

허니콤 구조물을 갖는 차체 바닥의 투과손실 해석기법 연구

Research on the Transmission Loss Analysis of the Honeycomb Structure's Floor Section

김관주[†] · 김상수* · 박진규*

Kwanju Kim · Sangsu Kim · Jinkyu Park

Abstract Sound transmission characteristics are investigated on the test specimen for the railway vehicle's floor section. Transmission loss on the honeycomb structure has been examined experimentally with the reverberation chamber. Predicted transmission loss values using NASTRAN, AUTOSEA2, are compared with measured values and the effect of resonance on the transmission loss is identified. Transmission loss of different shapes of honeycomb structure are predicted.

Keywords : honeycomb-shaped cross section, transmission loss, resonance, Statistical energy analysis, mass law

요 지 본 연구에서는 현 고속 차량의 차체바닥 구조의 투과손실 특성 파악을 연구하고자 하였다. 이를 위하여 우선 허니콤 구조인 알루미늄 시편을 제작하여 투과손실 측정 실험을 수행하였다. 측정된 결과에서는 800Hz 이상부터 질량 법칙을 따르는 투과손실의 특성을 파악할 수 있었다. 상용프로그램인 NASTRAN, AUTOSEA2를 사용하여 구조물에 대한 투과손실을 해석한 후 이를 실험치와 비교하여 신빙성있는 결과를 얻을 수 있었다. 아울러 다른 단면 형상을 갖는 허니콤 구조물에 대한 투과손실 해석을 수행하여 특성을 예측해 보았다.

주 요 어 : 허니콤 구조물, 투과손실, 공진, 통계적에너지 해석법, 질량 법칙

1. 서 론

철도차량의 경량화, 고속화와 함께 차량 승차감 및 쾌적성에 대한 승객의 요구를 만족시킬 수 있는 저소음 차량에 대한 체계적인 개발이 시급하다. 고속 철도차량의 실내소음에 관한 기준을 살펴보면, 미국의 American Public Transit Association이 제시한 기준은 300km/h로 운행 시 개활지에서는 70dBA, 터널 통과 시 80dBA이며, 국내 요구사항은 350km/h로 운행 시 개활지에서 66dBA, 터널 통과시 73dBA로 좀 더 엄격한 실정이다. 따라서 철도차량의 실내소음을 체계적으로 저감시킬 수 있는 근본적인 대책이 필요하다.[1]

고속철도 차량의 경우 차체구조물의 재질이 기존의 차량과는 달리 알루미늄 재질 구조로 변경되었다. 이는 차량의

경량화에 따른 운동성능은 크게 향상되었을지 모르나, 차음 측면에서 당연히 취약하게 된다. 철재 구조물이 알루미늄 구조물로 바뀌면서 무게는 대략 1/3 가량 감소되지만, 차음 성능 역시 질량 법칙이 성립되는 구간에서 대략 10 dB의 크기로 감소하는 역효과를 낼 수 있다. 왜냐하면 질량 법칙이 성립되는 구간의 차음 성능은 질량이 클수록, 주파수가 높아질수록 증가하는 구간이기 때문이다. 이는 쾌적한 실내공간을 확보해야 하는 고속전철의 경우에 치명적인 약점이 될 수 있다. 김운경 등[2]은 고속전철 허니콤(주름)구조물의 국부모드에 대한 투과손실에 대한 영향을 살펴보고, Wang 등은 철도차량에서 사용되는 샌드위치 패널에 대한 투과손실 특성을 계산하는 이론식[3]을 유도하여, 기존의 실험 결과와 비교하였다. 본 논문에서는 고속전철에서 많이 이용되는 허니콤(honeycomb) 구조물 형상의 알루미늄 압출재의 차음 성능을 전산해석에 의해서 계산하고, 실험 결과와 비교하고자 한다.

[†] 책임저자 : 정희원, 홍익대학교 기계시스템디자인공학과, 교수
E-mail : kwanju@hongik.ac.kr
TEL : (02)320-1643 FAX : (02)320-1113

* 비회원, 홍익대학교, 기계공학과 대학원

2. 본 론

우선 허니콤 구조에 대한 투과손실 특징을 알아보기 위하여 측정 데이터는 기존의 자료를 사용하였다.[2] 실험 및 해석에 사용된 허니콤 구조의 형상은 Fig. 1과 같으며, 허니콤 구조의 치수는 Table 1에 나타내었다. 단위는 밀리미터(mm)이다.

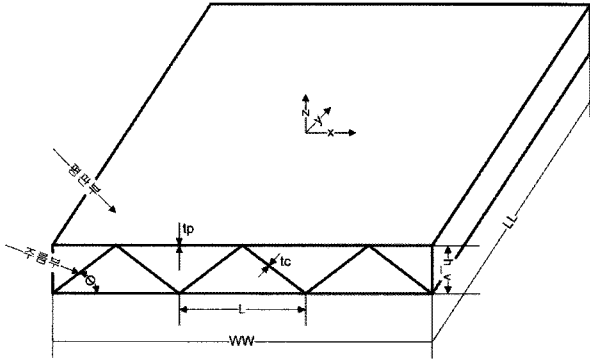


Fig. 1. The model of the honeycomb structure.

Table 1. The dimension of the honeycomb structure.

tp	tc	h_v	θ	L	WW	LL
3	3	40	30°	138	690	740

2.1 허니콤 구조물의 투과손실 측정

재료의 차음 성능을 알아보기 위한 대표적인 방법이 투과손실 측정이다. 이를 통해서 재료가 얼마나 방음에 효과적인지를 알 수 있는 유용한 방법이다. 본 논문에서는 자체적으로 제작한 소형 잔향실을 사용하여 시편의 투과손실을 측정하였다. 소형 잔향실의 구성은 다음 Fig. 2에 도식되어 있다.

소형잔향실은 그림에서처럼 아래 위치한 음원실은 스피커에서 방사된 음을 회전 장치를 이용하여 여러 지점에서 측정하여 이를 평균하여 계산한다. 수음실은 음원실에 비하여 체적이 크고 형상이 불규칙하므로 확산 음장이 잘 이루어지도록 하였으며, 음원실과 마찬가지로 회전 장치를 사용하여 여러 지점에서 측정된 음압 값을 평균하여 사용하였다. 소형 잔향실의 체적의 한계로 인하여 저주파수 한계를 400Hz로 설정하였다.

음원실과 수음실의 체적(m^3)은 각각 $0.37m^3$, $0.62m^3$ 이며 내부 표면적(m^2)은 음원실이 $2.75m^2$, 수음실이 $4.3m^2$ 이다. 그리고 실험에 사용되는 시편의 면적(m^2)은 $0.048m^2$ 이다.

투과손실값 측정을 설명하면 다음과 같다. 첫 번째로 소형 잔향실에 측정하고자 하는 시편을 놓은 후, 수음실의 잔향시간 측정한다. 이 결과로 수음실의 흡음률을 계산할 수 있다.

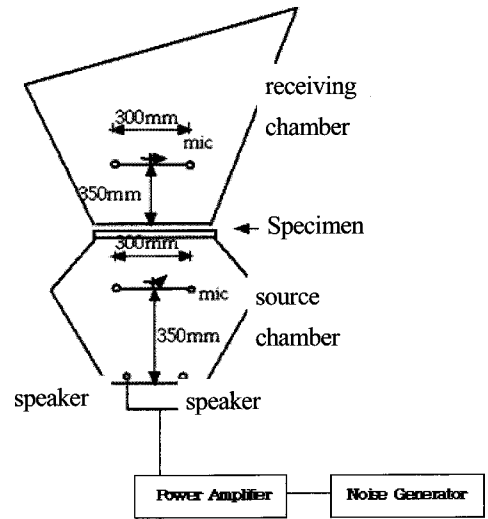


Fig. 2. The schematic figure of the small reverberant chamber

두 번째 단계로 스피커를 방사시킨 상태로 음원실과 수음실의 음압을 측정하여 잔향실법에 의한 투과손실 값을 계산한다. 투과손실 공식은 다음 식과 같다.

$$TL = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (1)$$

여기서 L_1 은 음원실의 음압, L_2 는 수음실의 음압, S 는 시편의 면적, A 는 수음실의 흡음률을 나타낸다.

투과손실은 음의 입사 방향에 따라 차이가 난다. 특히, 질량법칙이 성립되는 구간에서의 투과 손실의 이론값은 음의 입사방향을 고려하여 크게 수직입사음(normal incidence), 랜덤 입사음(random incidence), 그리고 필드 입사음(field incidence)으로 구별하며 다음과 같이 표현된다.[4],[5]

$$R_0 = 20 \log(mf) - 20 \log(\rho_0 c / \pi) \quad (2)$$

$$R_d(f) = R_0(f) - 10 \log[0.23 R_0(f)] \quad (3)$$

$$R_f(f) = R_0(f) - 5 \quad (4)$$

여기서 R_0 은 수직입사음, R_d 는 랜덤입사음, R_f 는 필드입사음에 대한 차음값을 나타내며, ρ_0 는 공기의 밀도, c 는 음의 속도, m 은 면밀도, f 는 관심 주파수이다.

측정 시편은 Table 1에 근거한 알루미늄 압출재를 대상으로 시험을 수행하였으며, 추가적으로 흡음재인 PU-FOAM을 시편에 부착한 후 투과손실을 측정하였다.

흡음재의 단위 면적 당 질량은 $0.3kg$ 으로 알루미늄 압출재의 단위 면적 당 질량대비 2.5%로 투과손실의 질량법칙에서



Fig. 3. The bare aluminum honeycomb structure

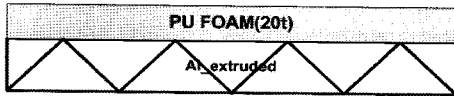


Fig. 4. The aluminum honeycomb structure with absorbing materials on top

는 무시할 수 있다.

위의 그래프는 실험으로부터 측정된 투과손실을 나타낸 것이며 1/3 옥타브 밴드(Octave Band) 중심주파수에 대해 분석하였다. 여기서 이론치는 알루미늄 압출재와 같은 면밀도를 갖는 철판에 대한 투과손실을 나타낸 것이다. 즉 압출재의 단면의 두께가 총 9mm로, 철의 밀도가 알루미늄의 약 3배가 되므로 3mm의 철판으로 등가시켜 이에 대한 투과손실의 결과를 이론적으로 계산하였다. 알루미늄 압출재의 차음 성능은 증가시킨 철판과 이론치에 비해 전체적으로 적게는 2 dB, 많게는 5 dB정도 낮게 나타나고 있다.

또한, 실험을 통하여 일반 균일 평판 시험에서 보기 힘든 공진 주파수가 600Hz 대역에서 나타나고 있는데, 차음 성능이 다른 영역에서 보다 현저하게 저하되고 있음을 알 수 있다.

흡음재로 처리하였을 경우가 그렇지 않은 경우보다 차음 성능이 크게 향상되었음을 알 수 있다. 800Hz 대역 이상의 질량 법칙이 성립되는 구간에서의 차음 성능은 이론치보다, 3dB, 흡음처리를 하지 않았을 경우보다 7dB 이상 좋아졌음을 알 수 있다. 이는 주름 판넬을 통한 진동 전달 특성이 흡음재로 인하여 크게 감소하였기 때문이다. 또한, 강성에 의해 차음 성능이 결정되는 영역인 630Hz 이하의 영역에서도 이론치와 비슷하거나, 더 향상된 차음 성능을 가짐을 볼 수 있다.

2.2 허니콤 구조의 고유 진동모드 해석

단면이 균일한 시편에 대한 일반적인 투과손실은 다음 그림과 같은 특성 곡선을 보인다. 일반적인 시편의 투과손실 특성은 강성과 고유진동수에 의하여 영향을 받는 영역과 질량의 크기에 따라 결정되는 영향으로 나눌 수 있다.[4]

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 단면이 균일한 시편의 공진주파수 영역에서는 음의 투과가 수월히 진행되며, 따라서 투과손실 값은 최소가 된다. 또한 이 영역 이후에서는 질량 법칙에 따라 투과손실이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 5에서 보여주는 알루미늄 압출재의 투과손실 측정 결

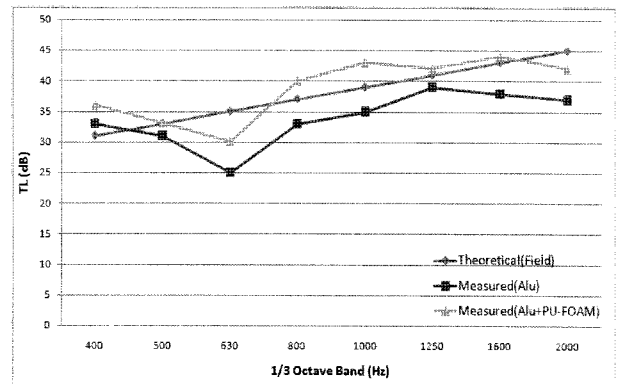


Fig. 5. The measured transmission loss of the honeycomb structure

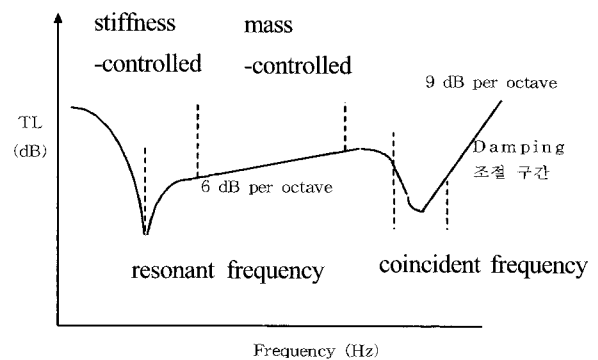


Fig. 6. The general transmission loss graph of the generic plate

Table 2. The normal modes and resonant frequencies of the honeycomb structure on free-free condition

298Hz	442Hz
520Hz	605Hz
619Hz	621Hz

과에서 600Hz대역에 투과손실의 저하가 발생함을 볼 수 있었다. 실험에 사용된 시편의 단면이 균일하지는 않지만 Fig. 6에서와 같이 비슷한 유형의 투과손실 특성을 가진다고 가정할 경우, 구조물의 고유 모드는 차음 성능에 중요한 영향을 미치는 인자이다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄 압출재의 공진 모드를 알아보기 위하여 해석적 방법에 의하여 고유 진동모드를 계산하였다. 유한요소해석 프로그램인 MSC사의 NASTRAN을 사용하여 자유-자유 경계조건에서의 알루미늄 압출재의 고유모드를 해석하였다. 다음은 압출재의 초기 주요 고유모드를 나타낸 것이다.

위의 그림을 통하여 공진 주파수는 대략 298Hz, 442Hz, 520Hz, 620Hz인 것을 알 수 있다. 초기에는 전체적인 굽힘 모드가 나타나는 것에 비하여 주파수가 증가할수록 점점 국소모드가 나타남을 알 수 있다. 이를 통하여 알루미늄 압출재의 투과손실 측정 결과 중 저주파수에서 저하가 고유모드와 어느 정도 상관관계가 있음을 알 수 있다.

2.3 AutoSea2를 사용한 투과손실 해석

상용 프로그램인 AutoSea2를 사용하여 압출재의 투과손실을 해석한 후에 이를 Fig. 5에 나타낸 투과손실 실험결과와 비교하였다. 우선 AutoSea2에서 실제 실험에 사용한 소형 잔향실과 알루미늄 압출재의 모델을 만든 후에 실험에서 측정 한 음원실, 수음실의 흡음률 측정 자료를 해석모델에 적용하였다. 알루미늄 압출재의 모서리는 Line Junction으로 연결하였고, 음원실과 수음실이 각각 압출재와 맞닿는 면은 Area Junction으로 연결하였다. 알루미늄 압출재의 내부손실계수(Damping Loss Factor)는 프로그램에서 제공되는 기본값을 사용하였다. 모델링을 완료 후에 음원을 입력 후에 음원실과 수음실의 음압레벨(sound pressure level)의 차를 계산하여 투과손실을 해석하였다. [6],[7] 다음 Fig. 7은 소형잔향실과 알루미늄 압출재를 모델링한 모습을 나타낸 것이다.

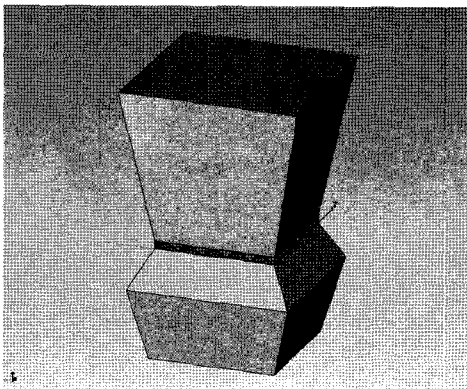


Fig. 7. The SEA model of the small reverberant chamber

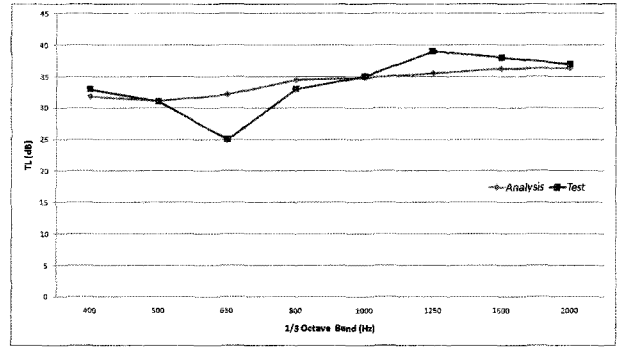


Fig. 8. The transmission loss of the untrimmed structure

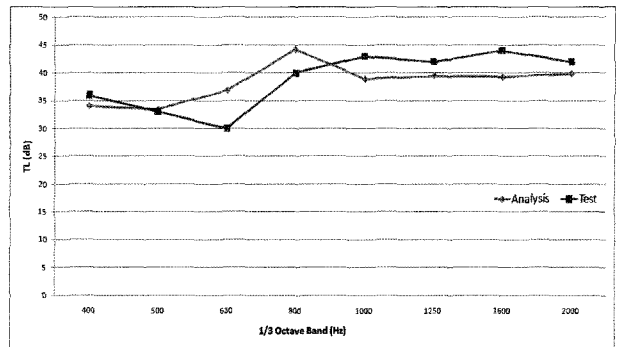


Fig. 9. The transmission loss of the trimmed structure

위의 그래프는 알루미늄 압출재의 투과손실해석을 실험결과와 비교한 것이다. 공진영역에서의 투과손실 결과를 제외하고는 대체로 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것은 우선 소형 잔향실의 체적이 작으므로 저주파수 대역에서 측정된 수음실의 흡음률 데이터 역시 오차를 발생시킬 수 있는 것이라 생각된다. 또한 실제 실험을 통하여 공진 모드에서의 내부손실계수(DLF)를 측정하였다면 좀더 정확한 해석 결과를 얻을 수 있다고 사료된다.

위의 그래프는 알루미늄 압출재와 PU-FOAM으로 구성된 시편의 투과손실해석을 실험결과와 비교한 것이다. 압출재의 공진영역을 제외한 영역에서는 대체로 일치하는 것을 볼 수 있다. AutoSea2가 통계적 에너지 해석법을 기반으로 중, 고주파수대역에서의 시스템의 특성을 파악하므로 저주파수에서 좀 더 정확한 투과손실 해석결과를 얻기 위해서는 기존의 방식인 유한요소법(FEM), 경계요소법(BEM)을 사용하는 것이 좀 더 유용한 결과를 얻을 것이라 생각된다.

3. 다른 구조의 이방성 구조물 투과손실 예측

이 장에서는 앞서 해석하였던 결과의 신빙성을 토대로 하여 알루미늄 압출재의 단면의 형상이 변화할 경우, 구조물의

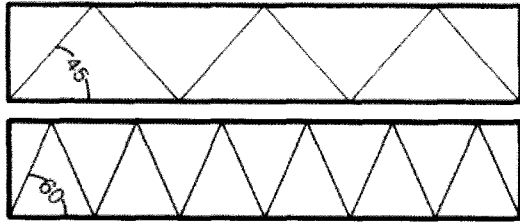


Fig. 10. The cross section of the structures

Table 3. The dimension of the structure

각도	tp	tc	h_v	L	WW	LL
$\theta = 45$	3	3	40	138	640	740
$\theta = 60$	3	3	40	138	646	740

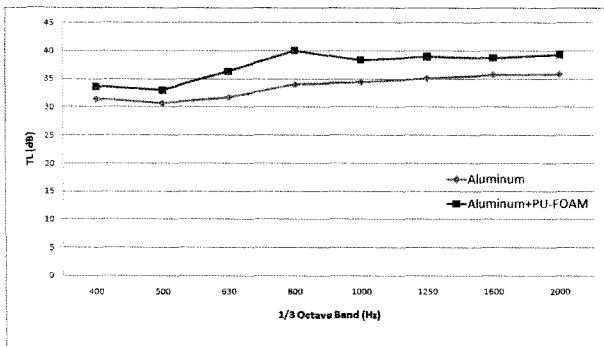


Fig. 11. The transmission loss in $\theta = 45$

투과손실을 해석적으로 예측해 그 특성을 파악하였다. 본 논문에서 앞서 실험과 해석에 사용된 알루미늄 압출재의 단면의 각도는 30° 였다. 이에 단면의 형상을 변화시켜 단면의 각도가 45° , 60° 인 알루미늄 압출재를 AutoSea2에서 모델링한 후, 투과손실의 해석을 수행하였다.

해석에 사용된 허니콤 구조의 단면의 형상은 Fig. 10에 나타나 있다. 또한 해석에 사용된 허니콤 구조의 치수는 Table 3에 자세히 나타나 있다. 단위는 밀리미터(mm)으로 나타내었다.

다음 Fig. 11과 Fig.12는 해석결과를 나타낸 그래프이다. Fig. 11은 단면의 주름 각도가 45° 인 경우의 투과손실을 나타내고, Fig. 12는 단면의 주름 각도가 60° 인 경우의 투과손실을 나타낸다.

두 경우 모두 흡음 처리를 한 경우가 그렇지 않은 경우보다 3dB에서 5dB까지 더 높은 투과손실 성능을 나타냄을 알 수 있다. 위의 투과손실 해석결과와 앞서 수행하였던 허니콤 구조물의 투과손실을 비교하면 다음 Fig. 13과 같다.

해석결과를 비교해 보면 단면이 30° 인 경우가 투과손실이 가장 높은 값을 나타내었다. 이것은 단면형상의 각도가 낮을수록 국소모드와 코어의 음향모드의 영향을 가장 적게 받는

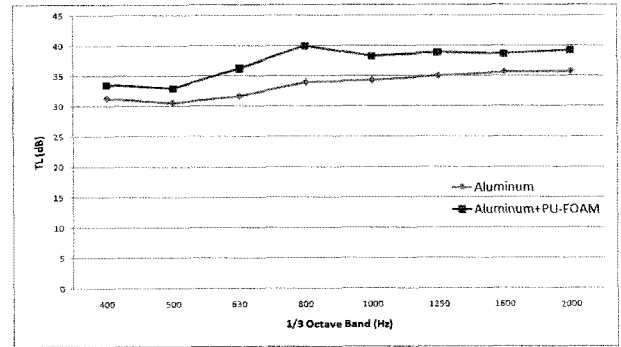


Fig. 12. The transmission loss in $\theta = 60$

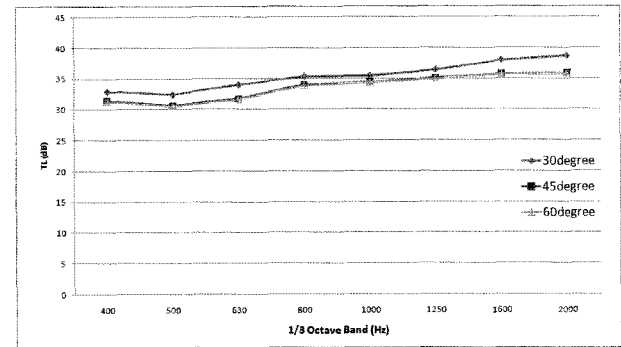


Fig. 13. The comparison of the transmission loss

다고 생각할 수 있다. 또한 단면 형상이 45° 와 60° 인 경우의 투과손실이 거의 비슷함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 허니콤 구조의 알루미늄 압출재의 투과손실 해석을 수행하기 위하여 기존의 압출재에 대한 투과손실 실험 데이터를 사용하여 이를 전산 해석결과와 비교하였다.

우선 알루미늄 압출재에 대한 투과손실 측정 결과가 대체로 질량법칙과 유사한 형태의 개형을 보였으나 경계조건의 차이로 인하여 약간의 오차가 발생함을 알 수 있었다. 또한 시편에 대한 좀 더 정확한 투과손실을 해석하기 위해서는 우선 충분한 크기의 잔향실-잔향실 공간에 대한 데이터 확보가 우선해야 함을 알 수 있었다.

일반적으로 알려진 구조물의 공명주파수에 대한 투과손실의 저하는 확인할 수 있었으나 임계주파수에서의 투과손실의 저하는 이론치와 상충하는 면이 있었다.

또한 구조물의 고유모드와 코어의 음향모드 또한 투과손실에 영향을 미침을 알 수 있었다. 고유 모드의 경우, 단면 형상이 45° 일 경우에 동일모드에 대한 고유진동수가 가장 높게

나왔으며 코어의 음향 모드의 경우에는 단면 형상의 각도에 따라 비례하게 고유진동수도 높아짐을 알 수 있었다.

투과손실의 경우에 있어서는 단면의 형상이 30도인 경우가 가장 높은 값을 나타냄을 알 수 있었다. 이는 국소모드의 영향을 가장 적게 받아서 생긴 결과로 사료된다.

그리고 중, 저주파에서는 SEA기법을 사용한 투과손실 해석보다는 기존의 방식인 유한요소법(FEM)이나 경계요소법(BEM)을 사용하는 것이 보다 효율적일 수 있다는 것을 나타내었다.

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 한국철도기술연구원과 홍익대학교 2005년도 학술연구조성비의 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

1. Voss, Norway, June, 1995, "Journal of sound and vibration, Proceedings of the fifth international workshop on railway and tracked transit system noise".
2. 김운경, 김정태, 김관주, 김석현, 2003, "허니콤 구조물의 차음특성에 관한 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제13권, 제1호, pp.19-25
3. Tongan Wang, Vladimir S. Sokolinsky, 2005, "Assessment of sandwich models for the prediction of sound transmission loss in unidirectional sandwich panels", Applied acoustics, pp.245-262
4. 박진근, 김정태, 1999, "소형잔향실을 이용한 구조물의 차음성능 평가", 홍익대학교
5. F. J. Fahy, 2001, "Foundations of Engineering Acoustics" Academic press, chap. 11
6. ESI. "AutoSEA2 User's Guide Rev.4"
7. K. Langhe, 1996, "High Frequency Vibrations : Contributions To Experimental and Computational SEA Parameter Identification Techniques", Ph. D. thesis, chap. 3

(2008년 1월 20일 논문접수, 2008년 2월 12일 심사완료)