

〈論 文〉

# 플라스틱 폼의 음향특성 조사

## A Study on the Acoustic Properties of the Reticulated Plastic Foams

정 성 수\* · 황 철 호\*

Sung-Soo Jung and Cheol-Ho Hwang

(1996년 4월 19일 접수 ; 1996년 5월 23일 심사완료)

**Key Words :** Plastic Foam(플라스틱 폼), Characteristic Impedance(특성 임피던스), Propagation Constant(전파상수), Flow Resistivity(유동저항), Sound Absorption Coefficient(흡음계수)

### ABSTRACT

The absorption coefficients of 3 largely reticulated urethane foams are measured by transfer function method which uses two microphones in an impedance tube. Based on the previously published data, the new modified empirical equations for predicting the characteristic impedance and propagation constant of the largely reticulated urethane foams are developed. Comparison is made between the measured data and the predicted data, based on the previously published equations and the new equation. Good agreement of the absorption coefficient between the measured and predicted data by the new modified empirical equation has been obtained.

### 1. 서 론

각종 방음시설이나 소음저감을 위한 대표적인 흡음재로는 유리솜(glass wool)과 암면(mineral wool)을 들 수 있다. 그러나 최근들어 이들 흡음재에 대한 인체 유해성 여부가 대두됨에 따라 이에 대한 사용제한 및 처리방법에 대한 논의와 함께 대체 물질에 대한 관심이 높아지고 있다<sup>(1,2)</sup>. 현재 대체 물질로는 플라스틱 폼 종류인 우레탄 폼(urethane foam)을 대표적으로 들 수 있으나 유리솜이나 암면에 비해 난연성이 부족하며, 가격도 상당히 비싼 편이어서 아직까지는 보편화되지 못하고 제한적으로 사용되고 있다.

플라스틱 폼에 대한 음향학적 연구는 유리솜이나 암면과 같은 섬유물질에 비해 연구가 늦게 시작되어 1982년에 Lambert가 체계적인 시도를 하였고<sup>(3~5)</sup> Allard 등<sup>(6)</sup>이 확장을 시켰으나 아직도 충분한 연구가 이루어지지 못한 상태이다. 한편 Delany와 Bazley가 유리솜과 암면의 음향특성에 대해 적절한

실험식<sup>(7)</sup>을 확립한 것처럼 우레탄 폼에 대해서도 실험식을 만들기 위한 몇몇 시도가 있었다. Wu<sup>(8)</sup>, Cummings와 Beadle<sup>(9)</sup> 등이 발표한 이 실험식들은 Delany와 Bazley의 실험식처럼 시료의 유동저항(flow resistivity)을 직접 측정하고 시료의 특성 임피던스와 전파상수를 주파수와 유동저항에 대한 지수함수로 표현한 것이다. 그러나 이 실험식들은 적용 가능한 유동저항의 범위가 서로 다르고 한정되어 있어서 우레탄 폼에 일반적으로 적용하기에는 문제점이 있었다.

본 연구에서는 적용범위가 서로 다른 Wu와 Cummings등의 우레탄 폼에 대한 측정결과를 이용하여 비교적 잘 열려진 셀(opened-cell) 구조의 우레탄 폼에 일반적으로 적용할 수 있는 새로운 실험식을 도출하였다. 또한 도출된 실험식의 타당성 검증 및 우레탄 폼의 흡음특성 평가를 위해 체적밀도가 서로 다른 세 가지 우레탄 폼에 대해 흡음계수를 측정하고 실험식과 비교하였다.

### 2. 표면 임피던스와 흡음계수

Fig. 1과 같이 임피던스 관내에 시료를 설치한 후

\*정회원, 한국표준과학연구원 음향·진동그룹

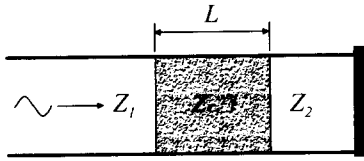


Fig. 1 Surface impedance of a single layer material in the impedance tube.

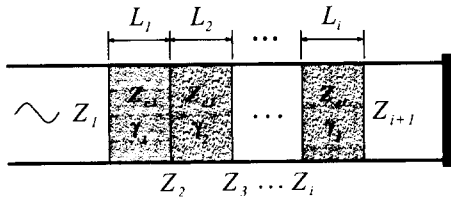


Fig. 2 Surface impedance of a multi-layer material in the impedance tube.

시료에 수직으로 평면파를 입사시키는 경우 두께가  $L$ 인 시료 전면에서의 표면 임피던스  $Z_1$ 은 다음 식으로 나타낼 수 있다<sup>(10)</sup>.

$$Z_1 = Z_c \frac{Z_2 \cosh \gamma L + Z_c \sinh \gamma L}{Z_2 \sinh \gamma L + Z_c \cosh \gamma L} \quad (1)$$

여기서  $Z_c$ 는 시료 자체의 특성 임피던스,  $Z_2$ 는 시료 후면의 표면 음향 임피던스이며,  $\gamma$ 는 전파상수이다. 일반적으로 특성 임피던스  $Z_c$ 와 전파상수  $\gamma$ 는 복소량이다.

시료 바로 뒤에 강체를 설치한 경우에는  $Z_2$ 가 무한대가 되므로 식 (1)은 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$Z_1 = Z_c \coth \gamma L. \quad (2)$$

시료가 단일 구조가 아니라 Fig. 2와 같이 다층 구조를 가지고 있는 경우 식 (1)을 각각의 층에 대해 연속적으로 적용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_i = Z_{ci} \frac{Z_{i+1} \cosh \gamma_i L_i + Z_{ci} \sinh \gamma_i L_i}{Z_{i+1} \sinh \gamma_i L_i + Z_{ci} \cosh \gamma_i L_i} \quad (3)$$

여기서  $i$ 는  $i$ 번째 층을 나타낸다.

만일 다층 구조에서  $i$ 번째 층이 시료가 아닌 공기 층이라면  $Z_{ci}$ 를 공기의 밀도  $\rho_0$ 와 공기 중에서의 음속  $c_0$ 의 곱인 공기의 임피던스  $Z_0 (= \rho_0 c_0)$ 로,  $\gamma$ 를  $j k$  ( $j = \sqrt{-1}$ ,  $k = \omega / c_0$ )로 대체하면 된다. 따라서 시료의 특성 임피던스  $Z_c$ 와 전파상수  $\gamma$ 를 이론 또는 실험식으로 결정하게 되면 임의의 층 구조를 가진 시료 표면에서의 표면 임피던스를 결정할 수 있다.

한편 시료의 흡음계수  $\alpha$ 는 최종적인 표면 임피던스가  $Z_1$ 인 경우 다음 식으로 표시된다.

$$\alpha = 1 - |(Z_1 - 1) / (Z_1 + 1)|^2 \quad (4)$$

### 3. 시료의 음향특성 예측 실험식

시료의 흡음계수는 시료의 유동저항에 의존하는 특성 임피던스와 전파상수에 의해 결정되는데 Delany와 Bazley는 유리섬과 압면의 흡음계수를 적절히 기술할 수 있는 실험식을 만들었다. 이 실험식은 유동저항을 측정된 후 유동저항의 함수로 표현되어 있어 이 식을 이용하면 일반적인 유리섬과 압면에 대해서는 시료의 표면 임피던스나 흡음계수를 측정하여 측정값과 실험식을 비교함으로써 유동저항 값을 역으로 추정할 수 있다<sup>(11)</sup>.

그런데 우레탄 폼의 내부 구조는 유리섬이나 압면과 같은 섬유 조직과는 다르기 때문에 Delany와 Bazley의 실험식을 그대로 적용할 수가 없다. 따라서 Delany와 Bazley의 실험식을 이용하여 우레탄 폼의 음향학적 특성을 적절히 기술할 수 있는 실험식을 도출하기 위한 많은 시도가 있었는데 그 중에서도 Wu, 그리고 Cummings 등이 각각 기술한 실험식이 비교적 다양한 종류의 우레탄 폼을 기술할 수 있는 것으로 평가되고 있다. 그러나 이 두 실험식은 각기 대상으로 하고 있는 시료의 유동저항 값의 범위가 다른데 Cummings 등은 유동저항 값이 60~6,230 mks rayl/m로 유동저항 값이 중간크기 이하이고 완전히 열려진 구조의 12가지 시료를 사용하는데 비해 Wu는 2,900~24,300 mks rayl/m의 유동저항을 갖고 완전히 열려진 구조와 막이 있는 셀이 다소 포함된 15가지의 시료를 사용하였다.

따라서 유동저항 값이 중간대 이하인 Cummings 등의 실험값과 중간대 이상인 Wu의 실험값을 모두 사용하여 새로운 실험식을 만든다면 일반적인 우레탄 폼의 음향 특성을 잘 기술할 수 있을 것이다. 또한 유동저항을 직접 측정하지 않고 음향 임피던스 또는 흡음계수 측정값을 이용하여 실험식으로부터 시료의 유동저항 값을 역으로 산출할 수 있게 된다.

본 연구에서 도출할 시료의 특성 임피던스  $Z_c$ 와 전파상수  $\gamma$ 에 대한 예측 실험식을 다음과 같은 형태로 가정하자.

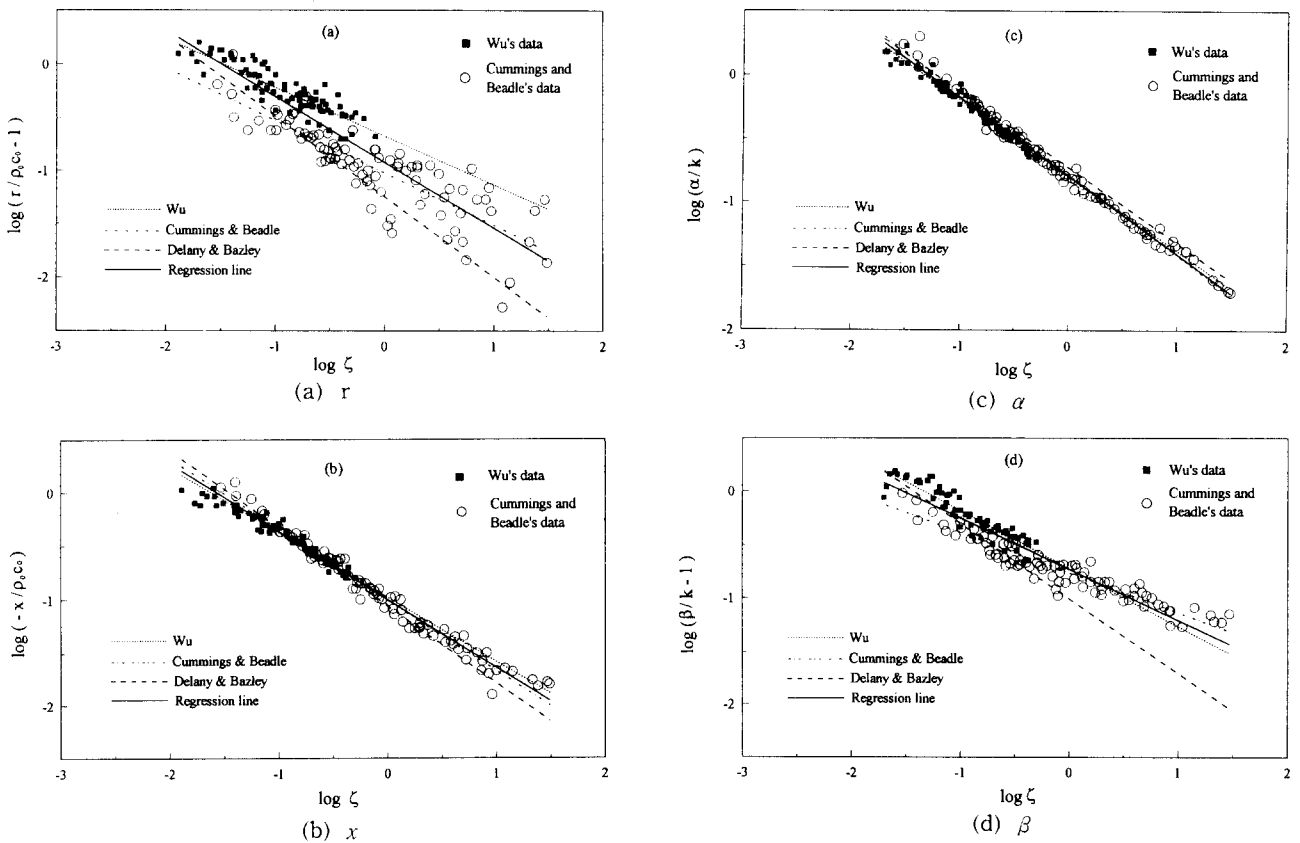
$$\frac{Z_c}{Z_0} = \frac{r}{\rho_0 c_0} + j \frac{x}{\rho_0 c_0} = 1 + c_1 \zeta^{c_2} - j c_3 \zeta^{c_4}, \quad (5-a)$$

$$\frac{\gamma}{k} = \frac{\alpha}{k} + j \frac{\beta}{k} = c_5 \zeta^{c_6} + j(1 + c_7 \zeta^{c_8}) \quad (5-b)$$

여기서  $\zeta$ 은  $\zeta = \rho_0 f / \sigma$  ( $\sigma$ : 유동저항,  $f$ : 주파수)이며,  $c_1 \sim c_8$ 은 본 연구에서 결정해야 할 미지수들이다.

**Table 1** Comparison of the coefficients of Wu's, Cummings and Beadle's, and Delany and Bazley's empirical formula with present modified model.

Coefficient	Wu	Cummings and Beadle	Delany and Bazley	Present study
$c_1$	0.212	0.0953	0.0571	0.120
$c_2$	-0.455	-0.491	-0.754	-0.618
$c_3$	0.105	0.0986	0.087	0.0993
$c_4$	-0.607	-0.665	-0.732	-0.635
$c_5$	0.163	0.167	0.189	0.161
$c_6$	-0.592	-0.636	-0.595	-0.614
$c_7$	0.188	0.174	0.0978	0.185
$c_8$	-0.544	-0.372	-0.700	-0.478



**Fig. 3** Measurements of the characteristic impedance  $Z_c$  and the propagation constant  $\gamma$  vs. predictions according to the new regression line

이제 Wu의 실험값과 Cummings와 Beadle의 실험값을 모두 포함하는 새로운 실험식을 도출하기 위해 이들의  $Z_c$ 와  $\gamma$ 에 대한 실험값들을 이용하여 최소자승오차법에 따라 식 (5)의 미지수  $c_i$ 들을 결정하였다. 이렇게 결정된 식 (5)의 계수  $c_1 \sim c_8$  값들과 함께 Wu, Cummings와 Beadle, Delany와 Bazley가

결정한 값들을 Table 1에 함께 나타내었다. 특성 임피던스  $Z_c$ 와 전파상수  $\gamma$ 에 대한 실험식을 도출함에 따라 식 (1) 또는 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 시료의 흡음계수를 이론적으로 결정할 수 있게 된다.

Fig. 3 (a) ~ (d)는 도출된 실험식으로 계산한 시료의 특성 임피던스와 전파상수를 나타낸 것이다. 비

교를 위해 Wu의 실험식과 측정값, Cummings와 Beadle의 실험식과 측정값, 그리고 유리솜과 암면에 적용해 온 Delany와 Bazley의 실험식을 같이 표시하였다. 그림에서 Wu의 측정값들은 Cummings 등의 측정값보다 좁은 영역에 걸쳐 분포되어 있음을 알 수 있는데 이것은 Wu가 유동저항  $\sigma$ 가 큰 시료에 대해 측정을 하였기 때문에  $\zeta = \rho f / \sigma$ 로부터  $\zeta$ 가 작은 영역에 분포하게 된 것이다. 그러나 다른 실험식과의 비교를 위하여 선을 확장하여 그렸다. 한편 Delany와 Bazley의 식은 Fig. 3(a)와 Fig. 3(d)에서 볼 수 있듯이 측정값으로부터 많이 벗어나 있어서 우레탄 폼에 대해서는 잘 맞지 않음을 알 수 있다. 한편 Fig. 3(a)에 나타난 측정값들이 나머지 Fig. 3(b)~(d)의 측정값들에 비하여 많이 분산된 것은 임피던스의 저항부분  $r$ 이 다른 양들에 비해 정확한 측정이 어렵기 때문이다.

한편 위에서 구한 새로운 실험식은 원리적으로는 유동저항이 24,300 mks rayl/m인 경우까지 적용이 가능하지만 시료에 막이 많이 포함되어 유동저항이 15,000 mks rayl/m 이상의 큰 값을 가지는 시료에 까지 적용하는데는 주의를 해야 한다. 이것은 큰 유동저항을 가지는 시료에 대한 실험값이 부족하기 때문에 그만큼 신뢰성이 부족하다. 따라서 본 연구에서는 신뢰성이 높은 영역인 유동저항이 중간값 이하의 시료에만 국한하여 시료의 흡음계수를 측정하고 새로운 실험식으로부터 구한 계산치와 비교하였다.

#### 4. 흡음계수의 측정 및 분석

##### 4.1 흡음계수의 측정

흡음계수는 두 마이크로폰을 이용한 ASTM E 1050-90 표준 방법에 따라 시험하였으며, 시험장치는 Fig. 4와 같다. 시험할 시료는 임피던스 관의 스피커 맞은 편 한쪽 끝에 설치하며, 이동가능한 피스톤을 이용하여 시료 뒤에 적절한 공기 층이 형성되게 할 수 있다. 임피던스 관은 내경 10 cm와 2.9 cm의 두 종류를 사용하여 주파수 구간 100~6,000 Hz까지 실험하였다. 관내 평면파가 깨지는 지름 모드에 의한 한계 주파수가 큰 관의 경우 약 2,000 Hz이고, 작은 관이 약 6,900 Hz이므로 본 실험에서는 100~1,500 Hz 구간은 큰 관을 사용하고, 1,500~6,000 Hz 구간은 작은 관을 사용하였다. 마이크로폰은 위상보정된 두 개의 1/4인치 마이크로폰 B & K 2633을 사용하였으며, 설치 위치는 큰 관의 경우 시료로부터 10 cm, 15 cm 떨어진 곳에 각각 한

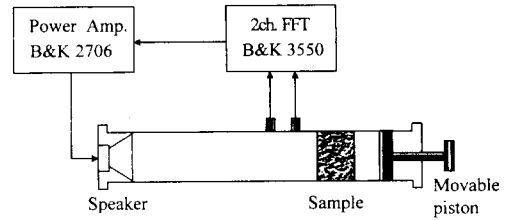


Fig. 4 Experimental set-up.

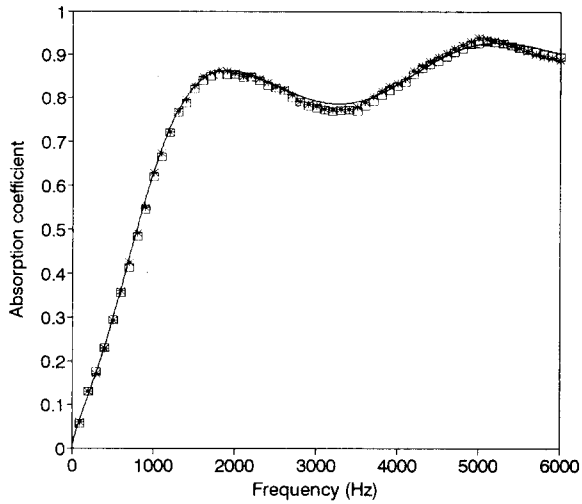
개씩 설치하였으며, 작은 관의 경우는 3.5 cm와 5.5 cm 떨어진 곳에 각각 설치하였다.

마이크로폰간의 음압과 위상의 보정은 두 마이크로폰 간의 위치-교환-방법(sense switching method)<sup>(12)</sup>로 보정하였으며, 측정 오차를 줄이기 위해 출력 스펙트럼의 평균횟수를 큰 관은 100회, 작은 관은 200회 수행하였다.

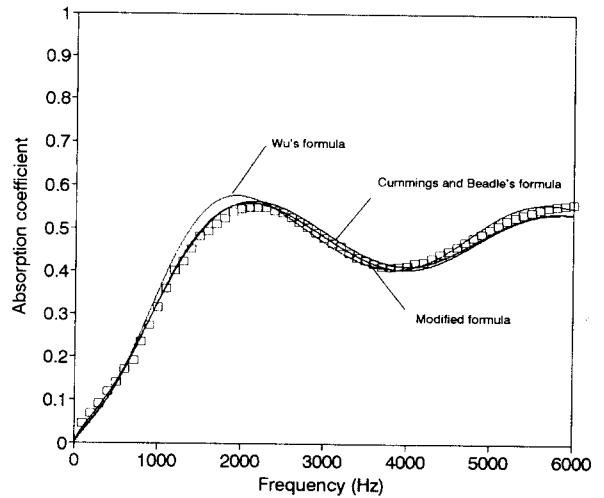
시료는 우레탄 폼으로 체적밀도가 각각 4 kg/m<sup>3</sup>, 5 kg/m<sup>3</sup>, 32 kg/m<sup>3</sup>인 3종류를 선택하였는데 앞의 두 시료는 잘 열려진 구조를 가지고 있으며, 체적밀도가 32kg/m<sup>3</sup>인 시료는 막이 형성된 셀이 미소하게 포함되어 있다. 실험은 임피던스 관을 이용하여 먼저 우레탄 폼의 등방성(isotropic) 여부를 살펴보았으며, 시료 뒤에 강체를 둔 경우와 시료 뒤에 적당한 공기 층을 둔 경우 그리고 시료의 두께에 따른 흡음계수를 측정하였다. 이들 흡음계수의 측정값들을 앞서 구한 실험식에서 유동저항 값을 적절히 선택함으로써 측정값을 잘 기술할 수 있는지를 확인하였고, 실험식에 의한 계산 값과 실험치의 오차가 최소화된 경우의 유동저항 값을 구하였다.

##### 4.2 측정 결과 및 분석

우레탄 폼 시료의 흡음계수를 측정하기에 앞서 먼저 시편을 자르는 방향에 따른 영향 즉, 등방성(isotropy)에 대한 조사가 필요하다. 일반적으로 유리솜이나 암면은 시료면에 음이 입사하는 각도에 따라 흡음계수가 영향을 받는 이방성(anisotropy) 재료이다. 우레탄 폼의 등방성 여부를 조사하기 위해 체적밀도가 32 kg/m<sup>3</sup>인 시료를 수직방향과 수평방향으로 두께 4.5 cm로 자른 후 각각의 시편에 대해 흡음계수를 측정하였다. Fig. 5에서 □와 \*는 각각 수직방향과 수평방향으로 절단한 시편에 대한 측정결과를 나타낸 것이며, 실선으로 표시한 값은 본 논문에서 도출된 실험식으로부터 구한 흡음계수를 나타낸 것이다. 실험식으로부터의 결과에 의하면 이 시료의 유동저항  $\sigma$ 는 3,500 mks rayl/m로 추정된다. 그림으로부터 두 측정값이 측정 주파수 범위에 대해



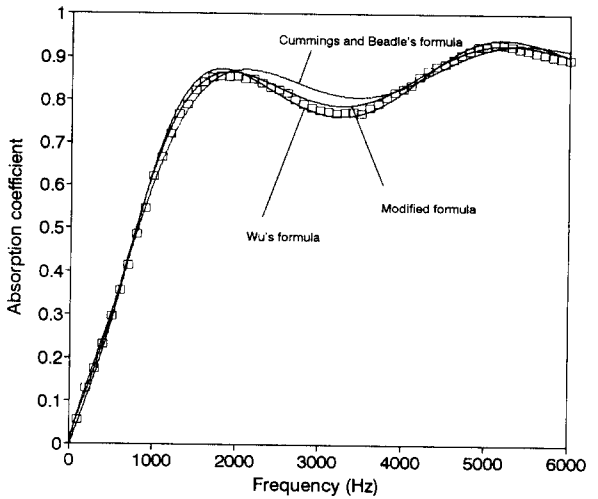
**Fig. 5** A comparison between the measured absorption coefficient of a 4.5 cm thick sample of urethane foam (bulk density = 32 kg/m<sup>3</sup>) and the predicted values(-), based on the present new empirical equation ( $\sigma=3,500$  mks rayl/m). Two samples were tested, which were cut in different direction to the surface of the urethane foam.



**Fig. 6** A comparison between the measured absorption coefficient of a 2.5 cm thick sample of urethane foam (bulk density 5 kg/m<sup>3</sup>) with 2.3 cm air gap and the predicted values, based on the Wu's, Cummings and Beadle's, and the new modified empirical formula ( $\sigma=1,500$  mks rayl/m).

거의 일치함을 알 수 있으며, 이로부터 우레탄 폼이 음향학적으로 등방성 매질이며 흡음계수 측정을 위한 시료 제작시 시료를 자르는 방향은 문제가 되지 않음을 알 수 있다.

다음은 Wu, Cummings와 Beadle의 실험식과 본 연구에서 제안한 실험식과의 비교를 위해 체적밀도 5 kg/m<sup>3</sup>, 두께 2.5 cm인 시료를 대상으로 시료 위의 공기 층이 2.3 cm인 경우에 대한 흡음계수를 측정하여 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 세 실험식 모두 유동저항이 1,500 mks rayl/m인 경우 측정값을 잘 기술하고 있으나 Wu의 실험식은 다소 오차를 보이고 있다. 이것은 Wu의 실험식이 유동저항 2,900~24,300 mks rayl/m에 대한 것으로 실험에 사용한 시료의 유동저항값이 해당범위를 벗어날 때 때문인 것으로 생각된다.



**Fig. 7** A comparison between the measured absorption coefficient of a 4.5 cm thick sample of urethane foam (bulk density 32 kg/m<sup>3</sup>) with no air gap and the predicted values, based on the Wu's, Cummings and Beadle's, and the new modified empirical formula ( $\sigma=3,500$  mks rayl/m).

Wu의 실험식과 Cummings와 Beadle의 실험식이 대상으로 하는 유동저항 범위 중에서 겹치는 범위에서의 특성 비교를 위해 체적밀도가 32 kg/m<sup>3</sup>, 두께 4.5 cm인 시료에 대해 공기층을 두지 않고 실험한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 유동저항 값은 3,500 mks rayl/m이며, 그림에서 Wu의 실험식과 제안한 실험식은 측정값을 잘 기술하지만 Cummings의 실험식은 오차를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서

본 실험으로부터 Cummings의 실험식은 낮은 유동저항 값에 대해, Wu의 실험식은 중간 크기의 유동저항 값에 대해 유용하다고 할 수 있다. 그러나 제안한 실험식은 유동저항 값이 낮은 경우와 중간 크

기의 경우 모두에 대해 측정값을 잘 기술할 수 있음을 볼 수 있었다.

본 논문에서 도출된 실험식의 타당성 검증을 확인

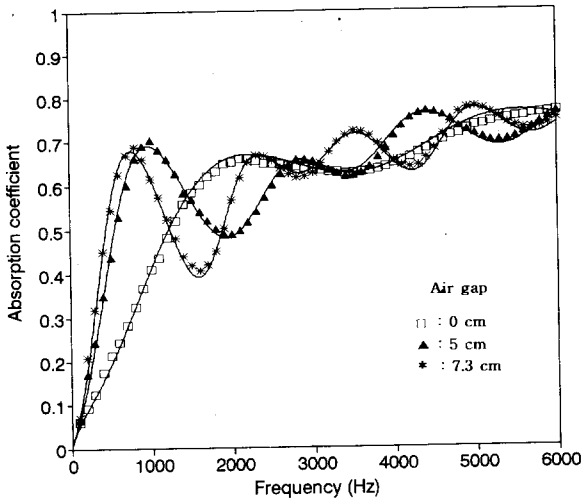


Fig. 8 A comparison between the measured absorption coefficient of a 4.7 cm thick sample of urethane foam (bulk density  $4 \text{ kg/m}^3$ ) with various air gap ( $\square$ , 0 cm;  $\blacktriangle$ , 5 cm;  $*$ , 7.3 cm) and the predicted values (—), based on the present modified empirical equation ( $\sigma=1,400 \text{ mks rayl/m}$ ).

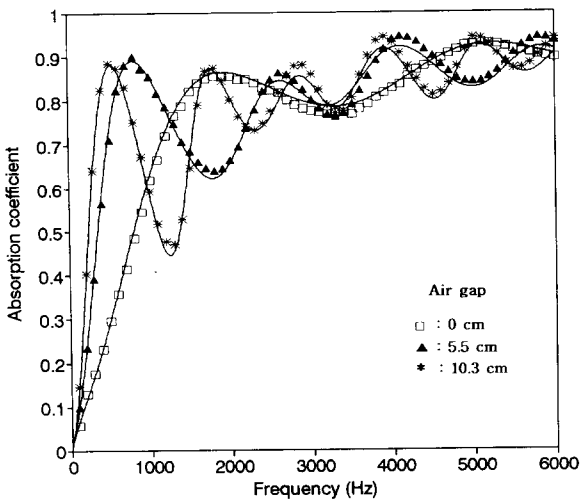


Fig. 9 A comparison between the measured absorption coefficient of a 4.5 cm thick sample of urethane foam (bulk density  $32 \text{ kg/m}^3$ ) with various air gap ( $\square$ , 0 cm;  $\blacktriangle$ , 5.5 cm;  $*$ , 10.3 cm) and the predicted values (—), based on the present modified empirical equation ( $\sigma=3,500 \text{ mks rayl/m}$ ).

하기 위해 다양한 체적밀도와 두께를 가진 우레탄 폼에 대해 측정값과 이론값을 비교하였다. Fig. 8은 체적밀도가  $4 \text{ kg/m}^3$ 이고 두께가 4.7 cm인 시료의 측정값과 이론값을 나타낸 것으로 그림에서  $\square$ ,  $\blacktriangle$ ,  $*$ 는 각각 시료 뒤의 공기 층을 0 cm, 5 cm, 7.3 cm로 한 경우에 대한 측정값이며, 실선은 유동저항을 1,400 mks rayl/m로 한 경우 실험식으로부터 계산한 이론값이다. 그림으로부터 측정값과 이론값이 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 9는 체적밀도  $32 \text{ kg/m}^3$ , 두께 4.5 cm의 시료에 대한 것으로  $\square$ ,  $\blacktriangle$ ,  $*$ 는 각각 시료 뒤의 공기 층이 0 cm, 5.5 cm, 10.3 cm인 경우에 대한 측정값이고 실선은 유동저항이 3,500 mks rayl/m일 때 실험식에서 계산된 이론값인데 두 값이 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 10은 체적밀도가  $32 \text{ kg/m}^3$ 인 시료에 대해 시편 두께가 각각 2.2 cm ( $\square$ ), 4.5 cm ( $\blacktriangle$ ), 6.7 cm ( $*$ )인 경우에 대한 결과를 나타낸 것으로 역시 유동저항이 3,500 mks rayl/m인 경우 측정값과 이론값이 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 10에 의하면 시료의 두께가 두꺼울수록 흡음계수가 커지며, 특히 저주파수 영역에서의 흡음 증가가 두드러짐을 알 수 있다.

한편 두께를 변화시키지 않고도 저주파수 영역의 흡음율을 향상시키거나 특정 주파수 영역의 흡음율

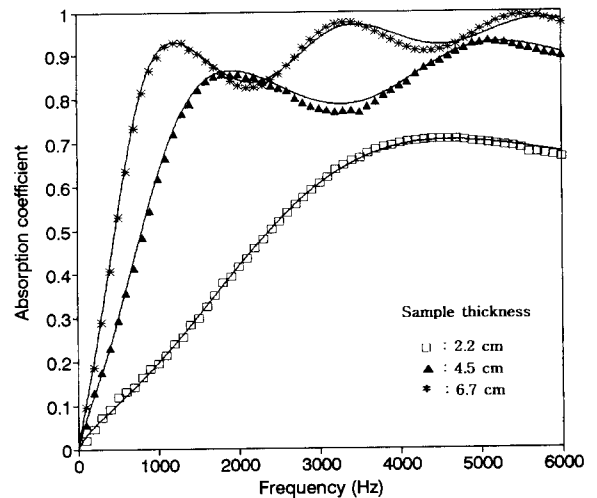


Fig. 10 A comparison between the measured absorption coefficient of various thick samples ( $\square$ , 2.2 cm;  $\blacktriangle$ , 4.5 cm;  $*$ , 6.7 cm) of urethane foam (bulk density  $32 \text{ kg/m}^3$ ) and the predicted values (—), based on the present modified empirical equation ( $\sigma=3,500 \text{ mks rayl/m}$ ).

을 높이려면 시료 뒤에 적절한 공기 층을 두면 된다. 이것은 Fig. 8, 9에서 볼 수 있듯이 공기 층으로 인한 공명을 이용하는 것인데, 시료가 얇은 강체인 경우는 공기층의 두께가 음 파장( $\lambda$ )의 1/4의 홀수배일 때 즉 공명 주파수가  $f_c = c_0/4L$ 의 홀수 배에서 발생하지만 본 시료는 일정한 부피와 유연한 구조를 가지고 있어 관성질량의 증가 효과로 위의  $f_c$ 보다도 낮은 주파수에서 공명이 발생하게 됨을 볼 수 있다. 또한 공기 층을 둔 경우 저주파수 영역은 흡음이 향상되나 부분적으로 흡음율이 공기 층이 없는 경우보다도 저하되는 주파수 영역이 존재하게 됨을 볼 수 있다.

끝으로 본 연구에서 도출된 실험식이 비록 200~2,000 Hz까지의 주파수 범위에 대한 Wu와 cummings 등의 실험값을 이용한 것이지만 본 실험을 통해서 주파수 구간 100~6,000 Hz까지의 비교적 넓은 주파수 구간에까지 적용이 가능함을 확인하였다.

## 5. 결 론

적용 가능한 유동저항 범위가 각각 다른 Wu의 측정값과 Cummings와 Beadle의 측정값을 이용하여 넓은 유동저항 범위의 우레탄 폼을 해석할 수 있는 새로운 실험식을 도출하였다. 또한 도출된 실험식의 검증을 위해 비교적 잘 알려진 구조를 가진 세 가지 시료에 대해 흡음계수를 측정하고 실험식과 비교하였다. 적절한 유동저항 값의 선택으로 도출된 실험식이 측정값을 잘 기술할 수 있음을 확인하였고 Wu와 Cummings 등의 실험식에 비해 보다 넓은 주파수 범위에서의 적용이 가능함을 확인하였다. 또한 시료의 체적밀도가 증가할수록 유동저항 값이 증가하며, 시료의 두께가 증가할수록 전반적인 흡음계수의 향상, 특히 저주파수 영역에서의 향상을 볼 수 있었다. 한편 시료의 두께 변화 없이 시료 뒤에 적절한 공기 층을 두므로써 저주파수나 특정 주파수 영역에서의 흡음율을 높일 수 있음을 알 수 있었으며, 우레탄 폼은 유리솜이나 암면과 달리 등방성 재료임을 확인하였다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단과 한국표준과학연구원의 Post-Doc. 지원금으로 연구되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) National Occupational Health and Safety Commission, National Standard for Synthetic Mineral Fibers. Australian Government Publishing Service, Canberra, 1990.
- (2) Nilsson, A. C. and Rasmussen, B., 1985, "Sound Absorption Properties of a Perforated Plate and Membrane Construction," *Acustica*, Vol 57, pp. 139~148.
- (3) Lambert, R. F., 1982, "The Acoustical Structure of Highly Porous Open-Cell Foams," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 72, pp. 879~887.
- (4) Lambert, R. F., 1982, "Propagation of Sound in Highly Porous Open-Cell Foams," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 73, pp. 1131~1138.
- (5) Lambert, R. F., 1982, "Surface Acoustic Admittance of Highly Porous Open-Cell Foams," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 73, pp. 1139~1146.
- (6) Allard, J. F., Aknine, A. and Depollier, C., 1986, "Acoustical Properties of Partially Reticulated Foams with High and Medium Flow Resistance," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 79, pp. 1734~1740.
- (7) Delany, M. E. and Bazley, E. N., 1970, "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials," *Applied Acoustics*, Vol. 3, pp. 105~116.
- (8) Wu, Q., 1988, "Empirical Relations between Acoustical Properties and Flow Resistivity of Porous Plastic Open-Cell Foam," *Applied Acoustics*, Vol. 25, pp. 141~148.
- (9) Cummings, A. and Beadle, S. P., 1993, "Acoustic Properties of Reticulated Plastic Foams," *J. Sound Vib.*, Vol. 175, pp. 115~133.
- (10) Zwicker, C. and Kosten, C., 1949, *Sound Absorbing Materials*, Elsevier, New York.
- (11) Woodcock, R. and Hodgson, M., 1992, "Acoustic Methods for Determining the Effective Flow Resistivity of Fibrous Materials," *J. Sound Vib.*, Vol. 153, pp. 186~191.
- (12) Chung, J. Y. and Blaser, D. A., 1980, "Transfer Function Method of Measuring in-Duct Acoustic Properties. I. Theory," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 68, pp. 907~913.