

고속철도 차음구조의 차음성능: 주름 및 압출재의 투과손실  
**Sound Insulation Performance of the Panel Structures in High Speed Train:  
Transmission Loss of the Corrugated and Extruded Panels**

김석현\*  
Kim, Seockhyun

백인수\*\*  
Paek, Insu

김정태\*\*\*  
Kim, Jeong-tae

---

**ABSTRACT**

Sound transmission characteristics are investigated on the corrugated steel and aluminium extruded panels used for railway vehicles. Sewell-Sharp-Cremer(SSC) model, equivalent orthotropic plate model and equivalent mass law are applied to predict the sound transmission loss. The predicted values of the sound transmission loss are compared with the measured values. The reliability and the limitation of the prediction models are investigated. For the corrugated panels and honeycomb panels, the coincidence and local resonance severely deteriorate the sound insulation performance around the corresponding frequency bands. The result of the study shows that the equivalent orthotropic plate model and the SSC model can be used as good prediction models, if the coincidence frequency or local resonance frequency is correctly applied.

---

**1. 서론**

현재 국내의 고속철도 산업은 최고 시속 350km 급의 고속전철이 운행 중이고, 최고 시속 400km 급의 개발이 시작된 상태이다. 철도 차량의 고속화는 레일 소음 및 공력 소음 등 주요 소음원의 파워 증가와 직결되고, 고속화를 위한 대차 구조의 변경 및 동력원의 분산 배치도 객실 내부 소음의 증가 요인이 된다. 이와 같은 불리한 소음 환경은 고속철도 차량의 소음예측 및 대책 수립을 위한 기술개발의 필요성을 더욱 높이고 있다. 철도 차량의 차음재 가운데에서도 주름 강판이나 허니콤 알미늄 압출재는 외부 소음을 차단하는 가장 중요한 차음재 역할을 담당한다. 이 구조는 중량당 매우 높은 횡 하중을 지지하는 장점 때문에 차체 경량화를 위하여 사용된다. 그러나 차음성능 측면에서는 구조 음향학적인 이유로 동일한 질량을 갖는 평판 구조보다 오히려 불리한 것으로 알려져 있다[1,2]. 본 연구에서는 주름 및 허니콤 압출재와 같은 직방성 차음재의 차음성능에 대한 예측 기법을 검토하고 그 신뢰도 및 문제점을 파악하고자 한다. 주름강판이나 알미늄 압출재가 동일한 중량을 갖는 등가 평판에 비해서 낮은 차음성능을 보이는 원인은, 굽힘 강성의 현저한 증가로 일치현상이 나타나는 임계주파수 대역이 현저히 낮아지는 것, 주름이나 코어의 주기적 구조에서 발생하는 국부 모드의 공진, 그리고 코어 공동의 공명 등을 들 수 있다.

이러한 현상들은 발생 주파수 대역의 예측은 어느 정도 가능하나, 차음에 미치는 악영향을 정량화시키는 것은 쉽지 않다. 때문에 주파수 구간별로 투과손실 모델을 적용하거나, 경우에 따라서는 실험 결과를 고려한 보정작업을 필요로 한다.

---

\* 강원대학교, 기계·메카트로닉스 공학부, 정희원

E-mail : seock@kangwon.ac.kr

TEL : (033)250-6372 FAX : (033)257-4190

\*\* 강원대학교, 기계·메카트로닉스 공학부

\*\*\* 홍익대학교, 기계공학과

관련된 연구를 살펴보면, 무한 직방성 패널에 대하여, Heckl[1]은 2개의 임계주파수로 표시되는 투과손실모델을 처음으로 제시하였으며, Bies와 Hansen[2]은 주름패널의 임계주파수를 구하기 위하여 주름단면의 2차모멘트를 계산하는 방법을 제시하였다. Alexander[3]는 다양한 단면 형상의 주름판재에 대하여 투과손실 실험치를 제공하였으며, Rowell과 Oldham[4]은 주름패널 음 방사의 방향성에 대한 연구를 수행하였다. 또한, Cordonnier, Cloarec등[5]은 유한요소해석 및 경계요소법으로 주름판재의 투과손실을 예측하는 방법을 제시한 바 있다. 판재의 유한성이 투과손실에 미치는 효과에 대해서는 Sewell의 해석[6]과 Hansen[7]의 실험적 연구가 유용한 정보를 제공한다. 그러나 이러한 해석이론은 Heckl의 직방성 거시모델[1]에 근거하므로, 주름내부 공동의 공명효과나 주기적인 단면의 국부적 구조 진동모드의 효과 등 미시적인 현상은 고려하지 못한다. 이에 관련하여, Windle과 Lam[8]은 주름구조에서 국부 진동모드의 공진이 투과손실을 크게 저하시킬 수 있음을 밝힌 바 있다. Zheng등[9]은 2중 주름판재와 보강된 주름판재를 사용하여, 그 해결 가능성을 보였다. 본 연구에서는 철도차량의 바닥재로 중요하게 사용되는 주름 강판과 허니콤 알루미늄 압출재를 대상으로 투과손실 해석이론의 적용성을 종합적으로 검토한다. 해석치와 실험치를 비교하여 예측의 신뢰도와 문제점을 분석한다. 주름판재 및 허니콤 압출재와 같은 직방성, 주기적 구조의 차음을 지배하는 설계인자를 파악하여 고속철도 차량의 차음 대책에 필요한 제공하는 것이 본 연구의 목적이다.

## 2. 직방성 판재의 차음성능 평가기법

### 2.1 Sewell-Sharp-Cremer(SSC) 이론

주름재나 허니콤 압출재는 거시적으로 직방성 판재의 거동을 보인다. 그러나 직방성 차음 모델의 복잡성 때문에, 상대적으로 간단한 등방성 평판의 차음 모델을 투과손실 예측에 자주 적용하게 된다. 가장 많이 사용되는 투과손실 예측모델은 다음의 필드입사음 질량법칙식인데, 등방성재의 임계주파수 아래에서 적용 가능한 모델이다.

$$TL(dB) = 10\log_{10}\left\{1 + \left(\frac{m\pi f}{\rho c}\right)^2\right\} - 5 \quad (1)$$

여기서,  $m$ 은 패널의 면밀도,  $\rho$ 는 공기의 밀도,  $c$ 는 공기중의 음속이다.

그러나 일치현상이 발생하는 주파수 대역에서는 질량법칙 예측치보다 투과손실이 크게 감소하므로, Cremer는 임계주파수 이상에서 일치효과를 고려한 다음의 투과손실 예측식을 제시하였다[10].

$$TL(dB) = 20\log_{10}\left(\frac{m\pi f}{\rho c}\right) + 10\log_{10}\left(\frac{2\eta f}{f_c}\right) - 5 \quad (2)$$

여기서,  $f_c$ 는 임계주파수,  $\eta$ 는 구조손실계수이다.

그러나 많은 실험 결과에서 일치현상은 일치주파수 훨씬 전부터 투과손실을 저하시키는 점을 감안하여, Sharp는 Cremer 모델을 보정하였다. 즉, 일치주파수의 1/2되는 주파수에서의 질량법칙 예측치와 일치주파수에서의 투과손실 예측치를 선형 내삽시키는 방법을 제시하였다[11].

이러한 Sharp-Cremer 모델도 저주파수대역에서는 실제의 투과손실을 과소하게 예측하는 문제를 보인다. 이에 대한 개선방안으로 Sewell은 다음의 저주파수 투과손실 모델을 제시하였다[6].

$$TL(dB) = -10\log_{10}\left\{\frac{\ln(k\sqrt{A}) + 0.16 - U(\Lambda) + \frac{1}{4\pi Ak^2}}{\left[\left(\frac{\mu\pi f}{\rho c}\right)\left(1 - \frac{f^2}{f_c^2}\right)\right]^2}\right\} \quad (3)$$

여기서  $A$ 는 판재의 면적,  $k$ 는 파수 (Wave number),  $U(\Lambda)$  형상함수,  $\Lambda$ 는 판재의 가로/세로 비이다.

종합적으로, 등방성 판재의 투과손실 예측은 일치 주파수의 1/2 아래에서는 식 (3)의 Sewell 모델을, 그 이상에서는 식(2)의 Cremer 모델을 Sharp가 보정한 Sewell-Sharp-Cremer 모델이 매우 실용적인

예측 모델로 사용되고 있다[12]. 이러한 등방성 판재 이론을 이용하려면, 주름 및 허니콤 판재의 등가 면밀도, 일치주파수 및 손실계수가 필요하다.

## 2.2 직방성 판재 이론

Fig.1의 주름판재는 거시적으로 직방성의 거동을 보인다. Cremer와 Heckl에 의한 등가 직방성 모델 (Equivalent orthotropic model)[10]에 근거하면 다음과 같이  $B_x, B_y$  두 개의 주 굽힘 강성에 의하여 패널내의 굽힘파에 의한 수직변위를 구할 수가 있다.

$$(1 + j\eta) \left[ B_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(B_x B_y)^{1/2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + B_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right] + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = p \quad (4)$$

평면 조화입사파  $p = P e^{j(\omega t - k_x x - k_y y)}$  에 의한 응답은  $w = w_0 e^{j(\omega t - k_x x - k_y y)}$  의 형태로 결정되는데, 각 방향의 파수(wave number)는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = (\omega/c)^2 \quad (5)$$

$$k_x = k \sin \theta \cos \phi, \quad k_y = k \sin \theta \sin \phi, \quad k_z = k \cos \theta \quad (6,7,8)$$

여기서, 입사각  $\theta, \phi$ 는 Fig.1에서 입사파가  $z$ 축 및  $x$ 축과 이루는 입사각을 의미한다. 식(1)로부터 패널 음향임피던스를 다음과 같이 입사각  $\theta, \phi$ 의 함수로 결정할 수 있다.

$$Z = \frac{P}{j\omega w} = j\omega m \left[ 1 - \left[ \frac{f}{f_{c1}} \cos^2 \phi + \frac{f}{f_{c2}} \sin^2 \phi \right]^2 \sin^4 \theta (1 + j\eta) \right] \quad (9)$$

여기서,  $m$  은 패널의 면밀도 (surface density),  $\eta$  는 구조감쇠치,  $c$  는 공기중 음속이며, 일치현상 (coincidence)이 발생하는 임계주파수는 다음의 두 식으로 주어진다.

$$f_{c1} = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B_y}}, \quad f_{c2} = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B_x}} \quad (10,11)$$

임계주파수의 결정에 필요한 등가 강성은 Bies와 Hansen[2]이 제시한 주름단면의 2차 모멘트법으로 구한다. 식(9)를 사용하여 입사 및 투과음사이의 파워비인 투과손실계수를  $\theta, \phi$ 의 함수로 다음과 같이 결정할 수 있다[7].

$$\tau_{\theta\phi} = \left| 1 + \frac{Z \cos \theta}{2\rho c} \right|^{-2} \quad (12)$$

본 연구에서는 다음과 같이 입사각을  $0^\circ \sim 78^\circ$  범위로 하여 펠드입사음 투과계수 및 투과손실을 계산하였다.

$$\tau_R = \frac{2}{\pi} \int_0^{\phi_{\text{lim}}} \left[ 2 \int_0^{\theta_{\text{lim}}} \tau_{\theta\phi} \cos \theta \sin \theta d\theta \right] d\phi \quad (13)$$

$$TL_R = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{\tau_R} \right) \quad (14)$$

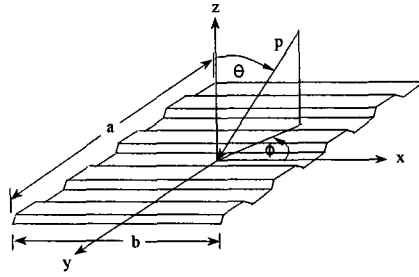


Fig. 1 Coordinate system of corrugated panel.

### 3. 차음성능의 평가

먼저 SSC 모델 관련하여, Callister 등은 다양한 두께의 유리창을 대상으로 투과손실을 비교 검토하여 SSC 모델의 신뢰도와 효용성을 확인하였다[12]. 대표적인 검증 사례를 Fig. 2에 인용한다. Fig.2는 4.9mm 두께 유리창의 투과손실 측정치와 SSC 모델 예측치를 비교한 결과로, Sharp의 모델 적용으로 저주파수 대역에서 서로 근접하고, Sewell의 보정으로 일치주파수 전후에서도 실험치와 예측치는 비교적 잘 접근한다.

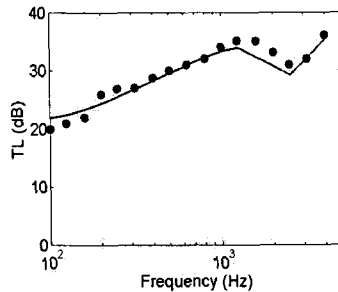


Fig. 2 A comparison of the sound transmission loss predicted using the SSC scheme and the experimental results for a 4.9 mm thick glass [12].  
 • : experimental, - : predicted

다음으로 Fig. 3의 주름판 강판을 대상으로 전술한 예측모델을 적용하였다. 주름 판재는 Hansen의 실험 모델로[7], 그 물성치 및 등가 직방성 모델에 요구되는 특성치를 Table 1에 보인다. 대/소 두 크기의 주름판재를 대상으로 투과손실 예측치와 Hansen의 측정 결과를 Fig. 4에서 비교한다. 먼저 등가 직방성 모델에 의한 예측치는 측정치에 비교적 잘 접근한다. 400Hz 부근에서 일치효과에 따른 투과손실의 감소가 측정결과와 비슷하게 나타나는 것은 1차 임계주파수의 예측치가 현실적임을 반영한다. (a)의 측정치에서 70Hz 부근에서 보이는 큰 낙폭은 패널의 1차 공진 모드 효과에 기인한다. 예측 모델은 패널 크기 및 경계조건에 따른 공진효과를 고려하지 못한다. 또한 두 판재 모두에서 4000Hz 부근에서 급격히 투과손실이 하락하는 것은 주름재와 같은 주기적인 구조의 국부적 공진 모드에 기인한다[8]. 이러한 구조적 공진이 투과손실에 미치는 효과를 정량적으로 모델링하는 것은 현실적으로 매우 어려운 문제이나, 그 주파수 대역의 예측은 어느 정도 가능하다. 직방성 판재 예측모델이 어느 정도 현실적인 결과를 보이는데 비해서, SSC 모델은 측정치와 비교할 때 상당한 차이를 보인다. 차이의 가장 큰 요인은 예측치가 1차 임계주파수에서 너무 큰 낙폭을 보이는 점이다. 등가 직방성 모델과 동일한 손실계수를 사용하였음에도 낙폭이 지나치게 크게 나오고 있다. 주름재와 같은 직방성재에서 일치 효과에 의한 낙폭이 실제로 별로 크지 않은 점은 추후 보다 많은 사례 조사를 통하여 확인이 필요한 문제이다. 예측치와 측정치를 차이 나게 하는 다른 중요한 요인으로, 4000Hz 부근에서 주름단위의 국부적 공진에 의한 투과손실 저하가 매우 크게 나오는 점이다. 이는 1차 임계주파수 이상에서의 투과손실 증가율을 억제시켜 SSC 모델과 질량법칙 예측치의 오차를 크게 만들고 있다.

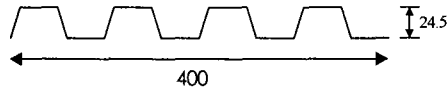
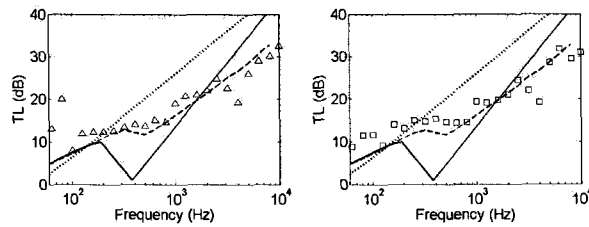


Fig. 3 Corrugated steel panel.

Table 1 Property of the corrugated panel

Panel Size	Thickness Excluding Coating (mm)	Surface Weight ( $kg/m^2$ )	Bending Stiffness ( $N \cdot m$ )		Critical Frequencies (Hz)			First Resonance Frequency	
			$B_x$	$B_y$	$f_{c1}$	$f_{c2}$	$\eta$	Panel Size	(Hz)
Small	0.42	4.58	11400	1.76	378	30400	0.011	1.50m $\times$ 1.05m	76.0
Large	0.42	4.58	11400	1.76	378	30400	0.011	3.19m $\times$ 2.96m	10.0



(a) small panel

(b) large panel

Fig. 4 A comparison of the sound transmission loss for a corrugated panel.  $\Delta$ ,  $\square$  experimental, -- : orthotropic model, — : SSC scheme,  $\cdots$  : mass law (Eq. (1)).

다음으로, Fig. 5의 허니콤 알루미늄 압출재를 대상으로 예측 모델로 구한 투과손실과 측정치를 비교 검토한다. 사용된 압출재는 선행 연구에서 시험된 시편이고[14], 그 측정결과를 예측치와의 비교에 사용한다. Table 1은 등가 직방성 모델을 이용하는 데에 사용된 특성치를 보인다.

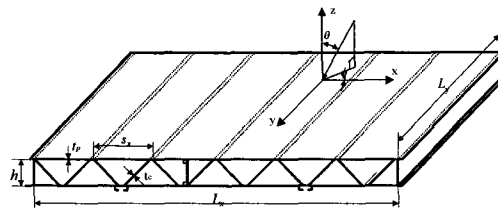


Fig.5 Structure of extruded panel.

Table 1. Specification of the aluminum extruded panel

Young's modulus , E	$71.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
mass density , $\rho$	$2800 \text{ kg/m}^3$
Poisson's ratio , $\nu$	0.33
panel height , h	80.5 mm
plate thickness , $t_p$	2.8 mm
core thickness , $t_c$	2.5 mm
equivalent mass density, m	$25.04 \text{ kg/m}^2$
panel dimensions , $L_x \times L_z$	2.15 m $\times$ 2.15 m
bending stiffness , $B_x$	594537 N·m
bending stiffness , $B_y$	748571 N·m
1st critical frequency , $f_{c1}$	110 Hz
2nd critical frequency , $f_{c2}$	123 Hz

Table 1의 등가 면밀도와 임계주파수를 사용하여 구한 투과손실 예측치와 측정치를 Fig. 6에서 비교한다. 압출재의 등가 강성은 Luo의 등가 연속체 평판모델과 유한요소해석을 이용하여 구할 수 있다 [15,16]. 등가 직방성 모델과 SSC 모델을 사용하여 예측한 투과손실은 측정치와 상당한 차이를 보인다. 그 차이의 근본 요인은 예측모델에서 일치효과가 100Hz 부근에서 발생하는 것으로 보는 데에 있다. 오히려 일치효과를 고려하지 못하는 질량법칙 예측치가 측정치에 가깝게 나오는 것이 이를 뒷받침한다. 오히려 투과손실 측정치에서는 1000Hz를 전후하여 투과손실의 폭락이 관찰된다. 즉, 이론적으로 계산된 Table 1의 임계주파수가 너무 낮게 추정되어, 질량지배 영역이 너무 낮은 주파수 대역으로 내려간 결과, 대부분의 주파수 대역에서 큰 오차가 발생하고 있다. 이러한 점을 감안하여 1차 임계주파수를 나뉘어 크게 발생하는 1000Hz 전후로 추정하여 등가 직방성 모델과 SSC 모델을 적용해 보았다.

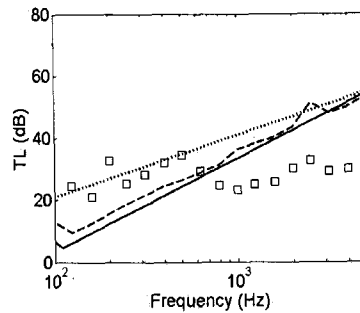


Fig. 6 A comparison of the sound transmission loss for an extruded aluminum panel.  $\square$  experimental, -- : orthotropic model, — : SSC scheme, ... : mass law (Eq. (1)).

Fig. 7은 일치현상이 900Hz와 1100Hz에서 발생한다고 추정할 때의 계산치와 측정치이고, Fig.8은 일치현상이 1000Hz와 1200Hz에서 발생한다고 추정할 때의 계산치와 측정치를 비교한다. 전술한 결과에 비해 측정치와의 차이가 크게 줄었다. 결국 등가 직방성 모델과 SSC 모델을 사용할 때, 임계주파수 값을 어떻게 설정하는가가 예측치의 신뢰도에 큰 영향을 미칠 수 있다. 한편, 측정치에서 보이는 저주파수 대역의 낙폭은 시편의 공진 효과로 보인다. 무한 평판 이론에서는 그 효과를 고려하지 못하나, SSC 모델에서는 Sewell의 크기 효과가 반영되는 관계로 등가 직방성 모델보다 측정치에 보다 근접한다. 한편, 질량법칙은 일치현상이 발생하는 주파수 아래에서는 어느 정도 투과손실을 예측하나, 일치주파수대역을 전후하여 측정치와 현격한 차이를 보이므로 그 적용에 주의를 요한다. 결과적으로 알

미늄 압출재의 경우, 등가 직방성 모델이나 SSC 모델이 차음성능의 예측에 사용될 수 있다. 그러나 예측치의 신뢰도 확보를 위해서는 일치효과가 발생하는 임계주파수의 산정이 매우 중요하다. 압출재의 경우 등가 강성으로부터 산정되는 임계주파수의 추정치가 실제 일치효과가 발생하는 대역과 큰 차이를 보이는 바, 실험적, 해석적 검토를 통하여 그 차이를 좁히는 방안이 필요하다.

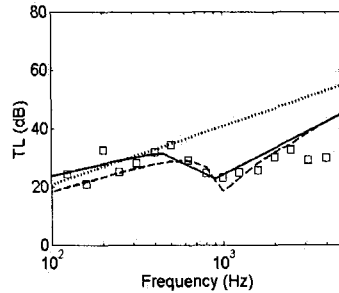


Fig. 7 A comparison of the sound transmission loss for an extruded aluminum panel(critical frequencies of 900 and 1100 Hz). □experimental, --: from orthotropic model, —: from SSC scheme, ...: mass law (Eq. (1)).

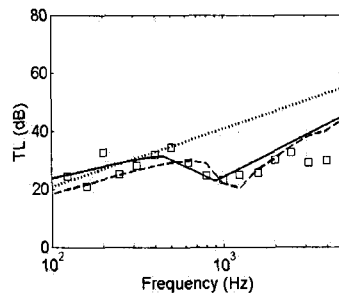


Fig. 8 A comparison of the sound transmission loss for an extruded aluminum panel(critical frequencies of 1000 and 1200 Hz). □experimental, --: from orthotropic model, —: from SSC scheme, ...: mass law (Eq. (1)).

#### 4. 결론

고속철도 차량의 차음재로 중요한 역할을 하는 주름판재 및 허니콤 알루미늄 압출재를 대상으로, 차음성능을 해석적, 실험적으로 평가하였다. 예측모델로는 등가 평판을 이용한 질량법칙, 패널 크기 및 일치효과를 고려한 SSC 모델, 그리고 등가 직방성 패널 모델을 사용하였다. 가장 간단한 질량법칙은 주름판재나 허니콤 압출재 모두에서 일치효과가 발생하는 주파수 훨씬 아래에서는 예측 모델로 적합하였다. 그러나 주름판재나 허니콤 구조에서 일치효과가 낮은 주파수대역에서 나타나므로, 질량법칙 적용에는 한계가 있었다. SSC모델은 주름판재에서는 일치주파수 부근에서 과도한 낙폭을 보였으나, 압출재에서는 측정치에 접근하는 예측치를 보였으며, 저주파수대역에서는 무한 등가직방성 패널 모델의 한계를 보완하는 대안이 될 수 있음을 보였다. 등가 직방성 판재 모델은 주름판재나 압출재 모두에서 예측모델로서의 효용성을 보였다. 그러나 예측 모델의 신뢰도는 일치주파수의 값을 어떻게 주는가에 따라 크게 달라질 수 있다. 향후 주름판재나 압출재를 대상으로 일치 주파수의 해석적 실험적 검토가 필요하다.

#### 후 기

본 연구는 건설교통평가원이 지원하는 “분산형 차량성능 및 운용 기반기술 개발연구”의 세부과제인 “실내의 소음저감 기술”의 연구비 지원으로 수행되었으며, 건설교통평가원의 지원에 감사드린다.

## 참고문헌

1. M. Heckl (1960), "Untersuchungen an Orthotropen Platten. Acoustics", Vol.10, pp.109-115.
2. D. A. Bies and C. H. Hansen (1988), Engineering Noise Control. Unwin Hyman Ltd, London.
3. N. J. H. Alexander (1988), "Measurement of Sound Absorption and Transmission of Corrugated Steel Plates", Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol. 10(5), pp.39-50.
4. M. A. Rowell. and D. J. Oldham (1988), "The Directivity of Orthotropic Factory Cladding Panels. Proceedings of the Institute of Acoustics", Vol.10(5), pp.39-50.
5. P. Cordonnier-Cloarec et al. (1992), "Contribution to the Study of Sound Transmission and Radiation of Corrugated Steel Structures", Journal of Sound and Vibration, Vol. 157, pp.515-530.
6. E. C. Sewell (1970), "Transmission of Reverberant Sound Through a Single Leaf Partition Surrounded by an Infinite Rigid Baffle", Journal of Sound and Vibration, Vol. 12, pp.21-32.
7. C. H., Hansen (1993), "Sound Transmission of Corrugated Panels", Noise Control Engineering Journal, Vol. 40, pp.187-197.
8. R. M. Windle, and Y. W. Lam (1993), "Prediction of the Sound Reduction of Profiled Metal Cladding. Inter-Noise'93", Vol. 2, pp.999-1002.
9. C. F. Ng. and H. Zheng (1998), "Sound Transmission through Double-leaf Corrugated Panel Construction", Applied Acoustics, Vol. 53, No.1-3, pp.15-34.
10. L. Cremer, M. Heckl, and E. E. Ungar (1988), Structure-Borne Sound, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin.
11. B. S. Sharp (1978), "Prediction Method for Sound Transmission of Building Elements", Noise Control Engineering, Vol.11,pp53-63.
12. J. R. Callister, and et al. (1999), "An Empirical Scheme to Predict the Sound Transmission Loss of Single-Thickness Panel", Journal of Sound and Vibration, Vol. 222(1), pp.145-151.
13. S. H. Kim, H. Jang. and J. Kim (2001), "Characteristics of Local Vibration Modes of the Aluminium Extruded Panels for Rail Road Vehicles", Journal of the Korean Society for Railway, Vol.4(3), pp87-93.
14. S. H. Kim et al. (2000), "Sound Transmission Loss of Aluminium Extruded Panels for Railway Vehicles", Transactions of KSNVE, Vol.10(4),pp662~668.
15. S. Luo, and J. C. Suhling, and T. L. Laufberg (1995), "Bending and Twisting Tests for Measurement of the Stiffness of Corrugated Board", ASME AMD-Vol. 209, pp.91-109.
16. W. Kim, J. Kim, G. Kim, and S. H. Kim (2003), "A Study on the Transmission Loss Characteristics of Honeycomb Structures", Transactions of KSNVE, Vol.13(1),pp.19~25.