

수직입사 임피던스를 이용한 난입사 흡음을 예측 연구

°유승국*, 김영찬*, 김두훈*

The study on the estimation of diffuse field absorption coefficient by using normal incidence impedance.

Seung-Kuk Yu, Young-Chan Kim, Doo-Hoon Kim.

ABSTRACT

This paper is to compare the absorption coefficient with normal incidence waves and it with diffuse incidence waves of glass wool which the most used absorption material and multi layer fiber. The absorption coefficient with normal incidence waves is calculated by surface impedance that measured by using an acoustic tube. Based on this data, the absorption coefficient with diffuse incidence waves is predicted and is compared with measured the absorption coefficient in reverberation room.

1. 서론

소음저감을 위한 소음대책 중 가장 일반적인 것은 흡음재를 이용하여 소리에너지를 감쇠 시키는 방법이다. 가장 흔하고 많이 쓰이는 흡음재료는 유리면과 압면 등이 있으나 유리입자의 비산으로 인한 인체 유해성 여부로 많은 환경적 제약을 받고 있다. 이에 많은 산업현장에서는 유리면과 압면을 대체할 수 있는 흡음재를 개발하고 있으나 경제면과 효율면에서 유리면과 압면의 성능에 미치지 못하는 한계 때문에 현장 사용에 많은 어려움이 있다. 그러나 제한적으로나마 정밀 기계장비를 위한 환경기준과 사무실 또는 주거지역의 생활환경 기준을 극복하기 위해 유리면과 압면을 대체하는 노력이 이루어지고 있으며 더 나아가 환경여건과 잘 어울리는 친미적 경향의 흡음재도 사용하려 노력

하고 있다. 개발되고 있는 흡음재료로는 다공질 흡음재료의 발포수지재료(foamed material)와 섬유질 흡음재 등이 있으며 금속성 알루미늄에 공기를 발포하고 모래와 같은 작은 입자를 압축 성형하는 등 특이한 흡음재의 개발 등 그 범위가 확대되고 있다. [1]일반적으로 많이 사용하는 유리면과 압면 등은 Delany와 Bazley의 음향특성 연구[2]등 여러 곳에서 그 음향학적 특성이 다뤄졌고, 발포수지재료 또한 Biot[3]등과 같이 그 특성을 가름할 수 있는 실험식을 구하고자 하는 많은 노력이 있어왔다. 이렇듯 많은 연구와 실험에도 불구하고 재질의 다양한 종류와 복잡성 등으로 각각의 재질에 대한 음향학적 특성의 실험식을 구하는 것은 여전히 어려운 상태라 할 수 있다. [4]한편 Utsuno[5]등은 임피던스관내에서 마이크로폰을 직접 흡음재에 넣어 재질의 특성임피던스와 전파상수를 구한 Scott[6]방법과 특정 주파수에 맞게 공기 층의 두께를 변화시켜야 하는 Yaniv[6]방법의 단점을 해소하기 위한 것으로 임피던스관의 공기 층을 자유로이 변화시

* 유니슨산업(주) 유니슨기술연구소

켜가며 재질의 표면임피던스만으로 그 특성임피던스와 전파상수를 구하는 두 마이크로폰의 전달함수법⁶⁾을 제안하였다. 이렇듯 재질의 특성 임피던스와 전파상수를 구하는 것 이외에 흡음재의 흡음율만을 구하여 그 음향학적 특성을 간단하게 평가하는 실용적인 방법도 있다. 이러한 방법으로는 임피던스관을 이용한 흡음율 측정외에 잔향실법을 이용한 방법이 있으나 음파가 전 위치에 대해 동일한 에너지를 갖는 잔향실을 갖추고 있어야 함은 물론 일정 정도의 시료 크기도 확보되어야 하는 등 공간과 비용의 발생으로 웬만한 산업현장에서는 설치하기가 어려운 실정이다.

본 논문에서는 임피던스관에 설치된 흡음재에 수직음을 입사하여 시료의 표면임피던스를 구하고 이것으로 수직입사시의 흡음율을 살펴보았다. 또한 음파가 난입사하는 경우의 흡음율을 예측하여 실제 잔향실에서 측정된 흡음율과 비교하였다. 또한 상·하한 주파수에 따른 임피던스관의 특성을 비교하여 앞으로 임피던스관을 이용한 재질의 특성을 살펴보고자 하는 이에게 도움을 주고자 하였으며 더 나아가 수직입사 흡음율로 잔향실에서 구한 흡음율을 정성적으로나마 예측하는 계기가 되고자 하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 기본이론

Fig. 1.과 같이 특성임피던스 z_1 을 갖는 유체 매질 I과 z_2 의 특성임피던스를 갖는 유체 매질 II의 경계면($x=0$)이 존재하는 경우, 평면파로 진행하는 음파는 매질의 경계면에서 음향에너지의 일부는 반사하고 일부는 투과하게 된다. 이때 각각의 음압은 다음식 (1)과 같이 진행하며 반사계수(reflection coefficient)와 투과계수(transmission coefficient)는 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$p_i = P_i e^{j(\omega t - k_1 x)} \quad (1.a)$$

$$p_r = P_r e^{j(\omega t + k_1 x)} \quad (1.b)$$

$$p_t = P_t e^{j(\omega t - k_2 x)} \quad (1.c)$$

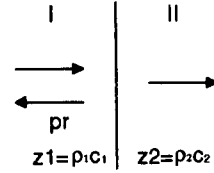


Fig. 1. Reflection and transmission of plane waves normally incident on a boundary.

$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (2.a)$$

$$T = \frac{2 \cdot z_2}{z_2 + z_1} \quad (2.b)$$

Fig. 2.와 같이 유체 매질 I를 통해 전달되는 입사파가 입정한 각도 θ 를 갖고 특성임피던스 Z_c 를 갖는 고체 매질 II에 입사할 때의 음압은 식 (3)과 같이 표시된다.

$$p_i = P_i e^{j(\omega t - k_1 x \cos \theta_i - k_1 y \sin \theta_i)} \quad (3.a)$$

$$p_r = P_r e^{j(\omega t - k_1 x \cos \theta_r - k_1 y \sin \theta_r)} \quad (3.b)$$

$$p_t = P_t e^{j(\omega t - k_1 x \cos \theta_t - k_1 y \sin \theta_t)} \quad (3.c)$$

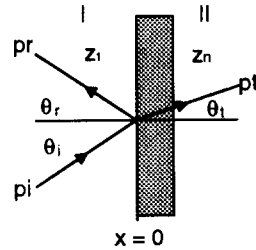


Fig. 2. Oblique incidence of plane waves on a normally reacting solid

이때 재질의 표면에서 표면 임피던스가 형성되며 이것은 음압과 입자속도의 위상차로 인해 상수가 아닌 복소수의 형태로 표현된다. 이것은 식 (4)와 같이 반사계수의 항으로 표현가능하며 흡음율 또한 식 (5)와 같이 반사계수항으로 나타난다.

$$z_n \cos \theta_i = z_1 \frac{1+R}{1-R} \quad (4)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (5)$$

$$z_{s1} = z_c \cdot \coth(\gamma d) \quad (7)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (8)$$

$$= 1 - \left| \frac{(z_{s1} - z_0)}{(z_{s1} + z_0)} \right|$$

2.2 임피던스관을 이용한 음향특성

관을 통과하는 음파가 기류의 발생과 벽면에서의 손실을 무시한다는 평면파 진행의 음파로 가정하여 재료의 음향학적 특성을 연구한 사례는 많다. 특히 Smith와 Parrott의 방법^[7]과 Utsuno등의 방법^[8]은 안정적이고 손쉬운 측정방법으로 최근까지 많이 사용되고 있다. Fig. 3.과 같이 시료를 임피던스관에 d의 두께로 설치하고 음파를 발생시켜 시료에 수직입사 시키면 시료의 표면 임피던스는 식 (6)과 같이 표현된다.

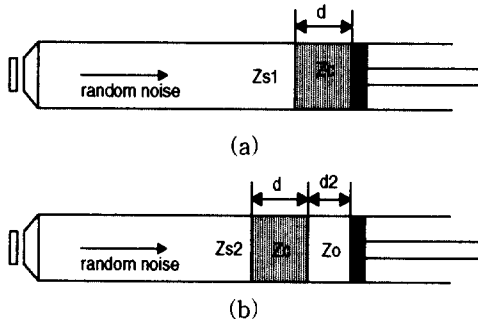


Fig. 3. Block diagram of the impedance tube

$$z_s = z_c \cdot \frac{z_0 \cosh(\gamma d) + z_c \sinh(\gamma d)}{z_0 \sinh(\gamma d) + z_c \cosh(\gamma d)} \quad (6)$$

z_s : 시료의 표면 임피던스

z_c : 시료의 특성 임피던스

z_0 : 공기층의 파동 임피던스 ($\rho_0 c_0$)

γ : 전파상수

d : 시료의 두께

d_2 : 공기층의 두께

만약 Fig. 3.(a)와 같이 시료 뒤편에 공기층이 아닌 강제로 막음한 경우라면 z_0 가 무한대로, 식 (6)은 식 (7)처럼 간단하게 표현할 수 있다. 또한 이때의 수직입사 흡음율은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

음파 발생 스피커에서 나오는 랜덤 신호가 공기를 통과하여 전달되다가 고체 매질인 시료를 통과할 때 발생하는 표면임피던스는 두 마이크로폰의 신호비인 전달함수로 구할 수 있으며 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{z_{s1}}{\rho c} = \frac{1+R}{1-R} \quad (9)$$

$$= j \frac{H_{12} \sin(kl) - \sin[k(l-s)]}{\cos[k(l-s)] - H_{12} \cos(kl)}$$

H_{12} : mic.1에 대한 mic.2의 전달함수

l : mic.1과 시료 사이의 거리

s : mic.1과 mic.2 사이의 거리

한편, 수직입사가 아닌 입사각 θ 가 각 각도별로 존재하는 난입사 경우의 흡음율은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있으며 전체 평균 흡음율은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha(\theta) = \frac{4 \cdot \text{Re}(z_{s1}) \cos \theta}{[\text{Re}(z_{s1}) \cos \theta + 1]^2 + [\text{Im}(z_{s1}) \cos \theta]^2} \quad (10)$$

$$\alpha_{av} = \int_0^\theta \alpha(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta \quad (11)$$

3. 측정방법 및 결과분석

3.1 측정개요

실험은 잔향실을 이용한 방법과 임피던스관을 이용한, 두 가지 방법으로 수행되었으며 각각 KS F 2805^[9]의 “잔향실내의 흡음율 측정 방법”과 ASTM C 384-88^[9], ASTM E 1050-86^[10]의 “임피던스관을 이용한 흡음율 측정 방법”으로 흡음율을 구하였다. 측정시료는 Table 1.과 같이 유리면과 섬유질 흡음재, 2종류를 선택하였으며 유리면은 밀도별, 두께별로 측정하였고 섬유질 흡음재는 섬

유질의 가공종류에 따라 그 흡음율을 측정하였다.

Table 1. Properties of the absorptive material.

시료종류		밀도 (kg/m ³)	두께 (mm)
유리면		48	50
		80	100
		80	100
인슈론	시료 1	30	50
	시료 2	30	50
	외국산	30	50

* 섬유질 흡음재는 인슈론이라고도 하며 국내 S사가 개발한 제품을 사용하였다.

3.2 잔향실을 이용한 측정방법

잔향실의 평면도는 Fig. 4.과 같으며 잔향실의 용적은 277.1m³으로써 100Hz이상의 주파수 대역의 흡음율 측정이 가능하다. 측정 방법은 마이크로폰(LD 2559)을 벽면으로부터 1m이상, 음원으로부터 2m이상 떨어진 위치, 25곳을 선정하여 측정하였으며 음원은 신호발생기(B&K 4205)를 통해 108dB 크기의 백색소음을 발생시켜 일정 정도의 시간이 흐른 다음 음원을 차단하여 잔향실의 잔향시간을 소음분석기(Larson-Davis 2900)로 처리하여 잔향시간을 기록한다. 이렇게 구한 잔향시간과 잔향실 용적, 시료의 면적을 변수로 사용하여 식 (12)을 이용하여 시료의 흡음율을 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{55.3V}{cS} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (12)$$

- α : 흡음율
- c : 공기중의 음속(m/s)
- V : 잔향실의 용적(m³)
- S : 시료의 면적(m²)
- T_1 : 시료가 없을 때의 잔향시간(sec)
- T_2 : 시료가 있을 때의 잔향시간(sec)

3.3 임피던스관을 이용한 측정방법

임피던스관을 이용하여 흡음율을 구하고자 할 때에는 측정 가능한 주파수범위를 고려하여 임피던스관을 설계하는 것이 필요하다. 잔향실법을 이용한 흡음율 측정시 유효한 주파수 대역은 1/3 옥타브 밴드 중심 주파수가 125Hz부터 4kHz까지이므로

로 임피던스관을 이용한 흡음율 측정에서도 같은 주파수 대역을 갖을 수 있도록 상·하한주파수를 Table 2.과 같이 결정한다.

Table 2. Determination of upper-limit frequency and below-limit frequency

	직사각형 덕트	원형 덕트
상한주파수	$f_u < 0.5 \frac{c}{d}$	$f_u < 0.586 \frac{c}{d}$
하한주파수	$\frac{3}{4} \lambda < L - d$ 또는 $L > \frac{3}{4} \lambda + d$	

f_u : 상한주파수(Hz) :

λ : 파장(m)

d : 직경(m)

L : 관의 길이(m)

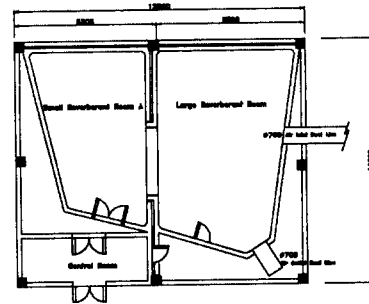


Fig. 4. A plane figure of reverberation room

Fig. 5.와 Fig. 6.은 위 식에 따라 실험장치를 나타낸 구성도이다.

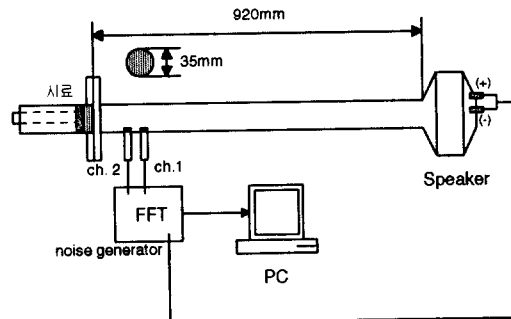


Fig. 5. Test apparatus and instrumentation for circular steel tube of measuring impedance and absorption coefficient.

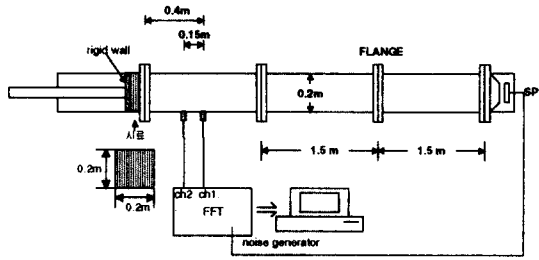


Fig. 6. Test apparatus and instrumentation for rectangular acryl tube of measuring impedance and absorption coefficient.

측정방법은 신호분석과 신호발생이 동시에 가능한 신호분석기(B&K 2034)를 사용하여 백색잡음(white noise)을 발생케 하였다. 발생된 음파는 관을 통과하여 시료에 수직하게 입사하도록 하였으며 이때의 신호는 시료 앞에 설치된 마이크로폰을 통하여 신호분석기로 전달된다. 마이크로폰은 음압과 위상을 두 마이크로폰간의 위치 교환방법으로 보정한 것으로 사용하였으며 시료의 뒷편은 강체로 막음한다. 막음에 사용되는 강체는 필요한 경우를 대비하여 공기 층의 간격을 조절할 수 있도록 설계한다. 본 실험에 사용된 임피던스관은 Fig. 5와 Fig. 6에서 보는 바와 같이 두가지 형태의 관이며 이 두 개의 임피던스관을 결합하여 사용하려 하였다. 다시 말해 100Hz~500Hz는 직사각형 덕트로 구한 임피던스관, 500Hz~4kHz까지는 원형관에서 구한 임피던스관을 측정 데이터로 활용하였다. 이렇게 구한 시료의 표면임피던스로 실측의 흡음율과 난입사 예측 흡음율을 구하여 잔향실법을 이용한 실측의 난입사 흡음율과 비교하여 보았다.

3.4 실험결과 및 분석

1) 임피던스관의 특성에 따른 차이 비교

Fig. 7은 steel tube와 acryl tube로 똑같은 재질의 흡음율을 비교한 것이다. 하한주파수가 290Hz인 steel tube로 구한 흡음율은 하한주파수가 60Hz인 acryl tube로 측정된 흡음율보다 약 300Hz 이하에서 훨씬 불안정한 상태가 나타남을 쉽게 관찰할 수 있다.

2) Glass Wool의 흡음율 비교

유리면은 48k와 80k의 밀도와 100mm와 50mm의 두께를 비교하였다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 48k가 80k보다 전반적인 주파수대역에서 흡음성능이 좋으며 두께가 두꺼울수록 저주파 대역에서 흡음

성능이 약10~40% 더 좋게 나타남을 알 수 있다. Fig. 9.는 유리면 100mm인 48k, 80k의 잔향실에서의 흡음율을 실측한 비교도표이다. 또한 Fig. 10.은 수직입사시의 흡음율과 난입사시의 흡음율, 그리고 임피던스를 이용하여 예측한 난입사 흡음율의 상호비교를 나타낸 도표이다. 고주파수 대역의 1kHz 이상에서는 예측 흡음율과 실측 흡음율이 약 $\pm 5\%$ 미만의 평균오차로 비교적 유사하나 500Hz 이하의 저주파수대역에서는 약 $\pm 10\%$ 정도의 차이가 있음을 볼 수 있다.

3) 섬유가공 흡음재

섬유가공 흡음재의 밀도 30kg/m³, 두께 50mm로 통일하였으며 재료에 따라 가공방식과 섬유의 특성에 차이가 있다. 재료1과 2는 3층구조로 구성되어 있으며 재료 1은 엠보싱이 없고 재료 2는 엠보싱을 주었다. 엠보싱을 준 재료가 저주파대역에서 좀 더 나은 흡음율을 나타낸다. Fig. 11은 수직입사시 각각의 시료에 대한 흡음율을 나타낸 것이고 Fig. 12.는 난입사시의 흡음율을 나타낸 것이다. 또한 Fig. 13.은 각 시료에 대한 수직입사시 흡음율과 난입사 예측 흡음율, 그리고 난입사 실측 흡음율을 비교한 그래프이다. 주로 중고음의 영역에서 흡음율이 좋음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 흡음재로 가장 많이 사용하는 유리면과 최근 개발이 활발한 섬유가공재, 2종류를 이용하여 수직입사시의 흡음율과 난입사시의 실측 흡음율을 비교하여 보았다. 또한 임피던스관을 이용한 간단한 실험으로 난입사시의 흡음율을 예측하여 보았다. 전반적으로 수직입사시의 흡음율은 난입사시의 실측 흡음율보다 중·저주파수(1kHz 이하)에서는 20~30% 낮게 평가되며 고주파수(1.5kHz 이상)에서도 20~30% 높게 평가되는 경향이 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Delany, M. E. and Bazley, E. N., "Acoustical properties of fibrous absorbent material", Applied Acoustics, 1970, Vol. 3, pp. 105~116.
- (2) Biot, M. A., "Theory of propagation of waves in a fluid-saturated porous solid", Journal of the Acoustic Society of America, 1956, Vol. 28, No 2, pp. 168~178.
- (3) Utsuno, H., Tanaka, T., Fujikawa, T., and Seybert, A. F., "Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials", J. Acoust. Soc. Am., 1989, Vol. 86, pp. 637~643.
- (4) Scott, R. A., "The absorption of sound in a homogeneous porous medium", Proc. Phys. Soc. London, Vol. 58, pp. 165~183.
- (5) Yaniv, S. L., "Impedance tube measurement of the propagation constant and characteristic impedance of porous material", J. Acoust. Soc. Am., 1973, Vol. 53, pp. 1138~1142.
- (6) A. F. Seybert, "Two-sensor method for the measurement of sound intensity and acoustic properties in ducts", J. Acoust Soc. Am. 83(6), June 1988.
- (7) Smith, C. D. and Parrott, T. L., "Comparison of three method for measuring acoustic properties of bulk materials", J. Acoust. Soc. Am., 1983, Vol. 74, pp. 1577~1582.
- (8) KS F 2805, "간향실법 흡음율의 측정 방법"
- (9) ASTM C384-88, "Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials by the impedance tube method"
- (10) ASTM E 1050-86, "Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones, and a digital frequency analysis system"
- (*) 정성수, 황철호, "플라스틱 폼의 음향특성 조사", 한국소음진동공학회지, 1996년, 제6권 제3호, pp. 333~340.
- (**) 황철호, 정성수, 은희준, "흡음재의 특성임피던스와 전파상수의 새로운 결정방법", 한국소음진동공학회지, 1997년, 제7권 제5호, pp.781~787.

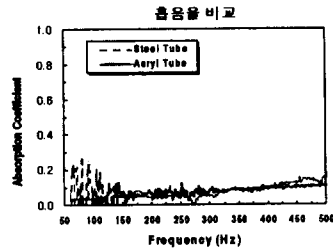


Fig. 7. Comparison between steel tube and acrylic tube.

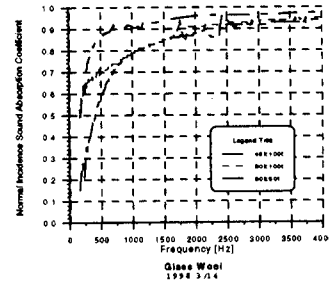


Fig. 8. Comparison of absorption coefficient with normal incidence waves

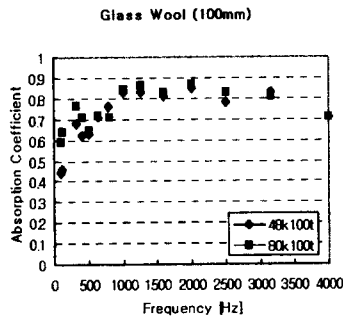
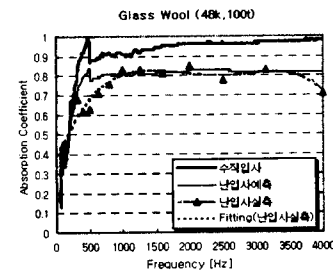
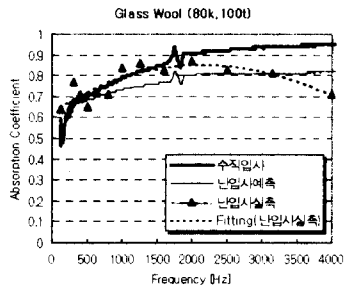


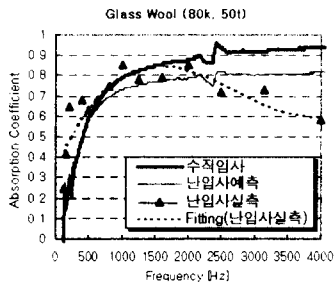
Fig. 9. Comparison between the measured absorption coefficient of a 48kg/m³ glass wool and a 80kg/m³ glass wool with diffuse incidence waves.



(a) Glass wool (48kg/m³, 100mm)



(b) Glass wool (80kg/m³, 100mm)



(c) Glass wool (80kg/m³, 50mm)

Fig. 10. Comparison of absorption coefficient for glass wool.

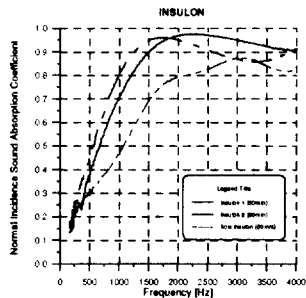


Fig. 11. Comparison between the measured absorption coefficient of Insulon 1, 2 and Australia Insulon with normal incidence waves

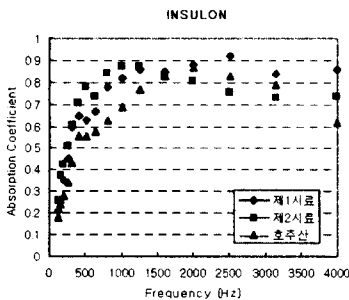
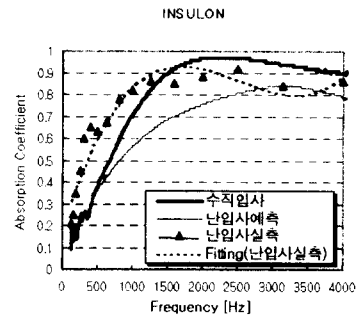
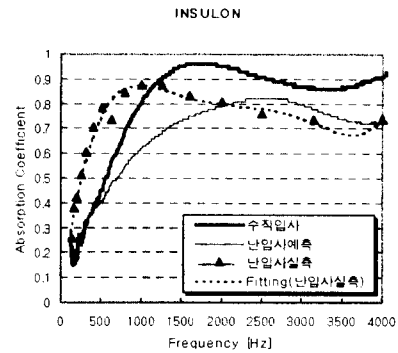


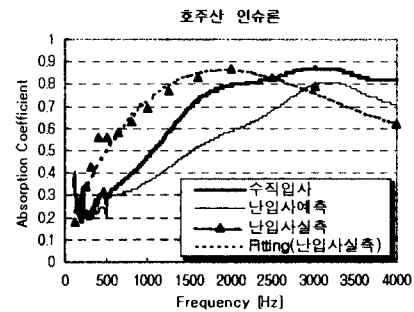
Fig. 12. Comparison between the measured absorption coefficient of Insulon 1, 2 and a Australia insulon with diffuse incidence waves



(a) Insulon 1 (30kg/m³, 50mm)



(b) Insulon 2 (30kg/m³, 50mm)



(c) Australia Insulon (30kg/m³, 50mm)

Fig. 13. Comparison of absorption coefficient for Insulon