

임피던스관에 의한 흡음계수와 임피던스의 결정방법 고찰

⁰정성수*, 조문재*, 국찬**, 김선우***

Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes

Sung Soo Jung*, Moon Jae Jho*, Chan Kook**, Sun-Woo Kim***

ABSTRACT

In this study, the ISO 10534-2 "Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer function method" was introduced and discussed. In order to make it as Korean Industrial Standard, several main contents of ISO 10534-2 are reviewed. Some experimental results are reconsidered.

1. 서론

건축재료 중 흡음재에 대한 흡음계수 시험을 위한 방법으로는 크게 임피던스관법과 잔향실법으로 구분되며 국내에서도 이미 잘 알려진 방법이다. 현 한국산업규격(KS)에서는 임피던스관법은 KS F 2814⁽¹⁾로서 그리고 잔향실법은 KS F 2805⁽²⁾로 규정하고 있다. 임피던스관법은 다시 정재파비법과 전달함수 방법으로 구분되며 현 ISO에서는 전자는 ISO 10534-1⁽³⁾로서 후자는 ISO 10534-2⁽⁴⁾로 되어 있다. 따라서 KS 규격도 국제화 시대에 맞게 정재파비법은 2000년 11월에 KS F 2814-1로서 규격안이 제시되었고, 전달함수법은 KS F2814-2로서 금년에 제정될 예정이다. 본 연구는 ISO 10534-2의 전달함수법의 일반적인 특성과 이를 KS화하는데 따른 몇 가지 주요 사항에 대해 좀더 자세히 검토하고자 한다. 주요 내용으로는 ISO 10534-1과 ISO 10534-2의 차이점, ISO 10534-2의 기본 원리 및 주요 내용, 주요 오차 요인들에 대해 알아보았다.

2. 전달함수법(Transfer function method)

2.1 전달함수법과 정재파비법의 차이점

전달함수법과 정재파비법은 몇 가지 차이점을 내포하고 있는데 각각 장·단점이 있다. 이들에 대해 계략적으로 살펴보면 다음과 같다. 우선 신호처리면에서 전달함수법은 마이크로폰에 측정된 음압을 푸리에 변환을 통해 주파수 성분으로 치환하여 사용하는 반면, 정재파비법은 음압 그 자체를 이용하고 있다. 따라서 전달함수법은 시험 도중에 시험이 잘 되고 있는지에 대한 판단을 하기 힘든 반면 정재파비법은 어느 정도 파악이 가능하다. 하지만 시험에 사용되는 음원에 있어 전자는 백색잡음과 같이 광대역 주파수 음을 동시에 사용할 수 있는 반면 후자는 단일 주파수 음을 사용함으로써 시험 시간에 있어 상당한 차이를 보이고 있다.

전달함수법은 관의 길이에 따른 주파수 제한이 적지만 두 마이크로폰 사이의 거리에 영향이 크며, 정재파비법은 관의 길이에 영향이 크다. 하지만 관의 내경에 따른 측정 주파수 한계는 모두 가지고 있다. 특히 전달함수법에서 두 마이크로폰을 사용할 경우, 두 마이크로폰 간의 음압크기와 위상의

* 한국표준과학연구원 음향·진동 그룹

** 동신대학교 도시조경학과

*** 전남대학교 건축학과

부정합은 시험 결과에 큰 영향을 미치게 된다.

시험결과의 활용에 있어 전달함수법은 대부분 백색잡음을 사용하기 때문에 주파수에 따른 흡음재의 흡음특성을 잘 확인할 수 있지만 정재파비법은 분해능이 저하되는 단점이 있다. 하지만 시험에 필요한 기기와 분석기를 모두 갖추려면 비용면에서 전달함수법이 정재파비법에 비해 고가인 단점이 있다.

2.2 ISO 10534-2의 주요 내용

ISO 10534-2의 전달함수법은 1998년 11월 15일에 처음 제정되었다. 본 규격은 본체와 7개의 부속서(annex)로 구성되어 있는데 다음의 내용을 포함한다.

본체의 내용

1. Scope
2. Definition and symbols
3. Principle
4. Test equipment
5. Preliminary test and measurements
6. Test specimen mounting
7. Test procedure
8. Precision
9. Test report

부속서 내용

- A. Preliminary measurements
- B. Procedure for the one-microphone technique
- C. Pressure-release termination of test sample
- D. Theoretical background
- E. Error sources
- F. Determination of diffuse sound absorption coefficient α_{st} of locally reaction absorbers from the results of this part of ISO 10534
- G. Bibliography

위의 내용들 중 주요 내용을 살펴보면 다음과 같다. 우선 본체 '3 기본원리'에서 측정방법을 두 개의 마이크로폰을 사용하는 방법과 단일 마이크로폰 방법을 모두 수용하여 어떤 방법을 사용해도 무관하도록 되어 있다.

'4.2 실행 주파수 범위'에서는 시험 주파수의 상한 (f_u) 주파수에 대해 원통형과 직각형 관에 대해 각각 주어지 있으며 마이크로폰간의 간격(s)도 제시되어 있다. 내경 혹은 최대 단면 길이(가로 혹은 세로)가 d (단위: m)인 관에 대해 f_u 와 s 에 대한 조건은 음속(c_o)과 함께 다음의 관계식을 갖는다.

원통형관: $d \leq 0.58\lambda_u$; $f_u \cdot d < 0.58 c_o$

직각관: $d \leq 0.5\lambda_u$; $f_u \cdot d < 0.5 c_o$

마이크로폰 간격: $f_u \cdot s < 0.45 c_o$

'4.3의 임피던스관의 길이'에서 마이크로폰과 시편과의 최소 간격은 시편의 형상에 따라 다음으로 주어진다.

평판한 시편: 직경 혹은 최대 단면 길이의 1/2배

반-평판한 시편: 직경 혹은 최대 단면 길이

심한 비대칭시편: 직경 혹은 최대 단면 길이의 2배

'4.4의 마이크로폰'에서는 직경이 c_o/f_u 보다 작은 마이크로폰과 임피던스관 벽에 설치하는 경우는 압력형을 그리고 관내에 삽입하는 경우는 자유 음장형 마이크로폰의 사용을 권장하고 있다.

'4.9의 스피커'에서 박막형 스피커의 사용을 권장하고 있으며 박막의 표면은 임피던스관 단면적의 2/3 배 이상을 요구하고 있다.

'4.10의 신호발생기'에서는 두 개의 마이크로폰은 평판한 스펙트럼 밀도를 가지는 정상신호(랜덤, 슈도랜덤, 주기적 슈도랜덤, 철평 등)를 한 개의 마이크로폰 방법인 경우는 슈도랜덤 신호가 적합하다.

'4.12의 온도계와 압력계'에서는 관내 온도와 압력을 모두 측정하도록 되어 있다.

'Annex G. Bibliography'에 인용문헌을 제시하고 있는데 이것은 ISO 10534-1에서 '2. Normative references'로 통일할 것인가에 대한 결정이 필요할 것으로 판단된다.

3. 전달함수법에 대한 고찰

3.1 두 개의 마이크로폰에 의한 흡음계수 측정법

두 개의 마이크로폰을 사용하여 흡음계수를 측정하는 방법으로 대표적인 것은 1977년의 Seybert와 Ross⁽⁵⁾ 그리고 1980년의 Chung과 Blaser⁽⁶⁾에 의해서이다. 전자는 음압 스펙트럼 밀도를 사용하는 반면 후자는 음압 스펙트럼을 사용하게 된다. 우선 이들 두 방법의 차이를 살펴보자.

• Seybert & Ross 방법

그림 1처럼 마이크로폰을 시료 표면으로부터 적절하게 떨어진 두 지점 1과 2에 각각 설치하자. 시료의 반대편에서 평면파 음이 시료에 수직 입사된 후 시료로부터 반사된 음과 중첩되어 마이크로폰 1과 2에 각각 측정된다. 두 측정된 음압 신호에 대한 푸리에 변환 스펙트럼에서 자기-스펙트럼 밀도(auto-spectral density)를 S_{11} 과 상호-스펙트럼 밀도(cross-spectral density)는 S_{12} 로 표시하며 다음과 같이 각각 쓸 수 있다.

$$S_{11}(f) = \{P_1(f, T)P_1^*(f, T)\} / T \quad (1)$$

$$S_{22}(f) = \{P_2(f, T)P_2^*(f, T)\} / T \quad (2)$$

$$S_{12}(f) = \{P_1(f, T)P_2^*(f, T)\} / T = C_{12} + jQ_{12} \quad (3)$$

여기서 T는 data 측정 총 시간 간격이고 C_{12} 와 Q_{12} 는 상호-스펙트럼의 실수부와 허수부를 각각 나타낸다.

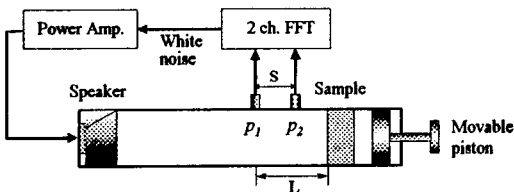


그림 1. 전달함수법에 의한 흡음계수 측정장치도.

한편 입사파와 반사파의 자기-스펙트럼 밀도를 $S_{AA}(f)$ 와 $S_{BB}(f)$ 로 나타낸다면 이들은 다음의 관계식을 만족한다.

$$S_{11} = S_{AA} + S_{BB} + 2[C_{AB} \cos 2kx_1 + Q_{AB} \sin 2kx_1] \quad (4)$$

$$S_{22} = S_{AA} + S_{BB} + 2[C_{AB} \cos 2kx_2 + Q_{AB} \sin 2kx_2] \quad (5)$$

$$C_{12} = [S_{AA} + S_{BB}] \cos k(x_2 - x_1) + 2[C_{AB} \cos k(x_1 + x_2) + Q_{AB} \sin k(x_1 + x_2)] \quad (6)$$

$$Q_{12} = [S_{AA} - S_{BB}] \sin k(x_2 - x_1) \quad (7)$$

위 식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$S_{AA} = [S_{11} + S_{22} - 2C_{12} \cos k(x_2 - x_1) + 2Q_{12} \sin k(x_2 - x_1)] / 4 \sin^2 k(x_2 - x_1) \quad (8)$$

$$S_{BB} = [S_{11} + S_{22} - 2C_{12} \cos k(x_2 - x_1) - 2Q_{12} \sin k(x_2 - x_1)] / 4 \sin^2 k(x_2 - x_1) \quad (9)$$

$$C_{AB} = [-S_{11} \cos 2kx_2 - S_{22} \cos 2kx_1 + 2C_{12} \cos k(x_2 + x_1)] / 4 \sin^2 k(x_2 - x_1) \quad (10)$$

$$Q_{AB} = [-S_{11} \cos 2kx_2 - S_{22} \cos 2kx_1 + 2C_{12} \sin k(x_2 + x_1)] / 4 \sin^2 k(x_2 - x_1) \quad (11)$$

따라서 시료 면에서의 반사계수(R)의 크기와 위상(θ)은 다음 식으로 각각 계산된다.

$$R^2 = S_{BB} / S_{AA}, \quad \theta = \tan^{-1}(Q_{AB} / C_{AB}) \quad (12)$$

• Chung & Blaser 방법

그림 1에서 위치 1에 있는 마이크로폰을 기준점으로 가정하고 음압을 입사파와 반사파로 표시하면 다음 식과 같다.

$$P_1(f) = P_A(f) + P_B(f) \quad (13)$$

위치 1과 s 만큼 떨어진 위치 2에서의 음압은 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$P_2(f) = P_A(f)e^{-jks} + P_B(f)e^{jks} \quad (14)$$

전달함수 H_{12} 를 다음으로 정의하자.

$$H_{12} = P_2 / P_1 \quad (15)$$

그러면 위치 1에서의 반사계수는 다음 식이 된다.

$$R_1 = [H_{12} - e^{-jks}] / [e^{jks} - H_{12}] \quad (16)$$

위치 1로부터 거리 L 만큼 떨어진 지점에서의 반사계수는 다음 식이 된다.

$$R_L = R_1 e^{2jkl} \quad (17)$$

한편 임피던스와 흡음계수는 반사계수와 각각 다음의 관계식을 만족한다.

$$Z/Z_o = (1 + R)/(1 - R) \quad (18)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (19)$$

위 식에서 보듯이 반사계수와 임피던스는 위치에 따라 다르지만 흡음계수는 위치에 무관하게 결정됨을 볼 수 있다.

한편 식 (16)에서 보면 분모가 0가 되는 경우 반사계수가 미정이 되며, $ks = n\pi$ ($n=1,2,\dots$)인 경우에 발생한다. 이러한 현상을 피하기 위해 Chung과 Blaser는 마이크로폰 간격을 $s \leq c/2f_m$ (f_m 은 최대 시험주파수)로, Chu⁽⁷⁾는 $s = 0.7(c/2f_m)$ 로 제한한 바 있다. 전달함수법은 두 개의 마이크로폰을 사용하는 것이 일반적이지만 음원과 측정 시스템이 안정된 경우에는 한 개의 마이크로폰을 사용하여 위치 1과 2에서 연속적으로 측정하고 자료 처리를 하여도 된다.

지금까지 전달함수법에 대한 일반적인 내용을 살펴보았고 다음은 이들 방법에 있어 오차를 줄이기 위해 고려할 수 있는 몇 가지 시험 방법을 참고 자료와 직접 측정된 결과를 가지고 살펴보겠다.

3.2 전달함수법에 의한 시험결과와 오차 분석에

전달함수법을 적용할 때 발생하는 오차 요인을 몇 가지 고려할 수 있는데 예를 들면, 두 개의 마이크로폰간의 음압 크기와 위상 부정합, 두 마이크로폰 사이의 간격, 시편과 마이크로폰 사이의 거리 등이다.

두 마이크로폰간의 음압 크기와 위상 부정합을 최소화하기 위해 인텐시티미터에 사용하는 마이크로폰처럼 두 마이크로폰의 특성이 유사한 것을 사용하는 것이 일반적이다. 이와 더불어 센서교환 방법을 사용하여 보정을 하고 있다. 두 마이크로폰의 특성이 유사하지 않은 일반적인 마이크로폰을 사용하여 측정을 한 경우와 센서교환 방법으로 보정을 한 경우에 대한 Chung의 결과를 보면 그림 2와 같다. 결과를 보면 보정을 하지 않은 경우(---)는 측

정값이 상당히 왜곡되고 있지만 보정을 한 경우(—)는 흡음특성을 잘 기술하고 있음을 확인할 수 있다.

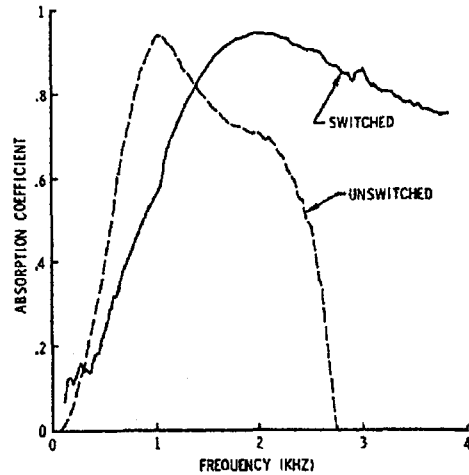


그림 2. 센서교환 방법으로 보정을 한 경우(—)와 보정을 하지 않은 경우(---) 흡음계수의 비교.

다음으로 두 마이크로폰간의 간격과 시편과 마이크로폰 사이의 거리에 따른 오차가 있다. 마이크로폰 간격은 앞서 살펴보았으며 마이크로폰과 시편과의 간격은 관내 음장이 형성된 후 마이크로폰 설치 지점이 node 근처에 있을 가능성이 있기 때문이다. 우선 마이크로폰 간격에 따른 영향이 실험값에 미치는 영향을 그림 3의 Chu의 실험결과에서 확인할 수 있다. 결과를 보면 마이크로폰 간격 s 가 0.2 m인 경우는 반사계수 값이 갑자기 크게 증가하는 경우를 볼 수 있다. 이것은 $ks = n\pi$ 인 지점에서 발생하게 되는데 계산하면 처음 두 주파수는 850 Hz와 1700 Hz가 되며 그림 3에서 이들 주파수 근처에서 발생됨을 확인할 수 있다.

마이크로폰 간격(s)과 시료와의 거리(L)에 따른 흡음계수 영향은 그림 4의 Chu의 실험 결과에서 확인할 수 있다. 결과를 보면 s 와 L 을 적절하게 선택함으로써 오차를 줄일 수 있다.

다음은 전달함수법으로 같은 시료에 대해 연속적으로 3번 측정된 경우에 대한 결과를 그림 5에 나타냈는데 값들이 모두 비슷함을 확인할 수 있다. 이것으로부터 측정 시스템이 안정되어 있음을 알 수 있다. 이때 음원은 백색잡음을 마이크로폰 간격은 0.05 m이다. 보정은 센서 교환방법을 사용하였다.

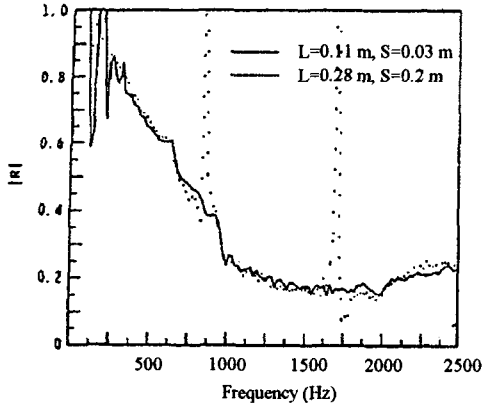


그림 3. 유리섬(두께 0.05 m)에 대한 반사계수 크기.

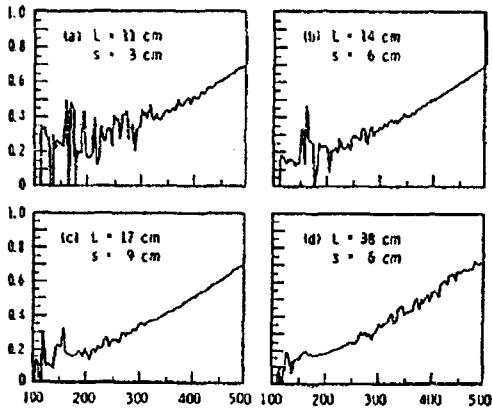


그림 4. 마이크론 간격(s)과 마이크론과 시료와의 거리(L)에 따른 흡음계수 결과 비교.

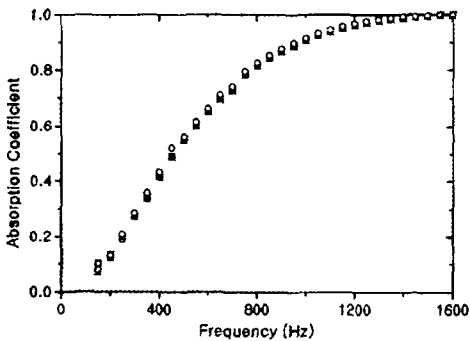


그림 5. 유리섬(두께 0.05 m)에 대해 3 번 연속 측정 한 흡음계수 시험결과 비교.

임피던스관법으로 흡음재의 흡음계수를 구할 때 전달함수법과 정재파비법으로 측정된 결과가 차이가 나면 안되므로 이를 확인해 보았다. 그림 6은 유리섬의 흡음계수 측정결과로서 결과에서 보듯이 두 값이 거의 차이가 나지 않고 있다. 따라서 두 방법 중 어떤 방법을 선택하여도 별다른 문제가 없음을 알 수 있다. 하지만 일반적으로 정재파비 방법으로 시험을 할 경우는 1/3-옥타브 밴드의 중심주파수를 사용하므로 중심 주파수 사이의 현상은 알 수 없다. 이런 점을 고려하면 백색잡음을 사용하는 전달함수법이 더 유리하다고 하겠다.

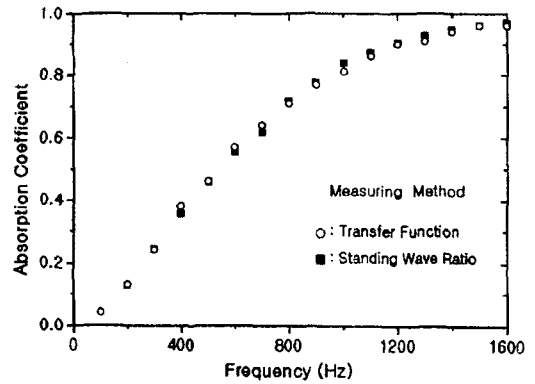


그림 6. 전달함수법과 정재파비법에 의한 흡음계수 측정결과 비교.

실제 흡음재에 대한 시험은 한 개의 시편만을 사용하는 것이 아니라 몇 개의 시편에 대한 측정값을 평균하게 된다. 이것은 시편을 선택하는 부위에 따라 다른 값을 줄 수 있는데 유리섬의 경우 시료가 균일하지 않고 국소적으로 불균일할 수 있다. 따라서 큰 시료로부터 3 군데서 얻은 시료에 대한 흡음계수를 측정된 결과를 그림 7에 비교하였는데 각 시료의 흡음계수 값이 차이가 남을 볼 수 있다. 이러한 차이는 고주파수에서 더 심한데 시료에 따라 최고 30%까지 차이가 나는 것으로 알려져 있다. 또한 같은 체적밀도를 갖는 시료라도 만드는 공법에 따라 역시 다른 흡음계수를 갖게 된다.

마지막으로 두 개의 마이크론을 사용하는 경우와 한 개의 마이크론을 사용하는 경우에 대해 살펴볼 것이다. 음원을 백색잡음 대신 단일 주파수 음을 사용하였다. 두께 0.05 m인 유리섬에 대한 결과를 그림 8에 나타냈는데 두 값이 거의 유사한 값을 가짐을 볼 수 있다.

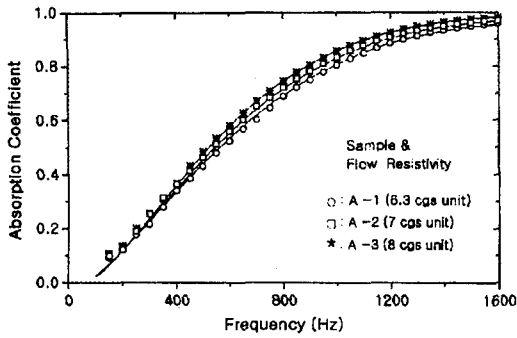


그림 7. 두께 0.05 m인 3 개의 유리솜에 대한 흡음 계수 측정결과 비교.

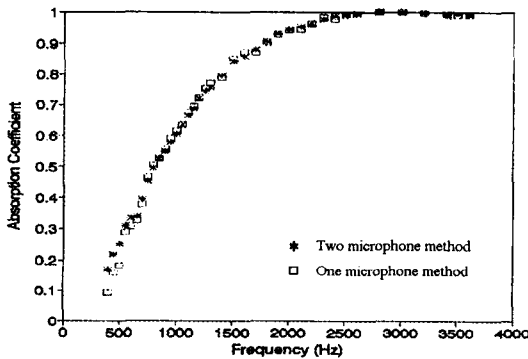


그림 8. 두 개의 마이크로폰 방법과 한 개의 마이크로폰 방법에 의한 유리솜(두께 0.05 m)의 흡음계수 측정결과 비교.

그림 8의 결과에서 보듯이 음원과 측정 시스템이 안정되어 있는 경우에는 한 개의 마이크로폰을 사용하는 것도 무방하다고 하겠다. 한 개의 마이크로폰을 사용할 경우는 측정시간은 두 개의 마이크로폰 보다 2배가 소요되지만 센서간의 부정합 요소가 없다는 장점도 있다. 여기서 사용한 마이크로폰은 일반 시중에서 쉽게 구입 가능한 저가형 콘덴스형으로 마이크로폰과 마이크로폰 증폭기 포함한 동특성이 가장 유사한 마이크로폰을 선택하여 측정하였으며, 센서 교환방법으로 보정을 하지 않았다. 이처럼 두 마이크로폰의 동특성이 비슷한 경우는 센서 교환 방법을 사용하지 않더라도 안정된 결과를 얻을 수 있으며, 또한 값 비싼 마이크로폰이 아니라 일반 마이크로폰을 사용해도 충분히 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 국제화 추세에 맞게 KS를 ISO화함에 있어 임피던스관법 중 전달함수법인 ISO 10534-2에 대한 내용을 소개하고 몇 가지 주요 사안을 살펴보았다. 또한 본 방법을 적용할 경우 시험에 발생될 수 있는 오차의 요인을 참고문헌과 시험을 통해 다시 한번 검토하였다. 주요 오차 요인으로는 두 마이크로폰간의 음압 크기와 위상의 부정합, 마이크로폰 간격, 마이크로폰과 시료 사이의 거리 등으로 이들은 적절히 교정될 수 있음을 알았다. 특히, 저가형 마이크로폰을 사용하더라도 충분히 좋은 결과를 얻을 수 있음을 확인하였으며, 따라서 일반 실험실에서도 전달함수법을 적용하는데 별다른 문제가 없을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) KS F 2814, 1978, "관내법에 의한 건축재료의 수직 입사 흡음률 측정방법"
- (2) KS F 2805, 1972, "잔향실 내의 흡음률 측정방법"
- (3) ISO 10534-1, 1996, Acoustics-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 1: Method using standing wave ratio.
- (4) ISO 10534-2, 1998, Acoustics-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2: Transfer function method.
- (5) A. F. Seybert and D. F. Ross, 1970, "Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone, random excitation technique," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 61, pp. 1362~1370.
- (6) J. Y. Chung and D. A. Blaser, 1980, "Transfer function method for measuring in-duct acoustic properties: I. Theory," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 68, pp. 907~913.
- (7) W. T. Chu, 1986, "Transfer function technique for impedance and absorption measurements in an impedance tube using a single microphone," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 80, pp. 555~560.