

ISO 방법론을 이용한 축소 잔향실에서의 확산계수 측정

Measurements of Scattering Coefficients Using the ISO Method in a Model Reverberation Chamber

전진웅*, 이성찬**, 류종관**
(Jin-Yong Jeon*, Sung-Chan Lee**, Jong-Kwan Ryu**)

*한양대학교 건축공학부, **한양대학교 대학원 건축공학과
(접수일자: 2003년 1월 27일; 수정일자: 2003년 3월 19일; 채택일자: 2003년 4월 12일)

콘서트홀의 음향성능을 결정짓는 중요한 요소 중의 하나로 알려진 확산현상은 실내마감재료의 "확산계수"에 의해 결정된다. 확산음장에서 임의입사 확산계수를 측정하도록 제안한 ISO (International Organization for Standardization) 측정방법을 기반으로 목재 반구 확산체와 각재확산체의 크기 및 점유밀도 변화에 따른 확산계수를 축소잔향실에서 측정하였다. 측정결과 15 cm 이상 높이의 반구가 가장 높은 확산계수를 보였으며, 반구의 경우 전체 점유밀도가 50%에서, 각재의 경우는 약 30% 점유에 각각 높은 확산계수를 보였다.

핵심용어: 확산현상, 확산음장, 확산계수

주요분류: 건축음향 분야 (7.5)

The degree of diffusion, characterized by the "scattering coefficient" of surface materials, has been known to be one of the most important factors in determining the acoustical qualities of concert halls. Based on the suggested ISO method, which measures the random-incidence scattering coefficient of surfaces in a diffuse field, the scattering coefficients of different sizes and densities of wooden hemispheres and cubes were measured in model-scale reverberation rooms. As a result, wooden hemispheres with a structural depth of more than 15 cm have the highest average (500 Hz~4 kHz) scattering coefficient. It was also found that the scattering coefficient becomes higher when the diffuser density reaches about 50% for hemispheres and 30% for cubes.

Keywords: Diffusion, Diffuse field, Scattering coefficient

AT&K subject classification: Architectural acoustics (7.5)

1. 서론

19세기 Sabine의 잔향식 이후 도입된 흡음률의 개념은 지난 20세기 전반에 걸쳐 음향설계에 없어서는 안될 중요한 지표로서 활용되어 왔다. 또한 컴퓨터의 발달로 인하여 음선추적법 (ray tracing)을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램들이 많은 발전을 이루었으며 이러한 시뮬레이션 프로그램들을 이용하여 실제 시공될 공간의 각종 음향적 성능들을 미리 평가하는 것이 가능하게 되었다. 또한 기청화 시스템을 통해 시공될 공간의 각 좌석에서의 소리를 미리 예측하여 들을 수 있는 수준까지 이르렀

다. 그러나 컴퓨터 시뮬레이션으로 예측한 잔향시간 등이 실제 홀에서 측정한 값과 다소 차이가 있는 경우가 종종 발생한다. 이러한 이유는 음향설계시 흡음률이라는 음향지표 이외에는 재료 및 내부마감 형상에 따른 음향적 특성을 나타낼만한 마땅한 지표가 없기 때문이다. 또한 흡음률과 음선추적법만으로는 확산현상이나 회절현상 등과 같은 소리의 여러 가지 물리적 특징들을 잘 표현할 수 없기 때문이다. 특히 확산현상은 초기 반사음과 후기 잔향음에 많은 영향을 미치며 실의 음향성능을 좌우하는 중요한 요소이다. 과거에 지어진 고전적인 홀의 내부에는 각종 문양과 조각상들이 요소요소에 배치되어 있어 자연스럽게 확산현상을 유도하였으나 근대 이후 지어진 홀에서는 이러한 확산현상을 유도할만한 요소들이 건축설계시 많이 배제되어 있다. 따라서 딱딱하면서도 평평

책임저자: 전진웅 (jyjeon@hanyang.ac.kr)
133-791 서울시 성동구 행당동 17
한양대학교 건축공학부
전화: 02-2290-1795; 팩스: 02-2291-1793

한 면이 많은 현대의 홀에서는 깨지는 듯한 소리 (acoustic glare)를 종종 경험하게 된다[1]. 이렇게 깨지는 듯한 소리를 방지하기 위하여 음향설계시 주요반사면에 확산체를 설치하여 인위적으로 확산현상을 유도하는 경우가 빈번하다. 그러나 확산체를 과다하게 적용하게 되면 오히려 음압이 줄어들어 흡음현상이 발생하게 된다[2].

Erwin Meyer는 확산현상에 대해 정의 및 측정용 시도를 하였으나 실 표면의 확산체에 의한 확산현상을 계량화하는 데는 미흡했다[3]. 그 후 Schroeder는 잔향실에서 확산현상의 측정에 대한 연구[4]를 시작으로 확산체의 음향적 성능에 대한 연구결과를 정리하여 QRD (Quadratic residue diffuser)를 제안하였으며 실제 홀에 적용하였다 [5, 6]. 그러나 Schroeder가 제안한 QRD는 개략적인 계산을 통해 확산체를 설계하는 이론상의 한계가 있다[7]. 따라서 QRD보다 더 높은 확산성능을 보이는 디자인 설계도 가능하다[8]. 그러나 확산체에 의한 확산효과를 측정하는데 어려웠기 때문에 현재까지 확산현상에 관한 과학적이고 정량적인 측정방법은 아직 마련되어 있지 않다. 따라서 기존의 음향적 공간에 적용된 확산체에 대한 객관적인 평가도 할 수 없는 실정이다.

현재 음향학과 관련한 여러 연구기관에서 확산현상의 측정 및 정량적인 평가에 관한 연구가 활발히 진행 중이며 대표적으로 ISO (International Organization for Standardization)와 AES (Audio Engineering Society)에서 각각 확산에 대한 측정방법을 연구하고 제안하여 제정 중에 있다. 독일의 Mommertz와 Vorläender를 중심으로 한 ISO 측정방법은 확산음장에서 확산계수를 측정하는 방법[9]에 대해 연구하고 있으며 D'Antonio와 Cox를 중심으로 한 AES에서는 자유음장에서 확산계수를 측정하는 방법[10]에 대하여 연구하고 있다. 최근 들어 국내에서도 확산현상에 대한 관심이 높아지고 있으며 ISO 확산계수 측정에 관한 연구결과가 발표된 바 있다[11]. 본 논문에서는 ISO/TC 43/SC 2/WG25에서 연구하고 제안한 확산음장 (diffuse field)에서의 확산계수 (Scattering coefficient) 측정방법을 소개하고 측정방법에 따라 반구의 크기와 점유밀도 변화시 확산계수와 각재의 배치형태와 점유밀도 변화시 확산계수를 측정하였다.

II. 이론적 배경

2.1. 측정이론

ISO에서 제안한 확산음장에서의 확산계수 측정방법은

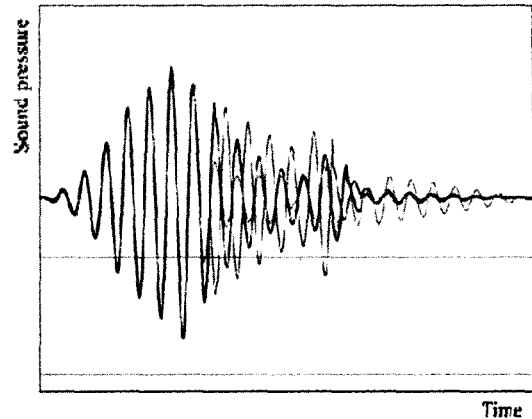


그림 1. 세가지 방향에서 수음한 임펄스 응답의 예
Fig. 1. Examples of the impulse responses measured at three different orientations of the test specimen.

시간 축 (Time domain)에서의 반사와 확산에 의한 영향을 보면 정확히 이해할 수 있다[12-14]. 다음의 그림 1은 서로 다른 세가지 방향에서 수음한 임펄스 응답 (Impulse response)의 모습이다.

그림 1에서 보면 임펄스 응답의 초기부분은 거의 일치하는 것을 볼 수 있으며 따라서 세가지 임펄스 응답의 초기 부분은 높은 상관관계를 가진다. 그러나 후기 부분은 표면의 형상에 의해 소리의 경로가 바뀌면서 경로차가 발생하여 아주 짧은 지연이 발생한다 (Fermat's 원리). 따라서 임펄스 응답의 후기 부분에는 표면에 의해 발생한 확산현상의 정보가 들어있다고 볼 수 있다. 따라서 각 방향에서 수음한 임펄스 응답들을 Synchronized (phase-locked) 평균하면 후기음 부분이 상쇄되어 직접음의 성분만을 가지고 있는 임펄스 응답을 얻어낼 수 있다. 후기부분에 확산성분을 포함한 임펄스 응답과 직접음의 성분만을 포함한 임펄스 응답으로부터 확산성분을 얻어 낼 수 있으며 이를 이용하여 확산계수를 계산하게 된다.

2.2. ISO 확산계수 측정 조건

확산계수의 측정은 확산음장인 잔향실에서 실시되며 잔향실의 체적은 적어도 $200 \cdot N^3 (m^3)$ 이상 되어야 하고 잔향실에 시료를 회전시킬 수 있는 시료 회전판 (Turn table)을 설치하여 확산계수를 측정한다. 여기에서 N 은 물리적 축적 비율이다. 시료 회전판의 상판 (base plate)은 원형이어야 하며 재질은 강한 반사재질로 만들어져야 한다. 또한 ISO에서는 시료 회전판 상판의 확산계수를 규정하고 있으며 상판의 확산계수가 이 규정을 넘지 말아야 한다. 아래의 그림 2에서는 ISO에서 규정한 상판의 확산계수 (S_{base})과 본 연구 시 사용된 시료 회전판 상판의

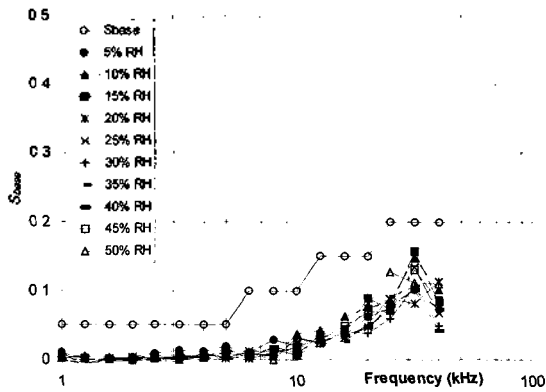


그림 2. 서로 다른 습도에서 상판의 확산계수
Fig. 2. The maximum scattering coefficients for the base plate itself at different relative humidities.

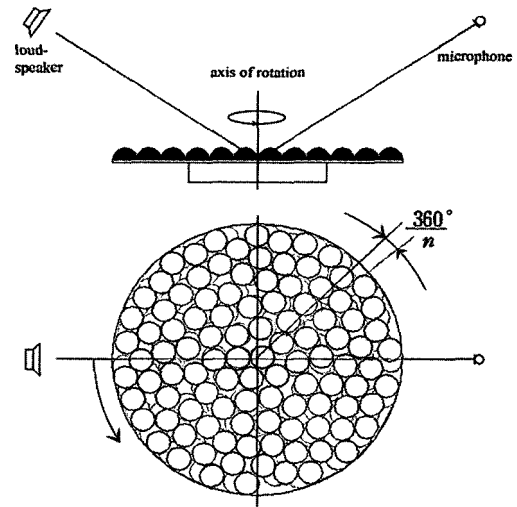


그림 3. 확산계수 측정을 위한 개략도
Fig. 3. Experimental arrangement.

각 습도별 확산계수를 볼 수 있다.

또한 상판의 직경 (d)은 최소 $3\text{ m}/N$ 이상이어야 하고, 잔향실의 벽으로부터 최소한 $1\text{ m}/N$ 이상 떨어져야 한다. 측정하는 시료의 돌출 높이 (h)가 $d/16$ 를 넘지 말아야 하며 시료의 흡음률은 전체 주파수 대역에서 0.5를 초과하지 않아야 한다.

2.3. ISO 확산계수 측정 및 계산

확산음장에서의 확산계수 측정방법은 기존의 흡음률 측정방법인 ISO 354, *Acoustics—Measurement of sound absorption in a reverberation room*을 기반으로 하고 있다. MLS와 같은 주기적인 신호나 Sweep 신호를 사용하여 측정하고, 적어도 2개소 이상의 음원과 3개소 이상의 흡음침에서 측정하여 총 6회를 측정한다. 시료 회전판이 설치되어 있을 경우 시료의 유무에 따른 2개의 잔향시간 (T_1, T_2)을 측정한 후 시료 회전판의 회전시 시료의 유무에 따른 2개의 잔향시간 (T_3, T_4)을 측정한다. 총 4개의 잔향시간을 측정하여 시료 회전판의 정지시와 회전시 각각의 경우 시료의 흡음률을 계산하여 확산계수를 계산하게 된다. 4가지 잔향시간의 측정 상태는 다음의 표 1에 나타나 있다.

표 1. 4가지 잔향시간의 측정상태

Table 1. The measurement condition for the four different reverberation times.

Reverberation time	Test sample	Turn table
T_1	not present	not rotating
T_2	present	not rotating
T_3	not present	rotating
T_4	present	rotating

시료 회전판의 1회 회전시 측정횟수(n)는 60회 이상 120회 이하로 측정하여야 하며, 측정각도($\Delta\phi$)는 $360^\circ/n$ 이며 따라서 $3\sim 6^\circ$ 의 범위를 갖는다. 본 연구에서는 $\Delta\phi = 5^\circ$ 로 설정하여 1회 회전시 72회 측정하였다. 또한 잔향실의 문을 닫은 후 내부 공기 흐름의 안정화를 위하여 최소한 $15/N$ 분 이상 기다린 후 측정을 실시한다. 그림 3은 확산계수 측정에 대한 개략도이다.

측정한 4개의 잔향시간을 아래의 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 시료 회전판 정지시 시료의 흡음률 (α_s)과 시료 회전판 회전시 시료의 흡음률 (α_{spec})을 구하게 된다.

$$\alpha_s = 55.3 \frac{V}{cS} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (1)$$

$$\alpha_{spec} = 55.3 \frac{V}{cS} \left(\frac{1}{T_4} - \frac{1}{T_3} \right) \quad (2)$$

여기에서 V 는 잔향실의 체적이며 c 는 공기 중에서 소리의 속도, S 는 시료의 면적이다. 위에서 계산된 두가지 경우의 흡음률과 다음의 식 (3)을 이용하여 확산계수(s)를 계산한다.

$$s = \frac{\alpha_{spec} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} \quad (3)$$

식 (3)에 의해 0~1사이의 확산계수 값이 계산되어야 하나 테두리 효과 (edge effect)에 의해 1이 넘는 값이 측정될 수 있다.

Ⅲ. 반구의 확산계수 측정

3.1. 측정 개요

본 연구에서는 ISO 확산계수 측정방법을 이용하여 기본적인 확산형태인 반구를 이용하여 크기별 점유밀도별 확산계수를 측정하였다. 측정 프로그램은 MLSSA 2000 System을 사용하였으며 1/10 축소잔향실에서 트위터 스피커를 이용하여 2개소에서 신호를 각각 발생시킨 후 B&K 1/8 inch microphone을 이용하여 3개소에서 각 음원에 따라 수음하였다. 시료 회전판의 직경은 4.2/10 m였으며 다음의 그림 4는 1/10 축소잔향실에서 확산계수 측정 당시의 장비 구성모습이다.

3.2. 크기에 따른 반구의 확산계수 측정

확산계수 측정방법을 토대로 5가지 크기의 반구의 확산계수를 측정하였다. 시료의 높이 ($h \cdot 10$)가 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 cm 인 5가지의 반구를 사용하였으며 (이후

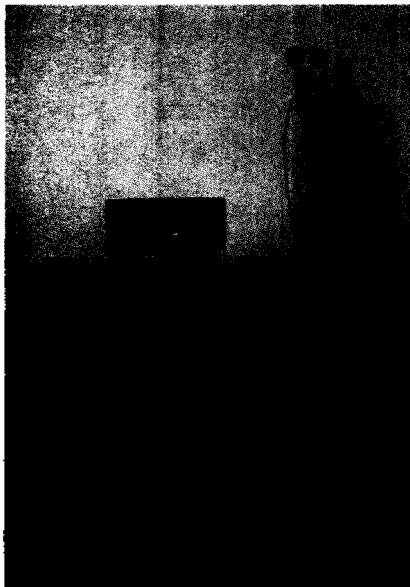


그림 4. 1/10 축소 잔향실에서 확산계수 측정을 위한 장비구성 모습
Fig. 4. Test setup of the 1/10 scale reverberation chamber for measuring scattering coefficients.

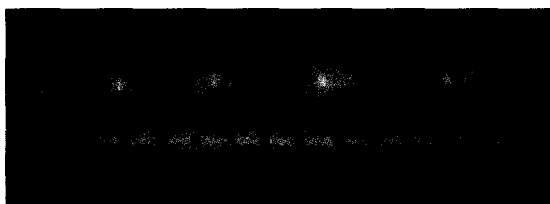


그림 5. 확산계수 측정당시 사용한 5가지 반구의 모습
Fig. 5. The five different hemispheres used in the measurements.

확산체는 실물크기, 측정 주파수 대역은 실제 측정치로 표기함) 각 크기별로 시료 회전판을 가득 채웠을 경우의 확산계수를 측정하였다. 측정에 사용한 5가지 반구는 독일의 Klass & Gessmann에서 제작한 높은 밀도를 가진 딱딱한 재질의 나무이며 그림 5는 측정당시 사용한 5가지 반구의 모습이다.

측정 결과 그림 6과 같이 저주파 대역의 확산계수는 거의 0에 가까운 값이 측정되었다. 15, 17.5 cm 반구의 경우 확산계수가 다른 크기의 반구에 비해 비교적 높게 측정되었으며 중주파수 대역이후 최고 0.8 이상의 확산계수를 보였다. 7.5 cm 반구의 경우 500 Hz대역 이후부터 확산계수가 증가하기 시작하였으며 17.5 cm 반구의 경우 200 Hz대역부터 확산계수가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 따라서 반구의 크기가 커질수록 저주파 대역의 확산이 증가하는 것으로 나타났다.

그림 7에서는 반구의 주파수별 확산계수를 500 Hz대역

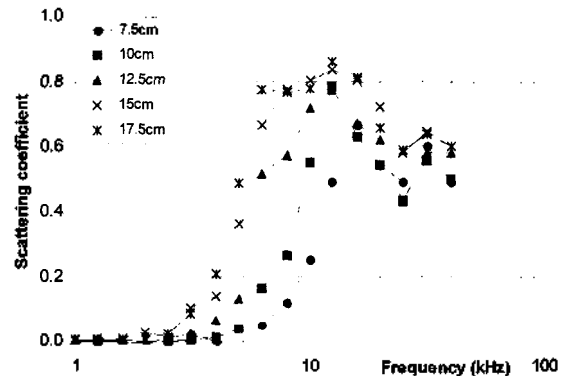


그림 6. 각 크기별 반구의 주파수별 확산계수
Fig. 6. Scattering coefficients of the "diffusers" (the circular plates completely covered with wooden hemispheres) measured in the reverberation chamber.

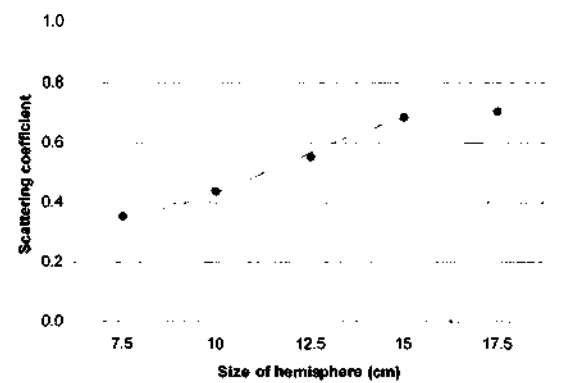


그림 7. 반구의 크기별 평균 확산계수
Fig. 7. Scattering coefficients, obtained after averaging of 1/3-octave band frequency-dependent values from 500 Hz to 4 kHz, as a function of the size of the hemispheres.

이후부터 평균한 값을 각 크기별로 나타내었다. 측정결과 15, 17.5 cm의 반구의 경우 0.7가량의 높은 확산계수를 보인 반면 나머지 크기의 반구는 0.6이하의 값을 보였으며 15 cm의 반구까지는 크기가 증가할수록 확산계수가 뚜렷한 증가를 보이고 있으나 그 이후 확산계수의 증가량이 둔화되는 경향을 볼 수 있다.

3.3. 점유밀도의 변화에 따른 반구의 확산계수 측정

크기가 다른 5가지 반구의 확산계수 측정결과 가장 큰 확산계수를 보인 17.5 cm의 반구를 사용하여 그림 8과 같이 전체 점유밀도를 증가시키며 확산계수를 측정하였다.

점유밀도 증가에 따라 측정된 1/3 옥타브 밴드 주파수별 확산계수를 500 Hz 대역부터 평균한 값을 각 점유밀도별로 그림 9에 나타내었다. 점유밀도가 14%인 경우 0.3정도의 확산계수 값을 보였으며 43%이후 증가량이 감소하여 57%이후 0.7이상의 높은 확산계수 값이 측정되었다.

IV. 각재의 확산계수 측정

4.1. 배치형태에 따른 각재의 확산계수 측정

한변의 길이가 20 cm인 정육면체의 각재를 사용하여

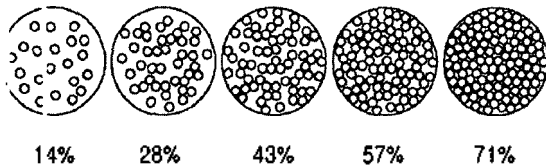


그림 8. 밀도 증가에 따른 확산계수 측정시 반구의 배치모습
Fig. 8. Features of the coverage areas increased by the diffuse densities of the hemispheres covering the base plate.

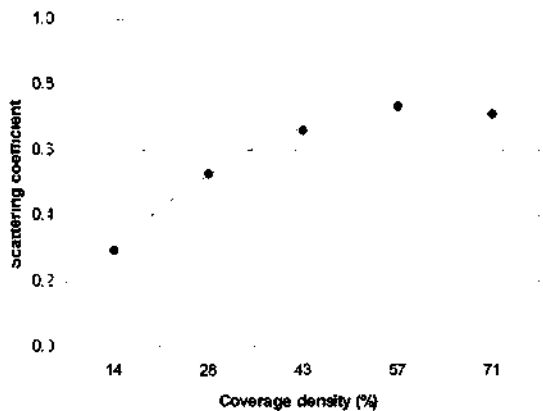


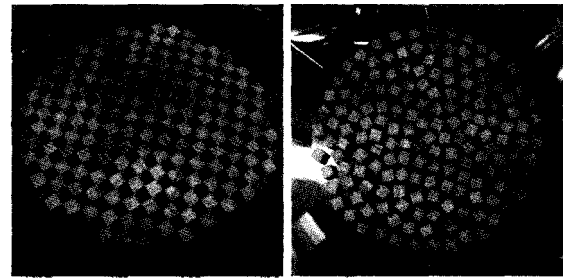
그림 9. 17.5 cm 반구의 점유밀도 증가에 따른 확산계수
Fig. 9 Scattering coefficients for the 17.5 cm hemisphere diffusers, as a function of the area percentage of the hemispheres covering the base plate.

같은 점유밀도일 경우 일정한 패턴을 가지고 배치되었을 경우와 무작위로 배치되었을 경우의 확산계수를 측정하였다. 다음의 그림 10은 측정당시의 배치 모습이다.

같은 점유밀도의 각재를 정렬 (pattern) 배치와 임의 (random) 배치시 주파수별 확산계수의 측정결과를 그림 11에 나타내었다. 정렬배치와 임의배치시 각 주파수별 확산계수가 비슷한 경향을 보이는 것을 볼 수 있다. 따라서 전체적으로 일정한 점유밀도를 가지고 확산체가 분포되었을 경우 배치 형태에는 크게 영향을 받지 않을 것으로 사료된다.

4.2. 점유밀도 증가에 따른 각재의 확산계수 측정

한변의 길이가 20 cm인 각재의 전체적인 점유밀도를 10%에서 70%까지 10%씩 증가시키며 확산계수를 측정하였다. 각재의 점유밀도 증가에 따른 1/3 옥타브 밴드의 주파수별 확산계수의 측정결과를 500 Hz 대역부터 평균하여 각 점유 밀도별로 그림 12에 나타내었다.



(a) 정렬배치시 (b) 임의배치시
(a) pattern arrangement (b) random arrangement

그림 10. 각재의 확산계수 측정모습
Fig. 10. Measurement scattering coefficients with different surface Experimental arrangements in box-type diffusers.

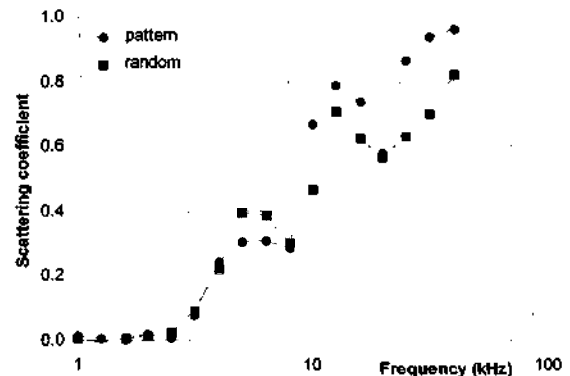


그림 11. 각재의 정렬배치와 임의배치시 주파수별 확산계수
Fig. 11. Scattering coefficients with different surface arrangements in box-type diffusers.

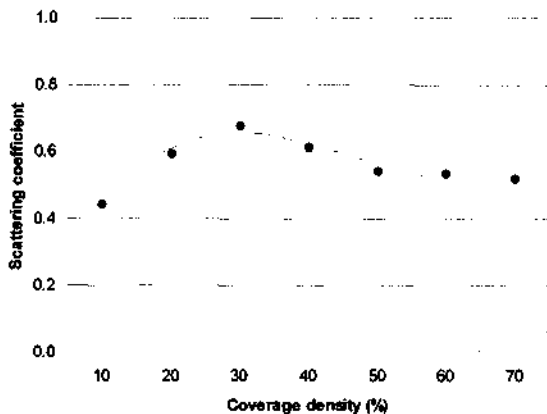


그림 12. 20 cm 각재의 점유 밀도증가에 따른 평균 확산계수
 Fig. 12. Scattering coefficients for the 20 cm cube diffusers, obtained from averaging 1/3-octave band frequency-dependent values from 500 Hz to 4 kHz, as a function of the area percentage of the cubes covering the base plate.

그림 12에서 볼 수 있듯이 각재의 경우 점유밀도 증가에 따른 확산계수 측정결과 10%일 경우 0.44 정도의 확산계수를 보였으며 30%일 경우 0.7 정도로 최대의 확산계수를 보였다. 30% 이후 확산계수가 감소하여 70%에서는 0.5가량의 확산계수를 보였다. 따라서 각재의 경우 확산계수가 전체적인 점유밀도가 30%에서 최적의 확산성능을 나타낸다고 할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 ISO/TC 43/SC 2/WG25에서 제안한 확산음장에서의 확산계수 측정방법을 기반으로 크기와 점유밀도 변화에 따른 반구확산체의 확산계수와 배치와 밀도 변화에 따른 각재확산체의 확산계수를 각각 측정하였다. 측정결과 15 cm 이상의 돌출높이를 가지는 반구에서 확산계수가 높게 나타났으며 전체적인 점유밀도 약 50%에서 최적의 확산성능을 보였다.

각재의 경우 전체적인 점유밀도가 약 30%인 경우에서 높은 확산계수를 보였으며 전체적으로 일정한 점유 밀도를 가지고 확산체가 분포되었을 경우 각 주파수별 확산계수가 비슷한 경향을 보여 배치 형태에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

본 논문의 확산계수 측정에 관한 연구결과는 향후 콘서트홀이나 오페라 하우스 등의 음향설계 시 적용될 확산체 설계에 기초적인 자료가 될 것이며, 본 논문의 측정방법

론에 의해 산출된 확산계수는 음향설계시 음향설계자, 확산체 제작자, 설계자들의 의사소통에 있어서 매우 중요한 지표로서 활용될 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산학협동재단 학술연구비 지원사업 (2001. 6. 1~2003. 5. 31)에 의한 결과임.

참고 문헌

1. L. L. Beranek, "Concert and opera halls: How they sound," *Acoustical Society of America*, Woodbury, NY, 1996.
2. F. P. Mechel, "The wide-angle diffuser - A wide-angle absorber?," *ACUSTICA*, 81, 379-401, 1995.
3. E. Meyer, "Definition and diffusion in rooms," *J. Acoust. Soc. Am*, 26 (5), 630-636, 1954.
4. M. R. Schroeder, "Measurement of sound diffusion in reverberation chambers," *J. Acoust. Soc. Am*, 31, 1407-1414, 1959.
5. M. R. Schroeder, "Diffuse sound reflection by maximum-length sequences," *J. Acoust. Soc. Am*, 57 (1), 149-150, 1975.
6. M. R. Schroeder, "Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: more lateral sound diffusion," *J. Acoust. Soc. Am*, 65, 958-63, 1979.
7. T. J. Cox and Y. W. Lam, "Prediction and evaluation of the scattering from quadratic residue diffusers," *J. Acoust. Soc. Am*, 95 (1), 297-305, 1994.
8. T. J. Cox, "The optimization of profiled diffusers," *J. Acoust. Soc. Am*, 97 (5), 2928-2936, 1995.
9. ISO/CD 17497, Acoustics - Measurement of the random-incidence scattering coefficient of surfaces, 2001.
10. AES-41d-2001, AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems - characterisation and measurement of surface scattering uniformity, *J. Audio. Eng. Soc.*, 49 (3), 149-165, 2001.
11. J.-Y. Jeon and S.-C. Lee, "Effects of size and density of diffusers on scattering coefficients measured in a 1:10 reverberation chamber," *J. Acoust. Soc. Am*, 112 (5), Pt. 2, 2225, Pan-American/Iberian Meeting on Acoustics, November 2002.
12. M. Vorländer and E. Mommertz, "Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients," *Applied Acoustics*, 60 (2), 187-199, 2000.
13. E. Mommertz, "Determination of scattering coefficients from the reflection directivity of architectural surface," *Applied Acoustics*, 60 (2), 201-203, 2000.
14. E. Mommertz and M. Vorländer, "Measurement of scattering coefficients of surfaces in the reverberation chamber and in the free field," *Proceedings of 15th International Congress on Acoustics*, 577-580, Trondheim, 1995.

저자 약력

• 전 진 용 (Jin-Yong Jeon)



1982년 2월: 한양대학교 건축공학과 (공학사)
 1981년~1988년: 대림산업(주) 기술연구소
 1991년 8월: University of Sydney, Master of Building Science
 1994년 5월: University of Sydney, Ph.D. in Architecture
 1994년~1997년: University of Sydney, Post-Doc
 1998년~현재: 한양대학교 건축공학부 부교수

• 이 성 찬 (Sung-Chan Lee)



2002년 2월: 한양대학교 물리학전공 (이학사)
 건축공학전공 (공학사)
 2002년~현재: 동대학원 건축공학과 석사과정

• 류 중 환 (Jong-Kwan Ryu)



2000년 2월: 성균관대학교 건축공학과 (공학사)
 2003년 2월: 한양대학교 건축공학과 (공학석사)
 2003년~현재: 한양대학교 건축공학과 박사과정