

허니콤 구조물의 차음특성에 관한 연구

A Study on Transmission Loss Characteristics of Honeycomb Structure

김운경[†] · 김정태* · 김관주* · 김석현**

Woon-Kyung Kim, Jeung-Tae Kim, Gwan-Ju Kim and Seoc-Hyun Kim

(2002년 7월 18일 접수 : 2002년 12월 31일 심사완료)

Key Words : Bending Rigidity(굽힘강성), Sound Transmission Loss(음향투과손실), Radiation Efficiency(방사 효율), Coincidence(일치효과), Critical Frequency(임계주파수)

ABSTRACT

As a test specimen, an aluminum extruded panel with a dimension of 640 mm×740 mm×40 mm is considered. This plate has 9 mm thickness if mass is concerned. Based on the FEM modeling in rigidity, the specimen turns out to be 32 mm and 12 mm thickness in isotropic steel plate. Also, the characteristics of transmission loss on the honeycomb structure have been examined experimentally with reverberation chamber. A honeycomb structure follows mass law in above 800 Hz. In order to improve the noise transmission effect in lower frequency, extra damping treatment is suggested. As a conclusion, the examined honeycomb structure is designed to improve the bending rigidity, not for the noise reduction.

1. 서 론

최근 에너지 절감과 차량의 효율을 증가시키기 위해 차량의 경량화에 크게 힘을 쓰고 있다. 국내에 현재 보유하고 있는 철도·전철기술은 대략 시속 200 km미만으로 주행하는 철도·전철 차량의 설계제작 수준에 머무르고 있다. 프랑스, 독일, 일본 등과 같은 선진국들은 이미 오래 전부터 시속 300 km급 이상에 해당하는 고속전철 기술을 보유하고 있다. 현재 우리나라가 시운전하고 있는 경부고속전철은 프랑스로부터 도입한 시속 300 km급 고속전철에 해당한다.

하지만 금번 국내 자체 제작한 고속전철의 경우는 최고 시속 350 km에 해당되는 것으로서, 시속 200 km로 운행하는 일반 철도차량과는 비교할 수 없을 정도로 매우 복잡하고 다양한 소음원을 가지고 있다.

† 책임저자, 정회원, 홍익대학교 대학원 기계공학과
E-mail : ga0211601@wow1.hongik.ac.kr
Tel : (02) 320-1113

* 정회원, 홍익대학교 기계공학과

** 정회원, 강원대학교 기계공학과

국내 고속 전철의 경우 운행구간의 상당 부분이 교량과 터널로 이루어질 수밖에 없는 지형적 여건 때문에 평야를 주행하는 TGV의 경우와 비교하여 쾌적한 실내환경을 유지하는데 매우 불리한 소음 여건을 갖는다. 더욱이 우리가 현재 보유하고 있는 철도기술 내지 전철기술의 수준은 아직은 선진형 고속전철을 개발하는 데에 크게 미흡할 뿐만 아니라, 프랑스로부터 도입되는 경부고속전철 기술을 이전 받아 자체적으로 소화하는 데에도 많은 어려움이 있을 것으로 판단된다.⁽¹⁾

특히, 쾌적한 승차 환경을 유지해야하는 고속전철의 실내소음은 승객의 편안한 여행을 위한 필수적인 요소라 할 수 있겠다. 하지만, 시험 운행을 앞두고 있는 한국형 고속철도 차량(korea high speed train : KHST)의 경우 내부 구조물이 기존 차량과는 달리 알루미늄 재질로 바뀌었다. 이는, 차량의 경량화에 따른 성능은 크게 향상되었을지 모르나, 차음 측면에서 보면 경량화 추세가 반드시 좋은 것만은 아니다.

우선, 철재 구조물이 알루미늄 구조물로 바뀌면서, 무게는 약 1/3 가량 줄어들지만, 소음 저감 능력은

질량 법칙이 성립되는 구간에서는 약 10 dB의 감소라는 역효과를 낼 수 있다. 왜냐하면, 질량 법칙이 성립되는 구간의 차음 성능은 질량이 클수록, 주파수가 높아질수록 상승하는 구간이기 때문이다. 이는 쾌적한 실내공간을 확보해야 하는 고속전철의 경우에 치명적인 약점이 될 수 있다. 이러한 차량의 강도 개선과 차음의 약점을 보완하기 위해서는 차체의 설계 과정부터 많은 연구와 분석이 필요하게 된다.

즉, 고속전철 차체의 설계과정에서 경량화와 함께 차실의 저소음화를 구현하기 위해서는 철재 차량과 같은 강도의 유지와 함께, 차음 성능을 유지하는 것이 필요하기 때문이다. 그러기 위해서는 알루미늄 차체로 설계되어 지고 있는 프레임의 구조적인 강도의 증가가 필요하고, 또한 그에 상응하는 차음 성능을 갖도록 설계되어야만 한다. 이에 대하여, 본 논문에서는 현재 한국형 고속전철 차체 프레임에 적용될 허니콤(honeycomb) 구조인 알루미늄 압출재의 차음 성능을 살펴보고자 한다.

이를 위해서, 허니콤 구조(주름판넬 구조)의 강도 측면에서의 역학적인 성질을 단순화 시켰다. 또한, 공진 주파수 특성과 소형 잔향실을 이용하여 투과손실 특성을 실험을 통하여 차음 성능을 분석하였다.

2. 허니콤 구조의 강성특성

일반적으로 강 구조물의 강도는 강성(stiffness)에 의해 지배된다고 볼 수 있다. 강성을 구하는 실험적인 방법중에는 UTM을 이용하여 힘과 변형률 사이의 관계를 이용하는 방법과, 기계 구조물의 고유진동수를 측정하여 질량(M)과 강성(K)의 관계로 구하는 방법이 있을 수 있고, 해석적인 방법으로 유한 요소법을 이용하여 구할 수 있다.

허니콤 구조의 경우, 질량은 작게 하면서 강성을 크게 한 구조라고 할 수 있다. 이와 같은 경우 균일 평판으로 등가 시키기 위해서는 허니콤 구조 판넬의 강성과 균일 평판의 강성이 같아야 한다. 이를, 유한 요소 해석을 통하여, 허니콤 구조의 판넬을 균일 평판으로 모델링 하고자 한다.

2.1 균일 평판 등가으로의 모델링^{(2)~(5)}

균일 평판으로 등가 시키기 위해서는 다음과 같은 가정을 전제로 한다. 우선,

- 재료의 성질은 탄성적이고, 균질(homogeneity)하다.
- 평판의 두께는 일정하다.
- 평판에 하중을 재하하기 전까지는 평면을 유지한다.

허니콤 구조의 형상은 Fig. 1과 같다. 허니콤 구조는 그림에서 보는 바와 같이, 평판부와 주름부(core)로 나눌 수 있다. 본 연구에서 사용된 허니콤 구조의 상세치수는 Table 1에서 자세히 나타나 있다.

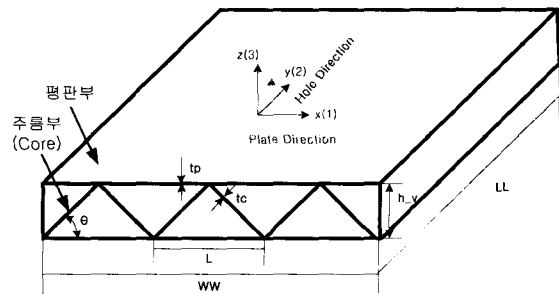


Fig. 1 Aluminum extruded panel-Honeycomb structure

Table 1 Dimension

	t_p	t_c	h_v	θ	L	WW	LL
Size(mm)	3	3	40	30°	150	640	740

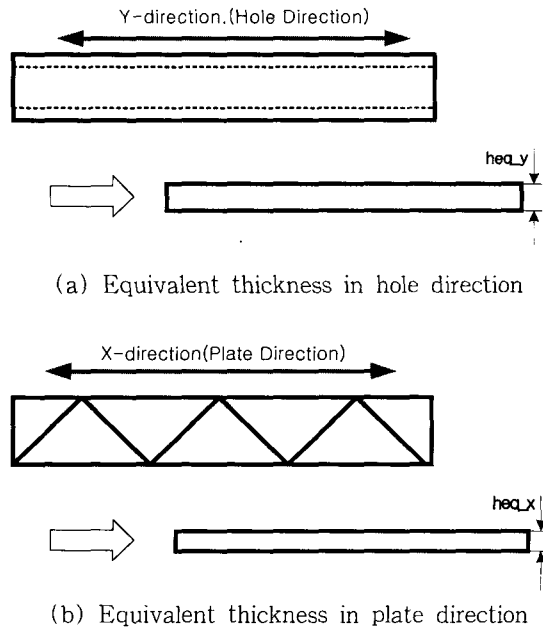


Fig. 2 Schematic diagrams of equivalent thickness in each direction

허니콤 구조의 형상 특징은 X축 방향(plate direction)과 Y축 방향(hole direction)의 강도의 크기가 다르다. 즉, 주름부가 보이는 부분의 강도를 크게 했다고 볼 수 있다. 그러므로, 균일 평판으로 등가시키기 위해서는 크게 두 부분으로 나누어야 한다. Y축 길이방향과 X축 길이방향으로 분리해서 생각할 수 있는데, 각 방향에 대한 등가 개념도는 Fig. 2에 나타나 있다.

허니콤 구조를 균일 등가 평판으로 등가시키기 위해서는 강성이 같아야 한다. 즉,

$$\begin{aligned} EI_{y \text{ honeycomb}} &= EI_{y \text{ plate}} \\ EI_{x \text{ honeycomb}} &= EI_{x \text{ plate}} \end{aligned} \quad (1)$$

균일 등방성인 경우, $E_{\text{honeycomb}} = E_{\text{plate}}$ 이므로

$$\begin{aligned} h_{eq-y} &= 2.29 \sqrt[3]{I_{y \text{ honeycomb}}} \\ h_{eq-x} &= 2.29 \sqrt[3]{I_{x \text{ honeycomb}}} \end{aligned} \quad (2)$$

이다. 여기서,

$E_{\text{honeycomb}}$: 허니콤 구조의 탄성계수(N/m²)

E_{plate} : 균일 평판의 탄성계수(N/m²)

$I_{y \text{ honeycomb}}, I_{x \text{ honeycomb}}$: 허니콤 구조의 단위 폭 당 y축, x축 단면적 관성모멘트(m³)

$I_{y \text{ plate}}, I_{x \text{ plate}}$: 균일 평판의 단위 폭당 y축, x축 단면적 관성모멘트(m³)

h_{eq-y}, h_{eq-x} : y축, x축 등가 두께(m)

2.2 균일 평판으로의 등가

빔 이론에서 외팔보로 가정하였을 때, 한쪽은 고정 지지하고, 지지단 반대쪽에 힘을 주었을 때의 처짐량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

여기서, P 는 한쪽 끝에 가해지는 단위 길이당 힘이고, L 는 외팔보의 전체길이, I 는 단위 폭당 관성

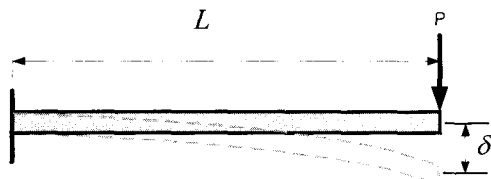


Fig. 3 Deflection of a uniform beam

모멘트, δ 는 보의 처짐량이다. 그러므로 끝단에서의 처짐량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} \quad (3)$$

보의 처짐량을 이용하여 강성을 나타내면, 다음 식과 같다.

$$EI = \frac{PL^3}{3\delta} \quad (4)$$

허니콤 구조의 처짐은 Y축 길이방향과 X축 길이 방향의 두 부분으로 해석해야 하므로, 각각의 방향에 대해서 EI_y, EI_x 로 나누어 생각하여야 한다.

2.3 해석과정

본 논문에서는 실험적인 방법으로 강성을 구하지 않고, FEM 모델 기법에 의해, 처짐량을 통한 강성을 구해 보고자 한다. 해석을 하기 위해서 자동차 및 항공 분야에 널리 사용되고 있는 프로그램인 CATIA를 이용하였다.⁽⁶⁾

빔 이론을 적용하기 위해서, 해석시 길이 및 폭의 비가 10배 이상이 되도록 하였다. 또한 평판이 균일한 상태를 유지하게 하기 위해서 자중에 의한 처짐은 고려 대상에서 제외하였다. 해석결과를 도시하면 다음과 같다.

Fig. 4와 5는 Y축을 길이 방향으로 크게 늘렸을 때의 허니콤 구조 모델링과 처짐량을 나타내고 있다. 하중은 아래 방향으로 50 N이다.



Fig. 4 Modeling of an aluminum extruded panel in hole direction

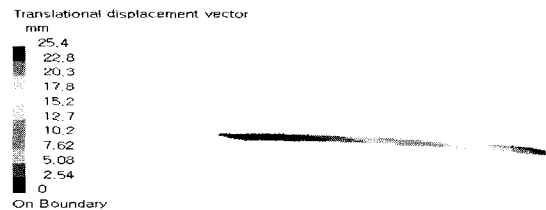


Fig. 5 Deflection of an aluminum extruded panel in hole direction

Fig. 6과 7도 마찬가지로 X 축을 길이방향으로 하였을 때의 모델링과 처짐량을 나타내고 있고, 이때도 하중을 하부로 50 N을 주었을 때이다.

유한 요소 해석을 통하여, 허니콤 구조의 등가 두께를 정리하면 Table 2와 같이 나타낼 수 있다. 탄성계수(E)는 균일재료라는 가정을 하였으므로, 축방향에 상관없이 같고, heq는 허니콤 구조를 각 방향에 대해서 등가시켰을 때의 등가 두께를 나타내고, heq-ave는 Y 축, X 축 길이방향 등가두께의 산술평균치를 의미한다. 또한 실제 구조물에서 힘을 크게 받는 Y 축 길이 방향에서의 등가 두께(heq)는 32.3 mm로 허니콤 구조 시편의 실 두께(hv) 40 mm의 0.8배에 해당함을 알 수 있다.

3. 허니콤 구조의 차음특성

3.1 허니콤 구조의 주파수 응답특성

알루미늄 압출재의 공진 모드를 알아보기 위해, 충격 해머(impact hammer)를 이용하여 가진력의 크기



Fig. 6 Modeling of an aluminum extruded panel in plate direction

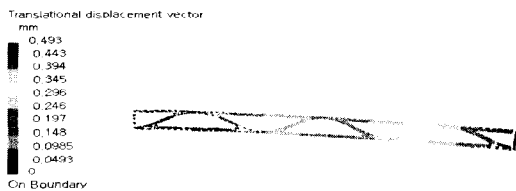


Fig. 7 Deflection of an aluminum extruded panel in plate direction

Table 2 Analysis for equivalent thickness

	Deflection (mm)	E (N/m ²)	Heq (mm)	Heq-ave (mm)	Thickness ratio (heq/hv)
Y-dir.	25.4	70.0×10 ⁹	32.3	22.1	0.81
X-dir.	0.493	70.0×10 ⁹	12.0		0.30

와 압출재의 가속도의 크기의 비(frequency response function)를 나타내 보았다.⁽⁷⁾ 주파수 대역 400 Hz 이상으로 하였으며, 이는 공진 모드가 나타나기 시작하는 지점이다.

지지조건은 4면 단순지지와 자유단으로 하여 주파수 응답 특성을 살펴보았다. Fig. 8은 알루미늄 압출재를 단순지지 했을 때, Fig. 9는 자유단 일 때의 그래프이다. 두 부분의 공진 주파수 특성은 다음과 같다. 두 측정치의 공진 주파수는 450 Hz, 520 Hz, 570 Hz, 620 Hz이다.

지지조건의 변화가 있어도 공진 주파수 대역의 변화는 크게 없음을 알 수 있다.

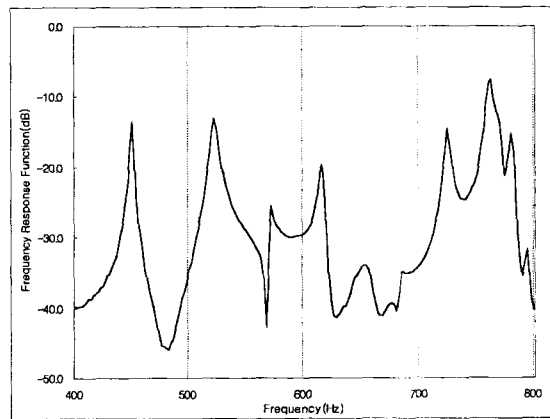


Fig. 8 Frequency response function of an aluminum extrude panel(4-edge simple supported)

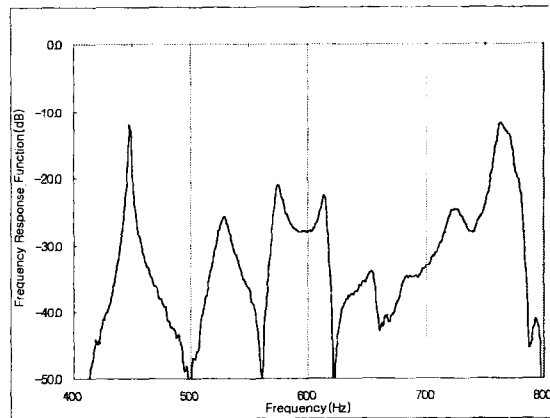


Fig. 9 Frequency response function of an aluminum extruded panel(free)

3.2 허니콤 구조의 방사효율^{(8)~(10)}

판의 굽힘 진동이 입사파와 일치하게 되면 음의 방사가 크게 일어난다. 면적(A_p)과 둘레 길이(P)를 갖는 유한 평판에서의 방사 효율(radiation efficiency)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{rad} &= 2\pi \frac{P_x}{A_p} \frac{C_l}{C} \sin^{-1} \left(\frac{f}{f_c} \right)^{1/2} (f < f_c) \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 - f_c/f}} (f < f_c) \end{aligned} \quad (5)$$

이 된다.

여기서, $x = h/\sqrt{12}$
 C_l : 종파속도 (5100 m/sec)
 C : 음속 (345 m/sec)
 f_c : 임계주파수 ($= \frac{13,000}{h}$)

방사효율에 크게 영향을 미치는 곳이 일치효과(coincidence)가 일어나는 곳이다. Table 2에서 본 바와 같이, 허니콤 구조판넬의 평균 등가두께(heq-ave)가 22 mm이므로 이를 이용하여 임계주파수(critical frequency)를 구하고, 식 (5)를 이용하여 방사효율 곡선과, 허니콤 구조의 판넬의 주파수 응답 특성 그래프를 나타내면 Fig. 10과 같다. 600 Hz 대역에서 일치효과(coincidence)가 일어나고 있고, 이 영역은 주파수 응답특성 3번째, 4번째 모드 사이에 존재함을 알 수 있다.

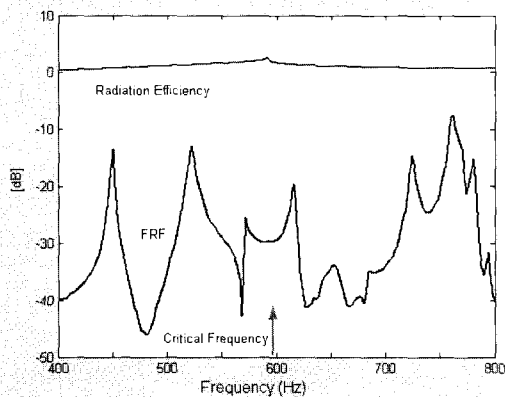


Fig. 10 Comparison of radiation efficiency and frequency response function in honeycomb structure

3.3 허니콤 구조의 투과손실 특성^(11, 12)

(1) 기본이론 및 측정 방법

한 공간에서의 음향 파워가 구조체를 통해 다른 공간으로 전파되는 경우, 구조체의 음향 전달 특성을 기술하는 용어로 차음값(transmission loss)이 있다. 인간이 소리에 의해 크게 영향을 받을 수 있는 영역의 구조체의 차음 특성은 강성과 공진 주파수에 의해 영향을 받는 영역과 질량의 크기에 따라 결정되는 영역으로 나뉠 수 있다.

수직형 차음 측정 장치인 한쌍의 잔향실을 이용하여, 투과손실을 측정하였다. 소형 잔향실의 장치 구성도는 Fig. 11과 같다. 음원실은 마이크로폰 회전 장치를 이용하여, 여러 측정점을 측정하여 그 평균값을 사용하였다. 수음실은 음원실에 비해 체적이 크고 형상이 불규칙하여 확산 음장이 잘 이루어지므로, 한 곳만을 측정하였다. 소형 잔향실의 물리적 한계로 인하여, 저주파수의 한계를 400 Hz 으로 하였다.

투과손실은 음원실과 수음실의 음향 파워비로 나타낼 수 있다. 한쌍의 잔향실에서의 투과손실은

$$TL = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (6)$$

이다. 여기서, TL 은 투과손실(transmission loss), L_1 과 L_2 는 음원실측과 수음실측의 음압레벨(sound

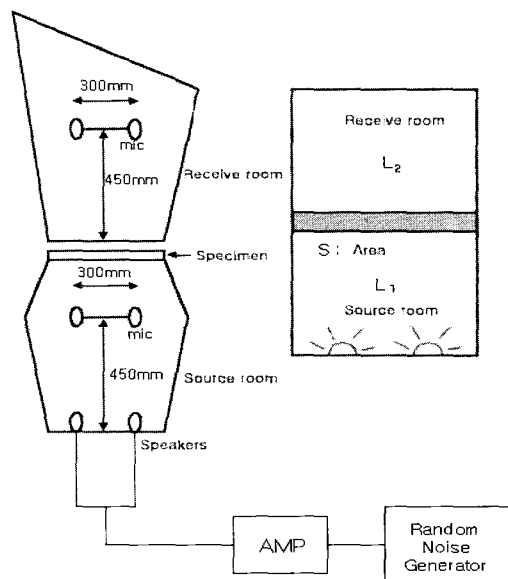


Fig. 11 Experimental set-up(schematic)

pressure level), S 는 측정 시편의 단면적(m^2), A 는 수음실의 흡음력(m^2)을 나타낸다.

투과 손실은 음의 입사 방향에 따라 크게 차이가 난다. 특히, 질량법칙이 성립되는 구간에서의 투과 손실 이론 값은 음의 입사방향을 고려하여 크게 수직 입사음(normal incidence), 랜덤 입사음(random incidence), 그리고 필드 입사음(field incidence)으로 구별한다.

$$R_0 = 20 \log(mf) - 20 \log(\rho_0 c / \pi) \quad (7)$$

$$R_d(f) = R_0(f) - 10 \log[0.23 R_0(f)] \quad (8)$$

$$R_f(f) = R_0(f) - 5 \quad (9)$$

여기서, R_0 는 수직입사음 R_d 는 랜덤입사음 R_f 는 필드입사음에 대한 차음값을 나타내고, ρ_0 는 공기의 밀도, c 는 음의 속도이다.

(2) 허니콤 구조물의 투과손실

알루미늄 압출재의 투과손실은 소형 잔향실을 통해서 측정하였다. 알루미늄 압출재 차음성능을 나타낸 그래프는 Fig. 12이고 주파수 대역은 1/3 옥타브 밴드(octave band)로 분석하였다. 그래프에서 이론치와 측정치 steel t3.0는 알루미늄 압출재와 같은 면밀도를 갖는 것이다. 즉, 알루미늄 압출재의 총 두께는 상부 평판부+주름부+하부평판부로 나타낼 때 9mm에 해당되고, 밀도가 철재에 비해 1/3배 작으므로 압출재가 철재로 등가 될 때는 steel t3.0에 해당된다고 볼 수 있다.

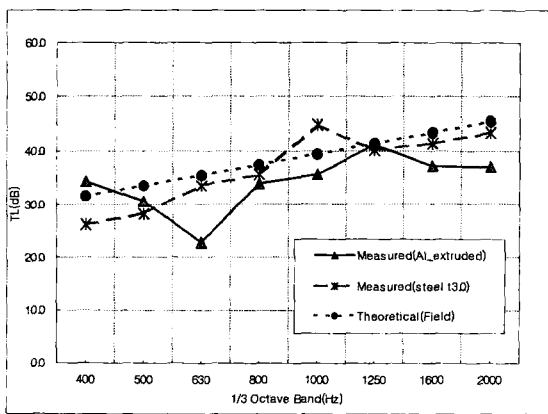


Fig. 12 Comparison of transmission loss of an aluminum extruded panel and equivalent uniform panel

알루미늄 압출재의 차음 성능은 등가시킨 철재와 이론치에 비해 전체적으로 적게는 2 dB, 많게는 5 dB 정도 낮게 나타나고 있다.

또한, 실험을 통해 일반 균일 평판 실험에서 보기 힘든 공진 주파수가 600 Hz 대역에서 나타나고 있는데, 이 주파수 대역은 주파수 응답실험을 통해 나타난 공진 주파수와 등가 평판 모델을 통하여 계산된 임계주파수가 일치하는 영역이다.

즉, 공진 주파수와 임계주파수가 동일 주파수에서 나타남으로 해서, 차음 성능이 다른 영역에서 보다 현저하게 저하되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 내부에 충전물을 보강했을 때의 차음 성능을 나타낸 그래프이다. 충전물로는 PU-FOAM으로 하였고, 흡음재의 질량은 0.3 kg으로 압출재 질량대비 2.5%로 질량법칙에는 큰 영향을 주지 않는다.

Fig. 12와는 달리 차음 성능이 크게 향상되었음을 볼 수 있다. 800 Hz 대역 이상의 질량 법칙이 성립되는 구간에서의 차음 성능은 이론치보다, 3 dB, 충진을 하지 않은 경우 보다는 5~9 dB 정도의 차음 성능 향상 효과를 보이고 있다. 또한 공진 주파수 영역에서의 차음 성능 향상도 충진을 하지 않았을 경우보다 7 dB 이상 좋아졌음을 알 수 있다. 이는 주름 판넬을 통한 진동 전달 특성이 흡음재로 인하여 크게 감소하였기 때문이다. 또한, 강성에 의해 차음 성능이 결정되는 영역인 630 Hz 이하의 영역에서도 이론치와 비슷하거나, 더 향상된 차음 성능을 가짐을 볼 수 있다.

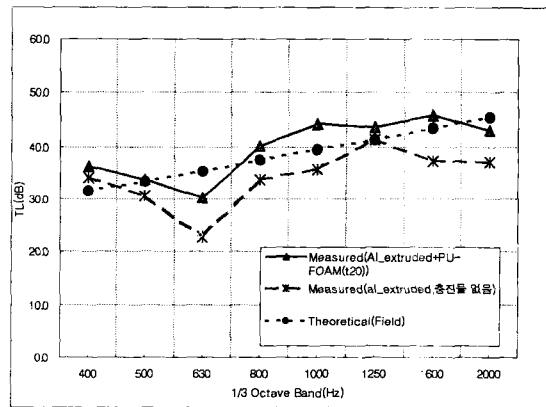


Fig. 13 Comparison of transmission loss of an aluminum extruded panel and equivalent uniform panel(damping)

4. 결 론

허니콤 구조의 알루미늄 압출재 시편과 시제차량 부품에 대한 구조 강도 특성과 차음 특성을 살펴보았다.

강도 측면에서의 허니콤 구조는 시편 압출재 두께 대비 균일 평판 등가 두께의 비는 80 %로 경량화와 함께, 구조적인 강도의 크기를 증가 시켰다고 볼 수 있다. 또한, 알루미늄 압출재는 지지 조건에 상관없이, 비슷한 주파수 대역에서 공진 특성을 나타내고 있다. 허니콤 구조와 같이 질량에 비해 강성의 크기가 크게 증가한 경우에는 흔히 저주파 대역에서 공진 모드가 고주파 대역으로 상승해 차음성능에 악영향을 주고 있음을 알 수 있다. 특히, 600 Hz 대역의 공진 주파수는 임계 주파수와 중첩되어 투과 손실이 크게 저하되고 있다. 또한, 질량법칙이 적용되는 영역에서도 동일 무게를 갖는 평판의 차음 성능보다 평균적으로 3 dB 이상 떨어지고 있음을 알 수 있었다. 결국, 허니콤 구조는 강도적인 면에서는 크게 향상되었으나, 차음 성능 측면에서는 크게 이득이 없음을 확인할 수 있었다. 하지만, 강성의 증가로 인하여 공진 영역을 일반 판넬에 비해 고주파 영역으로 높였다. 이로 인해 상대적으로 문제가 될 수 있는 200~300 Hz 대역의 저주파 영역의 차음 성능을 개선하는 효과를 가져오고 있다.

결과를 통하여, 허니콤 구조는 기본적으로 구조 보강을 목적으로 설계되는 제품이다. 따라서, 차음성능은 다소 떨어지므로, 허니콤 구조를 소음 방지 측면에서 사용시 질량 법칙이 나타나는 주파수 대역을 사전에 검토하여 효과적으로 설계에 적용해야 할 것이다. 또한, 공진 대역에서 차음성능 취약 특성을 보완하기 위해서는 댐핑재의 추가 부착 등의 방안이 요구되고 있다.

후 기

본 연구는 건설교통부/과학기술부/산업자원부의 위탁과제인 '고속전철 기반기술개발과제(과제코드 II-1-1-6)'에서 일부 지원을 받았으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 건설교통부, 과학기술부, 산업자원부, 2001, "고속전철 기반기술개발", 한국기계연구원, pp. 229~230.
- (2) Stephen, P. and Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, 1976, "Theory of Plates and Shells", McGraw-Hill, 2nd.
- (3) Cremer, L. and Heckl, M., 1988, "Structure-borne Sound", Springer-verlag, 2nd., pp. 95~100.
- (4) 김석현, 박정철, 김종현, 2000, "철도 차량용 알루미늄 압출재의 투과손실", 한국소음진동공학회 논문집, 제 10 권, 제 4 호, pp. 662~668.
- (5) 건설교통부, 과학기술부, 산업자원부, 1998, "진동소음해석 및 저감기술개발", 인하대학교, 4장.
- (6) 이석순, 황영진, 김효진, 2002, "Catia V5", 과학기술.
- (7) Ewins, D. J., 1986, "Modal Testing : Theory and Practice", Bruel Kjaer, pp. 154~160.
- (8) Richard, H. L., 1987, "Machinery Noise and Diagnostics", Butterworth Publishers, pp. 151 ~157.
- (9) Frank, F., 1985, "Sound and Structural Vibration", Academic Press, pp. 144~159.
- (10) Austin, R. F., Etc, 1980, "Fundamentals of Acoustics", John Wiley & Sons, Inc.
- (11) 박진근, 김정태, 1999, "소형잔향실을 이용한 구조물의 차음성능 평가", 홍익대학교.
- (12) 김운경, 김정태, 2001, "철도 차량 구조물의 TL 시험 평가 기법", 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp. 155~161.