

세라믹 소재의 흡음성능에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Absorption Performance of Ceramic Materials

송화영[†] · 서은성* · 김형태** · 이성민** · 이동훈***

Hwa-Young Song, Eun-Sung Seo, Hyung-Tae Kim, Sung-Min Lee, Dong-Hoon Lee

Key Words : Absorption Coefficient(흡음계수), Ceramic Material(세라믹 소재), Characteristic Impedance(특성임피던스), Propagation Constant(전파상수), Surface Impedance(표면임피던스)

ABSTRACT

In this study, the acoustic properties of ceramic sound absorbing materials with different thickness and bulk density were investigated in terms of characteristic impedance, propagation constant, and absorption coefficient. The well-known two-cavity method was used for evaluating those acoustic parameter values. Also, in order to validate the experimentally measured values, the results were compared with the results obtained from Chung and Blaser's transfer function method and SWR method. The experimentally measured values of normal absorption coefficients were generally agreed well with the corresponding values from the transfer function method and the SWR method. Based on the experimental results, the following conclusions could be made. The magnitude of the absorption coefficient and the frequency range of the maximum absorption coefficient were controllable by changing the thickness and bulk density of the sound absorbing materials.

1. 서론

최근 들어 각종 건축자재에서 '새집 증후군'을 유발하는 물질로 알려진 포름알데히드(HCHO)와 휘발성 유기화합물(TVOC)과 같은 유해 화합물들로 인해 친환경 건축자재에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 사회적 이슈와 맞물려 전통적으로 사용해 오던 소음저감용 흡음재의 패턴도 상당히 변화하고 있는 추세이다. 즉 종래의 대표적 흡음재인 유리섬유와 폴리우레탄 폼, 폴리에스터 흡음재 등의 다양한 문제점을 개선 및 보완하기 위해 많은 연구가 이루어져 왔으며, 이들을 대체하기 위한 친환경 소재를 개발하기 위해 지금도 많은 연구가 이루어지고 있다.

따라서 종래에 사용해 오던 흡음재들을 대체하기 위해서는 기존의 흡음재와 대등한 흡음성능을 가질 뿐만 아니라 적용분야에 따라 배수성, 방염성, 재활용성, 친환경성, 비산

성, 내구성, 디자인성 등과 같은 다양한 요건을 필요로 하고 있다.⁽¹⁾

예를 들어 지하철 및 박물관, 고속철도의 터널내부소음의 저감에 쓰이는 흡음재는 흡음성능 못지않게 비산 억제성이나 방염성을 요구하고 있다.⁽¹⁾

이와 같은 흡음재의 요구 조건에 착안하여 본 연구에서는 건설폐기물의 폐기과정에서 파생되어지는 점토벽돌의 부산물을 이용한 세라믹계 흡음재 개발을 시도하게 되었다. 폐점토벽돌을 이용하여 흡음재를 개발할 경우 부산물의 80%이상을 사용함으로써 재활용성이 높고 소결된 강성체로 반영구적이며, 불연 및 난연성이 뛰어나다. 그리고 습도 조절, 항균기능 등 다양한 기능들 접목하기 쉬운 장점을 가진다. 그러나 이러한 세라믹계의 흡음재가 기존의 흡음재와 비교하여 만족할 만한 흡음성능을 갖는지의 여부가 최대 관심사라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 각기 다른 두께와 소재의 배합조건을 갖는 세라믹계 흡음시료를 제조하여 음향특성을 평가하였다. 시험용 흡음시료는 파벽돌의 입자크기가 1~3mm인 입자들만 정제하여 소결과정을 거쳐 제조하였다. 세라믹계 흡음재의 특성 임피던스와 전파상수 그리고 흡음계수는 Yanvi⁽²⁾의 측정방법을 보다 발전시킨 Utsuno 등⁽³⁾이 제안한 Two-cavity method를 이용하여 측정하였다. 또

† 서울산업대학교 에너지환경대학원 에너지시스템공학과
E-mail : hysong@snut.ac.kr
Tel : (02) 970-6331, Fax : (02)979-7331

* 서울산업대학교 에너지환경대학원 에너지시스템공학과

** 한국세라믹기술원 엔지니어링 세라믹센터

*** 서울산업대학교 기계공학과/에너지환경대학원

Two-cavity method로 측정된 흡음계수 결과의 신뢰성 확인을 위해 Chung과 Blaser의 전달함수법⁽⁴⁾ 과 정재파법을 이용하여 흡음시료별 흡음계수를 측정하였다. 그리고 세라믹계 흡음재의 흡음성능을 보다 객관적으로 평가하기 위해서 금속와이어와 폴리에스테르 흡음재의 흡음성능과 함께 비교 고찰하였다.

2. 이론 모델

세라믹계 흡음재의 음향특성 파악을 위해 본 연구에서는 Utsuno등⁽³⁾ 이 제안한 Two-cavity method를 이용하였다.

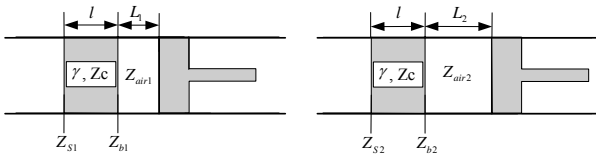


Fig. 1 Configurations of the two-cavity method.

Two-cavity method는 Fig. 1에 도시된 바와 같이 시료 뒤의 밀폐공동의 깊이 L_1 일 때의 표면임피던스 Z_{s1} 과 배후면의 임피던스 Z_{b1} 그리고 깊이 L_2 일 때의 표면임피던스 Z_{s2} 와 배후면의 임피던스 Z_{b2} 를 이용하여 시료의 특성임피던스 Z_c 와 전파상수 γ 를 계산하는 방법으로 관계식은 다음과 같다.

$$Z_c = \pm \left(\frac{Z_{s1}Z_{s2}(Z_{b1} - Z_{b2}) - Z_{b1}Z_{b2}(Z_{s1} - Z_{s2})}{(Z_{b1} - Z_{b2}) - (Z_{s1} - Z_{s2})} \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{1}{2l} \ln \left(\frac{Z_{s1} + Z_c}{Z_{s1} - Z_c} \frac{Z_{b1} - Z_c}{Z_{b1} + Z_c} \right) \quad (2)$$

식 (1)의 괄호 앞의 부호는 특성임피던스의 실수부가 양 (+)의 부호를 갖도록 선택되며, 식 (2)의 l 은 흡음시료의 두께를 나타낸다. 또 식 (1)과 식 (2)에 제시된 시료의 표면임피던스 Z_{s1} 과 Z_{s2} 는 측정을 통하여 구하는 반면에, 배후면의 임피던스 Z_{b1} 과 Z_{b2} 는 다음의 식으로 구한다.

$$Z_{b1} = -jZ_{air} \cot kL_1 \quad (3)$$

$$Z_{b2} = -jZ_{air} \cot kL_2 \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)에서 k 는 공기의 파동수, Z_{air} 는 공기의 특성임피던스 그리고 $j = \sqrt{-1}$ 을 뜻한다.

한편 흡음시료의 특성임피던스와 전파상수를 알면 시료의 두께가 다르거나 배후면의 공동깊이가 다른 경우의 표면임피던스 Z_s 는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$Z_s = Z_c \frac{Z_{b1} \cosh(\gamma l) + Z_c \sinh(\gamma l)}{Z_{b1} \sinh(\gamma l) + Z_c \cosh(\gamma l)} \quad (5)$$

또 식 (5)의 표면임피던스 값을 식 (6)에 대입하면 수직 입사 흡음율 α 가 얻어진다.

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - Z_{air}}{Z_s + Z_{air}} \right|^2 \quad (6)$$

3. 실험

Table 1은 본 연구에 이용된 세라믹계 흡음재의 제원을 나타낸 것이다. 세라믹계 흡음재는 파쇄된 파벽돌에서 입자 크기가 1~3mm인 입자들만 정제하여 소결과정을 거쳐 제조되며, 각 입자의 조성은 Table 1과 같다. 세라믹계 흡음재의 시료 두께는 0.018m와 0.04m 두 종류이며, 지름은 모두 0.07m이다.

Table 2는 세라믹계 흡음재의 흡음성능과 비교할 목적으로 제작한 금속와이어와 폴리에스테르 흡음재의 제원을 나타낸 것이다. 흡음시료의 두께는 모두 0.02m이며, 지름은 세라믹계 흡음재와 동일한 0.07m로 제작하였다.

Table 1 Specifications of ceramic absorbing materials.

| | Thickness (m) | Volume density (kg/m ³) | Composition (wt%) | Particle size (mm) |
|-------|---------------|-------------------------------------|---|--------------------|
| No. 1 | 0.018 | 1588 | 파벽돌 : 70 점토 : 10 Frit : 20 | 1 ~ 3 |
| No. 2 | 0.04 | 1039 | 파벽돌 : 60 점토 : 10 Frit : 20 Flux : 10 | 1 ~ 3 |

Table 2 Specifications of steel wire and polyester wool absorbing materials.

| | Thickness (m) | Volume density (kg/m ³) | Materials |
|-------|---------------|-------------------------------------|----------------|
| No. 3 | 0.02 | 1300 | Steel wire |
| No. 4 | 0.02 | 87 | Polyester wool |

Fig. 2는 시료의 표면임피던스를 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 도시한 것이다. 임피던스관의 길이는 1m이고, 지름은 0.07m이다. 관 입구측에는 스피커가 부착되어 있으며, 스피커를 통해 주파수분석기의 신호발생기에서 발생한 광대역음이 관내로 공급된다. 그리고 하류측 관단에는 이송이 가능한 강제피스톤이 설치되어 있다. 강제피스톤 전방부에 흡음시료를 설치한 후, 공동깊이를 변화시키면서 흡음시료의 표면임피던스를 측정하였다.

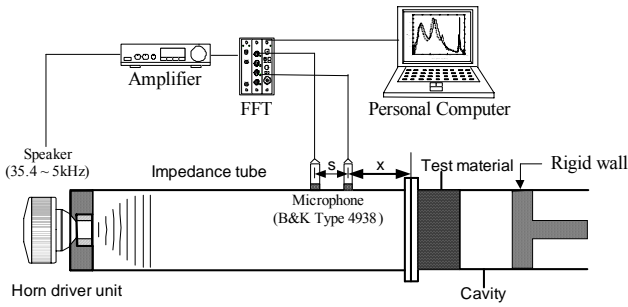


Fig. 2 Experimental apparatus for the impedance measurement of ceramic absorbing materials.

표면임피던스는 Fig. 2에서 보듯이 흡음시료의 상류측에 고정된 두 마이크로폰간의 전달함수 H 를 측정하여 구한다. 전달함수와 표면임피던스의 관계식⁽⁴⁾은 다음과 같다.

$$Z_{s1}, Z_{s2} = jZ_{air} \frac{\sin[k(x-s)] - H\sin(kx)}{H\cos(kx) - \cos[k(x+s)]} \quad (7)$$

식 (7)에서 x 는 시료로부터 첫번째 마이크로폰까지의 거리 그리고 s 는 마이크로폰 간격이다. 두께 l 인 흡음시료를 관출구에 장착하고 시료배후면의 공동깊이를 L_1 과 L_2 로 바꾸면서 측정된 전달함수로부터 시료의 표면임피던스 Z_{s1} 과 Z_{s2} 를 구한다. 공동깊이는 $L_1 = 0.02m$ 그리고 $L_2 = 0.06m$ 로 하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 세라믹계 흡음시료 No. 1과 No. 2에 대한 특성임피던스 측정결과를 공기의 특성임피던스 Z_{air} 로 무차원화하여 도시한 것이다. 또 그림상에 도시된 Re 는 임피던스의 실수부 그리고 Im 은 허수부를 나타낸다. 결과에서 흡음시료 No. 1의 경우가 흡음시료 No. 2보다 특성임피던스의 크기가 더 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 Table 1에 제시된 것처럼 No. 1의 경우가 No. 2에 비하여 체적밀도가 더 크기 때문이다. 특성임피던스는 음파가 시료에 입사하여

시료내를 통과할 때 음파가 느끼는 저항정도를 나타내는 흡음시료의 특성값임을 고려할 때, 시료의 체적밀도는 특성임피던스와 매우 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. 한편 높은 주파수대역에서의 특성임피던스 측정값이 큰 변동을 보이는 것은 두 마이크로폰을 이용하여 음향전달함수를 측정할 때 마이크로폰의 위치와 간격과 관련된 오차⁽⁵⁾가 측정결과에 반영되었기 때문이다.

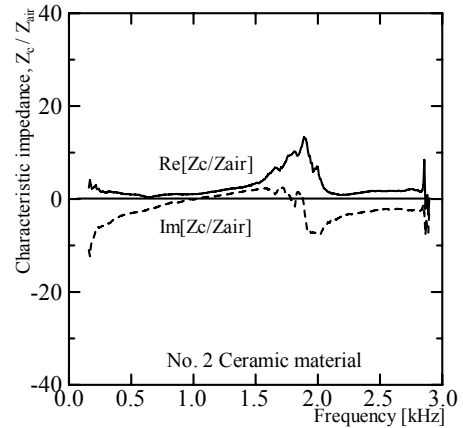
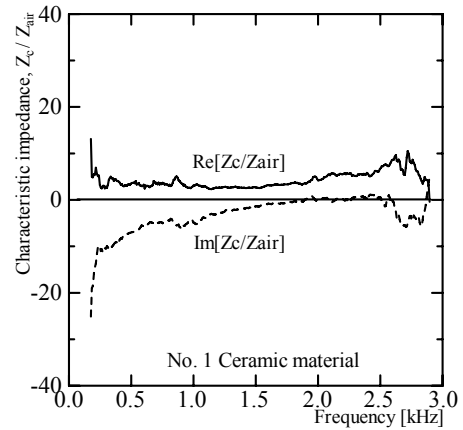


Fig. 3 Measured characteristic impedances of ceramic absorbing materials.

Fig. 4는 세라믹계 흡음시료 No. 1과 No. 2에 대한 전파상수 측정결과이다. 이 결과에서도 Re 는 실수부 그리고 Im 은 허수부를 나타낸다. 전파상수는 $radian/m$ 의 단위를 가지며, 실수부는 흡음시료의 단위길이 당 감쇠비를 그리고 허수부는 흡음시료 내를 전파하는 음파의 위상변화를 나타낸다. 결과에서 전파상수의 실수값이 주파수가 증가함에 따라 점차적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 한편 두 시료의 위상변화를 나타내는 허수값을 비교해 보면 시료 No. 1의 경우는 1576Hz에서 그리고 시료 No. 2의 경우는 952Hz 부근에서 허수값의 최대치가 양(+)에서 음(-)으로 바뀐다. 이와 같이 위상이 양(+)에서 음(-)으로 또는 음(-)에

서 양(+)으로 바뀌는 경계는 입사음의 입자속도가 최대가 되는 경계를 의미하며, 흡음시료의 두께가 입사음의 1/4 파장과 일치할 때 발생한다. 또 허수값의 최대 및 최저값을 이용하여 위상각도를 구하면 +90° 도와 -90° 의 위상변화를 갖는다.

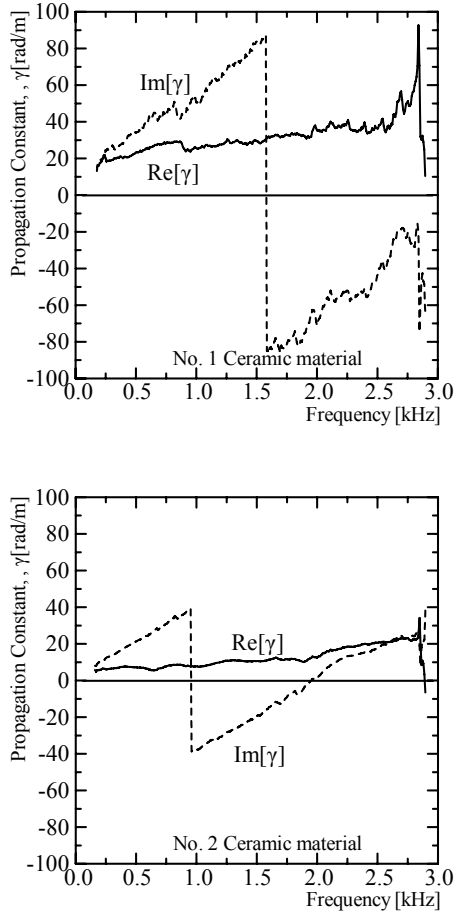


Fig. 4 Measured propagation constants of ceramic absorbing materials.

Fig. 5는 세라믹계 흡음시료의 흡음계수를 측정된 결과이다. Two-cavity method로 얻은 흡음계수 값의 신뢰성을 확인하기 위해 Chung 과 Blaser의 음향전달함수법과 정제파법으로 구한 흡음계수값을 결과에 함께 도시하였다. Two-cavity method로 구한 흡음계수는 특성임피던스와 전파상수값을 식(5)에 대입하여 식(6)으로부터 계산한 값이다. 결과를 상호 비교해 보면 Two-cavity method로 구한 흡음계수값 중에서 특정주파수영역의 흡음계수값을 제외하면 세가지 방법으로 구한 흡음계수값 모두가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 특정주파수대역에서 Two-cavity method로 구한 흡음계수값이 다른 두가지 방법으로 구한 측정값과 큰 차이를 보이는 원인에 대해서는 현 단계에서 명확하게 해명할 수는 없으나, 흡음시료의 제조시에 수반되

는 시료표면의 불균질 또는 시료내부의 동질성 결여가 주된 원인으로 사료되며, 음향전달함수를 측정할 때 마이크론의 위치와 간격과 관련된 오차⁽⁵⁾가 측정결과에 반영되었을 수도 있다고 판단된다.

또 Fig. 5와 Fig. 4의 결과값을 서로 비교해 보면 흡음계수의 경향이 전파상수의 위상경향과 잘 부합하는 것을 알 수 있다. 즉 흡음시료 No. 1에 대한 Fig. 4와 Fig. 5의 결과값을 상호 비교해 보면 1576Hz 부근에서 흡음계수가 최대가 되는 것을 알 수 있다. 흡음시료 No. 2에 대한 결과에서도 전파상수의 위상이 반전되는 952Hz부터 흡음계수가 최대가 되는 것을 볼 수 있다. 그리고 흡음시료 No. 2가 흡음시료 No. 1 보다 저주파수대역에서 흡음계수의 값이 큰 것은 시료의 두께가 상대적으로 더 두껍기 때문이다.

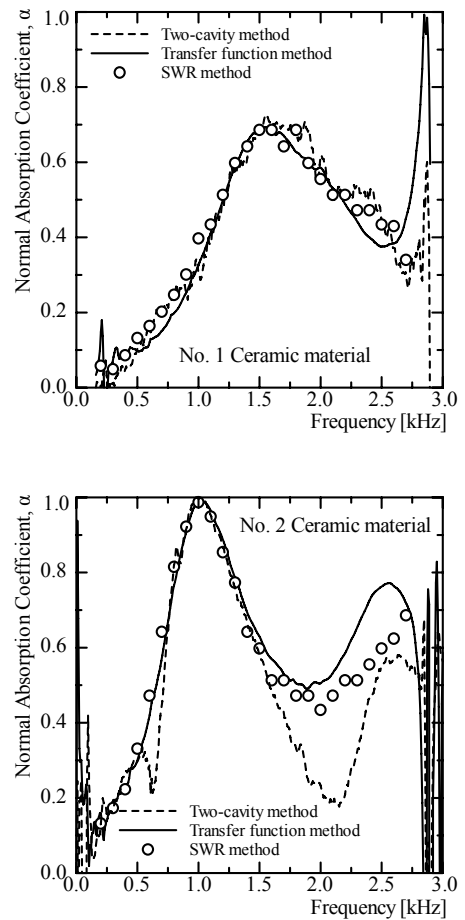


Fig. 5 Measured absorption coefficients of ceramic absorbing materials.

Fig. 6은 세라믹계 흡음시료의 흡음성능을 객관적으로 비교 고찰하기 위하여 폴리에스터와 금속와이어 흡음시료의 흡음계수를 함께 도시한 것이다. 세 가지 시료에 대한 제원은 Table 1과 Table 2와 같다. 결과에서 보듯이 세라

믹계의 흡음시료가 금속와이어 흡음시료보다 월등히 흡음 성능이 좋음을 알 수 있다. 그리고 폴리에스터 흡음시료와 비교하였을 때 흡음대역폭은 좁지만 약 1.5kHz 대역 전후로 폴리에스터 흡음시료와 대등한 흡음성능을 보여주고 있다.

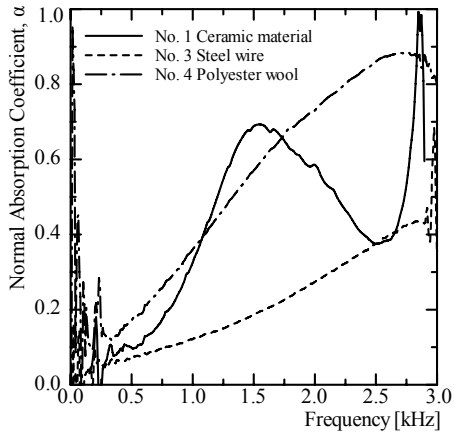


Fig. 6 Comparison of the Measured absorption coefficients for each different absorbing materials.

5. 결론

본 연구에서는 세라믹계 흡음재의 음향특성인 특성임피던스와 전파상수 그리고 흡음계수를 측정하여 고찰하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 건설폐기물의 폐기과정에서 파생되어지는 점토벽돌의 부산물을 이용한 세라믹계 흡음재는 우수한 흡음성능을 갖는 흡음재 소재로서의 충분한 가치가 있다고 판단된다. 특히 세라믹계 흡음재의 흡음계수 크기와 피크치를 갖는 주파수대역은 세라믹 입자조성과 체적밀도, 두께를 변화시키므로서 조절 가능함을 알았다. 따라서 향후 세라믹계 흡음재의 소음저감 성능을 좀 더 향상시킬 수 있는 연구를 진행하면 기존의 흡음재료를 대체할 수 있을 것으로 판단된다.
2. 세라믹계 흡음시료의 흡음계수의 크기는 다른 흡음재와 마찬가지로 특성임피던스와 전파상수에 좌우된다. 또한 전파상수의 위상이 바뀌는 주파수에서 흡음계수의 피크치가 얻어짐을 알았다. 전파상수의 위상변화는 흡음시료의 두께가 입사음의 1/4파장과 일치할 때 발생하며, 흡음계수의 피크치와 밀접한 관련이 있음을 알았다.

참고 문헌

- (1) 이승, 박상준, 이동훈, 배재근, 김민배, 2001, "금속와이어 흡음재의 음향특성", 한국소음진동공학회 2001년도 추계학술대회 논문집, pp1341-1346
- (2) Yaniv, S.L., 1973, "Impedance Tube Measurement of the Propagation Constant and Characteristic Impedance of Porous Materials, J.Acoust.Soc.Am., Vol.54, No.5, pp.1138~1142
- (3) Utsuno, H., Tanaka, T., Fujikawa, T., and Seybert, A.F., 1989, "Transfer Function Method for Measuring Characteristic Impedance and Propagation Constant of Porous Materials", J.Acoust.Soc.Am., Vol.86, No.2, pp.637~643.
- (4) Chung, J.Y. and Blaser, D.A., 1980, "Transfer Function Method of Measuring in-Duct Acoustic Properties. I Theory, II Experiment", J.Acoust.Soc.Am., Vol.68, No.3, pp.907~921.
- (5) Seybert, A.F. and Soenarko, B., 1981, "Error Analysis of Spectral Estimates with Application to the Measurement of Acoustic Parameters Using Random Sound Fields in Ducts", J.Acoust.Soc.Am., Vol.69, No.4, pp.1190~1199.