

관내법 시험시 Air-Damping이 흡음율에 미치는 영향 고찰

정 완섭^(*), 서 재갑^{*}, 황 재호^{**}

Investigation on the Effects of Air-Damping on the Sound Absorption Coefficients Measured in the Tube

Wan-Sup Cheung^(*), Jae-Gap Suh^{*}, Jae-Ho Hwang^{**}

Abstract

This paper raises issues in testing the absorption coefficients of sound-absorptive samples in the standing wave tube according to the Korean standard of KS F 2814. The code does not consider any effect of air-damping during test. This limitation has been shown to yield much variation of sound absorption coefficients for recent sample tests whose coefficients are less than 10 %. An improved method of calculating the sound absorption coefficients is proposed in this work and its effectiveness in real test is also illustrated. Finally, the guide line for the modification of our national standard code KS F 2814 is suggested for the future.

1. 서론

관내법을 이용한 흡음재의 특성분석은 국내 자동차 및 가전 제품 관련 회사, 그리고 건설 시공 회사의 요구사항이며 특히, 자동차 관련 업계의 시편은 흡음율이 낮은 금속재와 흡음성 복합재의 다층 구조를 갖는다.

일반적으로 시행하고 있는 관내법 흡음율 시험은 국가표준 규격인 KS F 2814 (1978)^[1] 그리고 관련 미국 표준 규격인 ASTM C 384 (1990)^[2]를 이용하여 시행하고 있다. 전자의 표준안은 air-damping 영향을 전혀 고려하지 않지만, ASTM C384 (1990)는 air-damping을 고려하여 흡음계수를 시험하도록 하고 있다. 이들 두 시험 방법에 따른 결과의 차이점이 본 논문에서 고찰된다 특히, 최대 흡음계수가 10 % 이하인 경우, air-damping 영향을 고려한 ASTM C 384 (1990)의 시험 결과가 KS에 의한 시험 결과보다 2 ~ 5 % 정도 흡음율이 낮다.

2 절에서는 air-damping이 정재파 비에 미치는 영향의 이론적 고찰과 더불어 실제 흡음 시험에서 간단히 사용할 수 있는 근사화된 계산식을 새로이 제안한다. 제 3 절에서는 정재파 비에 의한 흡음율 시험의 결과와 더불어 본 논문에서 제안하고 있는 계산식의 오차에 대한 실험적 결과를 보인다. 끝으로, 제 4 절에서는 본연구의 주요 내용의 요약과 향후우리의 표준안에 대한 방안을 제시한다

2. Air-Damping이 정재파 비에 미치는 영향의 이론적 고찰

정재파 시험 장치 (standing wave apparatus)의 관 내경 D가 구동 음원의 파장 λ보다 적을 경우 ($D < 0.6\lambda$), 관내 음압은 Fig. 1과 같이 흡음재 표면 ($x = 0$)에서의 입사파 $P_{I,0}$ 와 반사파 $P_{R,0}$ 로 구성된다.

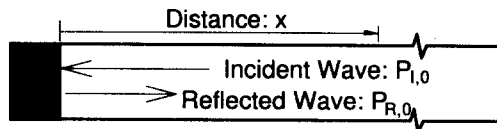


Fig. 1. Sound field in the standing wave tube.

위의 관내 정재파는 다음 식으로 표현된다.

$$P(x, f) = P_{I,0} \cdot e^{j\kappa x} + P_{R,0} \cdot e^{-j\kappa x} \quad (1)$$

윗식에서 음파 계수인 $\gamma = j \cdot (\kappa + \delta) + \delta$ 이며, κ 는 파수(wave number), 그리고 δ 는 공기의 damping 계수^[3]로 $\delta = 0.022 \cdot \sqrt{f} / (C_0 \cdot D)$ 이다 (C_0 = 음파 속도, f = 음원의 주파수). 식 (1)과 같은 관내 정재파를 이용한 흡음재 시험은 관내 최대 및 최소 음압의 측정치로부터 식 (2)와 같이 정재파 비 (Standing wave ratio, SWR), 즉, x_{max} 에서의 최대치 $|P(x, f)|_{max}$ 와 x_{min} 에서의 최소 음압 측정치 $|P(x, f)|_{min}$ 의 비를 계산한다.

* 한국표준과학연구원 음향진동 그룹
** 대전산업대학교 전자공학과

$$SWR = \frac{|P(x, f)|_{\max}}{|P(x, f)|_{\min}} = \frac{e^{\delta x_{\max}} + |R(f)| \cdot e^{-\delta x_{\max}}}{e^{\delta x_{\min}} - |R(f)| \cdot e^{-\delta x_{\min}}} \quad (2)$$

윗 식에서 공기의 damping 계수 $\delta = 0$ 인 경우, 관내에서 측정된 정재파 비는 측정 위치에 관계없이 일정함을 알 수 있다. 즉,

$$SWR|_{\delta=0} = \frac{1 + |R(f)|}{1 - |R(f)|} \quad (3)$$

표준 규격인 KS F 2814는 식 (3)의 공기의 damping이 없는 이상적인 결과에 국한되어 있음을 알 수 있다. 현재 한국표준과학연구원에서 사용중인 $D = 100$ mm 길이 1 m 인 관내법 장치에서, 음압 구동 주파수 $f = 630$ Hz 인 경우 공기의 damping에 의한 정재파 비의 변화를 Fig. 2에 제시하였다.

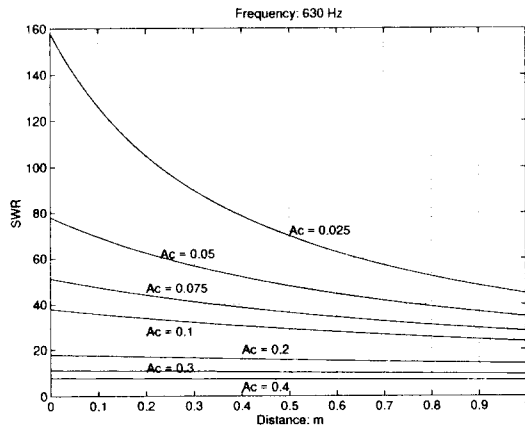


Fig.2. Variation of SWR (standing wave ratio) for different absorption characteristics: $Ac = \text{Sound absorption coefficient}$, $Ac = 1 - |R|^2$. ($R = \text{Reflection coefficient at the sample surface}$).

위의 결과에서 흡음율 Ac 가 0.1 이하인 경우 ($|R| \geq 0.948$), 관내 최대 및 최소 음압의 측정점 위치에 따라 정재파 비가 뚜렷한 차이를 보이고 있으며, 흡음재의 표면(distance $x = 0$)에서 멀어 질수록 정재파비 $SWR(x_{\max}, x_{\min})$ 는 감소되어 환산된 흡음율 $Ac(x_{\max}, x_{\min})$ 은 다음 식 (4)에서와 같이 증가하게 된다.

$$Ac(x_{\max}, x_{\min}) = \frac{4 \cdot SWR(x_{\max}, x_{\min})}{\{1 + SWR(x_{\max}, x_{\min})\}^2} \quad (4)$$

그러나, 흡음율이 관심 대역에서 0.4 이상인 경우, 공기 damping에 의한 영향은 미미함을 알 수 있다. 따라서, 공기의 damping에 의한 정재파 비의 변화는 흡음재 관내법 시험의 일차적 정밀도 영향 인자임을 명확히 알 수 있다. 특히, Fig. 1에서 확인된 바와 같이 흡음율이 0.1 이하인 시편인 경우, 우리의 표준 규격인 KS F 2814에 의한 시험 결과에 대한 측정 정밀도의 신뢰성이 매우 저하됨을 알 수 있다. 특히, 이러한 사실은 400 ~ 500 Hz 이하의 저주파수 대역에서 일반 흡음재의 흡음율이 0.1 이하일 경우, 공기의 damping에 의한 흡음 시험 결과에 대한 측정 정밀도의 신뢰성 저하가 수반됨을 알 수 있다.

이러한 공기 damping의 영향을 최소화하기 위한 방안을 소개한다. 우선, 표준과학연구원에서 사용중인 두 종류의 $\Phi 100$ mm, $\Phi 30$ mm 관에 대하여 식 (2)의 지수 함수의 1 차 근사화에 의한 계산 오차는 Table 1과 같이 오차를 무시할 수 있음을 알 수 있다.

Table 1. Approximates of exponential functions in equation (2).

주파수 Hz	계수 δ	$\Phi 100$ 관 :L=1 m		$\Phi 30$ 관 :L=0.3m	
		$e^{\delta L}$	$1+\delta L$	$e^{\delta L}$	$1-\delta L$
100	0.0064	1.0064	1.0064	---	---
400	0.0129	1.0130	1.0130	---	---
1000	0.0204	1.0206	1.0204	0.9939	0.9939
4000	0.0408	---	---	0.9879	0.9879

따라서, 관내 x_{\max} 과 x_{\min} 에서 측정된 최대 최소 음압의 비 $SWR(x_{\max}, x_{\min})$ 의 식 (2)를 근사화하여 정리하면 다음과 같다. 흡음재 표면의 반사계수 $|R(f)|$ 은

$$|R(f)| = \frac{(SWR - 1)(1 + \delta \cdot x_{\max})}{(SWR + 1)(1 - \delta \cdot x_{\min})} \quad (5)$$

이 되고 위의 식을 이용하여 흡음계수를 계산하면 정의식에 따라,

$$Ac(f) = 1 - |R(f)|^2 \quad (6)$$

이 된다. 근사화된 식 (5)와 (6)을 이용하여 관내법에 의한 흡음재의 시험을 본 연구원에서는 현재 시행 중에 있으며, 이러한 방법은 ASTM C 384 (1990)과 같은 국외 규격 또한 만족할 수 있다.

3. 실험결과 및 검토

관내법을 이용한 실험 장치의 개략적 구성은 Fig. 3에 보인 바와 같이 신호 발생단을 갖는 2 채널 주파수 분석기를 이용하여 구동 주파수에 대한

관내 최소 및 최대 음압을 측정하였으며, 각각의 최소 및 최대 음압점의 위치를 각각 기록하였다.

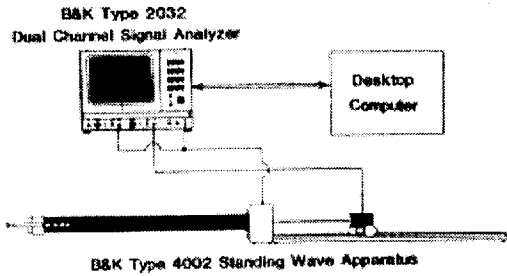


Fig. 3. Experimental setup

위의 실험 장치를 이용하여, 500 Hz에 대하여 두가지의 흡음 시편에서 얻은 관내 음압의 최대 최소 측정치를 Table 2는 보이고 있다.

Table 2. Measured voltage levels at the positions of minimum and maximum sound pressures in the standing wave tube.

Embossed Iron Plate (20 μ m color-painted)			Uretan Foam (t=50 mm, $\rho=30$ kg/m ³)		
x, mm	Min,V	Max,V	x, mm	Min, V	Max,V
173	0.0023	-----	96	0.214	-----
349	-----	0.349	269	-----	0.657
516	0.0032	-----	441	0.218	-----
685	-----	0.294	615	-----	0.656
858	0.0046	-----	783	0.221	-----

페인트된 철판의 최저 음압점의 측정 전압이 시편으로부터 멀어짐에 따라 약 2 배로 증가하는 경향을 명확히 관찰할 수 있으나, 발포 우레탄 시편의 최저 음압은 시편에서 멀어지더라도 그 변화의 정도는 매우 미약함을 알 수 있다. 이러한 결과는 2 절의 Fig. 2의 경향과 잘 일치됨을 보인다. 위 Table 2의 측정치로 부터 환산된 시편의 흡음율은 Table 3과 Table 4에 보이고 있다. 본 실험 결과에서 공기 damping을 고려하지 않는 표준규격 KS F 2814에 의한 평균 흡음율은 0.04이며, 현재 표준연 음향진동 그룹에서 평가하고 있는 평균 흡음율은 0.02로, 약 2 배의 흡음율 차이를 보이고 있다.

Table 3. Trend of Absorption Coefficients evaluated for each pair of neighbouring minimum and maximum sound pressure positions at 500 Hz: Embossed Iron Plate (20 μ m color-painted).

KRISS	R	0.992	0.991	0.995	0.991	0.993
A/V	Ac	0.016	0.018	0.010	0.017	0.02
KS F	R	0.985	0.979	0.979	0.984	0.982
2814	Ac	0.030	0.042	0.042	0.031	0.04

이는 흡음율이 낮은 경우 공기의 damping 효과를 고려하지 않을 경우 실제의 흡음율 보다 시험치가 높게 나타난다는 점을 확인 할 수 있다.

Table 4. Trend of Absorption Coefficients evaluated for each pair of neighbouring minimum and maximum sound pressure positions at 500 Hz: Uretan Foam (t=50 mm, $\rho=30$ kg/m³).

KRISS	R	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
A/V	Ac	0.739	0.745	0.742	0.745	0.74
KS F	R	0.51	0.50	0.50	0.50	0.50
2814	Ac	0.74	0.75	0.75	0.75	0.75

Table 4는 발포 우레탄의 시험 결과를 보이고 있다. 500 Hz에서 흡음율이 0.74 ~ 0.75 정도로 공기 damping 영향은 그의 관찰되지 않음을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 제 2 절에서 지적한 바와 같이 흡음율이 0.4 이상인 경우, 공기 damping이 음압 최저 치에 영향을 미치지 않기 때문으로 사료된다.

지금까지는 음압의 최소 및 최대 측정 지점에 따른 흡음계수의 차이에 대한 실험 결과를 소개하였다. 앞서 소개한 페인트가 입혀진 강판과 경량 콘크리트의 주파수 대역에 대한 흡음의 시험 결과를 Fig. 4 는 보이고 있다. 실선으로 그려진 결과는 공기의 damping을 고려한 경우이며, 점선으로 표시된 결과는 공기의 damping을 고려하지 않고 있는 KS F 2814의 시험 규격에 의한 흡음율 시험 결과를 각각 나타내고 있다. Fig. 4의 결과에서 공기의 damping을 고려한 경우가 보다 낮은 흡음율을 보이고 있으며, 주파수가 증가함에 따라 공기 damping을 고려한 흡음계수 와 이를 고려하지 않은 흡음계수의 차이가 보다 커지고 있음을 두가지 시편에서 확인할 수 있다. 특히, 630 Hz의 주파수 대역에서 공기의 damping에 의한 두 시편의 흡음계수의 차이가 가장 크게

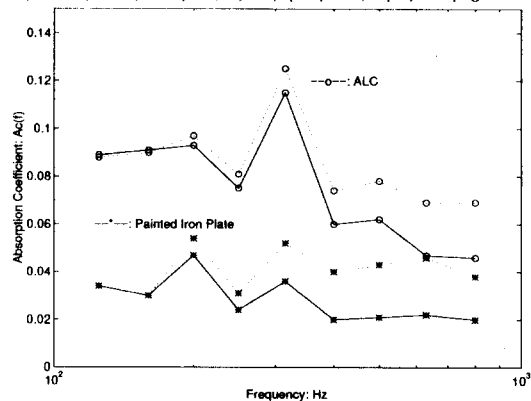


Fig. 4. Averaged absorption Coefficients of two sound absorbent samples: Solid line = KRISS Method and Dot line = KS F 2814 Code.

나타났으며, 공기의 **damping**을 고려한 경우 경량 콘크리트(ALC) 및 페인트된 철판의 흡음 계수는 각각 0.05와 0.02이며, 그리고 공기 **Damping**을 고려하지 않은 경우 두 흡음계수는 각각 0.07과 0.05로 나타났다.

이러한 결과는 공기 **damping**에 의한 흡음계수의 차이는 0.02 ~ 0.03 정도로 확인된다. 특히, 이러한 차이는 흡음율이 낮은 시편에 대하여 백분율을 이용한 오차 분석을 할 경우 본 연구원의 허용 시험 정밀도의 오차를 초과하는 경우가 발생하게 된다. 따라서, 제 2 절에서 보인 바와 같이 흡음율 $A_c(f) \leq 0.4$ 이하로 낮은 시편의 흡음계수 시험은 필히 공기 **damping**의 고려가 필요함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문은 현재 국가 표준 규격으로 채택하여 사용중인 관내법 시험규격인 KS F 2814 (1978)에서 발견되는 문제점, 즉, 흡음율이 0.4 이하의 흡음재 시편들의 시험 결과가 국외 관련 표준규격에 의한 흡음율 보다 높게 나타나는 문제점을 지적하고 있다. 이같은 문제점의 일차적인 원인 규명과 더불어 해결 방안으로 공기의 **damping** 효과를 고려한 시험 방안과 새로운 계산 식을 본 논문은 제안하고 있다. 그리고, 여러 시편에서 수집된 실험 결과들을 통하여 새로이 제안된 흡음율 환산 방법에 대한 타당성과 유용성을 입증하고 있다. 제안된 환산 방법은 미국의 관련 규격인 ASTM C 384 (1990)의 방법보다 계산 방법이 간단하여 현장에서의 활용도가 크게 기대된다. 물론, 시험 결과의 정밀도 또한 ASTM C 384의 정도를 유지할 수 있다.

향후 조속한 시일내 국가표준 시험 규격 KS F 2814 (1978)이 갖는 문제점과 적용의 한계점을 극복하기 위하여, 본 논문에서 제안된 방안이나 혹은 최근 확장된 국외 규격의 호환성을 유지할 필요성을 끝으로 지적하는 바이다.

참고 문헌

- [1] KS F 2814 (1978) 관내법에 의한 건축 재료의 수직 입사 흡음율 측정, 한국공업규격
- [2] ASTM C 384 (1990), Standard Test method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by the Impedance Tube Method, ASTM, PA, USA.
- [3] L. E. Linsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J.V. Sanders, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, NY:USA, 1982.