의 정면형상을 보인다.

실험에 이용된 점탄성제진재료는 현재 자동차의 바닥 및 보디의 제진에 널리 사용되고 있는 아

스팔트계의 점탄성제진재를 사용하였다. 점탄성제진재의 물성치는 Jones<sup>9)</sup>가 제안한 실험에 의해 구하였으며, 표 2에 본 연구에 사용된 점탄성제진재의 기계적성질을 보인다.<sup>5),6)</sup>

시험용 알루미늄 허니컴판 및 허니컴제진판은 제진재의 유무와 도포면적에 의해 크게 3종류로 분류한다. 시험용 허니컴제진판의 제작은 허니컴판의 한쪽 면에 점탄성제진재를 150℃의 오븐에서 30분간 가열하여 융착하는 방법을 이용하였다.<sup>10)</sup>

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 알루미늄 허니컴판의 차음성능

우선, 허니컴판의 차음성능을 조사하기 위해 알루미늄 허니컴판과 동일한 질량의 알루미늄 단

Table 2 Material properties of the viscoelastic damping material

Young's Modulus	$9.701 \times 10^{10}(\text{N/m}^2)$
Density	$1.469 \times 10(\text{kg/m}^3)$
Loss Factor	0.25064

Table 1 Mechanical properties of the aluminium honeycomb plate

Face Plate		Honeycomb Core	
Young's Modulus	$7.06 \times 10^{10}(\text{N/m}^2)$	Shear Modulus	$6.5 \times 10^5(\text{N/m}^2)$
Poisson's Ratio	0.33	Density	$38.0(\text{kg/m}^3)$
Density	$2.7 \times 10^3(\text{kg/m}^3)$	Shell Thickness	$5.0 \times 10^{-3}(\text{m})$
Thickness	0.001(m)	Shell Size	$9.5 \times 10^{-3}(\text{m})$

Table 3 Specimens of group I and its sound transmission loss average

Specimens of Group I	Honeycomb Core		Face Plate		Total Mass (kg)	STLA (dB)
	Hight (mm)	Mass (kg)	Thickness (mm)	Mass (kg)		
Plate 1	5	0.11	1	5.78	5.89	26.1
Plate 2	8	0.18	1	5.78	5.96	27.7
Plate 3	10	0.22	1	5.78	6.00	29.8
Uniform	without		2	5.78	5.78	32.6

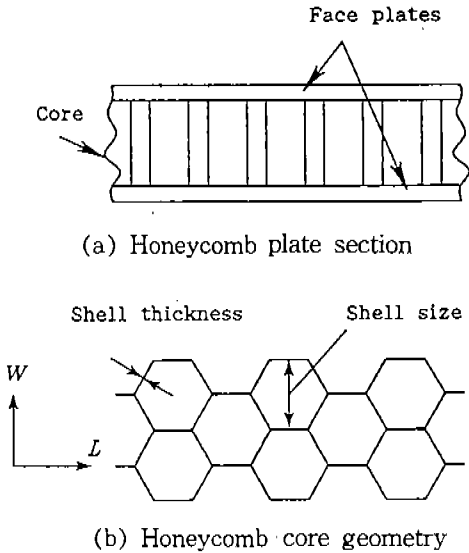


Fig.3 Geometry of an aluminium honeycomb plate

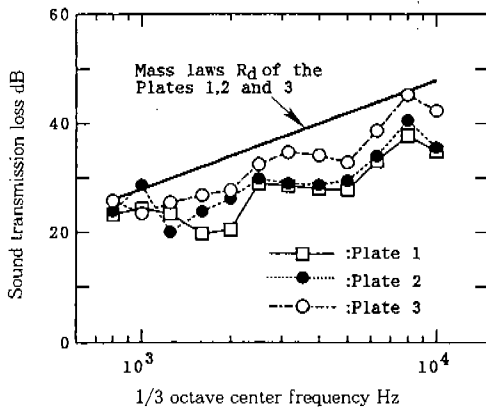


Fig.4 Sound transmission loss of the bare aluminium honeycomb plates

일 판의 투과손실을 조사한다. 표 3에 코어의 높이가 다른 3종류의 알루미늄 허니컴판과 알루미늄 단일 판의 채원을 보인다. 알루미늄 허니컴판은 코어의 높이를 3단계(5, 8, 10mm)로 변화시켜 코어에 의한 영향을 비교하기 위해 각 시험용판(Group I)의 투과손실에 대한 실험결과와 질량법칙에 의한 결과를 비교한다.

그림 4에 시험용판 Group I의 투과손실에 대

한 실험 및 질량법칙에 의한 결과를 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수에서 보인다. 그림에서 질량법칙에 의한 투과손실( $R_d$ )은 코어의 높이 변화에 따른 질량의 증가가 미소하기 때문에 일치하는 직선으로 나타나고 있다. 그러나 실험에 의한 투과손실은 허니컴코어의 높이가 크게 될수록 투과손실이 전반적으로 상승하는 경향을 보인다. 이와 같은 현상은 표면판 사이에 있는 코어 높이의 증가로 인하여 코어 내부의 공기층을 통한 음파전달의 감소와 코어강성의 증가로 허니컴판의 강성이 커져서 판진동의 속도성분에 기인하는 방사에너지가 감소되기 때문이다.

표 3에 나타낸 *STLA*(Sound Transmission Loss Average)는 실험에 의해 얻어진 투과손실을 전체 주파수에 대해 평균한 평균투과손실을 보인다. 표에서 허니컴판의 평균투과손실은 허니컴코어의 높이가 클수록 차음성능이 좋아짐을 알 수 있다. 그러나 이들의 평균투과손실은 허니컴코어를 갖지 않는 단일 판보다 낮은 값으로 본 연구의 필요성을 확인할 수 있다.

#### 4.2 점탄성제진재를 이용한 투과손실의 개선

제진재를 도포한 시험용판은 표 4와 표 5에서 보이는 것처럼 점탄성제진재가 표면 판의 한쪽면에 전면적으로 도포 되어진 경우(Group II)와 부분적으로 도포 되어진 경우(Group III)로 분류한다. Group II의 시험용판은 표 3에서 보인 Group I의 3종류의 허니컴판(Plate 1, 2, 3)에 각각 두께 1.3mm와 3.1mm의 점탄성제진재를 균일하게 도포한 것이다. Group III의 시험용판은 두께 3.1mm의 점탄성제진재를 허니컴판의 중앙부분에 부분적으로 도포한 것이다.

##### 4.2.1 제진층의 전면도포에 의한 투과손실의 개선

균일한 두께로 도포된 제진층의 두께변화에 대한 투과손실 및 투과손실의 개선효과를 비교하기 위해 각 시험용판에 대한 실험결과 중에서 Plate 1, Plate A 및 Plate D의 투과손실을 중심주파수에 대해 비교한 다음에 이외의 시험용판에 대한 차음성능은 표 4의 평균투과손실에 대해 정량적으로 비교한다. 표 3 및 표 4에서

Table 4 Specimens of group II and its sound transmission loss average

Specimens of Group II	Bare Honeycomb Plates	Damping Layer		STLA (dB)	ISTLA (dB)
		Thickness (mm)	Mass (kg)		
Plate A	Plate 1	1.3	2.0	33.8	7.7
Plate B	Plate 2	1.3	2.0	32.2	5.5
Plate C	Plate 3	1.3	2.0	31.1	1.3
Plate D	Plate 1	3.1	4.8	35.8	9.7
Plate E	Plate 2	3.1	4.8	35.2	7.5
Plate F	Plate 3	3.1	4.8	32.3	2.5

보이는 바와 같이 Plate 1은 제진층이 존재하지 않으나 Plate A, Plate D는 각각 두께 1.3mm와 3.1mm의 제진층이 Plate 1의 한쪽 면에 전체적으로 음착되어진 것이다.

그림 5는 시험용판 Plate 1, Plate A 및 Plate D에 대하여 질량법칙으로 구하여진 투과손실( $R_d$ )과 실험에 의해 얻어진 투과손실을 1/3 옥타브밴드의 중심주파수로 보인다. 질량법칙에 의한 투과손실은 제진재의 부가에 의한 질량증가로 전체 주파수범위에서 Plate 1과 비교하여 각각 3dB과 6dB의 개선효과가 얻어진다. 반면에 실험에 의한 투과손실은 질량증가에 의한 효과보다 훨씬 높은 개선효과를 보이며, 중심주파수 2kHz에서는 최대 13dB과 17dB까지의 개선효과가 얻어졌다. 이와 같은 투과손실의 개선은 제진층의 질량효과와 함께 판의 진동제어에 의한 개선효과가 가산되어져 얻어진 결과이며, 이들의 개선효과는 제진층이 도포된 다른 시험용판에 대해서도 유사한 경향을 보인다. 따라서 이것을 이외의 시험용판에 대한 투과손실의 개선효과를 평균투과손실(STLA) 및 개선된 평균투과손실(ISTLA : Improved Sound Transmission Loss Average)로 비교한다.

표 4에 각 시험용판과 이들의 평균투과손실 및 개선된 평균투과손실(ISTLA)을 보인다. 이들의 결과로부터 동일한 두께의 제진층에 의한 투과손실의 개선은 코어의 두께가 얇아질수록 탁월해짐을 알 수 있다. 이것은 코어의 두께가 얇아질수록 허니컴판의 강성이 낮아짐으로 인하여

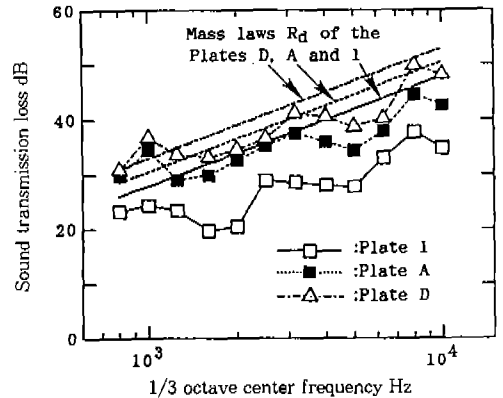


Fig.5 STLs of aluminium honeycomb plates with and without damping layer(Plate 1, A, and D)

점탄성제진층에 의한 제진효과가 크게 되기 때문이다.

#### 4.2.2 제진층의 부분도포에 의한 투과손실의 개선

제진층의 두께 및 도포위치에 의한 차음효과를 조사하기 위해 Group II의 시험용판 가운데 Plate A, B, C와 동일한 제진재의 질량으로 허니컴판의 중심부분에 3.1mm의 제진층을 도포한 시험용판 Group III를 제작하여 투과손실을 비교한다. 표 5에 Group III의 시험용판 Plate G, H, I에 대한 재원을 보인다. 즉, Group II의 Plate A는 두께 1.3mm의 제진층이 전체면적에 균일하게 분포 되어진 경우이지만, Group III의 Plate G는 두께 3.1mm의 제진층이 중앙에 음착

Table 5 Specimens of group III and its sound transmission loss average

Specimens of Group III	Bare Honeycomb Plates	Damping Layer		STLA (dB)	ISTLA (dB)
		Thickness (mm)	Mass (kg)		
Plate G	Plate 1	3.1	2.0	35.4	9.3
Plate H	Plate 2	3.1	2.0	34.5	6.8
Plate I	Plate 3	3.1	2.0	32.2	2.4

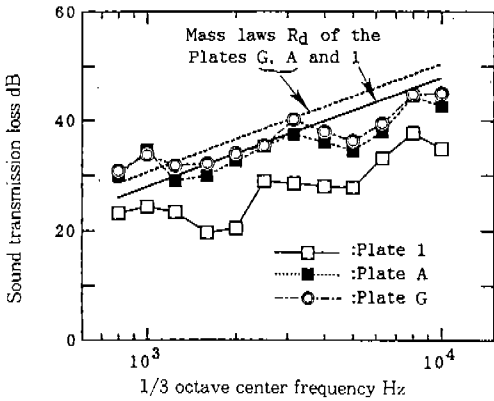


Fig.6 STLs of aluminium honeycomb plates with and without damping layer(Plate 1, A, and G)

된 경우이다. 따라서 Plate G는 Plate A에 비하여 제진층의 두께가 약 2.4배 증가한 반면에 도포면적은 전체면적의 약 42%가 된다.

그림 6은 시험용판 Plate 1, A, G의 투과손실에 대한 질량법칙과 실험에 의한 결과를 1/3 옥타브밴드 중심주파수에서 보인 것이다. 질량법칙에 의해 동일질량으로 도포되어진 Plate A와 Plate G의 투과손실은 Plate 1에 비하여 각각 3dB의 개선효과가 얻어진다. 그러나, 실험에 의한 투과손실의 개선은 제진층의 도포에 의해 전체 중심주파수에 걸쳐 6dB이상의 개선효과가 얻어짐을 알 수 있다. 또한, 제진층의 도포면적의 변화에 의한 개선효과는 각각의 중심주파수에 대해 차이가 있으나 전면적인 도포방법보다 최대 3dB까지의 개선효과가 얻어진다. 이와 같은 결과로부터 Plate A, B, C와 Plate G, H, I의 개선되어진 평균투과손실을 비교하면 각각 1.6,

1.3, 1.1dB 만큼의 투과손실이 개선되어짐을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 허니컴판의 차음성능을 개선하기 위해, 허니컴코어의 높이변화에 따른 기초적 실험과 점탄성제진재를 허니컴판의 한쪽 면에 전체적 혹은 부분적으로 도포하여 개선된 투과손실에 대한 실험결과를 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 점탄성제진재가 도포되어 있지 않은 알루미늄 허니컴판은 동일질량의 단일 판보다 낮은 차음성능을 갖지만, 허니컴코어의 높이가 높을수록 차음성능이 증가한다.
- 2) 알루미늄 허니컴판의 한쪽 면에 동일한 두께의 점탄성제진재를 전면 도포하는 방법에 의한 투과손실의 개선은 허니컴판의 진동제어가 쉬운 얇은 코어를 갖는 허니컴판의 경우가 높은 투과손실의 개선효과를 얻었다.
- 3) 알루미늄 허니컴판의 한쪽 면에 점탄성제진재의 부분도포에 의한 차음성능의 개선은 동일질량의 점탄성제진재를 허니컴판에 전면적으로 도포하는 것보다는 중앙부에 부분적으로 도포하는 것에 의해 최소 1.1dB 이상의 평균투과손실이 개선되었다.

## 참 고 문 헌

1. M. A. Lang and C. L. Dym, "Optimal

- Acoustic Design of Sandwich Panels”, Journal of Acoustic Society America, Vol. 57, No.6, pp. 1481~1490, 1975.
2. R. D. Ford, P. Load and A. W. Walker, “Sound Transmission through Sandwich Construction”, Journal of Sound and Vibration, Vol.5, No.1, pp. 9~21, 1969.
  3. 久我新一, 建築用遮音資料, 技術書院, pp. 98, 1979.
  4. F. N. Jefferson, R. Ikegami and D. Carbery, “Integrally Damped Honeycomb Structural Concepts to Increase Noise Transmission Loss”, Proc. of Damping 1991, pp. FBA1~FBA7, 1991.
  5. Y. H. Yu, B. S. Yang, and N. Nakagawa, “An Optimum Passive Vibration Control of an Elastic Plate with an Unconstrained Viscoelastic Damping Layer”, Machine Vibration, Vol. 5, pp. 45~51, 1996.
  6. 中川紀壽, 劉 永勳, “多數のモードを考慮した非拘束粘弾性制振層の最適設計”, 日本機械學會論文集 (C編), Vol. 61, No. 586, pp. 93~99, 1995.
  7. J. E. K. Foreman, Sound Analysis and Noise Control, Van Nostrand Reinhold, pp. 89, 1990.
  8. 住友輕金屬, 輕量化への御招待, 住友輕金屬出版, pp. 13, 1991.
  9. D. I. G. Jones, “Temperature- frequency Dependence of Dynamic Properties of Damping Materials”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 33, No. 4, pp. 451~470, 1974.
  10. JASO, Asphalt Sheet for Automobiles (M329-83), pp.1~2, 1983.