

ISO 방법론 및 1:10 축소잔향실을 이용한 확산률 측정

Measuring Scattering Coefficient in 1:10 Reverberation Chamber Using the ISO Method

°전진용* · 이병권** · 정갑철***

Jin-Yong Jeon, Byung-Kwon Lee and Gab-Cheol Jeong

Key Words : Scattering Coefficient, ISO Method, Diffuser, 1:10 Reverberation Chamber

ABSTRACT

Scattering of surface materials has been known as one of the most important aspects in evaluating the acoustics of concert halls are designed. One of the methods that can reduce the errors in estimating the reverberation time and other acoustic parameters through computer modeling is to calculate scattering coefficient of surface materials. However, so far, no objective and reliable methods measuring scattering coefficient has been suggested. In this situation, ISO has suggested the method of measuring the random-incidence scattering coefficient on surfaces in diffuse field, whereas AES has introduced a method on directional-incidence in free field. In this study, the scattering coefficients of five kinds of hemispheres (1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5cm) were measured by using the ISO method in 1:10 reverberation chamber. It was found that 3.0cm hemisphere has the highest scattering coefficient satisfying 95% reliability.

기호설명

- α : 흡음률
- δ_s : 확산률
- V : 잔향실의 체적 (m^3)
- S : 시료의 면적 (m^2)
- T_1 : 시료 없이 바닥판만 있을 때의 잔향 (sec)
- T_2 : 시료를 바닥판 위에 위치했을 때의 잔향 (sec)
- T_3 : 시료 없이 바닥판을 위치시키고 바닥판을 회전시키면서 측정한 평균 잔향 (sec)
- T_4 : 시료를 바닥판 위에 위치하고 바닥판을 회전시키면서 측정한 평균 잔향 (sec)
- C : 소리의 속도 (m/sec)
- N : 축척비 (1:N)
- $\Delta\phi$: 테이블의 1회 잔향 측정시 회전각

1. 서론

특히 콘서트홀을 중심으로한 공연장에서 음의 확산을 유도하기 위한 다양한 형태의 확산체가 벽면에 설치된 것을 볼 수 있다. 그러나 이러한 확산체를 위한 설계가 아직 정확한 물리적 계수(확산률, Scattering Coefficient)에 대한 측정상의 근거 없이 제작 설치된 것으로 그 효용성 및 성능의 수치적 입증이 불가능하다. 따라서 일반적으로 수용할 수 있는 측정 방법이 없이 확산의 값과 적음을 단순히 추측하는 수준에 머무를 수 밖에 없었다.

이러한 현실을 타개 하고자 국제적으로 ISO 및 AES (Audio Engineering Society) 등을 중심으로 확산에 대한 정의 및 정확한 물리적 값인 확산률 측정방법을 제안하고 있다. 독일 아헨공대 ITA (Institute of Technical Acoustics)의 Vorlaender와 Mommertz가 주축이 되어 연구하고 있는 ISO 방법론⁽¹⁾ 및 영국 Salford대학의 Cox와 미국 RPG社가의 D'Antonio가 주축이 된 AES방법론⁽²⁾은 모두 입사된 에너지 전부가 Snell의 법칙에 따라 입사된 각과 동일한 각으로 반사될 경우 확산률을 0, 반대로 동일한 각으로 반사되지 않고 다른 부분으로 음에너지가 모두 반사할 경우 확산률을 1로 보는 기본적인 확산이론에서 출발하였다 (Fig. 1 참조). 그러나 ISO의 방법론 (Fig. 2)은 확산음장에서 다방면의 입사 음에너지에 대한 확산을 고려한 방법이며 AES (Fig. 3)의 방법론은 자유음장에서 특정 각에서의 입

* 한양대학교 건축공학부 조교수
E-mail : jyjeon@hanyang.ac.kr
Tel : (02) 2290-1795, Fax : (02) 2291-1793

** 한양대학교 건축공학과 대학원 석사과정

*** (주)대우건설연구소 책임연구원

사 음에너지에 대한 확산률 측정이라는 점에 있어서 서로 다른 방법론을 추구하고 있다.

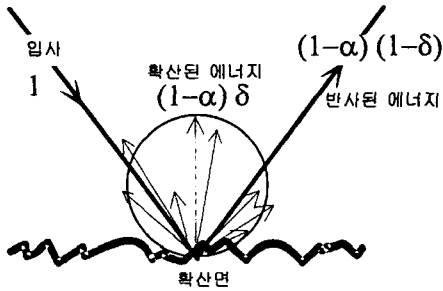


Fig. 1 확산면 위에서의 확산현상

본 연구의 제1 저자는 2001년 ICA(로마)에서 ISO/TC 43/SC 2 Work Group 25의 모임에 Invited Guest로 참가하여 1:10 축척 잔향실에서의 확산률 측정 가능성 및 고주파음의 공기흡음률에 대한 문제점 등을 토의한바 있다. 본 모임은 의장인 덴마크공대의 Rindel 교수를 비롯하여 Vorlaender, Mommertz, Cox, D'Antonio, Lam, Embrechts 등 실내음향학에 있어서 세계적인 음향 학자들로 구성되어 있다.

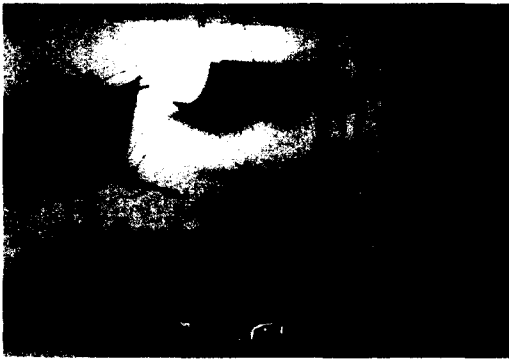


Fig. 2 ISO 방법론에 의한 실험기기

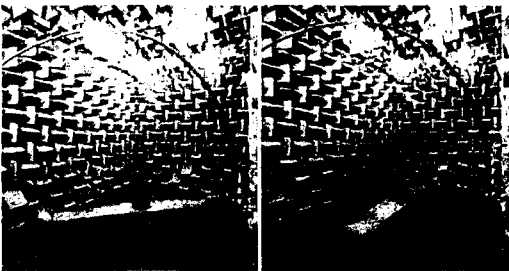


Fig. 3 AES 방법론에 의한 실험기기

이러한 측정법의 제안 배경하에 궁극적으로는 기존의 비파

학적인 확산체 제작 및 설치의 문제점을 개선하고, 확산률 측정 및 계산 근거에 따른 확산설계를 위하여 본 연구에서는 ISO방법론에 의거하여 가장 간단하면서도 확산효율이 높은 형태인 반구형 확산체의 크기별 확산률을 측정하여 이 방법론의 효용성 및 적용점에 대하여 연구하고자 한다.

2. 확산률 측정에 대한 ISO 방법론

2.1 기본 원리

확산률 측정에 있어서 일반적인 원리는 Time Domain에서 반사와 확산의 효과에 대한 관찰을 통해 가장 잘 설명된다. Fig. 4는 3개의 밴드패스 필터를 통과한 임펄스 응답으로, 시료의 확산 표면으로부터 서로 다른 방향으로 반사된 음을 마이크로폰으로 잡은 것이다.

반사음의 초기 부분이 서로 높은 상관관계에 있다는 것은 Fig. 4에서와 같이 알 수 있다. 즉, 반사의 초기 부분들이 일치하며 이 초기반사 부분은 가장 짧은 경로를 취한다(Fermat의 원리). 즉, 이 일치하는 부분은 동일 위상에서 음압이 강화되고 반대로 반사의 후기 부분은 위상이 같지 않으므로 특정 방향의 영향을 강하게 받는다. 결과적으로 반사된 임펄스 응답의 “꼬리(즉, 후기부분)”에 있어서는 확산된 음에너지 부분을 포함하고 있게 된다. 즉, 서로 다른 시료에 대하여 얻어진 임펄스 응답에 대하여 위상을 고정시키고 그 다른 위상을 평균하는 방법을 사용한다.

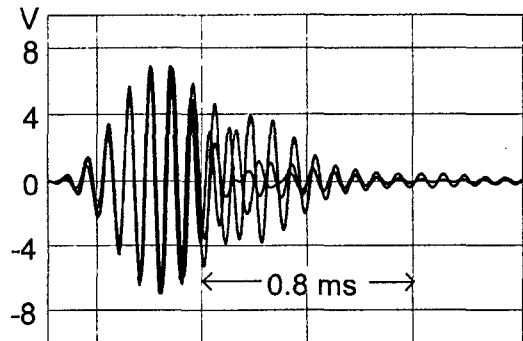


Fig. 4 다양한 방향에서 수음한 임펄스 응답

잔향실에서 흡음률에 대한 기존의 ISO 측정방법과 유사하게 시료를 턴테이블에 올려놓고, 임펄스 응답을 시료의 서로 다른 방향에서 구하여 확산률을 측정한다. 턴테이블의 회전에 의해 측정된 임펄스 응답은 위상이 일치하지 않는 확산음들을 평균하게 되므로 소멸된다.

확산음간의 통계적 독립성이 가정으로 되며 n개의

입펄스 응답을 일치시켜 평균할 때 초기 감쇠부분은 시료의 흡음에 큰 영향을 받는 반면 시료로부터 발생된 확산음에 의하여 에너지 감쇠가 측정된다. 이러한 차이를 이용하여 측정하게 되는 것이다.

2.2 측정 조건

잔향실의 적정 용적은 잔향실의 측척에 따라 결정된다(식 1참조). 턴테이블의 크기는 30/N m보다는 커야 하고 잔향실의 각 벽체로부터 적어도 1/N m 이상 떨어져서 위치해야 한다. 또한 ISO방법은 시료의 두께(h)가 턴테이블 직경(D)의 1/16이하여야 측정의 신뢰도가 높아진다고 설명하고 있다.

$$V \geq 200 \cdot N^3 (m^3) \quad (1)$$



Fig. 5 턴테이블의 직경과 시료 두께의 관계

시료의 배치시 시료의 중심이 턴테이블의 중심에서부터 턴테이블 직경의 1/8안쪽에 위치하도록 하여 회전시 최대한 대칭이 되도록 해야 한다. 또한 시료는 흡음률이 0.5이상되지 않아야 한다.

측정시 사용하는 음원은 MLS(Maximum Length Sequence)와 같은 주기적인 Pseudo-Random Noise를 사용하여야 하며 최소 음원의 위치는 2곳, 수음의 위치는 3곳으로 하여 총 6번의 측정 후 평균하여 사용한다.

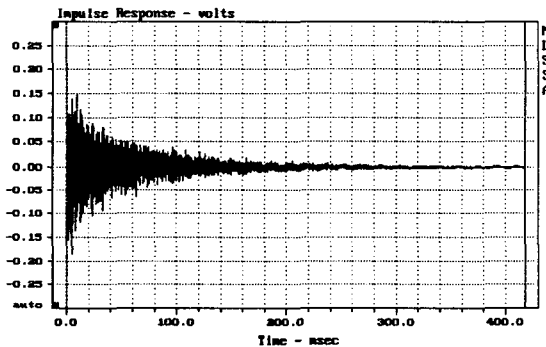


Fig. 6 MLSSA로 측정된 MLS음원의 입펄스 응답

2.3 측정 순서

본 실험은 확산음장인 부정형 5각형의 1:10 축소 잔향실내에서 측정하고자 하는 시료당 4가지 경우의 잔향시간 ($T_1 \sim T_4$)을 ISO의 규정에 따라 측정하여 확산률을 계산하였다.

우선 턴테이블을 잔향실의 중앙에 위치시킨 후 턴테이블을 돌리지 않은 상태에서 잔향실의 잔향을 측정한다(T_1). 두 번째 정지된 턴테이블 위에 측정시료를 위치시키고 잔향을 측정한다(T_2). 세 번째 측정시료 없이 턴테이블을 회전시키며 잔향을 측정한다(T_3). 네 번째 시료를 턴테이블 위에 위치시키고 회전시키면서 잔향을 측정한다(T_4).

턴테이블의 회전시 측정되어야 하는 입펄스 응답의 수(n)는 $60 \leq n \leq 120$ 의 범위를 가져야 하므로, 만약 n이 72일 경우 회전각 $\Delta\phi$ 이 5° 일때마다 측정하여 72번을 측정하게 된다.

Table 1 확산률 측정시 필요한 잔향시간의 측정상태

| 잔향시간 | 시료 | 턴테이블 |
|-------|----|------|
| T_1 | 없음 | 정지 |
| T_2 | 있음 | 정지 |
| T_3 | 없음 | 회전 |
| T_4 | 있음 | 회전 |

2.4 확산률의 계산

측정시 온도, 상대습도의 변화가 발생할 경우 고주파 영역에서 공기 흡음률에 의해 영향을 크게 받으므로 적어도 상대습도는 40%이하가 되도록 유지하고 습도의 변화시 보정식에 의해 보정하여야 한다.

잔향측정에 있어서는 최고 음압을 0dB로 가정하였을 때 -30dB까지의 음을 확보할 수 있어야 하며 잔향 계산시 -5dB~-20dB범위의 음감쇠 곡선으로 잔향을 계산한다. 또한 주파수별 분석시 1/3옥타브 밴드를 사용하여 측정하게 된다.

측정된 잔향 다음 식(2,3,4)에서 확산률을 계산하게 된다. α_s 와 α_{spec} 은 각각 T_2 와 T_1 간, T_3 와 T_4 간의 잔향차에 의한 흡음률이라 할 수 있다. 단, α_s 는 턴테이블이 정지한 상태에서의 흡음률이며 α_{spec} 은 다방면의 입사음을 고려하여 테이블을 회전시키면서 측정된 흡음률이다.

$$\alpha_s = 55.3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{C_2 T_2} - \frac{1}{C_1 T_1} \right) \quad (2)$$

$$\alpha_{spec} = 55.3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{C_4 T_4} - \frac{1}{C_3 T_3} \right) \quad (3)$$

$$s = \frac{\alpha_{spec} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} \quad (4)$$

3. 1:10 축소 잔향실을 이용한 확산률 측정

3.1 실험 조건

본 연구에서는 ISO방법론을 이용하여 1:10 축소잔향실에서 반구의 크기별 확산률을 측정하였다.

반구는 직경이 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5cm의 5종류 (실물 크기에서 돌출 높이가 각각 15, 20, 25, 30, 35cm)이며 모든 시료면적이 반구로 채워졌다.

회전각 $\Delta\phi$ 는 36° 로 설정하여 총 n이 100이 되도록 하였으며 각 경우 2개소에 위치한 고주파 스피커를 통해 500Hz~80kHz까지의 MLS신호를 출력하여 3개소에서 1/8" 마이크로폰을 통해 수음하였다. 측정시 사용된 소프트웨어는 MLSSA 2000 System을 사용하였다.

Table 2 사용기자재 사양

| 사용기자재 | 제작사 및 국가 |
|---------------------|-------------------|
| 1/8" 마이크로폰 | B&K Type 4138 |
| Measuring Amplifier | B&K Type 2610 |
| 고주파 스피커 | 모토로라, 소니 트위터 |
| 탭핑모터 | SANYO, Japan |
| Software | MLSSA 2000 System |

630Hz~40kHz대역에 대해서 잔향 측정시 고주파 영역에서 공기의 흡음률에 의해 잔향시간이 크게 줄고 측정치의 변동이 심하므로 축소 잔향실내에 질소가스를 주입하여 상대습도가 5%, 내부온도가 20°C가 되도록 유지하였다.

3.2 결과

상기 5가지 종류의 반구 확산률을 측정결과 Fig. 8에서와 같이 저주파에서의 확산률은 0.1을 밑도는 수준으로 측정 되었으나, 중주파수 이후에는 최고 0.6정도의 확산률을 보였다. 또한 직경이 3.0cm인 반구의 경우가 평균적으로 가장 큰 확산률을 보인 반면 직경이 1.5, 2.0cm인 반구의 경우 확산률이 0.1~0.2 수준으로 상대적으로 작은 값을 보였다.



Fig. 7 기자재 구성 모습

또한 확산률 실험시 요구되는 신뢰도(δ_s)를 표준편차를 이용하여 계산한 결과 ISO의 95%이상 신뢰도 기준에 대해 95.2%로 나타났다.

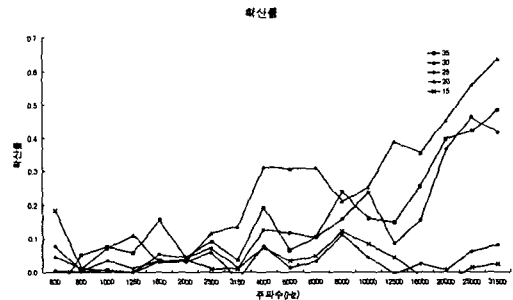


Fig. 8 5가지 반구의 주파수별 확산률

δ_{a_i} 및 $\delta_{a_{spec}}$ 는 T_1, T_2 의 경우 6번 측정시 발생한 각각의 잔향 편차와 평균 값으로, T_3, T_4 의 경우 회전각 $\Delta\phi$ 에 의해 결정된 n회의 측정에 의해 발생한 잔향 편차와 평균값으로 계산하게 된다.

$$\delta_{a_i} = \frac{55.3V}{cS} \sqrt{\left(\frac{\delta_2}{T_2^2} \right)^2 + \left(\frac{\delta_1}{T_1^2} \right)^2} \quad (5)$$

$$\delta_{a_{spec}} = \frac{55.3V}{cS} \sqrt{\left(\frac{\delta_4}{T_4^2} \right)^2 + \left(\frac{\delta_3}{T_3^2} \right)^2} \quad (6)$$

$$\delta_s = \left| \frac{\alpha_{spec} - 1}{1 - \alpha_s} \right| \sqrt{\left(\frac{\delta_{a_{spec}}}{\alpha_{spec} - 1} \right)^2 + \left(\frac{\delta_{a_i}}{1 - \alpha_s} \right)^2} \quad (7)$$

$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$: T_1, T_2, T_3, T_4 의 측정시 발생한 표준 편차

4. 결론

확산률은 정확한 잔향시간의 예측 및 측정, 음장의 정확한 해석, 시뮬레이션 모델의 적용 그리고 다양한 실내음장성능을 예측하고 측정하는데 있어서 중요한 인자로서 작용한다. 또한 실내음향의 성능을 결정하는데 중요한 요소인 확산체(Diffuser)의 확산성능을 정확히 측정하고 가장 간단한 형태인 반구를 크기별로 확산률을 측정하였다.

그러나 향후 기본 확산체인 반구의 밀도, 조합, 표면상태, 재료의 구성등을 통해 추가 연구가 진행될 경우 과학적인 방법에 의한 콘서트홀의 설계 및 확산 음장에 대한 설계에 있어서 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

아울러, 향후 축소모형에 이를 적용하여 벽체 및 무대부가 확산재로 구성되어 있을 경우 각 경우별 음장을 재현하여 객관적 확산률 지표 실험과 더불어 청감실험을 병행할 계획이다. 이를 통해 청감적 반응과 확산률과의 관계도 파악될 것이다.

참 고 문 헌

- (1) ISO/CD 17497.2000. Acoustics - Measurement of the random incidence scattering coefficient of surfaces.
- (2) AES-4id-2001. AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems - Characterization and measurement of surface scattering uniformity. J. Audio Eng. Soc. 49 (2001) 148-165
- (3) M. Vorlaender & E. Mommertz. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients. Applied Acoustics 60 (2000). 187-199.
- (4) D'Antonio P, Cox T. J. Two decades of sound diffuser design and development part 1: applications and design. J. Audio Eng. Soc. 46(11). (1998) 955-76