

# 폴리에스테르 흡음재의 음향특성 Acoustical Properties of Polyester Sound Absorbing Materials

주경민\*·용호택\*\*·이동훈\*\*  
Kyung-Min Ju, Ho-Taek Yong and Dong-Hoon Lee

**Key Words** : Absorption Coefficient(흡음계수), Characteristic Impedance(특성임피던스), Propagation Constant(전파상수), Specific Flow Resistivity(고유유동저항), Surface Impedance(표면임피던스)

## ABSTRACT

In this study, the acoustic properties of polyester sound absorbing materials with three different bulk densities were investigated by calculating and measuring the acoustic parameters in terms of characteristic impedance, propagation constant, and absorption coefficient. For the calculations, Delany and Bazley's empirical equation was used together with the experimentally obtained specific flow resistivities under steady flow conditions. For the experimental measurements, the well-known two-thickness method was accessed. The experimentally measured values of characteristic impedance and propagation constant were generally agreed well with the corresponding calculated values. Based on the comparisons between the calculations and measurements, it was found that the magnitude of the absorption coefficient was closely related to the characteristic impedance and the real part of the propagation constant. Especially, the maximum magnitude of the absorption coefficient was depended upon the imaginary part of the propagation constant indicating the phase change of the propagation constant.

## 1. 서론

최근 환경과 안전문제가 사회적으로 강력하게 대두됨에 따라 전통적으로 쓰여오던 소음저감용 흡음재의 패턴이 상당히 바뀌고 있다. 즉 종래의 대표적 흡음재인 유리섬유는 탁월한 흡음성능을 보유하고 있음에도 불구하고, 인체에 유해한 문제점 때문에 법적으로 사용규제를 받고 있으며, 또한 유리섬유와 대등한 흡음성능을 갖는 폴리우레탄 폼은 화재의 위험성 때문에 적용범위의 제한을 받고 있다. 따라서 방염성을 고려한 친환경적 흡음재의 개발이 시급한 실정이다.

흡음재의 고유특성은 특성임피던스와 전파상수에 의해 결정되며, 새로운 흡음재를 개발하거나 개발된 흡음재의 음향특성을 평가할 때는 흡음재의 특성임피던스와 전파상수에 대한 정보가 반드시 필요하다. 흡음재에 대한 연구는 특성임피던스와 전파상수에 대한 이론모델을 수립하기 위한 연구와 이들 검증할 측정방법에 관한 연구로 대별할 수 있으며, 이와 관련하여 최근까지 다수의 연구 결과가 발표된 바 있다.<sup>(1-3)</sup> 지금까지 발표된 일반화된 대표적인 모델로는 Delany와 Bazley<sup>(4)</sup>가 제안한 특성임피던스와 전파상수에 대한 경험식을 꼽을 수 있으며, 측정법으로는 Scott<sup>(5)</sup>와 Yaniv<sup>(6)</sup>의 측정법을 한층 발전시킨 Smith와 Parrott<sup>(7)</sup>이 제안한 Two-thickness method 그리고 Utsuno 등<sup>(8)</sup>의 Two-cavity method가 이용되고 있다.

본 연구는 앞서 언급한 상용흡음재의 문제점을 보완한 폴리에스테르 흡음재 3 종류에 대한 음향 특성 평가를 연구목표로 하였다. 폴리에스테르 흡음재의 고유음향특성인 특성임피던스와 전파상수는 Delany와 Bazley의 경험식을 이용하여 계산하였으며, 계산결과를 Two-thickness method로 측정된 결과와 비교고찰하였다 또 폴리에스테르 흡음재의 특성임피던스와 전파상수의 계산을 위해 유동저항을 측정하였다.

## 2. 이론검토

폴리에스테르 흡음재의 특성임피던스와 전파상수의 측정을 위해 본 연구에서는 Smith와 Parrott<sup>(7)</sup>이 제안한 Two-thickness method를 이용하였다. Two-thickness method는 Fig. 1에 도시된 것처럼 서로 다른 시료두께를 갖는 흡음재의 표면임피던스를 측정하여 특성임피던스와 전파상수를 알아내는 방법이다. Fig. 1에서 두께  $l_1$ 과  $l_2$ 인 시료의 표면 임피던스를 각각  $Z_{s1}$ 과  $Z_{s2}$ 라 하면, 특성임피던스  $Z_c$ 와 전파상수  $\gamma$ 와는 다음의 관계를 갖는다.

$$Z_{s1} = Z_c \coth(\gamma l_1) \quad (1)$$

$$Z_{s2} = Z_c \coth(\gamma l_2) \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)로부터  $l_2 = 2l_1 = 2l$ 로 하여 특성임피던스  $Z_c$ 와 전파상수  $\gamma$ 에 대하여 다시 정리하면 다음과 같다.

\* 서울산업대학교 산업대학원 기계공학과

\*\* 서울산업대학교 기계공학과

E-mail : Ldh@duck.snut.ac.kr, Tel : 02-970-6331

$$Z_c = [Z_{s1}(2Z_{s2} - Z_{s1})]^{1/2} \quad (3)$$

$$\gamma = (1/2l) \ln[(1+a)/(1-a)] \quad (4)$$

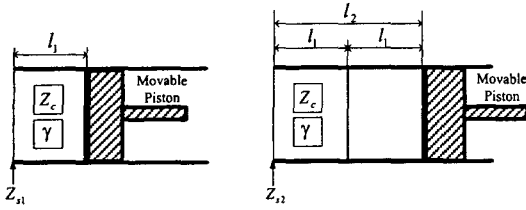


Fig. 1 Configurations for the two-thickness method.

식 (4)에서  $a = [(2Z_{s2} - Z_{s1})/Z_{s1}]^{1/2}$  이다. 또 식 (3)과 식 (4)의 관계에서 알 수 있듯이 특성임피던스와 전파상수를 구하는데는 표면임피던스만의 측정이 필요하다는 것을 알 수 있다. 역으로 특성임피던스와 전파상수가 구해지면 식 (1) 또는 식 (2)를 이용하여 임의두께  $l$  인 시료의 표면임피던스  $Z_s$  를 구할 수 있다. 시료의 표면임피던스  $Z_s$  로부터 수직입사 흡음율  $\alpha$  는 다음의 식으로 계산된다.

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - Z_{air}}{Z_s + Z_{air}} \right|^2 \quad (5)$$

식 (5)에서  $Z_{air}$  는 공기의 특성임피던스이다.

한편 Delany 와 Bazley<sup>(4)</sup>는 흡음재의 유동저항 측정값으로부터 특성임피던스  $Z_c$  와 전파상수  $\gamma$  를 손쉽게 예측할 수 있는 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$Z_c = \rho_o c \left[ 1.0 + 0.0497 \left( \frac{\sigma}{f} \right)^{0.754} - j 0.0758 \left( \frac{\sigma}{f} \right)^{0.732} \right] \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{2\pi f}{c} \left\{ \left[ 0.167 \left( \frac{\sigma}{f} \right)^{0.595} \right] - j \left[ 1 + 0.0858 \left( \frac{\sigma}{f} \right)^{0.70} \right] \right\} \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)에서  $\rho_o$  는 공기밀도 ( $kg/m^3$ ),  $c$  는 음속 ( $m/s$ ),  $f$  는 주파수 ( $Hz$ ) 그리고  $\sigma$  는 고유유동저항 ( $kg/m^3 sec$ )을 의미한다. 고유유동저항  $\sigma$  는 다음식으로 구한다.<sup>(9)</sup>

$$\sigma = \frac{\Delta P \cdot A}{Q \cdot l} \quad (8)$$

식 (8)에서  $A$  는 시료단면적 ( $m^2$ ),  $l$  는 시료두께 ( $m$ ),  $Q$  는 체적속도 ( $m^3/s$ ) 그리고  $\Delta p$  는 시료전후의 압력차 ( $N/m^2$ )를 나타낸다.

### 3. 실험

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 광대역음이 관내로 공급된다. 그리고 하류측 관단에는 이송이 가능한 강체 피스톤이 설치되어 있다. 강체 피스톤 전방에는 두께가 서로 다른 동질의 흡음시료를 번갈아 장착하면서 흡음시료의 표면임피던스를 구하였다.

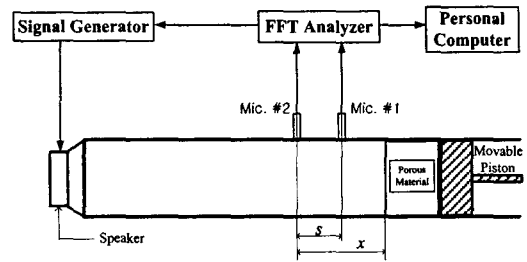


Fig. 2 Schematic diagram for the surface impedance measurement of polyester absorbing materials.

표면 임피던스는 Fig. 2 에서 보듯이 흡음시료로부터 상류측으로 20mm 와 40mm 위치에 고정된 두 마이크로폰간의 전달함수  $H$  를 측정하므로써 구하여진다. 전달함수와 표면임피던스의 관계식<sup>(10)</sup> 은 다음과 같다.

$$Z_s = jZ_{air} \frac{\sin[k(x-s)] - H \sin(kx)}{H \cos(kx) - \cos[k(x-s)]} \quad (9)$$

식 (9)에서  $x$  는 시료로부터 두번째 마이크로폰까지의 거리 그리고  $s$  는 마이크로폰의 간격이다. 시료두께  $l_1$  과  $l_2$  인 흡음재를 각각 장착하면서 전달함수  $H$  를 측정하여 시료의 표면임피던스  $Z_s$  를 구한다. Table 1 은 본 연구에서 사용한 폴리에스테르 흡음재의 제원을 나타낸 것이다.

Fig. 3 은 흡음재의 유동저항을 측정하기 위한 실험장치도이다. 관의 내경은 임피던스관과 같도록 하였으며 총길이는 2100mm 로 하였다. 공기저장 탱크로부터 유입되는 유동의 안정화를 위해 관의 입구측에는 디퓨저를 설치하였다. 흡음시료는 시료홀더에 장착되어 관로 중간에 삽입된다. 흡음시료의 전후방의 압력차 측정을 위하여 경사마노미터를 설치하였다. 관로에 공급되는 공기의 유량

은 관로 입구측에 설치된 유량계를 이용하여 조절하였다. 공기의 공급유량 범위는 120dB~140dB 범위에 해당하는 음의 입자속도를 구하여 결정하였다. 이 음압범위에서 구한 입자속도값을 토대로 하여 관지름 70mm 일 때의 레이놀즈수를 계산하면 층류범위인 230~2300 이 된다

Table. 1 Specifications of polyester absorbing materials.

	Polyester wool - No.1	Polyester wool - No.2	Polyester wool - No.3
Thickness (m)	0.021	0.042	0.043
Density ( $kg/m^3$ )	87	56	30

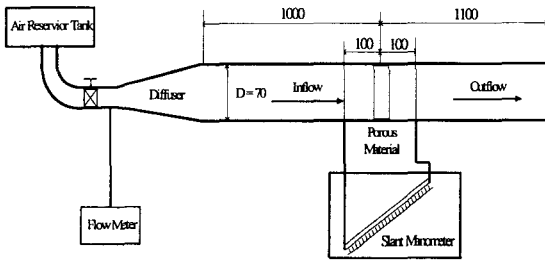


Fig. 3 Experimental apparatus for the flow resistance measurement of polyester sound absorbing materials.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 4 는 폴리에스테르 흡음재의 고유유동저항을 측정할 결과이다. 결과에서 심볼로 표시한 것은 레이놀즈수 230~2300 범위에서 측정된 유동저항값을 나타내며, 실선은 측정된 유동저항값을 이용하여 최소자승법으로 구한 추세선을 나타낸다. 도시된 결과에서 보듯이 흡음시료의 고유유동저항값은 체적밀도와 매우 밀접한 관련이 있으며, 레이놀즈수의 증가에 따라 선형증가하는 경향을 갖는다.

Fig. 5 는 폴리에스테르 흡음재의 특성임피던스에 대한 측정값과 계산값을 공기의 특성임피던스  $Z_{air}$  로 무차원화하여 비교도시한 것이다. 측정값은 Two-thickness method 를 이용하여 구하였으며, 계산값은 Delany 와 Bazley 의 경험식을 이용하여 구하였다. 또 결과에서  $Re$  는 임피던스의 실수값 그리고  $Im$  은 허수값을 나타낸다. 특성임피던스는 음파가 시료에 입사하여 시료내를 통과할 때 음파가 느끼는 저항정도를 나타내는 흡음시료의 특성

값임을 감안할 때, Fig. 5 에 도시된 특성임피던스값은 Fig. 4 에 도시된 고유유동저항값과 매우 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다.

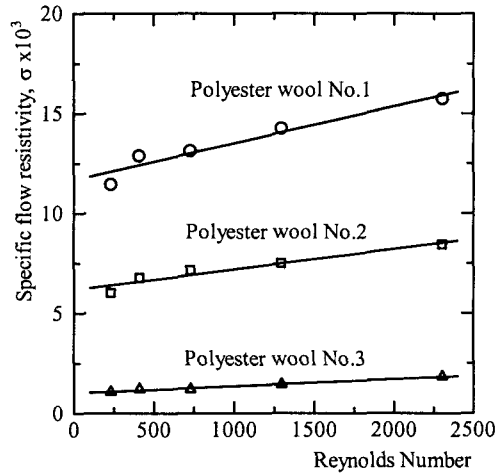


Fig. 4 Measured specific flow resistivities of polyester sound absorbing materials.

즉 Fig. 4 와 Fig. 5 에 도시된 결과를 상호비교해보면 고유유동저항값이 가장 큰 흡음시료인 No. 1 의 특성임피던스값이 가장 크고, 고유유동저항값이 가장 작은 흡음시료인 No. 3 의 특성임피던스값이 가장 작은 것을 알 수 있다. 또 Fig. 5 에 제시된 모든 결과에서 특성임피던스값은 주파수가 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보인다. 이것은 높은 주파수의 입사음이 낮은 주파수의 입사음에 비하여 상대적으로 더 작은 음향저항을 받기 때문이다. 한편 특성임피던스에 대한 계산값과 측정값을 비교해 보면 낮은 주파수대역에서의 일부 결과를 제외하면 비교적 잘 일치한다. 낮은 주파수대역에서 측정값이 계산값으로부터 크게 벗어나는 것은 두개의 마이크로폰을 이용하여 음향전달 함수를 측정할 때에 필연적으로 수반되는 마이크로폰의 위치 및 간격과 관련된 오차가 결과에 반영되었기 때문이다. 이러한 낮은 주파수대역에서 나타난 측정오차를 줄이기 위해서는 마이크로폰의 간격을 적절히 조절하면 개선시킬 수 있으나, 본 연구에서는 측정의 간편성을 위해 마이크로폰의 간격을 20mm 로 고정된 상태에서 모든 측정을 수행하였다.

Fig. 6 은 폴리에스테르 흡음재의 전파상수에 대한 측정값과 계산값을 상호비교한 것이다. Fig.5 에서와 같이 측정값은 Two-thickness method 를 이용하여 구하였으며, 계산값은 Delany 와 Bazley 가 제안한 경험식으로부터 구하였다. 또 결과에서  $Re$  는 임피던스의 실수값 그리고  $Im$  은 임피던스의 허수

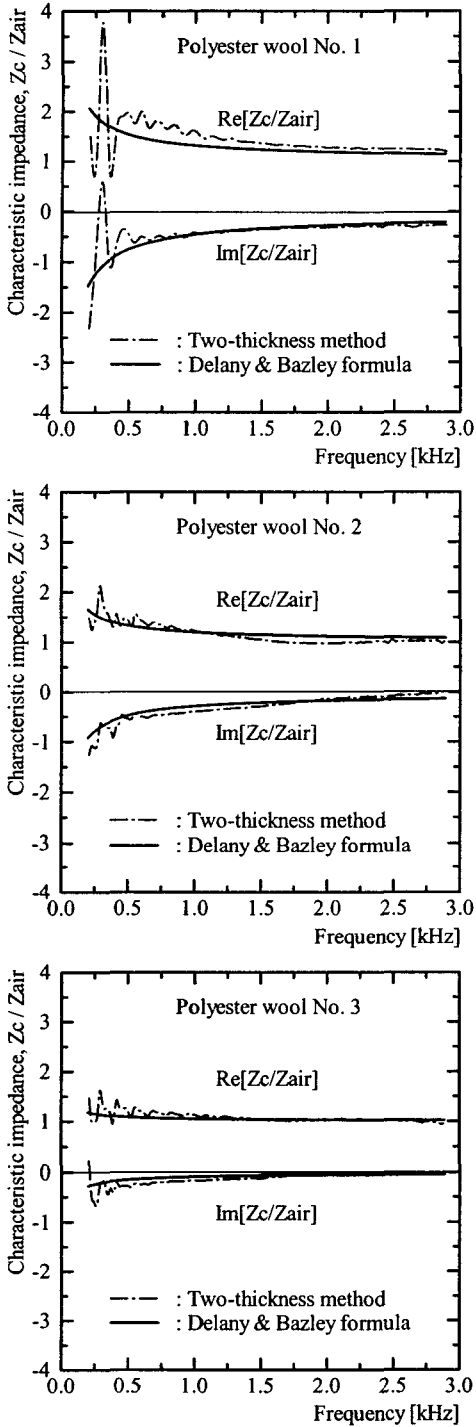


Fig. 5 Comparison between measured and calculated characteristic impedances of polyester sound absorbing materials.

값을 나타낸다.

전파상수의 실수부는 흡음시료의 단위두께당 감쇠정도를 나타내며, 단위는 *neper/m* 이다. 그리고 전파상수의 허수부는 흡음시료를 전파하는 음파의 위상정보를 나타내는 것으로서 *radian/m* 의 단위를 갖는다. 따라서 흡음시료의 전파상수에 대한 정보는 흡음시료의 흡음성능 피크치를 미리 파악할 수 있는 중요한 음향특성값의 하나이다. 먼저 흡음시료 No.1 에 대한 결과를 보면 주파수 증가에 따라 전파상수의 실수값과 허수값이 모두 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 흡음시료 No. 2 에 대한 결과에서는 전파상수의 실수부는 주파수 증가와 함께 계속하여 증가하지만, 허수부는 1760Hz 부근에서 부호가 바뀌어 음의 위상정보를 가지면서 증가하는 경향을 보인다. 위상이 양(+)에서 음(-)으로 또는 음(-)에서 양(+)으로 바뀌는 경계는 음의 입자속도가 최대로 되는 경계를 의미한다. 주파수 1760Hz 에서 음의 입자속도가 최대로 되는 입사음의 파장을 구하면 49mm 가 되며, 이것은 흡음시료 No. 2 의 두께와 거의 일치한다. 따라서 1760Hz 이상의 입사음은 흡음시료의 내부에서 음의 입자속도가 최대가 되므로 흡음성능은 거의 일정하게 된다. 또 흡음시료 No. 3 에 대한 전파상수의 허수부 결과에서도 No. 2 의 결과와 유사한 경향을 보이며, 1800Hz 정도에서 위상이 바뀌는 것을 볼 수 있다. 이 경우에서도 주파수 1800Hz 에서 입사음의 입자속도가 최대로 되는 파장을 구하면 47mm 가 되며, 이것 역시 흡음시료 No. 3 의 두께와 거의 일치한다. 그러나 흡음시료 No. 2 의 결과와 비교하면 전파상수의 실수값은 크지 않음을 알 수 있다. 이상의 결과로 볼 때 Delany 와 Bazley 의 경험식으로 구한 전파상수의 위상은 흡음시료의 두께가 입사음의 1/4 파장보다 같거나 작은 범위에서만 유효하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7 은 폴리에스테르 흡음재의 흡음계수에 대한 측정값과 계산값을 비교도시한 것이다. 결과에 도시된 일점쇄선은 Two-thickness method로부터 구한 흡음계수를 나타내며, 실선은 Delany 와 Bazley 의 경험식으로부터 구한 흡음계수를 나타낸다. 또한 이들 방법으로 구한 흡음계수값의 신뢰성을 검증하기 위해 정재파법으로 구한 흡음계수값을 결과에 함께 비교도시하였다. 세가지 방법으로 구한 흡음계수에 대한 결과는 각각의 시료에 대하여 서로간에 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

먼저 폴리에스테르 흡음시료 No. 1 에 대한 결과를

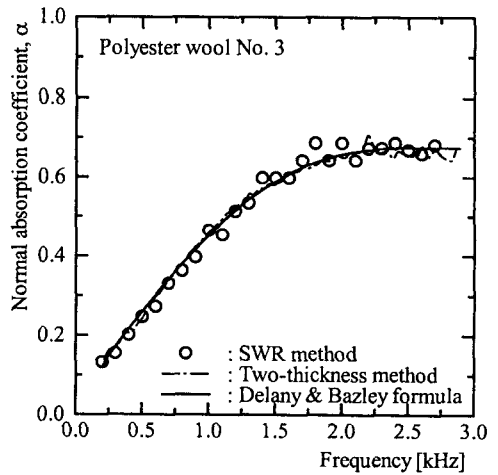
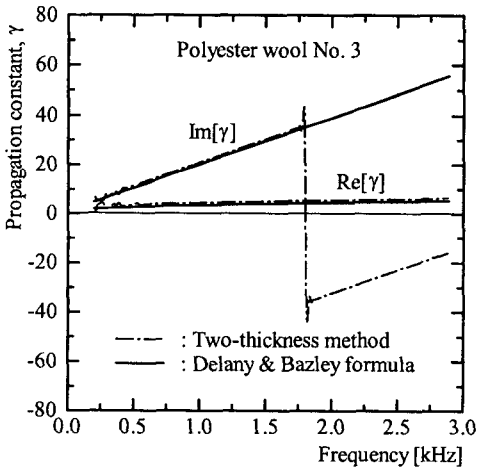
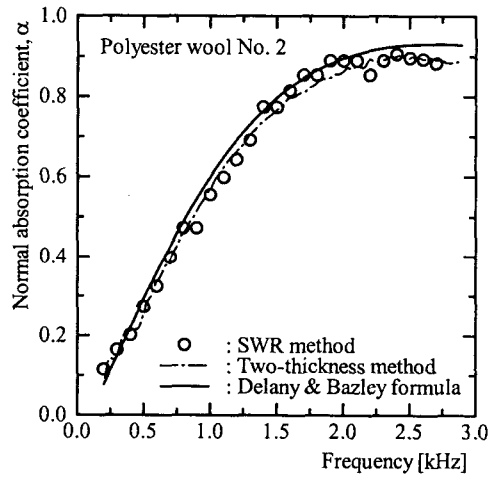
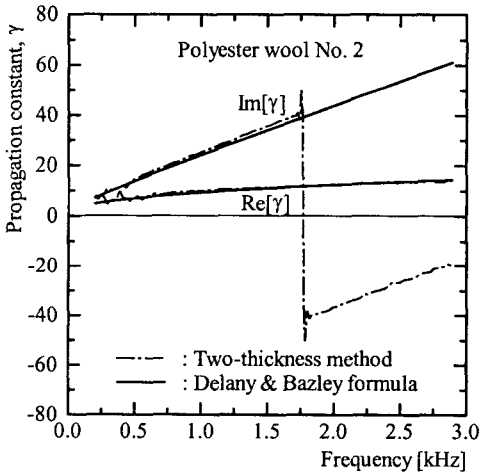
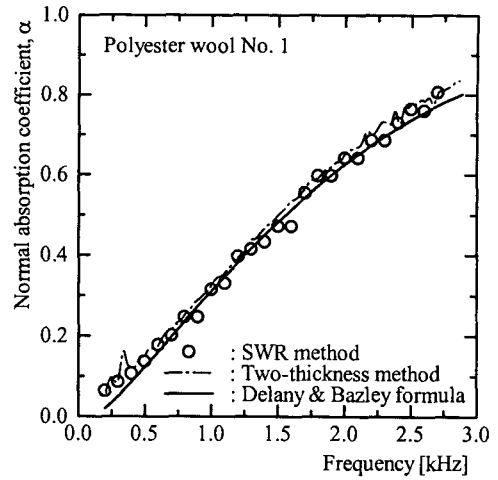
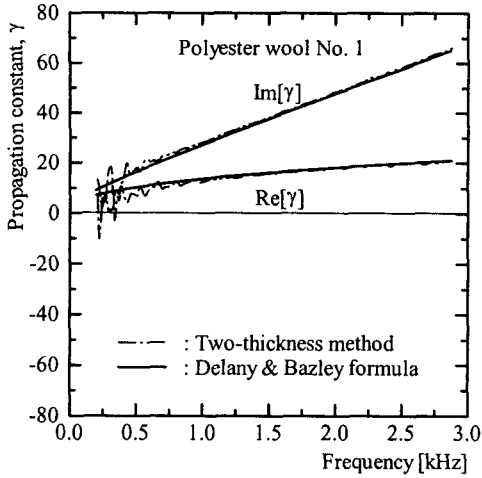


Fig. 6 Comparison between measured and calculated propagation constants of polyester sound absorbing materials.

Fig. 7 Comparison between measured and calculated absorption coefficients of polyester sound absorbing materials.

보면 흡음계수는 주파수 증가에 따라 계속하여 증가하는 경향을 갖는다. 이와 같은 흡음계수의 증가추세는 No. 1 의 전파상수에 대한 결과추세와도 잘 일치한다. 그러나 흡음시료 No. 2 에 대한 흡음계수 결과에서는 주파수증가에 따라 흡음계수가 증가하다가 1760Hz 근처에서 포화상태로 되는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 6 에 도시된 No. 2 에 대한 전파상수의 결과토의에서도 언급한 바 있듯이 1760Hz 근처에서 전파상수의 위상값이 반전되기 때문이다. 또 흡음시료 No. 3 에 대한 결과에서도 No. 2 와 유사한 경향을 보이며, 대략 1800Hz 부터 흡음계수값이 포화된다. 특히 No. 2 와 비교하여 흡음계수값의 최대크기가 작은 것은 Fig. 5 와 Fig. 6 에 도시된 No. 3 에 대한 특성임피던스와 전파상수의 실수부 크기가 다른 두 경우의 흡음시료와 비교하여 작기 때문이다. 이상과 같이 흡음시료의 흡음계수값은 특성임피던스와 전파상수의 실수값에 좌우되며, 특히 흡음계수의 최대값은 전파상수의 위상변화와 매우 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 폴리에스테르 흡음재의 음향특성인 특성임피던스와 전파상수 그리고 흡음계수를 Two-thickness method 로 측정하고 Delany 와 Bazley 의 경험식을 이용하여 계산하였다. 측정결과와 계산결과와의 비교고찰을 통하여 다음의 결과를 얻었다.

- 1) 폴리에스테르 흡음시료의 고유유동저항값은 체적밀도와 매우 밀접한 관련이 있으며, 레이놀즈수의 증가에 따라 선형증가하는 경향을 갖는다.
- 2) Delany 와 Bazley 의 경험식으로 구한 폴리에스테르 흡음시료의 특성임피던스, 전파상수의 실수부 그리고 흡음계수는 Two-thickness method 로 측정한 결과와 비교적 잘 일치하였다. 그러나 Delany 와 Bazley 의 경험식으로 구한 전파상수의 위상(허수부)은 흡음시료의 두께가 입사음의 1/4 파장과 같거나 작은 범위에서만 Two-thickness method 로 구한 결과와 잘 일치하였다.
- 3) 흡음시료의 흡음계수의 크기는 특성임피던스와 전파상수의 실수값에 좌우되지만, 최대값은 전파상수의 위상변화를 나타내는 허수값과 매우 밀접한 관련이 있음을 알았다

## 후 기

본 연구수행에 필요한 폴리에스테르 흡음재를 지

원해 준 SK 케미칼㈜의 관계자에게 감사를 표합니다.

## 참고문헌

- (1) Allard, J.F., and Champoux, Y., 1992, "New Empirical Equations for Sound Propagation in Rigid Frame Fibrous Materials", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 91, No. 6, pp. 3346~3353.
- (2) Allard, J.F., Champoux, Y., and Depollier, C., 1987, "Modelization of Layered Sound Absorbing Materials with Transfer Matrices", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 82, No. 5, pp. 1792~1796.
- (3) 황철호, 정성수, 은희준, 1997, "흡음재의 특성 임피던스와 전파상수의 새로운 결정방법" 한국소음진동공학회지, 제 7 권, 제 5 호, pp. 781-787.
- (4) Delany, M.E., and Bazley, E.N., 1970, "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials", *Applied Acoustics*, Vol. 3, pp. 105~116.
- (5) Scott, R.A., 1945, "An Apparatus for Accurate Measurement of the Acoustic Impedance of Sound-Absorbing Materials", *Proc. Phys. Soc. London*, Vol. 58, Pt. 3, pp. 253~264.
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) Brown, R.L., and Bolt, R.H., "The Measurement of Flow Resistance of Porous Acoustic Materials", Vol. 13, No. 4, pp. 337~344.
- (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.