

< 논 문 >

관내법 시험시 Air-Damping 이 흡음계수에 미치는 영향 고찰

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

정 완 섭* · 서 재 갑* · 이 두 희* · 황 재 호**

Wan-Sup Cheung, Jae-Gap Suh, Doo-Hee Lee and Jae-Ho Hwang

(1997년 5월 19일 접수 : 1997년 8월 6일 심사완료)

Key Words : Sound Absorption Coefficient(흡음계수), Air-damping Effect(공기 감쇠), Standing Wave Apparatus(정재파 시험장치)

ABSTRACT

This paper raises issues in testing the absorption coefficients of sound-absorptive samples using the standing wave apparatus according to the Korean standard of KS F 2814. The standard code does not consider any effect of air-damping which is significant in testing relatively low sound-absorptive samples. 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 guideline for the modification of our national standard code KS F 2814 is proposed.

1. 서 론

관내법을 이용한 흡음재의 흡음계수 시험은 국내 자동차, 가전제품, 그리고 건설 시공 회사등에서 사용하는 흡음재들의 기본 평가 항목으로 현재 국내 표준 규격(KS F 2814, 1978)⁽¹⁾으로 그 시험 방법을 규정하고 있다. 그리고, 관련 국외 규격으로 미국 시험 규격인 ASTM C 384 (1990)⁽²⁾과 일본의 규격인 JIS A 1405 (1994)⁽³⁾를 이용하여 흡음계수 시험을 할 수 있다. 국내 표준 규격과 일본의 표준 규격은 공기 감쇠 영향(air-damping)을 전혀 고려하지 않지만, 미국의 규격 ASTM C384 (1990)는 이를 고려하여 흡음계수를 시험하도록 권장하고 있다. 본 논문에서는 공기의 음압 감쇠 현상이 흡음 시험의 음향학적 특성치에 미치는 영향에 대한 이론적 접근과 실험적 규명

을 통하여 국내외적 표준 시험 법들에 대한 특성 비교를 수행한다.

공기 감쇠 현상이 정재파 비에 미치는 영향의 이론적 고찰과 더불어 실제 흡음 시험에서 간단히 사용할 수 있는 근사화 된 계산식을 2 절에서 제안한다. 제 3 절에서는 정재파 비에 의한 흡음율 시험의 결과와 더불어 본 논문에서 제안하고 있는 계산식을 이용한 실험 결과들의 오차 분석을 수행한다. 끝으로, 제 4 절에서는 본 연구의 주요 내용의 요약과 향후 우리의 표준 안에 대한 새로운 방안을 제시한다.

2. Air-Damping 이 정재파 비에 미치는 영향의 이론적 고찰

정재파 (standing wave) 시험 장치의 관 내경 D 가 구동 음원의 파장 λ 보다 적을 경우 ($D < 0.6\lambda$), 관내 음장은 흡음재로 수직 입사되는 입사파와 흡음재 표면에서 되돌아오는 반사파로 구성된 일차원 파동으로 정의된다.

* 한국표준과학연구원, 음향진동 그룹

** 대전산업대학교 공과대학 전자과

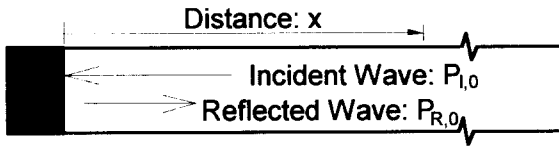


Fig. 1 Sound field at the sample surface

Fig. 1과 같이 흡음재 표면 ($x = 0$)에서 입사파를 $P_{I,0}$ 라 하고 반사파를 $P_{R,0}$ 라 할 때 관내 음장은 정재파로 다음 식으로 표현된다.

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

위의 식에서 γ 는 복소수로 정의되는 음파 계수(acoustic wave propagation constant)로 $\gamma = j(\kappa + \delta) + \delta$ 이며, κ 는 파수(wave number), 그리고 δ 는 공기의 감쇠계수⁽²⁾로 $\delta = 0.022 \times \sqrt{f} / (C_0 \times D)$ 이다 (C_0 = 음파 속도, f = 음원의 구동 주파수). 따라서, 입사파 성분은 시편으로 접근함에 따라 음압이 $e^{\delta x}$ 항에 비례하여 증가하는 반면에 반사파 성분은 시편으로부터 멀어짐에 따라 음압이 $e^{-\delta x}$ 항에 비례하여 감소함을 알 수 있다. 이러한 관내 공기에 의한 감쇠 현상이 관내 정재파의 분포에 미치는 영향을 소개한다.

정재파 분포를 이용한 흡음재 시험^(1~3)은 관내 최대 최소 음압의 크기에 대한 실험치를 이용한다. 식 (1)과 같은 정재파에 대하여, 음압이 최대가 되는 위치 x_{\max} 에서 음압치 $|P(x, f)|_{\max}$ 는

$$|P(x, f)|_{\max} = |P_{I,0}| \cdot (e^{\delta x_{\max}} + |R(f)| \cdot e^{-\delta x_{\max}}) \quad (2)$$

이며, 그리고 최소가 되는 위치 x_{\min} 에서 음압치

$|P(x, f)|_{\min}$ 는

$$|P(x, f)|_{\min} = |P_{I,0}| \cdot (e^{\delta x_{\min}} - |R(f)| \cdot e^{-\delta x_{\min}}) \quad (3)$$

로 기술된다. 위의 식에서 $|R(f)|$ 는 주파수 f 에서 시편의 반사계수로 $|R(f)| = |P_{R,0} / P_{I,0}|$ 이다. 식 (2)로부터 최대 음압치는 시편 표면에서 거리가 멀어짐에 크기가 증가함을 보이고 있다. 그리고, 식 (3)에 보인 최소 음압치 또한 시편 표면에서 거리가 멀어짐에 따라 증가함을 알 수 있다. 특히, 이들의 증가는 반사계수의 크기 $|R(f)|$ 에 또한 영향을 받게 된다는 점을 알 수 있다. 이와 같이 공기 감쇠에 따라 영향을 받는 정재파 비 (standing wave ratio) K 는 다음과 같이 정의된다.

$$K(x_{\max}, x_{\min}; f) = \frac{|P(x, f)|_{\max}}{|P(x, f)|_{\min}} = \frac{e^{\delta x_{\max}} + |R(f)| \cdot e^{-\delta x_{\max}}}{e^{\delta x_{\min}} - |R(f)| \cdot e^{-\delta x_{\min}}} \quad (4)$$

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

$$K(f)|_{\delta=0} = \frac{1 + |R(f)|}{1 - |R(f)|} \quad (5)$$

정재파 비 $K|_{\delta=0}$ 를 이용하여 반사계수를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$|R(f)| = \frac{K(f)|_{\delta=0} - 1}{K(f)|_{\delta=0} + 1} \quad (6)$$

우리나라의 표준 규격인 KS F 2814⁽¹⁾와 일본의 규격인 JIS A 1405⁽³⁾는 공기의 감쇠가 없는 이상적인 결과인 식 (6)을 현재 사용하고 있다. 그러나, 식 (4)의 결과는 시험 시편의 반사계수의 크기와 공기 감쇠 때문에 최대 및 최소 음압의 측정 위치에 따라 환산된 정재파 비가 일정하지 않다는 사실을 의미하고 있다.

지금까지 소개한 이론적 결과가 본 연구에서 사용한 내경 $D = 100$ mm, 길이 1 m인 관내법 시험 장치에서 어떠한 결과를 낳는지 살펴보자. 음압 구동 주파수 $f = 630$ Hz인 경우 공기의 음압 감쇠에 의한 정재파 비의 변화를 Fig. 2에 예시하고 있다.

Fig. 2에서 기호 "o"는 최대 음압이 시편 표면에 보다 근접한 경우로 최대 및 최소 음압의 위치가 각각 ($X_{\max}, X_{\min} = X_{\max} + \lambda/4$)라는 조건에 대한 정재파 비를 나타내고 있으며, 기호 "+"는 최소 음압이 시편 표면에 보다 근접한 경우로 최소 및 최대 음압의 위치가 각각 ($X_{\min}, X_{\max} = X_{\min} + \lambda/4$)라는 조건에 대한 정재파 비를 각각 나타내고 있다 (λ =파장). 이러한 결과는 최대 음압이 시편에 가장 근접 경우와 최소 음압이 시편에 근접한 경우, 공기 감쇠 때문에 정재파 비가 서로 다른 결과를 낳는다는 것을 알 수 있다. 그리고, 실선은 최대 음압점들을 지나는 포락선(envelope)과 최소 음압점들을 지나는 포락선(envelope)에 대한 관내 위치별 정재파 비를 나타내고 있으며, 이를 이용하여 최대 및 최소 음압의 위치가 파장의 25% ($X_{\max} = X_{\min} + \lambda/4$ 혹은 $X_{\min} = X_{\max} + \lambda/4$)되는 두 측정 위치 ("+" 혹은 "o"로 표시된 점들)에서 정재파 비의 차이를 예측할 수 있다. 위의 결과에서 흡음계수 A_c 가 0.1 이하인 경우 ($|R| \geq 0.948$), 관내 최대 및 최소 음압의 측정점 위치 $\{X_{\max}, X_{\min}\}$ 에 따라 정재파 비가 뚜렷한 차

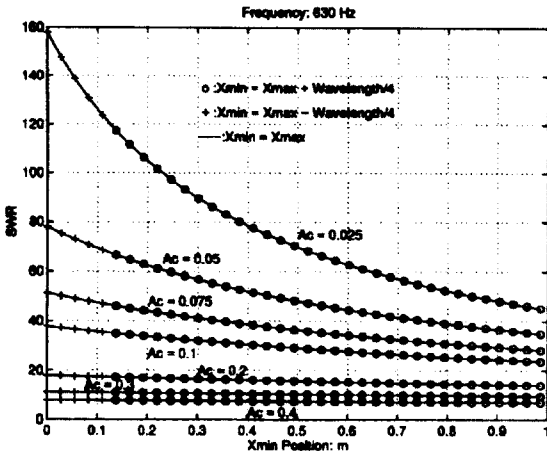


Fig.2 Variation of standing wave ratios for different absorption characteristics (A_c = Sound absorption coefficient, $A_c = 1 - |R|^2$, R = reflection coefficient at the sample surface).

이를 보이고 있다. 흡음재의 표면(distance $x = 0$)에서 멀어 질수록 정재파 비 $K(x_{max}, x_{min})$ 는 감소됨을 알 수 있다. 그러나, Fig. 2의 결과에서 보인 바와 같이 흡음계수가 0.2 이상인 경우 ($|R| \leq 0.894$), 공기 댐핑에 의한 영향은 미미함을 알 수 있다. 즉, 공기의 감쇠 계수 $\delta = 0$ 인 경우와 같이 위치에 따른 정재파 비의 의존도를 무시할 수 있는 경우가 된다. 따라서, 공기의 감쇠에 의한 정재파 비의 변화는 0.2 보다 낮은 흡음율을 갖는 시편들에 대한 흡음계수 시험의 일차적 정밀도 영향 인자임을 알 수 있다.

이러한 공기 감쇠의 영향을 최소화하기 위한 방안을 소개한다. 우선, 사용중인 두 종류의 $\Phi 100$ mm, $\Phi 30$ mm 관에 대하여 정재파 비에 대한 이론식 (4)의 지수 함수에 대한 1차 근사식의 오차는 Table 1과 같다. 이러한 결과는 정재파 이론식 (4)에 대한 1차 근사화로도 최소한 2% 이내의 오차 범위 내에서 지수 함수의 근사화가 가능 함을 확인할 수 있다.

Table 1 First order approximates of exponential functions.

주파수 Hz	계수 δ	$\Phi 10$ 관 : $L = 1$ m		$\Phi 30$ 관 : $L = 0.3$ m	
		$e^{-\delta L}$	$1 + \delta L$	$e^{-\delta L}$	$1 - \delta L$
100	0.0064	0064	1.0064	---	---
400	0.0129	0130	1.0130	---	---
1000	0.0204	0206	1.0204	0.9939	0.9939
4000	0.0408	---	---	0.9879	0.9879

따라서, 관심 주파수 f 에 대하여 반 파장 이내의 서로 이웃한 x_{max} 과 x_{min} 에서 측정된 최대 최소 음압치로부터 정재파 비 $K(x_{max}, x_{min})$ 의 식 (4)를 반사계수 $|R(f)|$ 에 대하여 정리하면 다음과 같은 반사계수를 얻게 된다.

$$R(x_{max}, x_{min}; f) = \frac{K(x_{max}, x_{min}; f) \cdot e^{\alpha x_{min}} - e^{\alpha x_{max}}}{K(x_{max}, x_{min}; f) \cdot e^{\alpha x_{min}} + e^{\alpha x_{max}}} \quad (7)$$

식 (7)에서 지수 함수에 대한 1차 근사화를 적용하면, 최소 최대 측정 점에서 정재파 비 K 와 위치 정보 $\{x_{min}, x_{max}\}$ 로부터 시편 표면에서의 반사계수를 얻게 된다.

$$|R(f)| = \frac{(K - 1) + \delta \cdot (Kx_{min} - x_{max})}{(K + 1) - \delta \cdot (Kx_{min} + x_{max})} \quad (8)$$

따라서, 다수의 최대 및 최소 측정 음압치로부터 서로 근접한 최대 최소 값의 쌍에 대응되는 반사계수들에 대한 평균값과 측정치들에 대한 실험 오차를 분석할 수 있다. 반사계수의 평균치를 $R_m(f)$ 라 하면 시편의 흡음계수는 다음 정의식에 따라 환산한다.

$$A_c(f) = 1 - |R_m(f)|^2 \quad (9)$$

근사화 된 반사계수 식 (8)과 흡음계수 환산식 (9)를 이용하여 관내 법에 의한 흡음재의 시험을 현재 시행 중에 있으며, 이러한 방법은 ASTM C 384 (1990)⁽²⁾와 같은 국외 규격 또한 만족할 수 있다.

3. 실험 결과 및 검토

관내 법을 이용한 실험 장치는 Fig. 3과 같이 구성하였다. 신호 발생단(B&K 1049)의 출력은 저잡음 전력 증폭기(PGA-7000)를 거쳐 관내법 시험장치

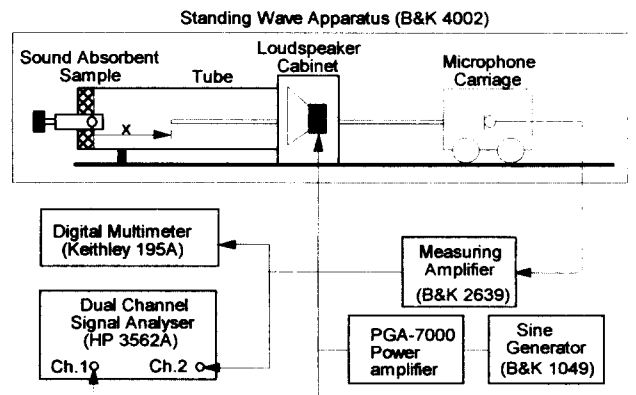


Fig. 3 Experimental setup

(B&K 4002)의 음원을 구동한다. 관내 음압은 도파관이 장착된 이송형 마이크로폰과 측정용 증폭기(B&K 2636)을 이용하여 측정하였다.

신호 발생 단의 구동 주파수에 해당되는 음압 성분만을 측정하기 위하여 신호 분석기(HP 3562A)를 이용하였으며, 측정 음압 신호 뿐 아니라 전력 증폭기의 신호에 포함된 저/고조파 성분의 분석을 동시에 행한다. 이러한 관내 법 시험 장치의 입/출력 신호 점검과 더불어, 전압 지시기(Keithley 165)를 이용하여 관내 평균 음압이 외부 배경 소음 레벨보다 40 dB 이상 높게 신호 발생기(B&K 1049)의 출력 전압을 설정한다. 이러한 시험 조건 설정 과정을 거쳐, 구동 주파수에 대한 관내 최소 및 최대 음압의 크기는 신호 분석기(HP 3562A)를 이용하여 측정하였다. 이때 최소 및 최대 음압의 위치 또한 기록하였다. 위의 실험 장치를 이용하여, 500 Hz에 대하여 두 가지의 흡음 시편에서 얻은 관내 음압의 최대 최소 측정치를 Table 2는 보이고 있다. 페인트된 철판의 최저 음압점("Min. V"로 표시)의 측정 전압이 시편으로부터 멀어짐에 따라 약 2 배로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 최대 음압의 크기("Max. V"로 표시)는 미소한 변화를 보이고 있다.

그리고, 발포 우레탄 시편의 최저 음압 또한 시편에서 멀어짐에 따라 음압 크기가 강판재 시편에 비해 상대적 변화율은 적으나 약간의 전압 증가는 보이고 있으며, 최대 음압의 크기는 강판재 시편과 같이 위치에 따른 변화는 그의 관측되지 않았다. 특히, 위의 결과에서 최저 음압이 공기의 감쇠의 효과에 민감함을 알 수 있다. 이러한 현상이 흡음계수의 시험 결과에 미치는 영향을 살펴보자.

우선 Table 2의 관내 최대 및 최소 음압 측정치들로부터 계산된 반사계수를 소개한다. Table 3에서 "KS"로 표시된 행의 값은 공기의 감쇠를 무시한 결과이다. 이는 첫째 최대값에 최소값을 나눈 값인 정제

파 비를 식 (6)에 대입하여 계산된 반사계수는 Table 3의 첫째 열(Pair order = 1)이며, 첫째 최대값과 둘째 최소값으로 구성된 두번째 쌍으로부터 같은 계산 과정을 거쳐 환산된 반사 계수는 Table 3의 KS 행의 둘째 열(Pair order = 2)이다. 이와 같이 서로 근접한 최대 및 최소 음압 측정치만을 이용하여 계산한 반사계수는 KS 규격 시험 규격을 따른 것이다. 그리고, 서로 근접한 최대 최소치의 음압 쌍 즉 첫째 최소값과 첫째 최대값의 쌍, 첫째 최대값과 둘째 최소값의 쌍, 그리고 둘째 최소값과 둘째 최대값의 쌍과, 그리고 이들 최대 및 최소 값에 대응되는 각각의 위치 값들을 식(8)에 대입하여 계산된 반사계수는 의 KRISS라 표시된 행에 나타나 있다. 이와 같이 서로 근접한 최대 및 최소 음압 쌍에 대한 두 시편의 위치별 반사 계수들의 평균치 또한 Table 3에 표시되어 있다.

Table 3의 실험 결과는 앞서 2장에서 소개한 바와 같이 공기에 의한 음압의 감쇠를 고려하지 않은 KS의 반사계수가 이를 고려한 KRISS의 반사계수보다 적다는 점과, 평균 반사계수에 대한 위치별 반사계수의 편차 또한 KRISS의 결과가 KS 경우보다 적다는 점을 각각 보이고 있다.

Table 3의 평균 반사 계수를 이용하여 식 (9)에 따라 계산된 두 시편에 대한 최종 흡음계수는 Table 4와 같다. 강판재 시편인 경우 KS F 2814("KS"라 표시)에 의한 흡음계수는 약 4%이며, 본 연구("KRISS"라 표시)에서 얻은 흡음계수는 약 1% 이하이다. 이러한 흡음계수의 차이는 공기 감쇠에 의한 영향으로, KS F 2814에 의한 결과는 공기에 의한 관내 흡음 효과를 마치 시편 자체의 흡음 성능처럼 평가하고 있다. 이러한 공기 흡음 효과를 시험에서 분리하여 시편의 고유한 흡음 성능을 평가할 수 있는 방안이 "KRISS"라 표시된 방법임을 알 수 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, ρ =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	-----	0.350	615	-----	0.656
858	0.0046	-----	783	0.221	-----

Table 3 Reflection coefficients evaluated for each each pair of neighbouring minimum and maximum sound pressure positions lists at Table 2

Pair Order	Embossed Iron Plate		Uretan Foam	
	KS	KRISS	KS	KRISS
1	0.985	0.993	0.509	0.510
2	0.979	0.996	0.502	0.508
3	0.979	0.996	0.502	0.508
4	0.984	0.998	0.496	0.508
Mean	0.982	0.996	0.502	0.509

Table 4. Sound absorption coefficients evaluated from the results at Table 2

Embossed Iron Plate		Uretan Foam	
KS	KRISS	KS	KRISS
0.035	0.008	0.748	0.741

Table 4의 발포 우레탄 시편의 경우, 두 시험 방법의 차이가 1% 이내의 정확도를 만족함을 확인할 수 있다. 이같이 흡음율이 높은 경우 두 시험 방법의 차이는 무시할 수 있으나, 흡음계수가 0.2 이하인 경우 위의 실험 결과에서 보인 바와 같이 관내 공기의 흡음 영향 때문에 정재파 비에 근거한 현재의 KS 시험법은 공기의 흡음특성과 시편 고유의 흡음특성이 서로 포함된 평가 결과를 낳는 한계점을 보이고 있다.

지금까지는 500 Hz의 한 주파수에 대하여 공기 감쇠에 의한 흡음계수의 영향에 대한 실험 결과를 소개하였다. 페인트가 입혀진 강판 시편 5개와 경량 콘크리트 시편 5개에 대하여 앞서 소개한 방법과 같이 각 시편의 흡음계수 시험을 수행하였다. 다섯 종의 시편에 대한 평균 흡음계수를 Fig. 4에 보이고 있다. 실선으로 그려진 결과는 공기의 감쇠를 고려한 경우이며, 점선으로 표시된 결과는 이를 고려하지 않은 KS F 2814의 시험 규격에 의한 흡음계수 시험 결과를 각각 나타내고 있다. Fig. 4의 결과에서 공기의 감쇠를 고려한 KRISS에 의한 시험 결과가 보다 낮은 흡음계수를 보이고 있다. KS F 2814 규격에 의한 흡음계수가 강판 재인 경우 ("o"로 표시) 약 2배 정도 높게 나타났다.

그리고, 경량 콘크리트 (ALC) 시편 (Fig. 4에 "*"로

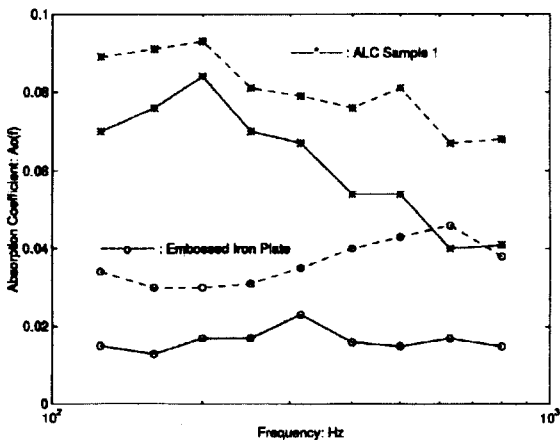


Fig. 4 Averaged absorption coefficients of two sound absorbent samples: Solid line = KRISS Method and Dot line = KS F 2814 Code.

표시)의 경우 KRISS의 흡음계수와 KS 흡음계수의 차이를 백분율로 환산하면 200 Hz에서 15% 그리고 630 Hz에서는 65%에 달하는 흡음계수의 차이를 보이고 있다. 이러한 차이점을 낳는 주요 인자는 공기 감쇠라는 점을 본 실험에서 확인하였다. 따라서, 현재 국내에서 시행중인 관내법 표준 시험 규격의 공기의 감쇠 효과를 고려할 수 있는 시험 방법에 대한 대책 마련은 조속한 시일 내에 해결되어야 할 문제점으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문은 현재 국가 표준 규격으로 채택하여 사용 중인 관내법 시험 규격인 KS F 2814 (1978)에서 발견되는 문제점, 즉, 흡음율이 0.2 이하의 흡음재 시편들의 시험 결과가 국외 관련 표준 규격에 의한 흡음계수 보다 높게 나타나는 문제점을 지적하고 있다. 이같은 문제점의 일차적인 원인 규명과 더불어 해결 방안으로 공기의 감쇠 효과를 고려한 시험 방안과 새로운 계산 식을 본 논문은 제안하고 있다. 그리고, 본 연구에서 수행한 실험 결과들을 통하여 새로이 제안된 흡음계수 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 시일 내 우리 표준 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.

참 고 문 헌

- (1) KS F 2814 (1978), 관내 법에 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) JIS A 1405 (1994), Methods of Test for Sound Absorption of Acoustical Materials by the Tube Method, JS Association, Japan.
- (4) Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J.V. Sanders, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, NY:USA, 1980.