

# 실내음향에 확산성이 미치는 영향에 관한 실험적 연구

한 찬 훈

충북대학교 공과대학 건축공학과

전 진 용

한양대학교 공과대학 건축공학부

## A Pilot Study on the Influence of Surface Diffusivity on the Acoustics in Rooms

Haan, Chan-Hoon

Dept. of Architectural Engineering, Chungbuk National University

Jeon, Jin-Yong

Division. of Architectural Engineering, Hanyang University

### 요 약

본 논문은 건축실내표면의 확산성이 실내음향에 미치는 영향의 범위와 그 정도를 알기 위하여 가상의 홀을 시뮬레이션하여 확산성의 차이에 따른 실내음향인자의 변화를 분석하였다. RT, EDT, C80 등의 음향인자의 분석을 통하여 실내의 확산성이 초기 음에너지의 증가와 확산에 큰 영향을 미치고 있으며 특히, 천장보다는 벽체의 확산면이 명료도의 증가와 음이해도의 상승에 기여하는 것으로 나타났다.

의 음향성능을 예측할 수 있음을 나타내고 있다. 또한 또 다른 논문<sup>1)</sup>에서 실내 표면의 거친 정도(roughness)가 독립된 인자(surface diffusivity)로서 실내음향에 미치는 중요성에 대하여 나타낸 바가 있다. 본 연구에서는 가상의 홀을 설정하여 실내표면의 확산정도에 따른 실내음향인자의 변화를 분석하여 표면의 확산성이 실내음향에 미치는 영향과 그 관계를 나타내고자 한다. 따라서 본 연구는 표면의 거칠기가 콘서트홀 음향의 질적 향상을 위해 어떻게 적용되어야 하는가에 대한 기초적인 조사를 하기 위한 목적을 두고 있다.

### 1. 서론

1960년 이후 실시된 많은 실내음향연구의 주된 목표는 주관적인 응답과 음향인자의 상관관계를 찾는 것이었다. 그러나 이런 연구들의 결과는 실제 공연장의 설계에 항상 쉽게 적용되는 것은 아니다. 음향지수의 값을 계산하기 위해서는 매우 정밀한 디자인 데이터가 필요한데 실제 초기단계에서는 이러한 값의 산출이 어려움으로 홀의 음향에 대해서 작은 부분만이 예상될 수 있을 뿐이다. 일련의 Haan과 Fricke<sup>1)</sup>의 논문은 최초의 설계단계에서 홀의 기본적인 설계 데이터가 홀

### 2. 확산성 이론의 고찰

콘서트홀에서는 소리가 되도록 많은 방향에서 청취자에게 도달할수록 확산음장을 이룰 수 있음으로 좋은 소리로 간주된다. 소리의 확산이 홀의 음향에 영향을 미치는 중요한 요소라고 믿으면서도 그 역할에 대한 증명은 매우 미비하였다. 그 이유는 확산성을 측정하기가 기술적으로 어려웠고 Meyer<sup>2)</sup>가 발견시킨 확산성의 측정방법에도 불구하고 실 표면에서의 확산요소의 역할을 계량화 하기가 어려웠기 때문이었다.

확산은 한 점에 도달하는 소리에너지의 방향적

분포의 척도로 정의할 수 있다. 확산성을 측정하고 잔향실에서 확산의 정도를 평가하기 위한 몇 가지 방법이 제시되긴 했지만 홀의 음향을 평가하기에는 만족스러운 것은 없었다.

Schultz<sup>(10)</sup>는 1971년에 실내에 확산체를 사용하고, 격자로 덮어진 벽표면을 적용하고, 흡음을 추가함으로써 확산을 얻을 수 있는 방법을 제시하였다. 잔향실에서의 확산음장에 관한 연구<sup>(11)</sup>로부터 흡음성이 높은 재료가 많은 큰공간에서 효과적인 확산음장을 만들기 위하여 불규칙한 방향으로 선정된 많은 양의 확산패널을 설치하는 것이 필수적이라고 밝혀졌다. 이것은 청중으로 가득 찬 객석이 높은 흡음성을 갖는 음악당과 같은 홀에서도 동일한 조건의 상태가 됨을 의미한다. 이는 또한 확산음장을 만들기 위해서는 확산체를 공간 전체에 여기 저기 흩어져서 설치하는 것이 필요함을 나타낸다.

Beranek<sup>(9)</sup>은 벽과 천장의 불규칙성에 근거하여 음확산에 대한 평가척도(rating scale)를 만들었다. 그는 소리의 좋은 확산을 위한 두 개의 요구조건을 제시하였다. 첫 번째는 실의 잔향이 짧은 경우 작은 반사회수 이후에 소리가 빨리 소멸되므로 잔향시간이 상당히 길어야만 한다는 것이다. 이것은 소리가 실에서 확산되기 위해서는 많은 반사를 거듭해야만 함으로 긴 잔향시간은 확산에 도움이 되기 때문이다. Beranek의 두 번째 요구치는 홀의 천장과 벽이 소리의 파장이 표면으로부터 반사될 때 확산할 수 있도록 불규칙적이어야 한다는 것이다.

Strom<sup>(10)</sup>은 청중이나 음악가에게 인식되어지는 홀의 음상(sound picture)은 좌석의 위치와 반사면의 지향성, 실의 모양, 실의 규모, 그리고 실내표면의 반사특성 및 확산정도에 의하여 상하개 영향받는다 고 하였다. 종종 확산체는 3차원상의 정형화된 플라스틱이나 실내표면에 새겨진 나무로 된 장식으로 나타나고 있다. 여기서 요구되는 것은 이런 확산 요소의 중요성이 정량화 되는 것인 것이다.

음악당에서 음의 확산에 영향을 미치는 반사체와 확산체의 효과를 알기 위한 몇개의 연구가 실행되었다. Somerville<sup>(11)</sup>은 음악당의 무대 위에 설치된 대형의 canopy나 반사판이 주관적으로 뛰어난 음감(tonal quality)을 제공하고 음원의 수직적인 상승의 효과를 제공한다고 주장하였다.

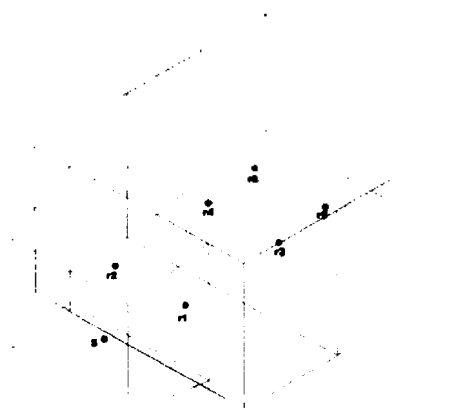
Strom<sup>(10)</sup>은 실내표면의 불규칙한 요소가 객석

과 무대의 음에너지 분포를 얼마나 변화시키는지에 대하여 조사하였다. 그는 무대 위에서 확산체의 유무에 따른 음의 세기를 측정하였다. 조사 결과 소리의 확산성은 천장과 벽에 확산체를 부여함에 따라 증가하였다. 이 결과는 무대위의 확산체는 연주자를 위한 음에너지 분포를 개선시키고 객석을 향한 초기에너지의 방출을 증가시킨다는 것을 의미한다.

### 3. 모델의 설정 및 적용

실내의 음상을 분석하고 음압레벨을 비롯한 음향인자들의 계산을 위하여 3차원 컴퓨터 시뮬레이션에 이용하였다. 본 연구에서 사용한 프로그램인 ODEON program은 음선추적법(ray-tracing method)과 허상법(image model method)을 동시에 사용하고 있으며 프로그램의 정확도나 검증은 이미 많은 연구에 의하여 발표되었으며 현재 구조에서 가장 광범히 사용되어지고 있다.<sup>(12)(13)(14)</sup>

본 연구를 위하여 가상의 홀을 선정하여 실내표면의 확산도를 차별하여 적용하였다. 각 홀은 D-1 모델을 기본으로 각각 벽과 천장에 확산정도를 다르게 하여 만들었다. 즉, D-1 모델은 벽과 천장을 평탄한 면으로 처리했으며, D-2의 경우는 벽에만, D-3의 경우는 천장에만, D-4의 경우는 벽과 천장에 확산체를 처리하여 D-1 모델보다는 D-2와 D-3가 D-2와 D-3보다는 D-4 모델이 더 많은 확산면을 가지도록 계획하였다. 각 모델의 두시도와 실내표면 상태는 (그림 1)부터 (그림 4)에 나타난 바와 같다.

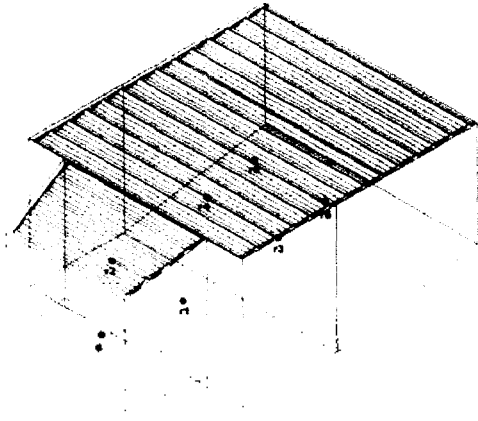


(그림 1) D-1 모델 (반사벽 및 반사천장)

각 모델의 실내 마감재료는 동일하게 적용하였으며 부위별 적용재료는 표 2와 같다.

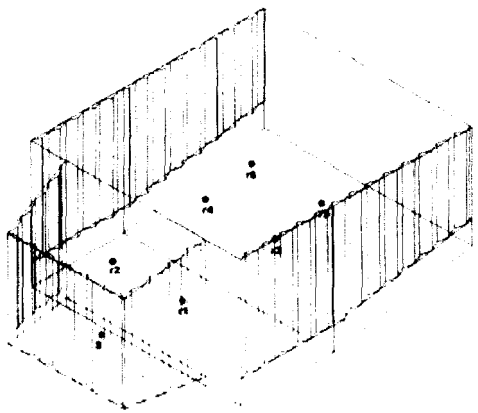
<표 2> 모델에 적용된 실내 마감재료

번호	부위	재료
1	천장 및 측벽	plaster board
2	무대바닥	wood flooring
3	객석바닥	접이식 의지
4	객석 뒷벽	흡음벽 ( $\alpha=0.5$ )

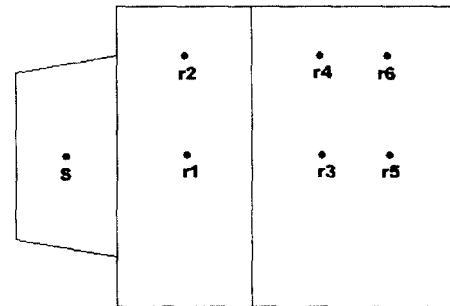


(그림 2) D-2 모델 (반사벽 및 확산천장)

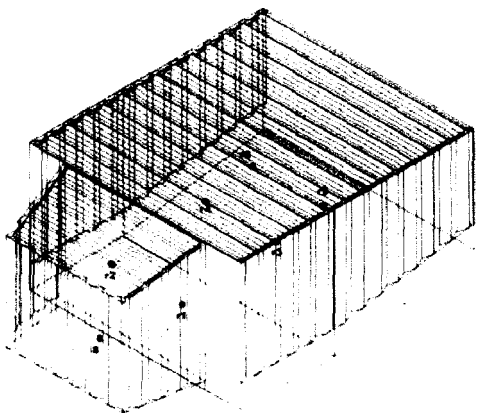
각 모델의 실내에 6개의 임의의 수음점을 바닥 위 1.2m 높이에 설정하고, 무대 중앙에 바닥 위 1.5m 위치에 1개의 음원을 설정하였다. 평면상에 나타난 음원과 수음점의 위치는 (그림 5)와 같다.



(그림 3) D-3 모델 (확산벽 및 반사천장)



(그림 5) 모델 평면상의 음원과 수음점의 위치



(그림 4) D-4 모델 (확산벽 및 확산천장)

본 연구의 시뮬레이션은 음원에서 임의로 발생시킨 음선을 그 음에너지가 소멸될 때까지 추적하고, 그 음선이 실내의 어떤 표면에 부딪힐 때마다 재료의 흡음률을 고려한 음에너지 방정식으로 계산하여 이 값들을 계속 추적해 나갔다. 본 연구에서는 시뮬레이션 마다 한 개의 음원당 2,000개의 음선을 방사하였으며 2,000개의 음선을 동시에 모두 추적하여 실내에서 음이 진행되는 양태를 분석하고, 수음점에서 최종적으로 음향지수의 계산치를 산정하였다. 수음점에서의 수음각은 좌우 180도 수평상태에서 상하 90도 범위에서 들어오는 모든 음선은 수음점은 중심으로 1m 범위에서 수렴하였다. 본 연구의 시뮬레이션 수행시 설정한 세원은 다음과 같다.

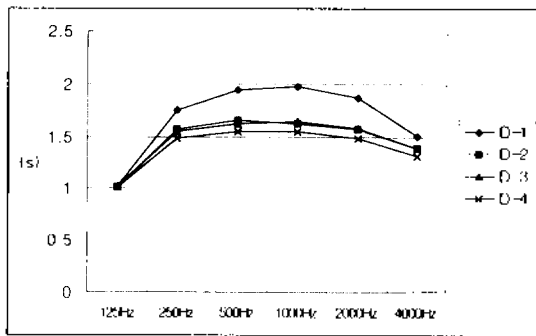
- 1) Number of Rays : 2,000개
- 2) Max. Number of Reflections : 200회
- 3) Impulse Response Length : 1,700ms
- 4) Impulse Response Resolution : 9ms
- 5) 음원의 파워레벨 : 120dB

#### 4. 분석

가상홀에 대한 시뮬레이션을 통하여 각 모델의 수음실에서 잔향시간(RT), 초기감쇠시간 (EDT), 명료도 ( $C_{80}$ )등의 음향인자의 값을 계산하여 분석하였다.

##### 1) 잔향시간 (Reverberation Time)

직용모델의 홀의 전체 잔향시간은 D-1홀에서 D-4홀로 갈수록 감소하는 경로 나타났다. 이것은 동일재료하에서 실내표면적의 차이에서 발생된 결과로 판정된다. D-1에 확산체를 추가시킬수록 실내표면적이 증가하여 작은 잔향이 발생되었다. 천장이나 벽에만 확산체를 설치한 D-2홀과 D-3 홀은 천장과 벽 모두에 확산체를 설치한 D-4에 비해서 잔향시간이 길게 나타났다. D-2와 D-3 홀은 거의 비슷한 값을 보여주고 있으나 천장보다 넓은 면적을 가진 벽체가 확산처리된 D-3 홀의 잔향이 천장만을 확산처리한 D-2홀 보다 저주파수 대역에서 다소 짧은 것도 확인 할 수 있다. 각 홀의 잔향시간은 (그림 6)에 나타난 바와 같다.

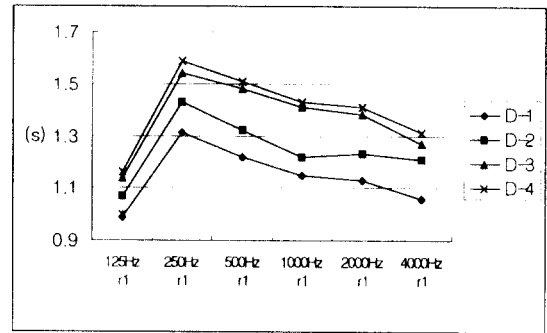


(그림 6) 각 홀의 주파수별 잔향시간

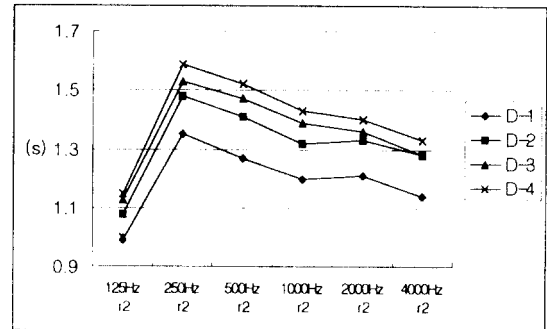
##### 2) 초기감쇠시간 (EDT)

잔향의 또다른 수학적 지수인 초기감쇠시간 EDT의 값을 각 수음점별로 계산하였다. 각 홀의 주파수에 따른 수음점별 EDT값은 (그림 7)부터 (그림 10)에 각각 나타난 바와 같다.

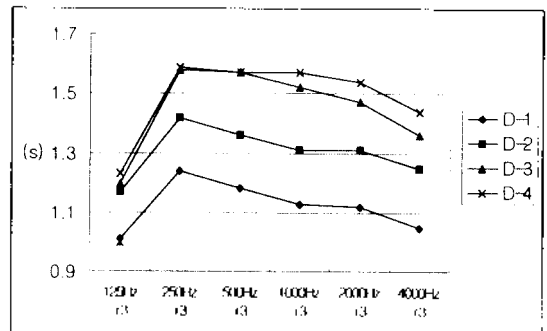
분석결과 EDT는 잔향시간과는 반대로 확산성이 좋은 홀일수록 더 길게 나타났다. 이것은 확산성이 좋은 홀에서는 에너지가 많은 음, 즉 초기음의 공간채유시간이 길어짐에 따라 초기의 음 감쇠시간이 길어진다는 것을 의미한다.



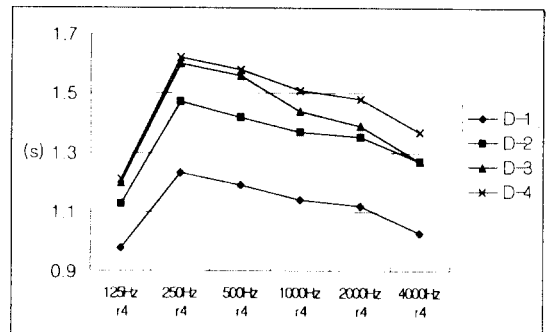
(그림 7) 수음점 r1에서의 EDT 분포도



(그림 8) 수음점 r2에서의 EDT 분포도



(그림 9) 수음점 r3에서의 EDT 분포도



(그림 10) 수음점 r4에서의 EDT 분포도

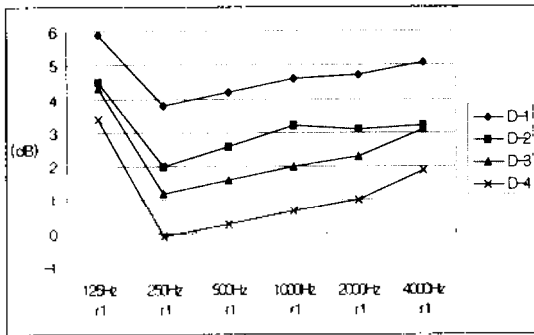
이것은 확산성이 좋은 홀은 실내표면적의 증가로 인한 전체 잔향시간은 짧아지나 음 방사후 전체 음에너지의 대부분이 초기에 집중되어 분산됨에 따라 실내 음향에 긍정적인 영향을 준다는 것

을 의미한다.

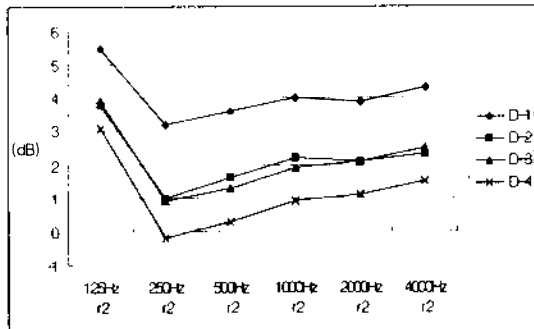
저의 비슷한 값을 보여준 D-2홀과 D-3홀의 잔향시간과는 달리 EDT의 경우 모든 수음점에서 D-2홀보다는 D-3홀이 더 크게 나왔다. 이것은 EDT 값은 실내의 확산면적에 비례하여 증가하는 것을 암시한다. 특히 객석의 중앙부위(홀수의 수음점)에서 객석의 측면부위(짝수의 수음점)보다 D-3홀과 D-4홀의 EDT값의 격차는 줄고 D-3홀과 D-2홀의 격차는 늘어나고 있음을 알 수 있다. 이 결과로 보아 EDT는 천장보다는 벽에 의한 확산으로 더 많이 증가된다는 것을 나타내고 있다.

### 3) 명료도 ( $C_{80}$ , Clarity)

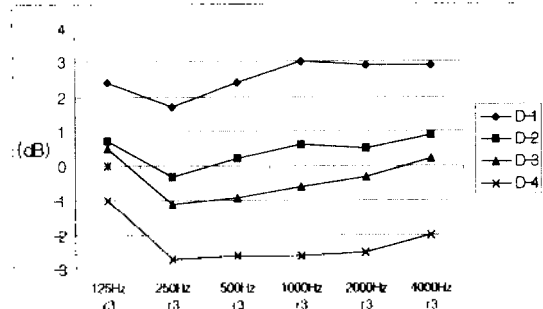
명료도의 계수로 사용한  $C_{80}$ 을 EDT의 경우와 같이 각 수음점 별로 계산하였다.  $C_{80}$ 값은 80ms를 기준으로 한 초기음에너지 대비 늦은음 에너지의 비를 나타낸다.  $C_{80}$ 값은 명료도의 주관적 척도로 사용되며 명료도와 잔향의 균형을 나타내고 있다. 각 홀에서 수음점 r1부터 r6에서의  $C_{80}$ 값은 (그림 11)부터 (그림 16)에 나타난 바와 같다.



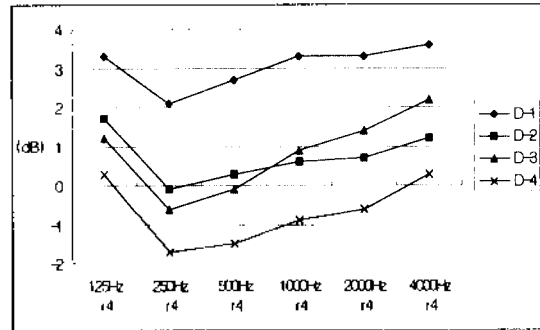
(그림 11) 수음점 r1에서의  $C_{80}$  값 분포도



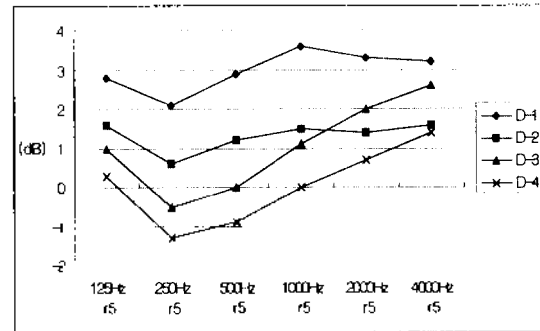
(그림 12) 수음점 r2에서의  $C_{80}$  값 분포도



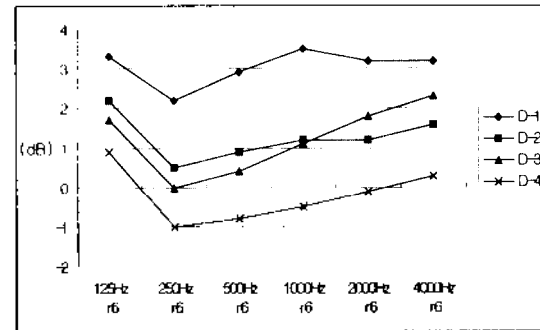
(그림 13) 수음점 r3에서의  $C_{80}$  값 분포도



(그림 14) 수음점 r4에서의  $C_{80}$  값 분포도



(그림 15) 수음점 r5에서의  $C_{80}$  값 분포도



(그림 16) 수음점 r6에서의  $C_{80}$  값 분포도

분석결과 잔향시간의 모델별 분포에서 유추할 수 있듯이 확산성이 좋은 홀일 수록  $C_{80}$ 값은 더 작게 나타났다. 이것은 잔향에서 나타났듯이 확산면이 증가할수록 음에너지의 공간체류시간이 상

대적으로 같아지게 됨에 따라  $C_{50}$ 값이 같아지게 된 결과이다.

특이한 결과는 수음점 r1과 r3이외의 모든 수음점에서 D-3홀의  $C_{50}$ 값이 중간주파수 이상의 범위에서 D-2홀 보다 크게 나타나고 있는 점이다. 참고로 수음점 r1과 r3이외의 나머지 수음점의 위치는 측벽이나 뒷벽에 가깝게 위치한 지역이다. 따라서 전장의 확산면보다는 벽체의 확산면이 큰 벽체에 인접한 지역의 명료도 감소를 방지하고 있다는 것을 알 수 있다.  $C_{50}$ 값의 전이가 중간주파수대 이후로 나타나는 것은 확산체의 크기에 관계된 확산파상의 범위와 관계있다.

## 5. 결론

분석 결과를 종합해 볼 때 실내 확산성의 증가는 많은 문헌에서 지적한 바와 같이 대체로 실내 음향성능을 높여주는 것으로 나타났다. 특이할만한 사항은 보통 홀에서는 같은 양상을 보여주는 산향시간과 EDT값이 이 실험결과에서는 상당한 차이를 보였다. 보통 홀에서는 산향시간이 길면 EDT값도 따라서 길게 나타나는 데 반하여 확산성이 증가된 홀에서는 반대로 산향시간이 짧은 홀에서 EDT값이 길게 나타났다.

이것은 확산성이 좋은 홀에서는 초기음의 공간 채움시간이 길어진다는 것을 의미한다. 즉, 음 방사후 전체 음에너지의 대부분이 초기에 집중되어 분산됨에 따라 온기에 많은 음에너지가 확산된다는 증거이다. 또한 EDT는 천장보다는 벽에 의한 확산으로 더 많아 증가된다는 것을 나타내었다.

또한 예상대로 확산성이 좋은 홀일 수록  $C_{50}$ 값은 더 작게 나타났다. 그러나 실제 음의 이해도는 확산성이 큰 홀에서 더 높은 결과가 나타났다. 명료도와 음성이해도 조사에서 광히 분석된 결과는 전장의 확산면보다는 벽체의 확산면이 명료도 및 음이해도의 상승에 크게 기여한다는 것이다.

이상의 결과를 종합하여 볼 때 음악당을 비롯한 실내공간의 측벽면에 확산성이 높은 표면을 적용할 경우 상대적으로 높은 초기음에너지와 음성 이해도의 향상을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. C.H.Haan and F.Fricke, "Guidelines for the Acoustic Design of Auditoria", Proc. of ANZAScA Conference, p.67-77 (1990).
2. C.H.Haan and F.Fricke, "Geometry as a measure of acoustic performance of auditoria", Proc. of 14th ICA, Beijing, F3 2 (1992).
3. C.H.Haan and F.Fricke, "Statistical investigation of geometrical parameters for the acoustic design of auditoria", Applied Acoustics 35(2), p.105-127 (1992).
4. C.H.Haan and F.Fricke, "An Evaluation of the Importance of Surface Diffusivity in Concert Halls", Applied Acoustics, vol. 51, No. 1, p.53-69 (1997).
5. E.Meyer, "Definition and diffusion in rooms", J.Acoust.Soc.Am. 26(5), p.630-636 (1954).
6. T.J.Schultz, "Diffusion in reverberation rooms", J.Sound Vib. 16(1), p.17-28 (1971).
7. C.W.Kosten, "International comparison measurements in the reverberation room", Acustica 10, p.400-411 (1960).
8. C.G.Balachandran and D.W.Robinson, "Diffusion of the decaying sound field", Acustica 19(5), p.245-257 (1967/68).
9. L.L.Beranek, Music, Acoustics and Architecture, John Wiley, pp.415 (1962).
10. S.Strom, "The influence of diffusing elements on the sound distribution in large halls", ELAB Report, Trondheim' pp.18-24 (1987).
11. T.Somerville, et al, "Recent work on the effects of reflections in concert halls and music studios", J.Sound Vib. 3(2), 127-134 (1966).
12. J.H.Rindel, & G.M.Naylor, "Predicting room acoustical behaviour with the ODEON computer model," 124th ASA Meeting, New Orleans, 3aAA3, (1992).
13. G.M.Naylor, "ODEON-Another hybrid room acoustical model," Applied Acoustics 38(2) p.131-143 (1993).
14. M.Volander, "International round robin on room acoustical computer simulations," 15th ICA, Trondheim, (1995).