

금속와이어 흡음재의 음향특성 Acoustical Properties of Steel-Wire Sound Absorbing Materials

이 승*, 박상준*, 이동훈**, 배재근***, 김민배****

Seung Lee, Sang-Jun Park, Dong-Hoon Lee, Chae-Gun Phae, Min-Bae Kim

Key Words : Absorption Coefficient(흡음계수), Characteristic Impedance(특성임피던스), Propagation Constant(전파상수), Surface Impedance(표면임피던스), Sound Absorbing Material(흡음재)

ABSTRACT

In this study, the acoustic properties of steel-wire 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 in experiments. 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. Also, the magnitude of the absorption coefficient depended on the characteristic impedance and the propagation constant. As large as the air cavity depth at the rear side of the steel-wire sound absorbing materials, the maximum magnitude of the absorption coefficient occurred at the lower frequency ranges.

1. 서론

최근에 들어 와서 소음문제는 단순히 환경공해의 차원을 넘어 제품의 품질과 가격을 결정짓는 매우 중요한 평가척도로 자리매김 됨에 따라 소음 감소를 위한 다양한 형태의 연구가 시도되고 있다. 소음문제를 해결하기 위해서는 여러가지 방안이 제시될 수 있겠으나, 기본적으로 흡음재와 차음재를 사용하거나 이를 병용하는 대책수립이 대부분이다. 특히 이 중에서 흡음재의 경우는 음에너지의 소산측면에서 흡음재 내부의 구멍이 상호 연결된 다공구조의 형태가 가장 효과적인 점을 감안하여 다공구조를 갖는 유리섬유나 폴리우레탄 폼이 폭넓게 쓰이고 있다.

그러나 산업의 발전과 함께 소음발생원이 다양해짐에 따라 최근의 흡음재는 단순히 흡음성능뿐만 아니라 적용분야에 따라 배수성, 방염성, 단열성, 비산성, 내구성 등과 같은 다양한 요건을 필요로 하고 있다. 예를 들면 고속제트의 방출로 야기된 제트소음, 지하철과 고속철도의 터널내부소음의 저감에 쓰이는 흡음재는 흡음성능 못지 않게

비산 억제성이나 방염성을 요구하고 있다.

이와 같은 흡음재의 요구조건에 착안하여 본 연구에서는 페타이어의 처리과정에서 생산되는 금속와이어를 이용하여 흡음재 개발을 시도하게 되었다. 페타이어는 파쇄시 고무칩, 고탄소강의 금속와이어 그리고 나일론 코드사로 분리되며, 이 중에서 고무칩은 칩 또는 분말의 형태로 보도블록 및 건축재료로 재활용되고 있으며, 나일론 코드사는 보일러용 연료로 사용되고 있다. 그러나 금속와이어는 단순히 고철로 매각되고 있으며, 또다른 부가가치를 갖는 제품으로의 재활용은 되지 않고 있다. 금속와이어로 제조된 흡음재는 무게가 매우 무겁기 때문에 앞서 언급한 비산의 문제는 없으며 화재에도 안전하다. 다만 만족할만한 흡음성능을 갖는지의 여부가 최대 관심사라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 각기 다른 두께와 체적 밀도를 갖는 금속와이어 흡음시료를 제조하여 음향특성을 평가하였다. 시험용 흡음시료는 지름 0.2mm 인 와이어를 이용하여 제조하였다. 금속와이어 흡음재의 특성임피던스와 전파상수는 Yanvi⁽¹⁾의 측정방법을 보다 발전시킨 Utsumo 등⁽²⁾이 제안한 Two-cavity method 를 이용하여 측정하였다. 또 Two-cavity method 로 측정된 흡음계수 결과의 신뢰성 확인을 위해 Chung 과 Blaser 의 전달함수법⁽³⁾ 과 정재파법을 이용하여 흡음시료별 흡음계수를 측정하였다. 또 금속와이어 흡음재의 배

* 서울산업대학교 산업대학원 기계공학과

** 서울산업대학교 기계공학과
E-mail : Ldh@duck.snut.ac.kr. Tel. (02) 970-6331

*** 서울산업대학교 환경공학과

****(☎) mTm

후면의 공동깊이를 변화시키면서 흡음계수를 측정하여 공동깊이가 흡음성능에 미치는 효과에 대해서도 검토하였다.

2. 이론검토

금속와이어 흡음재의 음향특성 파악을 위해 본 연구에서는 Utsuno 등⁽²⁾ 이 제안한 Two-cavity method 를 이용하였다.

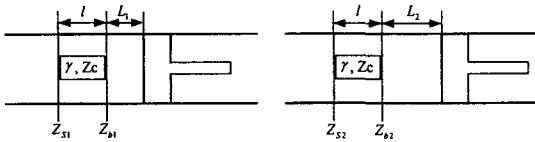


Fig. 1 Configurations of the two-cavity method.

Two-cavity method 는 Fig. 1 에 도시된 바와 같이 시료뒤의 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 괄호앞의 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 $j = \sqrt{-1}$ 를 뜻한다.

한편 흡음시료의 특성임피던스와 전파상수를 알면 시료의 두께가 다르거나 배후면의 공동깊이가

다른 경우의 표면임피던스 Z_s 는 다음식을 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 표면임피던스값을 식 (6)에 대입하면 수직입사 흡음을 α 가 얻어진다.

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

3. 실험

Table 1 은 본 연구에 이용된 금속와이어 흡음재의 제원을 나타낸 것이다. 금속와이어는 페타이어를 파쇄한 후, 와이어에 부착된 고무를 분리하므로서 얻어진다. 와이어의 지름은 0.2mm 와 1mm 두 종류이며, 파쇄과정에서 30~50mm 정도의 길이로 절단된다. 본 연구에서는 지름 0.2mm 인 가는 와이어만으로 흡음시료를 제작하였으며, 와이어에 소량 부착되어 있는 고무성분은 열분해방식을 이용하여 제거하였다. 열분해방식은 풀림을 촉진시키며, 연소시 탄화작용이 금속와이어의 산화를 억제시키는 효과가 있음을 선행연구에서 밝힌 바 있다.⁽⁴⁾ 이상의 과정을 통해 얻어진 와이어를 금형몰드에 충전시켜 일정하중을 가하게 되면 흡음시료의 제조가 완료된다.

Table 1 Specifications of steel-wire absorbing materials.

	Thickness (m)	Volume density (kg/m ³)
Steel-wire No. 1	0.020	1300
Steel-wire No. 2	0.025	2080
Steel-wire No. 3	0.040	1300
Steel-wire No. 4	0.060	870
Steel-wire No. 5	0.060	1300

Fig. 2 는 시료의 표면임피던스를 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 도시한 것이다. 임피던스관의 길이는 1000mm 이고, 지름은 70mm 이다. 관입구측에는 스피커가 부착되어 있으며, 스피커를 통해 주파수분석기의 신호발생기에서 발생한 광대역 음이 관내로 공급된다. 그리고 하류측 관단에는 이송이 가능한 강제피스톤이 설치되어 있다. 강제피스톤 전방부에 금속와이어 흡음시료를 설치한 후, 공동깊이를 변화시키면서 흡음시료의 표면임피던스를 측정하였다.

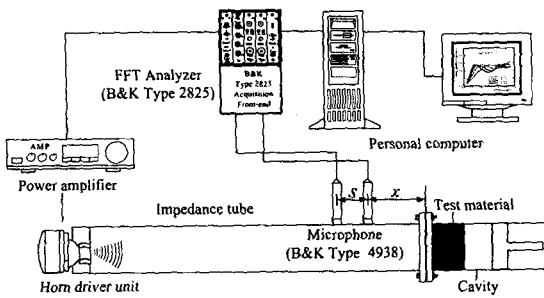


Fig. 2 Experimental apparatus for the impedance measurement of steel-wire absorbing materials.

표면임피던스는 Fig. 2 에서 보듯이 흡음시료의 상류측에 고정된 두 마이크로폰간의 전달함수 H 를 측정하여 구한다. 전달함수와 표면임피던스의 관계식⁽³⁾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 1 인 금속와이어 흡음시료를 관측구에 장착하고 시료배후면의 공동깊이를 L_1 과 L_2 로 바꾸면서 측정한 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. 3 은 금속와이어 흡음시료 No.2 와 No.3 에 대한 특성임피던스 측정결과를 공기의 특성임피던스 Z_{air} 로 무차원화하여 도시한 것이다. 또 그림 상에 도시된 Re 는 임피던스의 실수부 그리고 Im 은 허수부를 나타낸다. 결과에서 흡음시료 No.2 의 경우가 흡음시료 No.3 보다 특성임피던스의 크기가 더 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 Table 1 에 제시된 것처럼 No.2 의 경우가 No.3 에 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. 또한 주파수 증가에 따라 특성임피던스의 크기가 점차 감소하는 경향도 볼 수 있다. 이것은 높은 주파수의 입사음이 낮은 주파수의 입사음에 비하여 상대적으로 더 작은 음향저항을 받기 때문이다. 한편 낮

은 주파수대역에서의 특성임피던스 측정값이 큰 변동을 보이는 것은 두 마이크로폰을 이용하여 음향전달함수를 측정할 때 마이크로폰의 위치와 간격과 관련된 오차⁽⁵⁾가 측정결과에 반영되었기 때문이다.

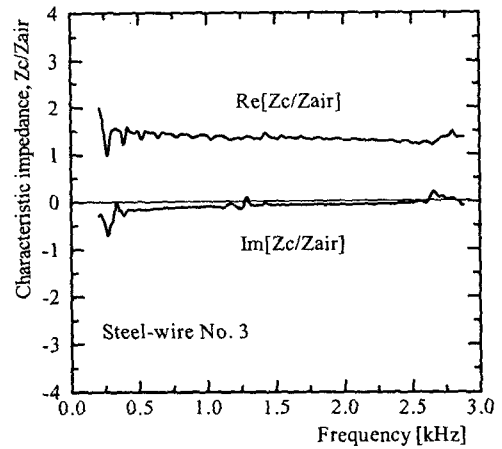
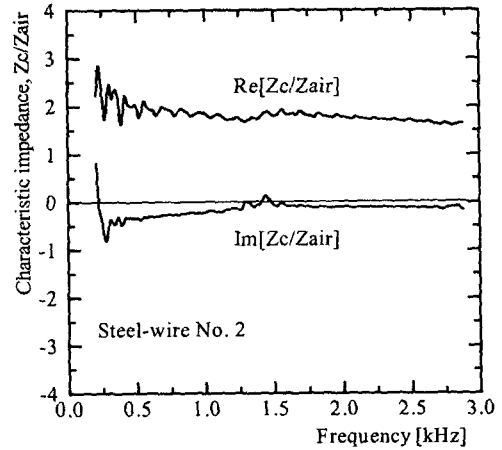


Fig. 3 Measured characteristic impedances of steel-wire sound absorbing materials.

Fig. 4 는 금속와이어 흡음시료 No.2 와 No.3 에 대한 전파상수 측정결과이다. 이 결과에서도 Re 는 실수부 그리고 Im 은 허수부를 나타낸다. 전파상수는 $radian/m$ 의 단위를 가지며, 실수부는 흡음시료의 단위길이당 감쇠비를 그리고 허수부는 흡음시료내를 전파하는 음파의 위상변화를 나타낸다. 결과에서 전파상수의 실수값이 주파수가 증가함에 따라 점차적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 또 두 시료에 대한 실수값을 비교해 보면 시료 No. 2 가 시료 No. 3 에 비하여 감쇠의 척도인 실수값이 더 크게 되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 시

료 No.2 가 시료 No. 3 보다 흡음능이 더 좋다는 것을 의미한다. 한편 두 시료의 위상변화를 나타내는 허수값을 비교해 보면 시료 No.2 의 경우는 2690Hz 에서 그리고 시료 No.3 의 경우는 1840Hz 부근에서 허수값의 최대치가 양(+)에서 음(-)으로 바뀐다. 이와 같이 위상이 양(+)에서 음(-)으로 또는 음(-)에서 양(+)으로 바뀌는 경계는 입사음의 입자속도가 최대로 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.

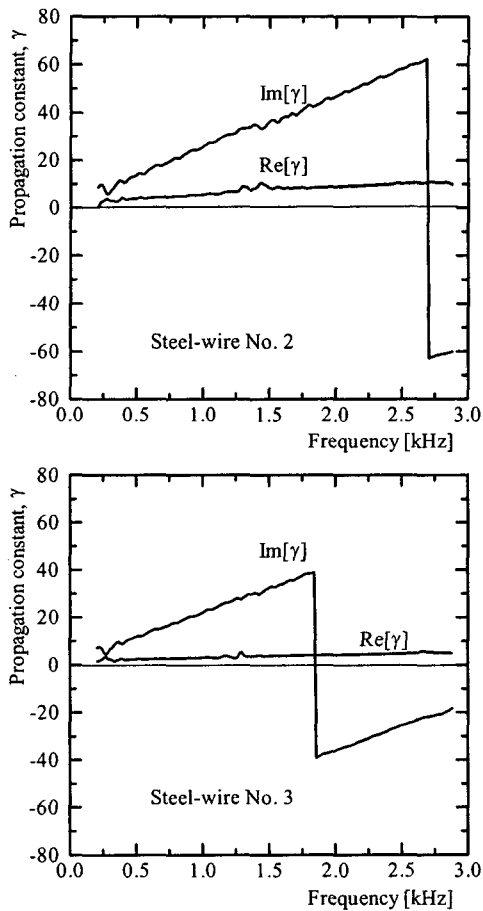


Fig. 4 Measured propagation constants of steel-wire sound absorbing materials.

Fig. 5 는 금속와이어 흡음시료의 흡음계수를 측정 한 결과이다. Two-cavity method 로 얻은 흡음계수값의 신뢰성을 확인하기 위해 Chung 과 Blaser 의 음향전달함수법과 정재파법으로 구한 흡음계수

값을 결과에 함께 도시하였다. Two-cavity method 로 구한 흡음계수는 특성임피던스와 전파상수값을 식(5)에 대입하여 식(6)으로부터 계산한 값이다. 결과를 상호비교해 보면 Two-cavity method 로 구한 흡음계수값 중에서 특정주파수영역의 흡음계수값을 제외하면 세가지 방법으로 구한 흡음계수값 모두가 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 특정주파수 대역에서 Two-cavity method 로 구한 흡음계수값이 다른 두가지 방법으로 구한 측정값보다 큰 차이를 갖는 원인에 대해서는 현단계에서 명확하게 설명할 수는 없으나, 금속와이어 흡음시료의 제조시에 수반되는 시료표면의 불균일 또는 시료내부의 동질성 결여가 주된 원인이라 사료된다.

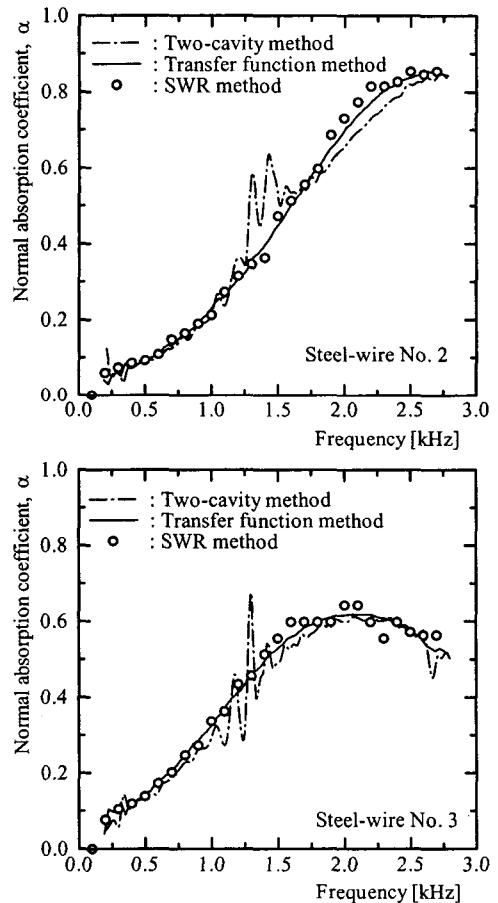


Fig. 5 Measured absorption coefficients of steel-wire sound absorbing materials.

또 Fig. 5 와 Fig. 4 의 결과값을 서로 비교해 보면 흡음계수의 경향이 전파상수의 위상경향과 잘 부합하는 것을 알 수 있다. 즉 시료 No.2 에 대한

Fig. 4 와 Fig. 5 의 결과값을 상호비교해 보면 2690Hz 부근에서 흡음계수가 최대로 되는 것을 알 수 있다. 시료 No.3 에 대한 결과에서도 전파상수의 위상이 반전되는 1840Hz 부터 흡음계수가 최대로 되는 것을 볼 수 있다. 특히 시료 No.2 가 시료 No.3 보다 흡음계수에 대한 전체적인 결과값이 더 큰 것은 시료 No.2 의 특성임피던스와 전파상수의 실수값 크기가 시료 No.3 보다 더 크기 때문이다.

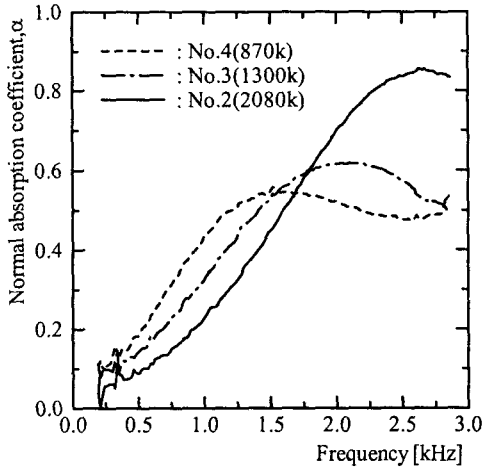


Fig. 6 Measured absorption coefficients of steel-wire sound absorbing materials with different bulk densities.

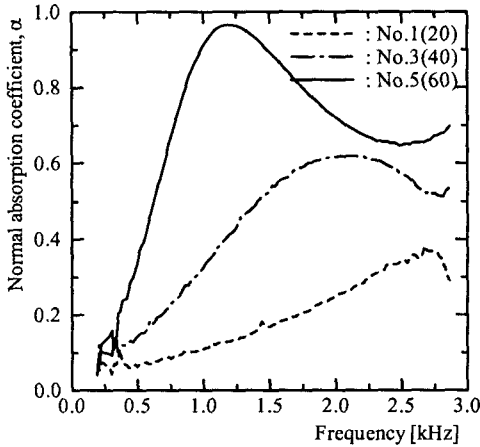


Fig. 7 Measured absorption coefficients of steel-wire sound absorbing materials with different thickness.

Fig. 6 은 체적밀도가 각기 다른 금속와이어 흡음시료의 흡음계수를 측정된 결과이다. 측정은 Chung 과 Blaser 의 전달함수법을 이용하였으며, 팔

호내의 수치값은 체적밀도를 가리킨다. 결과에서 보듯이 시료의 체적밀도가 증가할수록 흡음계수값은 점차 고주파수영역으로 이동하면서 증가하는 경향을 갖는다.

Fig. 7 은 체적밀도가 $1300\text{kg}/\text{m}^3$ 으로 일정한 흡음시료를 두께만 변화시키면서 흡음계수를 측정된 결과이다. 이 경우도 측정은 Chung 과 Blaser 의 전달함수법을 이용하였으며, 팔호내의 수치값은 흡음시료의 두께(mm)를 뜻한다. 흡음시료의 두께가 커질수록 흡음계수의 피크치가 저주파수대역으로 이동하면서 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 두께 60mm 인 경우는 저주파수영역에서 우수한 흡음성을 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 6 과 Fig. 7 의 결과로부터 금속와이어 흡음재의 흡음성은 체적밀도와 두께변화를 통하여 성능조절이 가능함을 알았다.

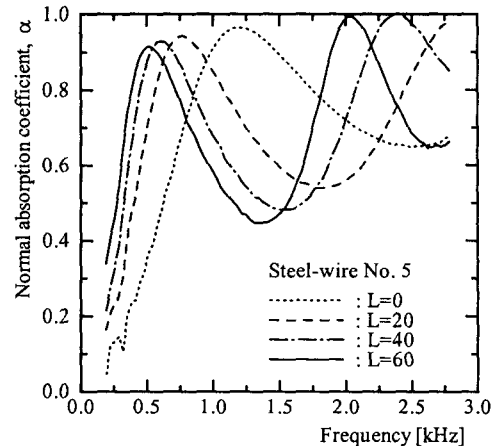
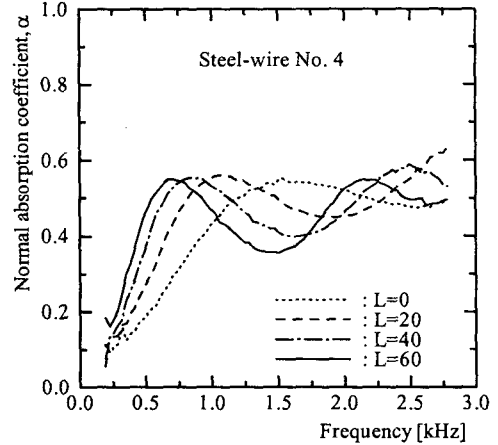


Fig. 8 Effect of the air cavity depth at the real side of the steel-wire sound absorbing materials on the absorption coefficients.

Fig. 8 은 흡음시료 배후면에 있는 공동깊이를 변화시키면서 흡음계수를 측정한 결과이다. 시료 No.4 는 두께 60mm, 체적밀도 $870\text{kg}/\text{m}^3$ 이며, 시료 No.5 는 두께 60mm, 체적밀도 $1300\text{kg}/\text{m}^3$ 이다. 두 결과 모두에서 공동깊이가 커질수록 흡음계수의 피크치가 저주파수영역으로 이동되는 것을 볼 수 있다. 흡음계수의 피크치는 시료두께와 공동깊이를 합한 길이가 입사음의 1/4 파장과 같을 때 얻어진다.

5. 결론

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

1. 페타이어 처리과정에서 생산된 금속와이어는 우수한 흡음성능을 갖는 흡음재 소재로서의 충분한 가치가 있다고 판단된다. 특히 금속와이어 흡음재의 흡음계수 크기와 피크치를 갖는 주파수대역은 흡음재의 체적밀도와 두께를 변화시키므로서 조절 가능함을 알았다.
2. 금속와이어 흡음시료의 흡음계수의 크기는 다른 흡음재와 마찬가지로 특성임피던스와 전파상수에 좌우된다. 또한 전파상수의 위상이 바뀌는 주파수에서 흡음계수의 피크치가 얻어짐을 알았다. 전파상수의 위상변화는 흡음시료의 두께가 입사음의 1/4 파장과 일치할 때 발생하며, 흡음계수의 피크치와 밀접한 관련이 있음을 알았다.
3. 금속와이어 흡음시료의 배후면의 공동깊이를 크게 할수록 흡음계수의 피크치는 저주파수영역으로 이동한다. 이 피크치는 시료두께와 공동깊이를 합한 총길이가 입사음의 1/4 파장의 기수배와 일치할 때 얻어진다.

참고문헌

- (1) 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
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 배재근, 황진우, 김민배, 이동훈, 2001, "흡음재료로

- 서 페타이어 금속 Chip 의 재활용 가능성 검토", 2001년 춘계 폐기물 관련학회 공동학술대회 논문집(1), pp.465~468.
- (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.