

## 금속와이어 흡음재의 흡음성능에 관한 실험적 연구

서 성 원, 용 호 태, 이 동 훈<sup>†</sup>

서울산업대학교 기계공학과

### An Experimental Study on the Absorption Performance of Steel-Wire Sound Absorbing Materials

Seong-Won Seo, Ho-Taek Yong, Dong-Hoon Lee<sup>†</sup>

Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received February 27, 2003; revision received April 11, 2003)

**ABSTRACT:** The acoustic performances of steel-wire sound absorbing materials with different thicknesses and bulk densities were investigated experimentally. The well-known two-cavity method was used to measure the characteristic impedance, propagation constant and absorption coefficient. The normal absorption coefficients measured by two-cavity method agreed well with those by the two-microphone impedance tube method. The experimental results showed that 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 steel-wire. Therefore, the steel-wires obtained from the crushed tire chips could be used as a good absorbing material.

**Key words:** Absorption coefficient(흡음계수), Characteristic impedance(특성임피던스), Impedance tube(임피던스관), Propagation constant(전파상수), Surface acoustic impedance(표면음향임피던스), Sound absorbing materials(흡음재)

#### 기 호 설 명

$c$  : 음속 [m/s]  
 $f$  : 주파수 [Hz]  
 $H(f)$  : 음향전달함수  
 $k$  : 파수 (=  $\omega/c$ )  
 $l$  : 흡음시료 두께 [m]  
 $L$  : 공동 깊이 [m]  
 $Z_{air}$  : 공기의 특성임피던스 [Pa.s/m]  
 $Z_b$  : 흡음재 뒷면의 표면음향임피던스 [Pa.s/m]

$Z_c$  : 흡음재의 특성임피던스 [Pa.s/m]  
 $Z_s$  : 흡음재 앞면의 표면음향임피던스 [Pa.s/m]

#### 그리스 문자

$\alpha$  : 수직입사 흡음계수  
 $\gamma$  : 전파상수 [rad/m]  
 $\omega$  : 각주파수 [rad/S]

#### 1. 서 론

최근 들어 환경과 안전문제로 인하여 전통적으로 쓰여 오던 흡음재의 패턴이 크게 바뀌고 있다.<sup>(1-4)</sup> 즉, 종래의 대표적 흡음재인 유리섬유는 탁월한 흡음성능을 보유하고 있음에도 불구하고,

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-970-6331; fax: +82-2-949-1458

E-mail address: ldh@snut.ac.kr

인체에 유해한 문제점 때문에 법적으로 사용규제를 받고 있으며, 또한 유리섬유와 대등한 흡음성을 갖는 폴리우레탄 폼은 화재의 위험성 때문에 적용범위의 제한을 받고 있다. 따라서 최근의 흡음재는 단순히 흡음성능뿐만 아니라 적용 분야에 따라 배수성, 난연성, 단열성, 비산성, 내구성 등과 같은 다양한 요건을 필요로 하고 있다. 예를 들면 고속제트의 방출로 야기된 제트소음, 지하철과 고속철도의 터널소음 및 기계실 소음의 저감에 쓰이는 흡음재는 흡음성능 못지않게 비산억제성이나 난연성을 요하고 있다. 이와 같은 흡음재의 요구조건에 착안하여 본 연구에서는 페타이어로부터 생산된 금속와이어를 이용하여 흡음재 개발을 시도하였다. 페타이어는 파쇄시 고무칩, 고탄소강의 금속와이어, 그리고 나일론 코드사로 분리되며, 이 중에서 고무성분은 칩 또는 분말의 형태로 보도블록 및 건축재료로 재활용되고 있으며, 나일론 코드사는 보일러용 연료로 사용되고 있다. 그러나 금속와이어는 단순히 고철로 매각되고 있어, 새로운 부가가치를 갖는 제품으로 재활용은 되지 않고 있다. 금속와이어로 제조된 흡음재는 자체의 자중이 크므로 앞서 언급한 비산문제가 없으며 화재에도 안전하다. 다만 만족할만한 흡음성능이 있는지의 여부가 관심사라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 페타이어로부터 회수된 금속와이어로 각기 다른 두께와 밀도를 갖는 흡음재를 제조하여 흡음성능을 평가하였다. 시험용 금속와이어 흡음재는 페타이어 칩을 열분해 연소시켜 얻은 지름 0.2mm인 와이어만을 이용하여 제조하였다.<sup>(5)</sup> 흡음재의 특성임피던스와 전파상수는 Utsuno et al.<sup>(6)</sup>이 제안한 Two-cavity method를 이용하여 측정하였다. 또한 Two-cavity method로 구한 흡음계수값의 신뢰성을 판단하기 위해 두 개의 마이크로폰이 부착된 임피던스관법<sup>(7)</sup>을 이용하여 흡음시료별 흡음계수를 측정하여 상호 비교하였다.

## 2. 관련이론

흡음재의 음향특성을 구하기 위한 대표적인 측정법으로는 Smith and Parrott<sup>(8)</sup>가 제안한 Two-thickness method와 Utsuno et al.<sup>(6)</sup>이 Yanvi<sup>(9)</sup>의 방법을 한층 개선시켜 제안한 Two-cavity me-

thod를 들 수 있다. 이 중에서 Two-thickness method는 균질인 2개의 흡음시료를 만들어 차례대로 임피던스관에 장착하여 흡음재의 표면음향 임피던스를 측정하여 흡음계수를 구하는 방법인 반면에, Two-cavity method는 하나의 흡음시료를 장착한 상태에서 시료 후방의 공동 깊이를 두 번 변화시키면서 측정한 표면음향임피던스를 이용하여 흡음계수를 구하는 방법이다. 따라서 본 연구에서 대상으로 하고 있는 금속와이어 흡음재의 경우는 동일한 성질의 2개의 시료를 제조하는 것이 어렵다는 점을 감안하여 Two-cavity method를 이용하여 흡음성능을 측정하고자 한다.

Two-cavity method는 Fig. 1에 도시된 바와 같이 밀폐된 공동깊이  $L_1$ 일 때 시료 앞면의 표면음향임피던스  $Z_{s1}$ 과 시료 뒷면에서 공동에 대한 음향임피던스  $Z_{b1}$ , 그리고 공동깊이  $L_2$ 일 때 시료 앞면의 표면음향임피던스  $Z_{s2}$ 와 뒷면의 공동에 대한 음향임피던스  $Z_{b2}$ 를 이용하여 시료의 특성 임피던스  $Z_c$ 와 전파상수  $\gamma$ 를 계산하는 방법으로 관계식은 다음과 같다.<sup>(6)</sup>

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

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

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

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

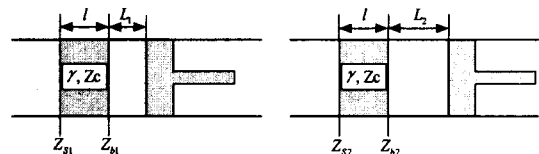


Fig. 1 Configurations for the two-cavity method.

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

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

한편 시료의 특성임피던스  $Z_c$ 와 전파상수  $\gamma$ 를 알고 있는 상태에서 시료 두께 또는 배후공동의 깊이변화에 따른 표면음향임피던스  $Z_s$ 는 각각 다음식을 이용하여 구할 수 있다.

$$Z_s = Z_c \coth(\gamma l) \quad (5a)$$

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

또 식(5)의 표면음향임피던스를 다음에 제시되는 식(6)에 대입하면 수직입사 흡음계수  $\alpha$ 가 구해진다.

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

### 3. 실험

Fig. 2는 페타이어 고무칩이 부착된 금속와이어와 이를 열분해 연소시킨 후, 금형모울드에 충전시켜 제조한 시료를 도시한 것이다. 금속와이어 흡음재의 제조과정을 간략히 소개하면 다음과 같다. 먼저 Fig. 2의 좌측에 도시된 바와 같이 길이 30~50 mm 정도로 파쇄된 지름 0.2 mm와 1 mm의 금속와이어에 부착된 고무칩을 열분해 연소방식을 이용하여 제거시킨 후, 지름 0.2 mm 금속와이어만을 선별하여 흡음소재로 활용하였다.

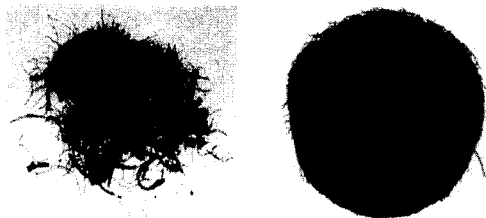


Fig. 2 Crushed tire chips (left) and steel-wire sound absorbing materials for test sample (right).

특히 연소시 수반되는 탄화작용으로 금속와이어 표면에 탄화피막이 형성되어 산화를 억제시키는 부가적인 효과가 생긴다.<sup>(5)</sup> 또 열분해 연소 후에는 금속와이어 흡음재의 제조를 쉽도록 하기 위해 풀림처리를 수행한다. 이상의 과정을 통해 얻어진 금속와이어를 금형모울드에 충전시켜 일정하중을 가하게 되면 Fig. 2의 우측에 도시된 것과 같은 시료가 만들어진다. Table 1은 전술한 방법으로 만든 금속와이어 흡음재의 제원을 나타낸 것이다.

한편 금형모울드에 금속와이어를 충전시킬 때 충전소요량을 한번에 모두 넣고 가압하면 균질에 가까운 시료가 제조되지만, 금속와이어를 여러 번 나누어 충전시키면서 가압하게 되면 제조된 시료에는 층이 생겨 균질성이 결여된다. 균질성 결여는 결과적으로 흡음재의 음향특성에 영향을 미치게 되는데, 본 연구에서는 이러한 균질성이 시료의 음향특성에 어느 정도의 영향을 미치는지를 조사할 목적으로 균질성이 결여된 시료 하나를 별도로 제조하여 시험하였다. 즉, Table 1에 \*로 표시된 시료 No. 5가 균질성이 결여된 시료이다. 또 시료 No. 6, No. 7, No. 8, No. 9는 밀도와 두께 변화가 흡음성능에 어떠한 영향을 미치는지를 파악할 목적으로 시료의 밀도와 두께를 일정 크기로 변화시키면서 제조한 시료들이다.

참고로 Table 1의 비교란에 표기된 음향특성값들은 해당시료별로 측정항목을 표시한 것이다.

Fig. 3은 금속와이어 시료의 표면음향임피던스를 측정하기 위한 실험장치도를 도시한 것이다. 임피던스관의 길이는 1,000 mm이고, 안지름은 70

Table 1 Specifications of the steel-wire sound absorbing materials

	Thickness (m)	Bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	Remarks
Steel-wire No. 1	0.018	147	Z, $\gamma$ , $\alpha$
Steel-wire No. 2	0.023	194	Z, $\gamma$ , $\alpha$
Steel-wire No. 3	0.030	167	Z, $\gamma$ , $\alpha$
Steel-wire No. 4	0.040	133	Z, $\gamma$ , $\alpha$
Steel-wire No. 5*	0.026	170	Z, $\gamma$ , $\alpha$
Steel-wire No. 6	0.020	133	$\alpha$
Steel-wire No. 7	0.025	212	$\alpha$
Steel-wire No. 8	0.060	89	$\alpha$
Steel-wire No. 9	0.060	133	$\alpha$

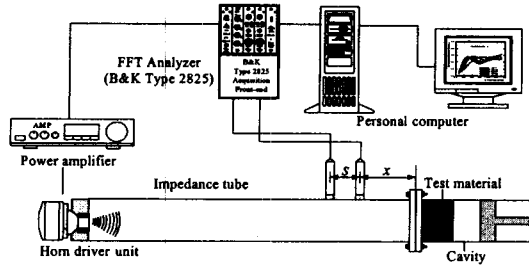


Fig. 3 Experimental setup for the absorption performance measurement of steel-wire sound absorbing materials.

mm이다. 관 입구측에는 스피커가 부착되어 있으며, 스피커를 통해 주파수분석기(B&K, type 2825)의 신호발생기에서 발생한 광대역음이 관내로 공급된다. 그리고 하류측 관단에는 1/4인치 콘덴서형 마이크로폰(B&K, type 4938)이 관 내면과 잘 일치하도록 설치되어 있으며, 강체피스톤으로 밀봉되어 있다. 강체피스톤 전방부에 금속와이어 시료를 설치한 후, 공동 깊이를 변화시키면서 시료의 표면음향임피던스를 구한다.

표면음향임피던스는 Fig. 3에서 보듯이 시료의 상류측에 고정된 두 마이크로폰 간의 음향전달함수  $H(f)$ 를 측정하여 구하는 두 마이크로폰법<sup>(7)</sup>을 이용하였다. 이 경우 전달함수로부터 표면음향임피던스를 구하는 관계식은 다음과 같다.<sup>(10)</sup>

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

식(7)에서  $x$ 는 시료면으로부터 첫번째 마이크로폰까지의 거리이고,  $s$ 는 마이크로폰 간격, 그리고  $f$ 는 주파수이다. 두께  $l$ 인 금속와이어 시료를 관 출구에 장착하고 배후공동의 깊이를  $L_1$  및  $L_2$ 로 바꾸면서 측정된 전달함수로부터 시료 앞면의 표면음향임피던스  $Z_{s1}$ 과  $Z_{s2}$ 를 구한다. 본 연구에서는 공동깊이  $L_1=20$  mm, 그리고  $L_2=60$  mm로 하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 4는 금속와이어 시료 No. 1, No. 2, No. 3, 그리고 No. 4에 대한 특성임피던스 측정결과를 공기의 특성임피던스  $Z_{air}$ 로 무차원화하여 도시한

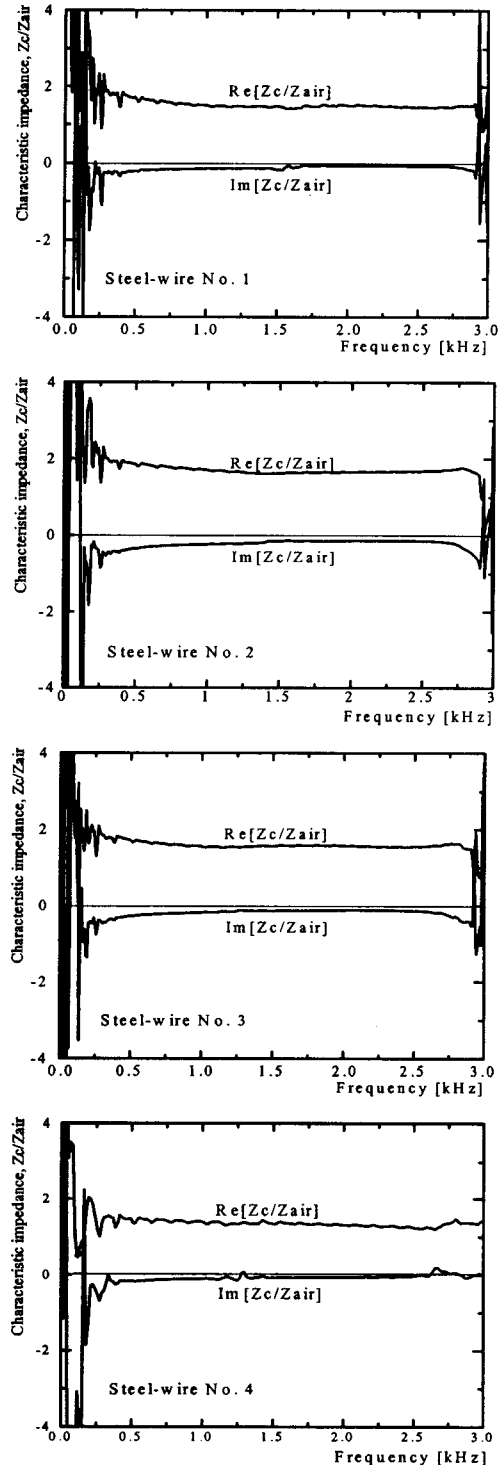


Fig. 4 Characteristic impedances of steel-wire sound absorbing materials.

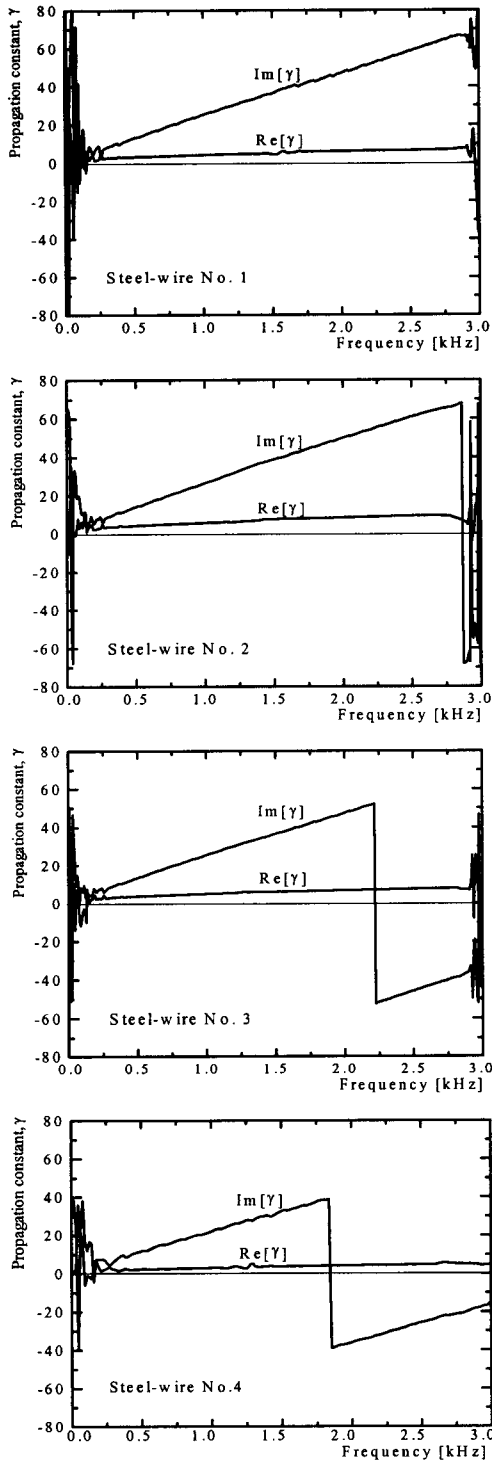


Fig. 5 Propagation constants of steel-wire sound absorbing materials.

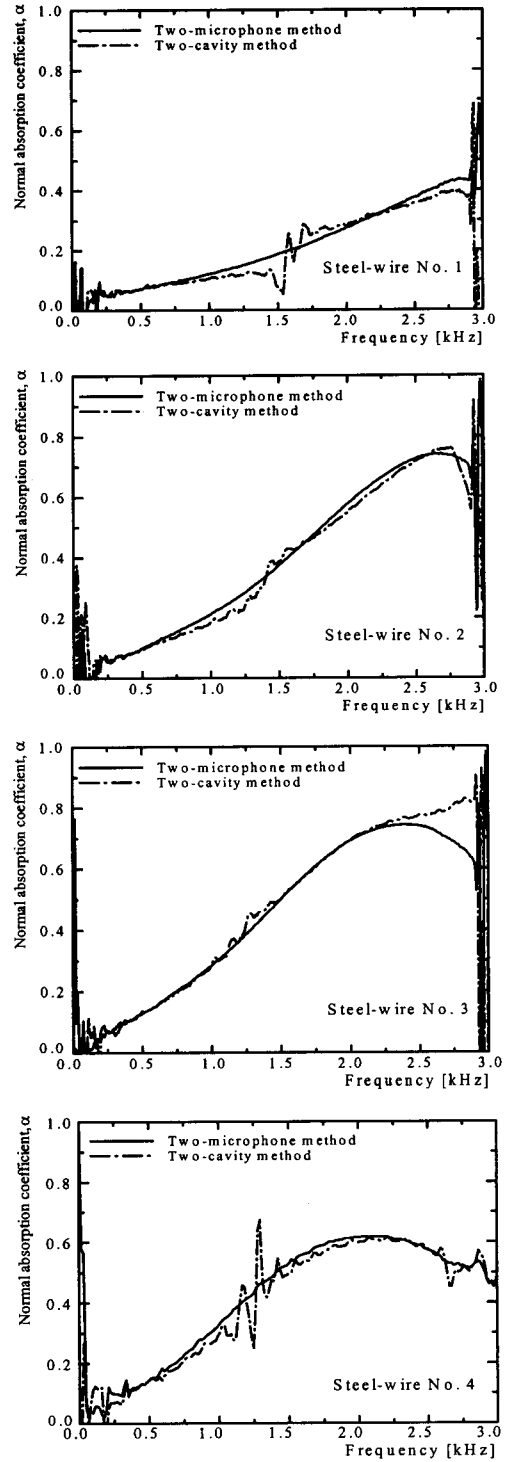


Fig. 6 Absorption coefficients of steel-wire sound absorbing materials.

것이다. 결과에 도시된  $Re$ 는 임피던스의 실수부,  $Im$ 은 허수부를 나타낸다.

특성임피던스는 음파가 시료에 입사하여 시료 내를 통과할 때 음파가 받는 저항 정도를 나타내므로 시료의 밀도와 매우 밀접한 관계를 갖는다. 그러므로 제시된 네 가지 결과를 비교해 보면 시료 No. 2의 경우가 시료 No. 1, No. 3, No. 4의 경우보다 특성임피던스의 실수부 및 허수부의 크기가 약간 더 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 Table 1에 제시된 밀도값과도 잘 일치한다. 또한 제시된 네 가지 결과 모두에서 주파수 증가에 따라 특성임피던스의 크기가 점차 감소하는 경향을 보이는데, 이것은 높은 주파수의 입사음이 낮은 주파수의 입사음에 비하여 상대적으로 더 작은 음향저항을 받기 때문이다.

한편 아주 낮은 200 Hz 이하의 주파수 대역에서 특성임피던스 측정값이 큰 변동을 보이는 것은 두 마이크로폰을 이용하여 음향전달함수를 측정할 때 마이크로폰의 위치 및 간격과 관련된 오차가 측정결과에 반영되었기 때문이며,<sup>(2)</sup> 2,900 Hz 이상에서의 특성임피던스값이 크게 변동하는 것은 임피던스관 내에서 야기된 고차모드가 전파하기 때문이다.

Fig. 5는 금속와이어 시료 No. 1, No. 2, No. 3 및 No. 4에 대한 전파상수 측정결과이다. 이 결과에서도  $Re$ 는 실수부,  $Im$ 은 허수부를 나타낸다. 전파상수는  $radian/m$ 의 단위를 가지며, 실수부는 흡음시료의 단위길이당 감쇠비, 허수부는 흡음시료 내를 전파하는 음파의 위상변화를 나타낸다. 도시된 네 가지 결과 모두에서 보듯이 전파상수의 실수값이 주파수가 증가함에 따라 점차적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 또 네 가지 시료에 대한 실수값을 비교해 보면 시료 No. 2와 No. 3가 No. 1, 그리고 No. 4에 비하여 전파상수의 실수값이 더 크게 되어 흡음성능이 더 좋아진 것을 알 수 있다.

한편 네 종류 시료의 위상변화를 나타내는 허수값을 비교해 보면 시료 No. 2는 2,875 Hz, No. 3의 경우는 2,250 Hz 부근, 그리고 No. 4는 1,850 Hz에서 양(+)에서 음(-)으로 바뀐다. 이와 같이 위상이 양(+)에서 음(-)으로 또는 음(-)에서 양(+)으로 바뀌는 경계는 입사음의 입자속도가 최대로 되는 주파수 경계를 의미하며, 흡음재 두께가 입사음의 1/4파장과 일치할 때 발생한다. 허수

값의 최대 및 최저값을 이용하여 위상각도를 각각 구하면  $+90^\circ$  및  $-90^\circ$ 와 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 금속와이어 시료 No. 1, No. 2, No. 3, 그리고 No. 4에 대한 흡음계수를 측정된 결과이다. Two-cavity method로 구한 흡음계수값의 정확성 여부를 검토하기 위해 두 마이크로폰법<sup>(7)</sup>으로 측정된 흡음계수값을 결과에 함께 비교 도시하였다.

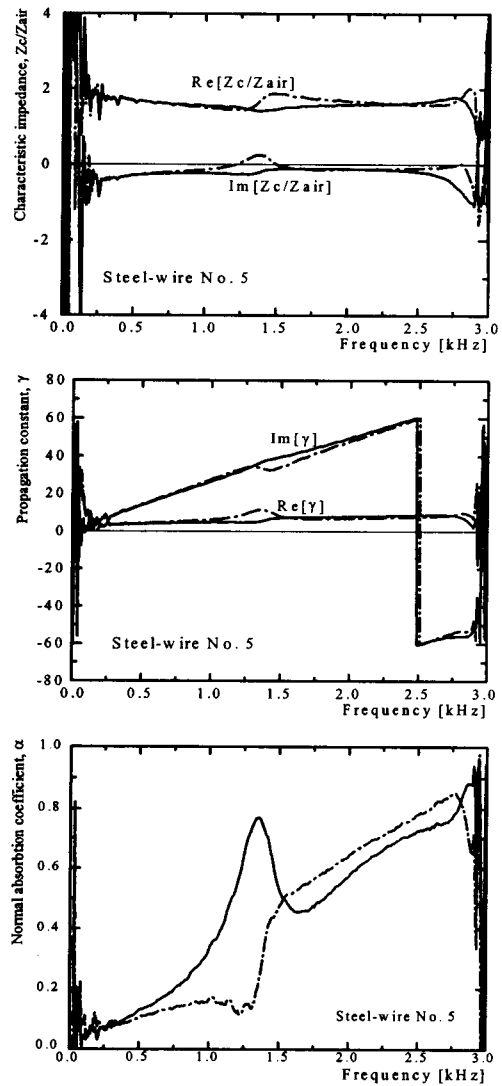


Fig. 7 Acoustical characteristics of a non-homogeneous steel-wire sound absorbing materials.

Two-cavity method로 구한 흡음계수는 특성 임피던스와 전파상수값을 식(5a)에 대입하여 식(6)으로부터 계산한 값이다. 제시된 결과값들을 상호 비교해 보면, 시료 No.2를 제외하고는 Two-cavity method로 구한 흡음계수값과 두 마이크로폰법으로 구한 흡음계수값들이 특정주파수 대역에서 잘 일치하지 않는 것을 알 수 있다. 시료 No.1의 경우는 1,500 Hz 대역, No.3의 경우는 2,500 Hz 이상에서, 그리고 No.4는 1,250 Hz에서 Two-cavity method로 구한 흡음계수값이 Two-microphone method로 구한 흡음계수값과 비교하여 큰 차이를 갖는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 금속와이어 시료의 제조시에 수반되는 시료 내부의 균질성 문제가 주된 원인이라 사료되며, 이에 대해서는 Fig.7에서 토의된다.

한편 Fig.5와 Fig.6의 결과값을 서로 비교해 보면 Fig.6에 도시된 흡음계수값의 경향이 Fig.5의 전파상수의 위상경향과 잘 부합하는 것을 알 수 있다. 즉, 시료 No.2에 대한 Fig.5와 Fig.6의 결과값을 상호 비교해 보면, 위상이 바뀌는 주파수가 흡음계수 곡선의 정점에 해당하는 주파수범위에 속하는 것을 알 수 있다. 시료 No.3에 대한 결과에서도 전파상수의 위상이 반전되는 2,250 Hz가 흡음계수가 최대로 되는 주파수범위에 포함되는 것을 볼 수 있다. 특히 시료 No.2와 No.3의 흡음계수값이 No.1이나 No.4보다 더 높은 것은 특성임피던스와 전파상수의 실수값 크기가 No.1이나 No.4보다 더 크기 때문이다.

Fig.7은 균질성이 결여되도록 별도로 제조한 금속와이어 시료 No.5에 대한 특성임피던스, 전

파상수 및 흡음계수를 Two-cavity method로 구한 결과이다. 제시된 결과의 실선과 일점쇄선은 각각 시료의 후면과 전면을 입사음방향으로 향하도록 하여 측정된 값이다. 먼저 특성임피던스와 전파상수의 결과에서 보듯이 결과값의 차이가 1,000 Hz와 2,000 Hz 사이, 그리고 2,500 Hz 이상에서 크게 나는 것을 알 수 있다. 또한 흡음계수에 대한 결과에서도 1,000 Hz 이상부터 입사음방향에 따른 흡음계수값의 차이가 크게 나는 것을 볼 수 있다. 이상의 결과로 미루어 볼 때 Fig.6에 도시된 No.1의 1,500 Hz 대역, No.3의 2,500 Hz 이상, 그리고 No.4의 1,250 Hz 대역에서 보여준 Two-cavity method와 두 마이크로폰법으로 구한 흡음계수값의 차이는 시료 내부의 균질성 결여가 주된 요인이라 할 수 있다.

Fig.8은 밀도가 각기 다른 금속와이어 시료인 No.6, No.7, 그리고 No.8에 대한 흡음계수 측정 결과이다. 측정은 두 마이크로폰법을 이용하였으며, 괄호 내의 수치값은 밀도값을 가리킨다. 결과에서 보듯이 흡음계수는 주파수에 따라서 증가하여 그 최대값은 밀도가 클수록 높은 주파수에서 나타난다.

Fig.9는 밀도가 133 kg/m<sup>3</sup>으로 일정한 시료를 두께만을 변화시키면서 흡음계수를 측정한 결과이다. 이 경우도 측정은 두 마이크로폰법을 이용하였으며, 괄호 내의 수치값은 시료의 두께(mm)를 뜻한다.

시료의 두께가 두꺼워질수록 흡음계수의 피크치가 저주파수 대역으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 특히 두께 60 mm인 경우는 다공판 시스템<sup>(11)</sup>

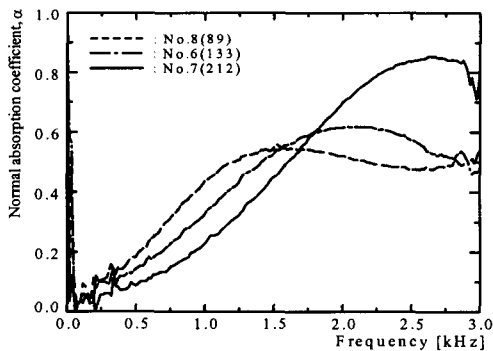


Fig. 8 Absorption coefficients of steel-wire sound absorbing materials with different bulk densities.

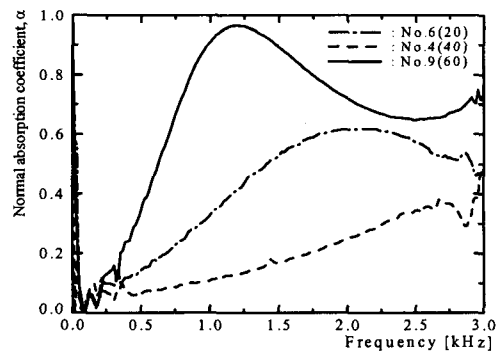


Fig. 9 Absorption coefficients of steel-wire sound absorbing materials with different thickness.

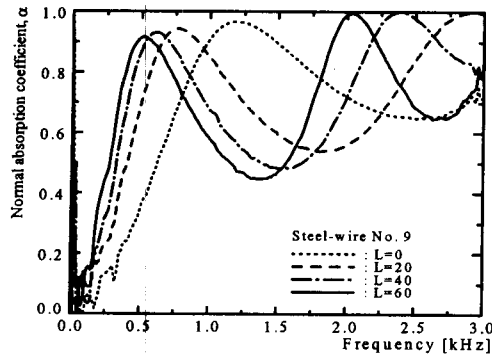


Fig. 10 Effect of the air cavity depth on the absorption coefficient of the steel-wire sound absorbing materials.

처럼 저주파수 영역에서 우수한 흡음성능을 나타내는 것을 볼 수 있는데, 이것은 다른 시료에 비하여 상대적으로 공극률(porosity)이 크기 때문이다.<sup>(2,12)</sup> 이상의 결과를 감안해 볼 때 금속와이어 흡음재의 경우도 유리섬유나 폴리우레탄폼과 같이 밀도와 두께변화를 통하여 흡음성능 조절이 가능함을 알았다.

Fig. 10은 시료 No. 9를 임피던스관에 장착한 상태에서 시료배후에 있는 공동 깊이를 각각 0, 20, 40, 60(mm)로 변화시키면서 흡음계수를 측정 한 결과이다. 결과에서 공동 깊이가 커질수록 흡음계수의 피크치가 저주파수 영역으로 이동되는 것을 볼 수 있다. 또 결과에 도시된 흡음계수의 피크치는 시료 두께와 공동 깊이를 합한 길이가 입사음의 약 1/4파장과 같을 때 얻어진다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 폐타이어로부터 회수된 금속와이어 흡음재의 성능을 평가하기 위하여 흡음재의 음향성능 지표인 특성임피던스, 전파상수, 그리고 흡음계수를 측정하여 고찰하였으며, 결과를 요약 하면 다음과 같다.

(1) 폐타이어 처리과정에서 생산된 금속와이어는 우수한 흡음성능을 갖으며, 흡음계수와 흡음대역폭은 밀도와 두께를 조절하거나 공기층을 들으로써 제어할 수 있다.

(2) 균질성을 갖도록 제조한 금속와이어 흡음재는 그 음향성능인 특성임피던스, 전파상수, 그리고 흡음계수를 Two-cavity method로 평가할

수 있다.

(3) 금속와이어 균질성은 제품의 올바른 흡음성능평가와 품질관리를 위해서라도 실제의 생산공정에서 반드시 고려되어야 할 사항이라 사료된다.

## 후 기

이 논문은 서울산업대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. Ju, K. M., Yong, H. T. and Lee, D. H., 2001, Acoustical properties of polyester sound absorbing materials, Autumn Conference Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Korea, pp. 1347-1352.
2. Heo, S. W., Ju, K. M., Hur, S. C., Yong, H. T. and Lee, D. H., 2002, Acoustical performance measurement of steel-wire sound absorbing materials, Proceedings of the SAREK 2002 Winter Annual Conference, Korea, pp. 438-443
3. Hur, B. Y., Ahn, H. J., Jeon, S. H., Choi, D. C., Kim, S. Y. and Hur, Y., 2000, Acoustic absorption characteristic and fabrication process of foamed aluminum, Autumn Conference Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Korea, pp. 396-402.
4. Maa, D. Y., 1987, Microperforated-panel wideband absorber, Noise Control Engineering Journal, Vol. 29, No. 3, pp. 77-84.
5. Bae, J. G., Hwang, J. W., Kim, M. B. and Lee, D. H., 2001, Investigation on recycle possibility as sound absorbing materials of steel-wire produced from pyrolyzed tire waste, Proceedings of the 2001 Co-conference sponsored by the Korean Solid waste Engineering Society, the Korean Institute of Resources Recycling, and the Korea Organic Waste Recycling Council, Vol. 1, pp. 465-468.



6. 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.
7. Lee, D. H., Yong, H. T. and Lee, S., 2002, Sound transmission loss measurement for sound isolation sheets by two-microphone impedance tube method, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Eng.*, Vol. 14, No. 1, pp. 63-72.
8. Smith, C. D. and Parrott, T. L., 1983, Comparison of three methods for measuring acoustic properties of bulk materials, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 74, No. 5, pp. 1577-1582.
9. Yanvi, 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.
10. 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.
11. Lee, D. H., Hur, S. C. and Kwon, Y. P., 2002, Estimation of the absorption performance for multiple layer perforated plate systems by transfer matrix method, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 12, No. 9, pp. 709-716.
12. Ju, K. M., Lee, D. H. and Yong, H. T., 2002, A study on the physical characteristics of steel-wire sound absorbing materials, *Spring Conference Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Korea, pp. 1244-1249.