

# 철도차량용 주름패널의 음투과특성에 관한 연구

## A Study on the Sound Transmission Characteristics of the Corrugated Panels for Railway Vehicles

김석현\* 박정모\*\*

Kim, Seock Hyun Park, Jung Mo

### ABSTRACT

Sound transmission characteristics are investigated on the corrugated panels which used for railway vehicles. A special purpose program is developed to calculate the sound transmission loss of orthotropic multi-layered panels. Several kinds of corrugated panels are analysed to estimate the transmission performance and the results are compared with the measured data. Calculated transmission losses show good agreement with the measured values in corrugated panels and aluminum/foam multi-layered panels. The analysis results can be utilized to design the corrugated panels and multi-layered panels which are required to reduce the interior noise in railway vehicles.

### 1. 서 론

철도차량은 엔진 및 구동장치, 차륜 및 레일, 공조계, 팬터그래프, 각종 전기 및 기계장치, 공력소음등 많은 내/외부의 소음 및 진동원을 가지고 있다. 기밀성이 양호한 경우, 소음/진동원에서 발생한 소음은 바닥, 측면 및 천정의 패널부를 통하여 실내로 투과되거나 결합부를 통하여 구조진동으로 실내로 전달된다. 객차 및 동력차의 실내는 충분한 차음을 위하여 흡차음재로 구성된 다층판재로 소음원과 격리되어 있다. 이 경우 소음원으로부터의 소음을 어느정도 차단하는가는 판재의 음향 투과손실 특성에 의하여 지배된다. 특히, 객실을 둘러싸고 있는 다층 흡/차음재의 차음성능은 외부의 소음 조건이 주어질 때, 실내소음의 수준을 결정하는 매우 중요한 인자가 된다. 특히 바닥재는 충분한 하중을 지지하면서 레일소음을 효과적으로 차단하기 위하여 우수한 차음성능을 갖는 다층구조로 설계된다. 그림 1은 한국형 고속전철에 사용되는 바닥 다층구조를 보인다. 바깥쪽의 주름패널(corrugated panel)은 바닥판이 충분한 굽힘강성을 갖도록 하는 효과적인 구조이다. 내부에는 흡음재와 공기층을 넣어 판재의 면밀도에 비하여 높은 투과손실을 얻을 수 있도록 설계되어 있다. 본 논문에서는 주름패널과 다층구조의 투과특성에 대한 이론적 고찰을 통하여 투과손실을 지배하는 설계인자의 효과를 규명하고, 차음에 유리한 다층판재의 설계에 유용한 정보를 제공하는데 연구의 목표를 둔다. 이를 위하여, 실험치와의 비교가 가능한 몇가지 다층판재를 대상으로, 개발한 프로그램을 사용하여 투과손실특성을 비교 분석하였다.

---

\* 강원대학교 정밀기계공학과 교수, 정회원

\*\*강원대학교 정밀기계공학과, 석사과정

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 주름판재의 투과손실

주름판재는 직방성을 가지므로, 주름패널내의 굽힘파의 운동은  $B_x, B_y$  두 개의 굽힘강성에 의하여 다음 식으로 기술된다<sup>[1]</sup>.

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

또한, 그림 2에서와 같이 입사각은  $\theta, \phi$  두 개의 변수에 의하여 표시되며, 특히,  $\phi$ 는 주름의 방향과 입사음파의 방향에 의하여 정해진다. 실험환경에 따라 입사각은 실험치와 해석치와의 차이에 영향을 주는 인자로 되어있다. 주름패널의 굽힘강성은 그림 3의 설계변수들에 의하여 지배되는데, 본 연구에서는 다음의 굽힘강성 모델을 사용한다<sup>[2]</sup>.

$$B_x = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \left[ \frac{\sum_n b_n}{L} \right] \quad (2)$$

$$B_y = \frac{Eh}{(1-\mu^2)L} \sum_n b_n \left[ z_n^2 + \frac{h^2 + b_n^2}{24} + \frac{h^2 - b_n^2}{24} \cos 2\phi_n \right] \quad (3)$$

이 경우, 일치현상이 발생하는 임계주파수는 다음의 두 식으로 결정된다.

$$f_{c1} = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B_y}}, \quad f_{c2} = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{B_x}} \quad (4), (5)$$

여기서,  $m$ 은 패널의 면밀도(surface density)이고,  $c$ 는 공기중 음속이다. 판재속도에 대한 음압비로 정의되는 판재의 음향임피던스는 식(1)-식(5)을 사용하여 다음과 같이  $\theta, \phi$ 의 함수로 결정된다.

$$Z = \frac{P}{j\omega w} = j\omega m \left[ 1 - \left[ \frac{f}{f_{c1}} \cos^2 \phi + \frac{f}{f_{c2}} \sin^2 \phi \right]^2 \sin^4 \theta (1+j\eta) \right] \quad (7)$$

식(7)을 사용하면, 입사음파 및 투과음사이의 파워비인 투과계수를  $\theta, \phi$ 의 함수로 다음과 같이 결정할 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$\tau_{\theta\phi} = \left| 1 + \frac{Z \cos \theta}{2\rho c} \right|^{-2} \quad (8)$$

확산음장의 입사환경을 가정하여, 랜덤입사음 투과계수 및 투과손실을 구할 수 있다.

$$\tau_R = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left[ 2 \int_0^{\pi/2} \tau_{\theta\phi} \cos \theta \sin \theta d\theta \right] d\phi, \quad TL_R = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{\tau_R} \right) \quad (9), (10)$$

### 2.2 다층판재의 투과손실

단일판재의 투과손실치는 질량법칙에 의하여 제한된다. 차음성능을 높이기 위해서는 내부에 공간이나 흡음재를 갖는 다층판재를 사용한다. 그림 4는 다층판재의 해석모델이다. 일반적으로 사용되는 다층차음재는 직방성주름패널과 강판, 알루미늄, 플라스틱이나 유리와 같은 비투과성 등방성패널, 그리고 유리섬유, 폴리우레탄, 공기층등의 투과성 흡음층으로 구분된다. 따라서, 3가지 층의 임피던스와 음압식을 사용하여 각 층의 해석모델을 모듈화시키고, 각 판재층 경계면상의 입출력 임피던스와 음압의 연속조건을 사용하여 전체 다층재의 임피던스를 구할 수 있다. 다음에 각 경계층에서의 음압을 연속적으로 구해나가면, 다층재의 입사파와 투과파의 파워비를 계산할 수가 있다. 본 연구에서는 Byrne의 층간 임피던스 및 음압매칭 알고리즘<sup>[4]</sup>을 사용하고 흡음재 임피던스의 실용적인 모델인 Delany, Bazley의 실험모델<sup>[5]</sup>을 사용하여 해석프로그램을 구성하였다<sup>[6]</sup>.

### 3. 단일주름패널의 음투과손실

그림 5에 보이는 5종의 주름패널모델을 대상으로 음투과손실을 계산하여 Hansen<sup>[7]</sup>의 실험결과와 비교하였다. 패널은 0.42mm의 동일한 두께를 가지는 구조용강판으로 되어있다. 모든 모델은  $7800 \text{ kg/m}^3$

의 동일한 밀도를 가지나, 주름의 형태에 따라 면밀도에서는 도표 1에서와 같이 약간의 차이를 보인다. 측정치는 대/소 2개의 시편을 사용한 결과를 보인다. 큰 시편은 3.19m x 2.96m 이고, 작은 시편은 1.50m x 1.05m의 크기를 갖는다. 해석은 무한패널의 이론모델에 근거하므로, 데이터를 비교함으로써, 투과손실에 대한 패널의 크기효과를 평가할 수 있다. 해석에서 손실계수로는 Hansen이 실험적으로 구한  $\eta=0.011$ 을 사용하였다. 그림 6의 대부분의 주름패널 모델에서 유한시편의 투과손실 측정치는 해석치보다 다소 높은 값을 보인다. 이러한 차이는 패널 공진주파수 아래의 저주파수범위에서 두드러지는데, 시편크기의 유한성이 강성을 증가시키는 것에 기인되며, 작은 시편에서 더욱 두드러진다. 한편, 저주파수대역의 측정치는 시험에 사용되는 잔향실의 크기에 따라 측정오차를 가질 수도 있다. 대부분의 모델에서 1차 임계주파수( $f_{c1}$ )부근에서 투과손실의 감소를 보인다. 등방성 등가평판에 비해서, 주름에 수직인 축에 대한 굽힘강성( $B_z$ )이 매우 높으므로, 1차 임계주파수가 저주파수대역으로 내려오게 된다. 도표 1에서와 같이 수백Hz대역에서 1차 임계주파수를 가지게 되므로, 등방성판재에 비하여 차음특성이 저하되는 결과를 가져온다. 그림 7은 5가지 주름패널모델에 대하여, 동일한 면밀도를 갖는 등가평판과의 투과손실차이를 비교한 결과이다. 그림에서 panel rib모델은 주름의 골이 가장 얇아 등가평판과 굽힘강성이 유사하므로, 투과손실의 차이를 별로 보이지 않는다. 골이 비교적 깊은 다른 모델에서는 굽힘강성이 등가평판보다 현저히 커지므로, 투과손실의 저하를 보이게 된다. 모델별 차음특성은 임계주파수의 위치에 따라 다르게 나타난다. 그림 8은 고속철도차량의 바닥재에 사용되는 주름패널의 투과손실과 이와 등가적인 평판의 투과손실을 비교한다. 실선은 그림 1의 바닥재중 1.2mm두께 주름판의 투과손실을 표시한다. 가는 점선은 주름패널과 동일두께 및 동일한 면밀도를 갖는 평판의 투과손실이고, 굵은 점선은 동일두께에 동일재질(동일밀도)을 갖는 평판의 투과손실을 표시한다. 모두 랜덤입사음의 투과손실로서, 그림 2의 입사각  $\theta, \phi$ 를  $0^\circ \sim 90^\circ$ 로 하여 구하였다. 1차 임계주파수 200Hz대역 아래에서는 대등한 투과손실을 보이나, 그 이상에서는 동일한 면밀도를 갖는 평판에 비해서, 주름패널이 10dB정도 낮은 투과손실을 보인다. 각 모델별로 등가평판의 투과손실과 비교함으로써, 주름패널의 구조에 따른 차음성능을 비교할 수 있다. 이러한 투과손실특성은 음파의 입사각에 따라서 차이를 보인다. 통상적으로  $\theta, \phi$  두 입사각에 대하여 랜덤입사음을 가정하여 투과손실을 구하고 있으나, 직방성 주름판재에서는 입사각  $\theta$ 보다는 입사각  $\phi$ 의 효과가 더욱 의미를 갖는다. 그림 9는 그림 2에서 정의된 입사각  $\phi$ 에 따른 주름패널의 투과손실을 비교한 결과이다.  $\phi=90^\circ$ 의 경우, 입사파는 굽힘강성이 매우 작은 굽힘파를 가진하게 되므로, 임계주파수가 매우 높아져 투과손실곡선은 단순한 질량지배특성을 보인다. 반면,  $\phi=0^\circ$ 에서는 가장 낮은 임계주파수를 발생시키므로 투과손실곡선의 골이 저주파대역으로 최대한 이동하여 차음성능이 저하된다. 이러한 특성은 바닥을 통하여 전달되는 소음의 주파수성분과 입사방향에 따라 주름판재의 차음특성이 크게 달라질 수 있음을 의미한다. 한편, 주름패널은 내부적인 구조감쇠와 결합층의 뎀핑재에 의하여 손실계수를 갖는다. 그림 10은 한국형 고속철도 차량 바닥재에 사용되는 주름패널의 투과손실에 대한 구조감쇠치의 영향을 보인다. 1차 임계주파수인 200Hz대역 아래에서는 감쇠인자의 영향이 거의 관찰되지 않으며, 임계주파수 이후에서는 감쇠치의 증가에 따라 투과손실도 증가하나 그 변화율은 비교적 작다.

#### 4. 다층패널의 음투과특성

그림 1과 같은 다층패널의 음투과특성을 계산하기 위해서, 2절의 이론에 근거한 다층패널의 투과손실해석 전용프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 신뢰도를 검증하기 위하여, 실험치와 비교가 가능한 몇가지 모델을 대상으로 해석을 수행하였다. 그림 11은 1.27mm의 알루미늄판과 27mm의 우레탄폼층을 접착제로 접착시킨 2중 패널의 투과손실을 보인다. 실험치는 Bolton<sup>[6]</sup>의 음향인텐시티법에 의한 결과를 인용하였다. 1000Hz아래에서는 두 결과가 비교적 잘 일치하나, 1000Hz 이상에서 큰 차이를 보인다. 이러한 차이는 두 층이 완전히 접착된 관계로 2중판의 등가 굽힘강성이 증가하고, 그 결과 임계주파수가 저주파수대역으로 내려오기 때문이다. 본 연구에서 사용하는 해석모델이 폼층의 추가로 인한 굽힘강성의 증가를 반영하지 못하므로 차이를 보인다. 그림 12는 알루미늄+폼층+알루미늄 3겹재가 접착되지 않

고 층 사이에 공기층을 갖는 경우의 투과손실특성을 비교하는데, 대부분의 주파수대역에서 비교적 잘 일치하고 있다. 이는 알미늄과 폼이 떨어져있는 관계로 각 층이 독립적인 굽힘강성을 가지게 되기 때문이다. 결과적으로, 알미늄판 굽힘강성에 큰 변화가 발생하지 않으며, 해석모델이 실제 상황에 적합하게 된다. 그림 13은 알미늄/폼 접착층+공기층+알미늄판으로 구성된 다층구조의 투과손실을 보인다. 알미늄/폼접착층의 증가된 굽힘강성으로 임계주파수가 2000Hz부근으로 내려와 이 부근에서 낮은 투과손실을 보인다. 또한, 200Hz-300Hz에서는 공기층의 존재로 인한 패널공진이 발생하여 낮은 투과손실을 보인다. 흡음층에 유리섬유나 암면을 사용하는 경우, 우레탄폼과 달리 굽힘강성을 거의 무시할 수 있으므로, 접착효과가 상대적으로 작을 것으로 예상된다. 이상의 몇가지 다층판재에 대한 실험치와의 비교에서, 개발된 프로그램이 비교적 현실성있는 해석결과를 주고 있음을 확인할 수 있다. 추후의 지속적인 연구를 통하여 실차량의 투과손실치와 비교/분석하고, 실차의 차음성능 개선을 위한 설계기술 개발에 해석프로그램을 적극 활용할 계획이다.

## 5. 결론 및 토론

등방성판재, 직방성주름판재, 흡음재 및 공기층으로 구성된 다층판재의 투과손실해석 전용프로그램을 개발하였다. 널리 사용되는 대표적인 주름판재 모델의 랜덤입사음 투과손실을 해석하고 모델별 차음성능을 평가하였다. 주름에 의한 굽힘강성의 증가는 투과손실의 저하를 유발시켰다. 알미늄/폼 다층패널의 투과손실에서는 공기층에 의한 패널공진주파수와 알미늄/폼 접착층의 임계주파수에서 투과손실이 저하되었다. 주름패널을 갖는 다층판재에서는 주름의 골이 깊어지면 굽힘강성은 커지나, 임계주파수의 저하로 차음성능은 감소하는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

- 1.W.Soedel(1993),"Vibration of Shells and Plates",Marce Dekker, Inc.
- 2.P.C.Cloarec, S.Pauzin, D.Biron, M.Haddar and M.A.Hamdi(1978), "Contribution to the Study of Sound Transmission and Radiation of Corrugated Steel Structures," Journal of Sound and Vibration, Vol.157, pp. 515-530.
- 3.F.Fahy(1985),"Sound and Structural Vibration",Academic Press.
- 4.K.P.Byrne(1989),"Calculating the Acoustical Properties of Plane Uniform Constructions", Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, 111, pp. 343-350.
- 5.M.E.Delaney, E.N.Bazley(1970),"Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials", Applied Acoustics, Vol.3, pp.105-116.
- 6.박철희의(1997),"진동소음해석 및 저감기술개발", 고속전철기술개발사업 1차년도보고서.
7. C.H.Hansen(1992), "Sound Transmission Loss of Corrugated Panels", Noise Control Engineering, Vol. 40, pp.187-197.
8. J.S.Bolton, N.M. Shi and Y.J.Kang(1996), "Sound Transmission through Multi-Panel Structures Lined with Elastic Porous Materials", Journal of Sound and Vibration, Vol. 191(3), pp.317-347.

도표 1. 사용된 주름패널의 종류와 물성치

Panel Type	Thickness Excluding Coating	Surface Weight ( $kg/m^2$ )	Bending Stiffness ( $kg \cdot m^2 \cdot sec^2$ )		Critical Frequencies (Hz)	
			$B_x$	$B_y$	$f_{c_1}$	$f_{c_2}$
Hi Span 800	0.42	4.58	11400	1.76	378	30400
Hi Rib	0.42	4.82	38000	1.83	212	30600
Hi Ten	0.42	4.28	10800	1.64	375	60400
Custom Orb	0.42	4.29	3020	1.54	710	31400
Panel Rib	0.42	3.9	95.9	1.48	3800	30600

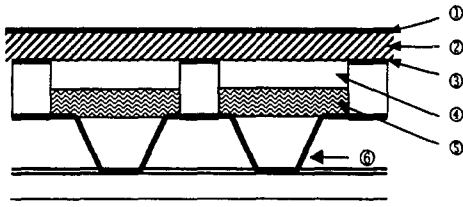


그림 1. 철도차량 바닥재용 다층주름패널.

(① rubber:3mm, ② plywood:22mm, ③ rubber4mm, ④ air:23mm, ⑤glassfiber:40mm ⑥ steel:1.2mm)

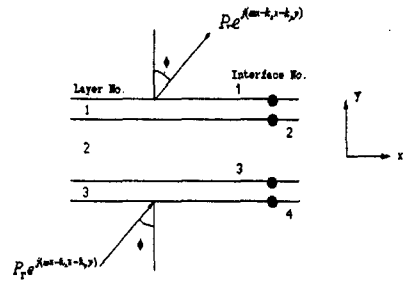


그림 4. 다층판재의 투과손실 모델

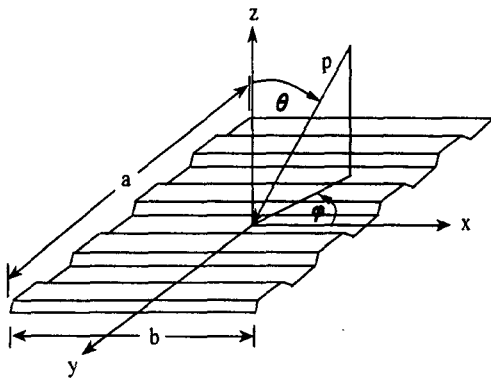


그림 2. 주름패널의 구조 및 음입사.

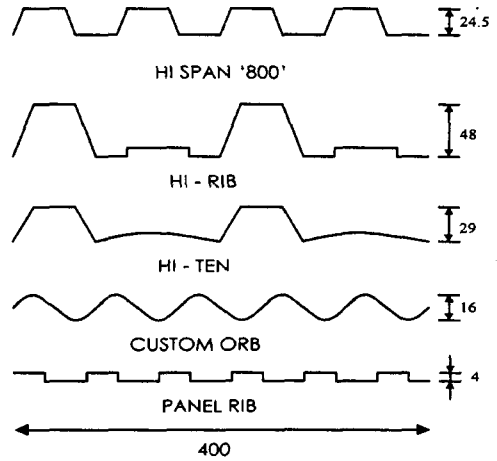


그림 5. 주름패널모델의 구조.

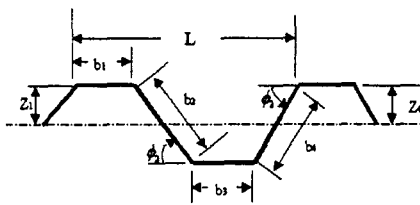
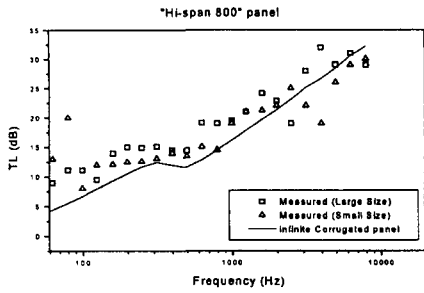
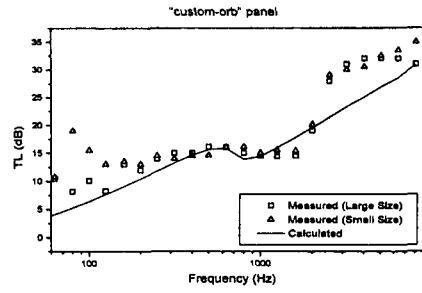


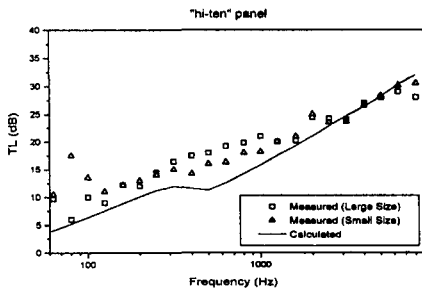
그림 3. 주름패널의 설계변수.



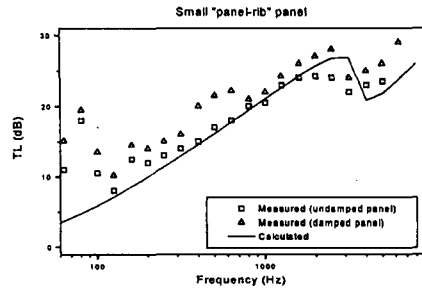
가) Hi-Span 800 패널의 투과손실 특성



라) Custom-Orb 패널의 투과손실 특성

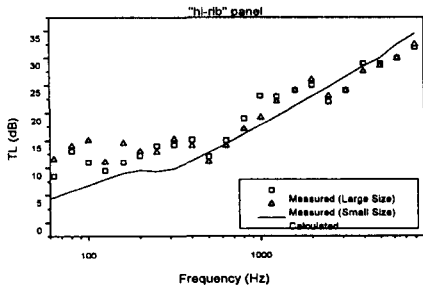


나) Hi-ten 패널의 투과손실 특성



마) Panel-Rib 패널의 투과손실 특성

그림 6. 주름패널모델의 투과손실.



다) Hi-rib 패널의 투과손실 특성.

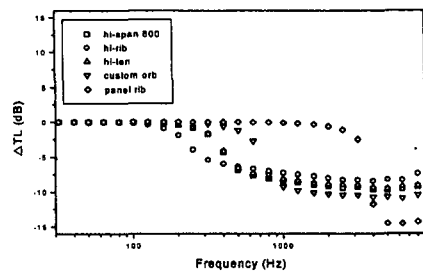


그림7. 철도차량용 주름패널의 투과손실.

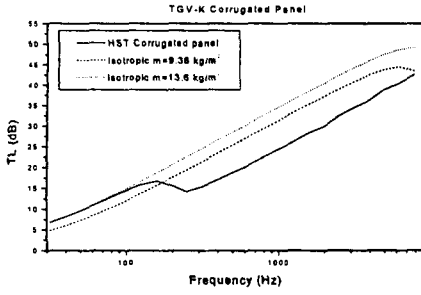


그림 8. 주름패널과 등가평판의 투과손실비교.

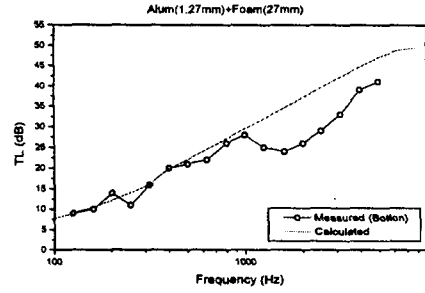


그림 11. 알루미늄/우레탄폼 접착판재의 투과손실.

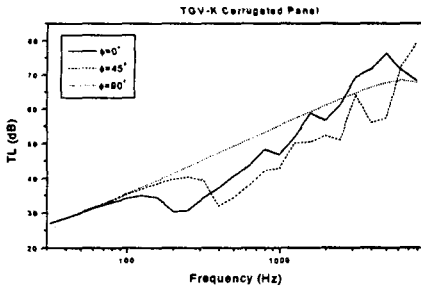


그림 9. 입사각  $\phi$ 에 따른 투과손실.

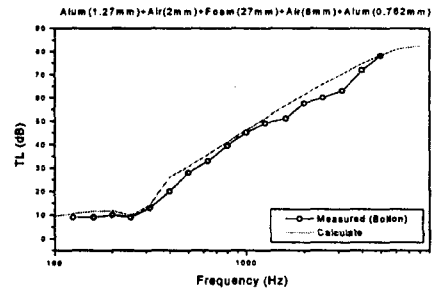


그림 12. 알루미늄/우레탄폼/알루미늄 비접착 3겹재의 투과손실.

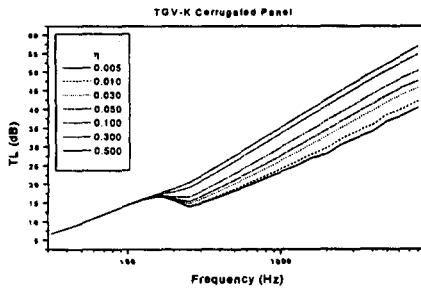


그림 10. 투과손실에 대한 손실계수의 효과.

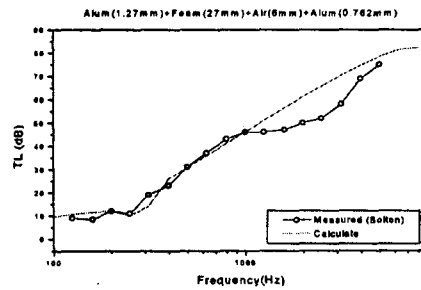


그림 13. 알루미늄, 폼 접착층/공기층/알루미늄 3겹재의 투과손실.