

알루미늄 소결재를 이용한 흡음 특성 연구

Study of sound absorption characteristics using the sintered aluminium plate

노 대호*, 김 재수^, 윤 진국^, 강 현주+, 신 종철**, 김 원용^

Rho Dae-Ho, Kim Jae-Soo, Yoon Jin-Kuk, Kang Hyun-Ju,

Shin Jong-Choul, , Kim Won-Yong.

Key Words : Sintered aluminium plate(알루미늄 소결재), sound absorpion(흡음), air gap(배후 공기층)

ABSTRACT

The purpose of this paper is to examine sound absorption characteristics of sintered Al(aluminum) plate. Comparison between experiment and theoretical analysis by using empirical formula are made. Based on comparison, it is found that Voronina model gives more reasonable explanation for sound absorption characteristics of sintered Al plates. Effect of air gap with varying the thickness of plates are also investigated, which concludes that the air gap generally increase absorption but for too thick thickness of Al plates. Al plates with air gap shows 0.85~0.9 of NRC(Noise Reduction Coefficient) measured in reverberation room, which is comparable to glass wool. Comparison between normal and random incident absorption shows that random incident absorption is higher than normal incident absorption.

1. 서 론

일반적인 소음방지 대책으로서 흡음재로서 주로 유리면이 사용되어왔으나, 인체에 유해성이 밝혀짐에 따라 사용이 제한되었고, 다른 대체 물질로서 고분자 섬유 계통의 다공질 흡음 재료들이 존재하나 내구성, 내열성이 크게 뒤떨어지고, 구조적인 강도가 적용에 따라, 별도의 부자재가 필요하여, 간접재료비가 상승되는 단점이 존재한다. 또한 화재시 발생하는 유독가스는 인명에 직접적인 피해를 초래하고 있다. 더욱이 장기간 사용시 내구성 저하로 인하여 흡음효율이 감소하며, 비산 문제가 있다. 이런 문제를 해결하기 위하여 불연성의 새로운 흡음재료가 필요하게 되었고, 이에 따라 등장한 것이 콘크리트 계열의 강체 흡음재와 중공형 석고보드, 중공형 금속판, 세라믹 판재등이 고려되었다. 그러나 콘크리트 계열의 강체 흡음재의 경우 중·고음역에서 탁월한 성능을 보이나, 방음벽으로서 용도가 제한되어 있고, 중공형 석고보드의 경우, 강도가 낮으며, 중공형 금속판의 경우 상대적으로 고중량이므로 차음효과는 우수하지만 흡음 특성이 떨어진다. 세라믹 판의 경우 생산 단가가 높아 실용화되지 않고 있다. 이에 대안으로 제시된 것이 다공질 금속 판재로서 1980년 이후부터 발포금속을 이용한 흡음재의 연구⁽¹⁾가

진행되었고, 대표적인 예가 발포 알루미늄 판재이다. 발포알루미늄 판재의 경우 매우 경량이며, 제조 단가가 상대적으로 적고, 강도와 내구성이 우수하나, 요구되는 흡음 특성을 갖고 있지 못하다. 따라서 본 연구에서는 Al 합금을 재활용하여 제조된 소결재를 이용하여 흡음특성을 측정하고, 흡음률을 높이는 방법을 연구하였다. 또한 Miki⁽²⁾ 및 Voronina⁽³⁾의 경험식을 이용하여 알루미늄 소결판의 흡음특성을 예측하고, 실제 측정결과와 비교 분석하였다.

2. 알루미늄 소결재의 흡음특성의 예측

2.1 다공질재의 흡음 특성

다공질재를 이용한 음향학적 해석으로 1950년대에 Beranek⁽⁴⁾는 수직입사흡음률에 대한 이론적 해석을 시도하였고, Biot⁽⁵⁾는 다공질재 내부의 파동현상에 대한 기초를 확립하였다. Allard⁽⁶⁾는 Biot의 결과를 전달행렬법을 이용하여 다공판의 흡음특성을 설명하였다. 금속소재 흡음재로서 발포알루미늄의 흡음특성에 대해서는 공동저자가 실험연구⁽¹⁾를 수행하였다. 알루미늄 소결재의 경우에는 실질적인 흡음 연구가 진행되지 않았으며 이론적 접근도 거의 이루어지지 않았다.

음향학적 관점에서 보면 다공질재는 고체부의 frame과 유체부로서 다공질 판재 내부에 존재하는 기공으로 나누어 볼 수 있다. 다공질 판재의 음향학적 특성을 파악하기 위하여

* 고려대학교 재료공학과

^ 한국과학기술연구원 금속공정연구센터

+ 한국기계연구원 음향연구 그룹

여 프레임의 운동을 강체(rigid body)나 탄성체(elastic body)로 간주하는 것에 따라 구분된다. 프레임의 운동을 탄성체로 가정할 경우, 고체부에 의한 종파와 횡파와 더불어 유체에 의한 종파를 고려하여 해석되며, 강체운동으로 가정할 경우, 프레임의 운동은 유체에 비해 매우 적으므로 무시된다. 알루미늄 소결재의 경우 각각의 알루미늄들이 강하게 결합된 구조를 가지고 있으므로 프레임의 운동을 강체운동으로 가정할 수 있다. 이 경우에 음향학적 특성은 복소 전파상수(complex wave number)와 특성 임피던스로 표현가능하며, 주파수의 함수인 기공내부 유체의 점성 및 관성효과를 나타내는 복소밀도(complex density)와 열전달효과를 나타내는 복소압축 혹은 탄성계수(complex compressibility)가 있다.

2.2 다공질 흡음체의 음향모델

일차원의 조화운동만을 고려할 때의 운동방정식은 (1)식으로 표현된다.

$$-\frac{dp}{dx} = j\omega\rho(\omega)v \quad (1)$$

여기서 $\omega = 2\pi f$ 이며, ω 는 각주파수, p 는 음압, v 는 공기입자속도, $\rho(\omega)$ 는 기공내부의 공기의 유효밀도를 나타낸다. 위의 운동방정식과 함께 연속방정식과 상태방정식은 식 (2) 및 (3)식으로 표현된다.

$$\rho_0 \frac{dv}{dx} = j\omega\delta\rho \quad (2)$$

$$\frac{d\rho}{\rho_0} = \frac{p}{K(\omega)} \quad (3)$$

여기서 ρ_0 와 $\delta\rho$ 는 각각 평형상태의 밀도와 유체의 변동밀도를 나타내며 $K(\omega)$ 는 유효체적 탄성률을 나타낸다. (2)와 (3)식으로부터 (4)식을 구할 수 있으며, (4)식과 (1)식을 조합하면 (5)식의 파동방정식을 구할 수 있다.

$$-\frac{dv}{dx} = \frac{j\omega p}{K(\omega)} \quad (4)$$

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = \frac{\rho(\omega)}{K(\omega)} \frac{d^2 p}{dt^2} \quad (5)$$

(5)식은 다공질 재 내부에서 전파되는 음파의 거동을 보여 주며, 파동의 전파속도 ($c^2 = \frac{K(\omega)}{\rho(\omega)}$)는 유효밀도와 체적 탄성율에 의해 결정된다. 입사음압을 평면파라고 가정하면 (6)식과 같이 표현할 수 있고, 이것을 이용하여 파수를 (7)식으로 구할 수 있다.

$$p = e^{j(\omega t - \gamma x)} \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{\omega}{c} = k - j\beta \quad (7)$$

k 는 전파상수 즉 공간상의 주파수를 의미하며, β 는 감쇠상수로서 파동이 공간상으로 진행시 감쇠율을 나타낸다. (5)식을 이용하여 파수를 구하는 식을 (8)식으로 나타내었다.

$$\gamma = \frac{\omega}{c} = j\omega \left[\frac{\rho(\omega)}{K(\omega)} \right]^{1/2} \quad (8)$$

(3)과 (6)식을 이용하여 특성임피던스를 구하면 (9)식으로 표현할 수 있다.

$$Z_c = \frac{p}{v} = [\rho(\omega)K(\omega)]^{1/2} \quad (9)$$

(8)과 (9)식을 사용하여 재료의 음향학적인 성질을 예측할 수 있으며, 파수와 임피던스에 대한 여러 모델들이 연구되었다. 그러나 아직 알루미늄 소결판에 적합한 모델이 얻어지지 않았으며, 본 연구에서는 경험적인 모델로부터 파수와 임피던스를 구하여 흡음특성을 설명하고자 한다.

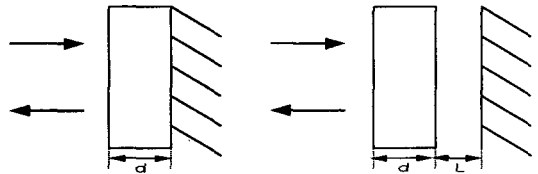


Fig. 1. Absorptive material with or without air gap

Fig. 1에서 보인 것과 같이 흡음체의 두께가 d 인 경우, 수직입사 흡음률을 구하기 위한 표면 임피던스는 (10)식으로 표현된다.

$$Z_s = -jZ_c \cot(\gamma d)Z_0 \quad (10)$$

여기서 $Z_0 = \rho_0 c_0$ 로서 공기의 임피던스이다. 한편 배후에 공기층이 있는 경우, 공기층에 대한 임피던스는 (11)식으로 나타내며 흡음재와 공기층의 결합된 임피던스는 (12)식으로 주어진다.

$$Z_{air} = -jZ_0 \cot(\gamma L) \quad (11)$$

$$Z_s = Z_c \frac{-jZ_{air} \cot(\gamma d) + Z_c}{Z_{air} - jZ_c \cot(\gamma d)} \quad (12)$$

따라서 흡음재 표면에서의 반사계수 R 과 수직입사 흡음률 α_0 는 (13)식으로부터 구할 수 있다.

$$R = \frac{(Z_s - Z_0)}{(Z_s + Z_0)}, \quad \alpha_0 = 1 - |R|^2 \quad (13)$$

2.3 파수 및 특성 임피던스에 대한 경험식

Delany와 Bazley(7)는 공극률이 1에 가까운 섬유 재료들의 전파상수와 특성 임피던스를 측정하여 이 값이 주파수와 재료의 유동비저항의 함수로 표현될 수 있음을 밝혀내었다. (14)와 (15)식에 Delany와 Bazley의 경험식을 나타내었다.

$$\gamma = \frac{\omega}{c_0} [1 + 0.0978X^{-0.7} - j 0.189X^{-0.595}] \quad (14)$$

$$Z_c = \rho_0 c_0 [1 + 0.0571X^{-0.754} - j 0.087X^{-0.732}] \quad (15)$$

$X = \frac{\rho_0 f}{R_1}$ 으로서 f 는 주파수, R_1 은 유동비저항(flow resistivity)이다. 이 경험식은 제한된 주파수 범위에서 특정 재료에 제한적인 사용이 가능하지만 직접 측정 가능한 인자인 유동비저항으로만으로도 예측이 가능하다는 장점이 있

다. (14)와 (15)식을 사용할 경우 저주파수에 대한 제한이 존재한다. 따라서 이 한계를 극복하기 위해서 Miki는 저주파수의 영역의 제한성을 극복할 수 있는 새로운 경험식 ((16), (17)식)을 제시하였다. 즉 저주파수 영역에서 표면 임피던스의 실수부가 음수화 되는 것을 보완하였다.

$$\gamma = \frac{\omega}{C_0} \left[1 + 0.109 \left(\frac{f}{R_1} \right)^{-0.618} - j 0.16 \left(\frac{f}{R_1} \right)^{-0.618} \right] \quad (16)$$

$$Z_c = \rho_0 c_0 \left[1 + 0.07 \left(\frac{f}{R_1} \right)^{-0.632} - j 0.107 \left(\frac{f}{R_1} \right)^{-0.632} \right] \quad (17)$$

Voronina는 기공율과 fiber의 직경을 주요변수로 하는 경험식을 제시하였다. fibrous material의 경우 (18)식으로 표현되며 porous material의 경우 (19)식으로 표현된다.

$$Z_c = \rho_0 c_0 (HQ - jQ), \quad \gamma = k' - jk'', \quad (18)$$

$$\text{단, } Q = (1-H)q_0 \frac{1}{HD} \sqrt{\frac{8\mu}{k\rho_0 c_0}}, \quad q_0 = \frac{1+0.25 \times 10^4}{(1-H)^2}$$

$$k = k(1+Q), \quad k' = kQ \frac{2+Q}{1+Q}$$

$$Z_c = \rho_0 c_0 (Z_{re} - jZ_{im}), \quad \gamma = k' - jk'', \quad (19)$$

$$Z_{re} = 1 + Q, \quad k' = k[1 + Q(HB)],$$

$$Z_{im} = \frac{Q}{2}, \quad k'' = kQ, \quad \text{for } Q < 1$$

$$Z_{im} = \frac{Q}{2+a}, \quad k'' = \frac{2kQ}{2+a} \quad \text{for } Q > 1$$

$$B = (60x^2 - 120x + 61.5)^{-1}, \quad a = \frac{Q}{(1+\sqrt{Q})^2}$$

$$x = 120 \frac{m}{y(1+Q)}, \quad y = \sqrt{D \frac{\rho_0 c_0}{\mu}}$$

$$m = 1000 \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_f} \right), \quad Q = \frac{1-H}{HD} \sqrt{200 \frac{\mu}{k\rho_0 c_0}} \quad (21)$$

ρ_f 는 강체 프레임의 밀도, D는 fiber 또는 pore의 직경, μ 는 동점성 계수, H는 기공율을 나타낸다.

알루미늄 소결재의 흐름저항, 파이버의 직경, 최대 기공 크기를 측정 한 후, MiKi의 경험식을 사용하여 흡음특성을 예측한 결과와 Voronina의 경험식을 사용하여 얻어진 흡음특성 예측결과를 Fig. 2에 나타내었다. 이 예측에 사용된 알루미늄 소결재의 물성을 Table 1에 나타내었다.

density of rigid frame	2.87g/cm ³
viscosity	0.00045
max. pore size	16.5994 μ m
length of Al fiber	4mm
mean diameter of Al fiber	150 μ m

Table 1. Material properties of Al sintered plate.

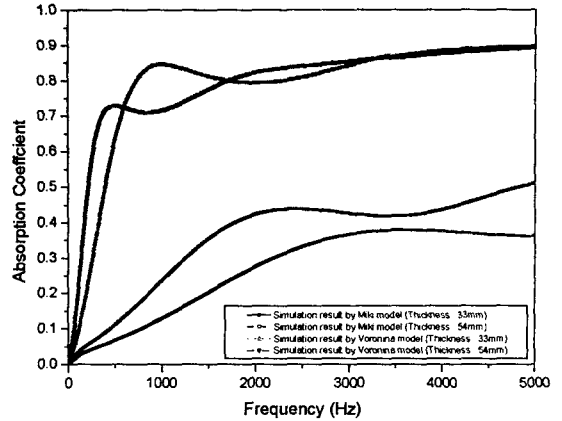


Fig. 2. Comparison of the Miki model and Voronina model

Miki 경험식을 사용하여 예측한 결과 두께 증가에 따라 전체적인 전 주파수 영역에 걸쳐서 흡음특성이 증가하는 경향을 보인다. 그러나 일정 두께 이상으로 두께가 증가하면 흡음률의 증가 경향은 둔화된다. Voronina 경험식을 사용하여 예측된 결과는 Miki 경험식에서 얻어진 값보다 높은 흡음율을 보이며 특히 저 주파수 영역에서 높은 값을보인다. 또한 전 주파수 영역에서 MiKi 경험식과는 달리 직선적인 증가는 보이지 않는다.

3. 알루미늄 소결재의 흡음특성

3.1 알루미늄 소결재의 물질 특성

본 연구에서 사용된 알루미늄 소결판은 A08500 합금을 채용용 한 후 원심급냉분무장치를 사용하여 알루미늄 합금 파이버를 제조한 후, 액상소결과정을 거쳐서 제조된 것이다.

Fig. 3, 4는 알루미늄 소결판의 형상과 미세구조를 나타낸 것이다. 각각의 fiber들이 서로 교차 결합되어 강한 강도를 유지하고 있으며, 이것은 스펀지 등의 흡음재보다 높은 강도를 유지할 수 있게 한다.



Fig. 3. Surface of sintered Al plate.

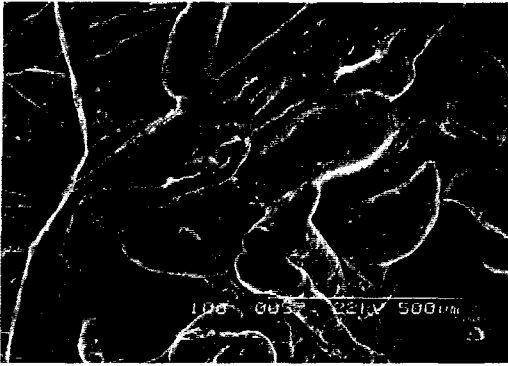


Fig. 4. Microstructure of Al sintered plate.

3.2 소결 알루미늄판재의 흡음특성 측정

알루미늄 소결재의 수직입사 흡음률은 Fig. 5에서 나타난 two-microphone impedance tube를 사용하여 측정하였다

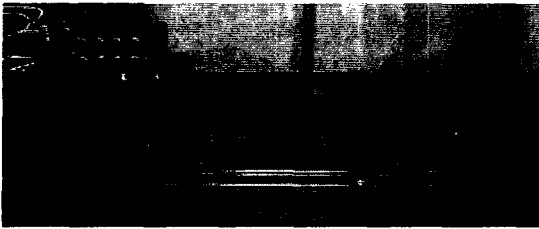


Fig. 5. Two-microphone impedance tube for normal incidence absorption.

알루미늄 소결재를 두께별로 수직입사 흡음률을 측정한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

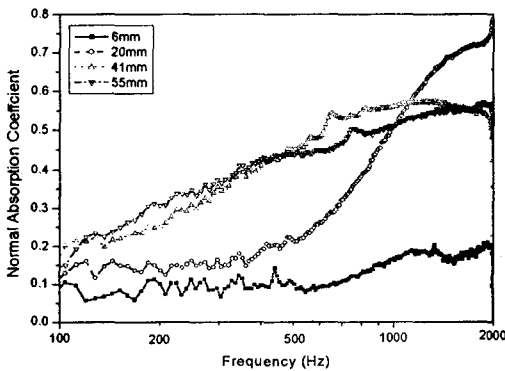


Fig. 6. Normal absorption coefficient with various thickness of Al sintered plate.

소결재의 두께가 증가함에 따라 전체적인 흡음률이 전 주파수 영역에서 증가한다. 그러나 두께가 일정 이상이 되면 흡음률이 증가하지 않는다. 이는 여러 기공이 교차되면서 열

린 기공이 아닌 닫힌 기공의 거동을 보임에 따라 상대적인 변화를 보이지 않는 것으로 보인다.

3.3 측정된 흡음특성과 예측결과의 비교

이러한 흡음특성을 이론적으로 검증하기 위하여 Miki의 경험식의 예측결과와 Voronina의 예측결과를 실험 결과와 비교하여 Fig. 7에 나타내었다.

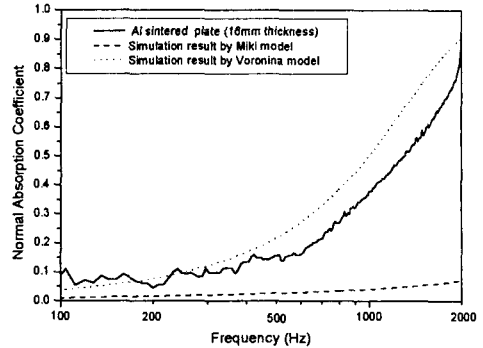


Fig. 7. Comparison of measured and predicted.

Miki 경험식의 경우, 실험 결과와 비교하여 전 주파수 구역에서 낮은 값을 보인다. 반면에 Voronina 경험식의 경우, 전체적인 경향이 실험 결과와 일치함을 보인다. Voronina model이 Miki model보다 알루미늄 소결재의 실험치와 유사한 경향을 보이고 있다. 즉 다공성을 가진 흡음재의 예측에는 변수가 흐름저항만으로 주어진 Miki model보다 Voronina model이 적합하다는 것을 알 수 있다.

3.4 배후공기층의 영향

Al 소결재의 흡음특성에 미치는 배후공기층의 영향을 관찰하기 위하여 두께 6mm인 경우를 Fig. 8에 54mm인 경우를 Fig. 9에 나타내었다. 6mm 소결재의 경우, 배후공기층의 효과가 뚜렷히 나타나며 재료자체의 흡음효과에 배후공기층에 의한 임피던스의 효과가 추가됨으로서 전 주파수 영역에서 높은 흡음률을 보이고 있다.

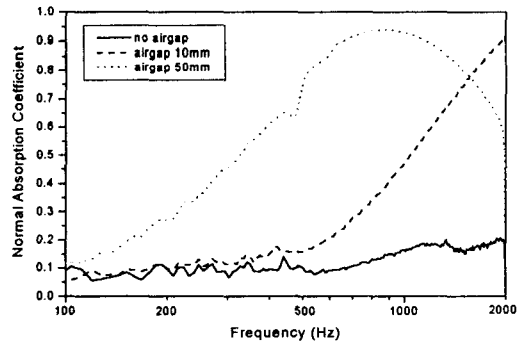


Fig. 8. Effect of air gap of Al plate with d=6mm. 일정 두께 이상을 가지는 알루미늄 소결재의 경우, 배후

공기층의 효과가 거의 나타나지 않음을 볼 수 있었다. 이것은 Fig. 6에서 나타난 것과 같이 일정두께 이상이 되면 기공의 중첩에 의하여 열린 기공이 아닌 닫힌 기공으로서 소결체 내부의 기공이 작용함에 따라 입사되는 음파가 배후공기층까지 전달되지 못하고 반사됨에 따라 배후공기층의 역할이 무의미해진다. 이 결과에 의하여 전체적으로 열린 기공 형태를 가진 알루미늄 소결체가 높은 흡음률을 유지할 수 있고, 배후공기층의 간격을 조정함으로써 알루미늄 소결체의 흡음특성을 높일 수 있음을 알게 되었다.

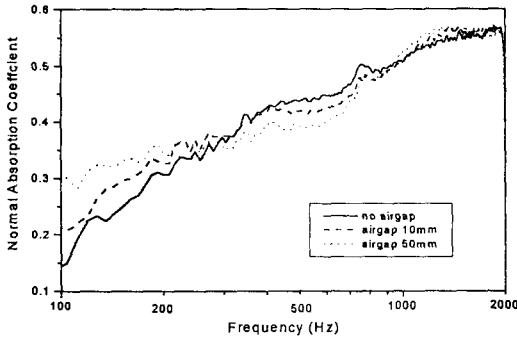


Fig. 9. Effect of air gap of Al plate with $d=54\text{mm}$.

3.5 수직입사 및 잔향실법 흡음률의 비교

잔향실법으로 배후공기층 역할을 하는 내부의 공간의 크기를 변화시키면서 흡음률을 측정된 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 이 측정 결과, 내부기공은 Helmholtz resonator의 효과와 배후공기층의 효과 때문에 전체적인 흡음률을 높이고 있다.

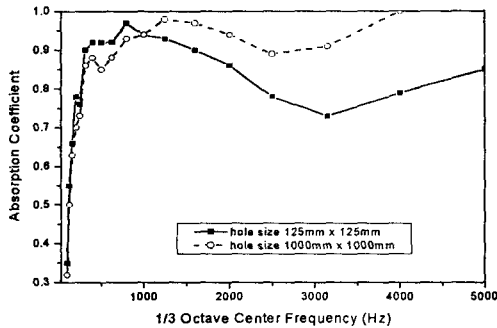


Fig. 10. Random incidence absorption coefficients with various hole size of Al sintered plate.

결과적으로 NRC(Noise Reduction Coefficient)는 0.85~0.9 사이를 보이며, 이는 같은 두께의 유리섬유에 비교할 만한 흡음특성을 보이며, 상업적 활용이 충분히 가능하다고 보여진다. Fig. 10에서 보여 주듯이 hole의 크기가 커짐에 따라 3000~5000Hz부근의 값이 상대적으로 높아지고 있다.

Fig. 13은 수직입사 흡음측정 결과와 잔향실법에 흡음 측정결과를 비교한 그래프이다. 전체적인 흡음률이 수직입사

에 의한 것보다 잔향실법으로 측정된 값이 높으며, 이는 저주파수영역에서 잔향실법에 의한 결과가 높아진다는 연구결과⁽⁸⁾와 일치한다. 그러나 고주파 영역에서 관찰되는 잔향실법에 의한 결과가 낮아지는 현상은 보이지 않았다. 그 원인으로 볼 수 있는 것은 수직입사법에서 오차를 제외한 신뢰도 있는 측정값이 2000Hz 이하인 것에 비하여 잔향실법의 경우 5000Hz까지 신뢰도를 가진다는 것이다. 시편 형상의 제약에 따라서 2000Hz이상의 수직입사결과를 얻지는 못하였다.

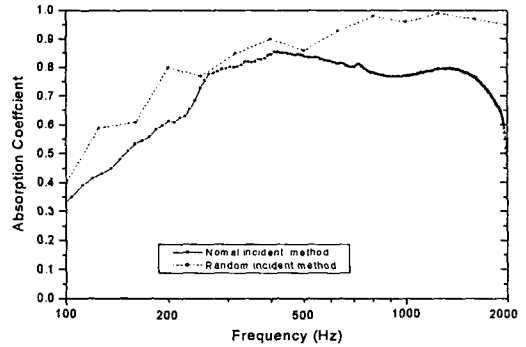


Fig. 11. Comparison of the result by normal and random incident absorption method.

4. 결론

알루미늄 소결체를 사용하여 이론적 예측 및 수직입사 흡음율과 잔향실법에 의한 흡음률을 측정하여 비교하였다. Miki model과 Voronina model을 사용하여 예측된 결과 값은 소결체의 두께가 증가함에 따라서 전체적인 흡음특성이 증가하였으며, 흡음특성 측정결과와 마찬가지로 일정 두께 이상에서는 일정한 값을 유지하였다. 알루미늄 소결체의 흡음거동은 Voronina model과 정성적으로 일치함을 알 수 있었다. 소결판의 흡음특성에 배후공기층과 시편의 두께와 기공이 영향을 미침을 알 수 있었다. 수직입사에 의한 흡음률 측정결과와 잔향실법에 의한 흡음률 측정결과를 비교한 결과, 잔향실법에 의한 흡음률이 높음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 환경진흥연구센터에서 지원하는 차세대 핵심환경 기술개발사업(03-004)으로 지원되어 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) 강현주 외, 발포금속을 이용한 흡/차음재의 응용제품 개발에 관한 연구, 한국기계연구원 보고서, Chap.

3 (1999)

- (2) Y. Miki, Acoustical properties of porous materials - modification of Delany-Bazely models, J. Acoust. Soc. Jap. (E), 11, 19-24 (1990)
- (3) N. Voronia, An emperical model of rigid frame porous materials with high porosity, Appl. Acoust., 51, 181-196 (1997)
- (4) L. L. Beranek, Acoustic impedance of porous materials, J. acoust. Soc. Am. 13, 248-260 (1942)
- (5) M. A. Biot, Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, J. Acoust. Soc. Am. 28, 2, 168-178 (1956)
- (6) P. Rebillard, J. E. Allard, C. Depollier, P. Guignourd, W. Lauriks, C. Verhaegen and A. Cops, The effect of a porous facing on the impedance and the absorption coefficient layered porous materials, J. Sound and Vibration, 156, 3, 545-555 (1992)
- (7) M. E. Delany and E. N. Bazely, Acoustic properties of fibrous absorbent materials, Appl. Acoust. 7, 3, 105-116 (1970)
- (8) 강현주 외, 수직 및 랜덤입사 흡음률에 관한 연구, 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 19, 1, 283-286 (2000)