

# 음의 감쇠곡선과 음의 명료도의 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 예측

김유만<sup>1</sup>, 이희원<sup>2</sup>, 이병호<sup>3</sup>  
한국과학기술원<sup>1</sup>    경기공업개발대학<sup>2</sup>    한국과학기술원<sup>3</sup>

## Prediction of Sound Decay Curves And Speech Intelligibility By Computer Simulation

Kim Yu Man, Lee Hee Won, Lee Byung Ho  
KAIST    Kyung Gi Open University    KAIST

### 1. 서론

음악당이나 강당과 같은 건축물에 있어서 음향학적인 설계는 매우 중요하다. 그러나 이와 같은 건축물 내의 명명한 음향장의 해석은 거의 불가능하다. 그런데 컴퓨터가 보편화되면서 컴퓨터를 이용하여 건축물 내의 음향장을 시뮬레이션하여 근사적으로 구하는 방법들이 제시되었다.<sup>1,2</sup> 이들 방법 가운데 Ray 추적법과 영상 음원법이 주로 쓰이고 있다. 이 Ray 추적법과 영상 음원법은 모두 음의 전파에서 파동에 의한 효과를 고려하지 않고, 음의 전파를 Ray의 전파로 가정한다는 공통점은 가지고 있지만 근본 알고리즘의 개념은 서로 다르다. Schroeder,<sup>3</sup> Krokstad,<sup>4</sup> Embrechts,<sup>5</sup> Wayman,<sup>6</sup> Walsh<sup>7</sup> 등은 Ray 추적법을 이용하여 건축물의 음향학적 성질을 나타내는 파라미터들을 연구하였고, 또 Allen 과 Berkley,<sup>8</sup> Mitchell,<sup>9</sup> Baxa,<sup>10</sup> Barron,<sup>11</sup> Borish<sup>12</sup> 등은 영상음원법으로 연구를 하고 있다. 본 연구에서는 이 두가지 방법을 이용하여 음의 감쇠곡선(Sound Decay Curve)과 음의 명료도(Speech Intelligibility)를 구하여 실험결과와 비교하였고, 이로부터 두 방법의 장, 단점을 비교, 확인하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 Ray 추적법과 영상음원법

Ray 추적법은 음원으로부터 수 많은 Ray를 발생시켜 이 Ray가 일정한 크기를 갖는 수음점에 도달할 때까지 추적하여, 수음점에 도달한 Ray의 에너지로부터 실내의 임펄스 응답을 얻는 방법이다. 이에 대하여 영상 음원법은 실내의 음원과 수음점의 위치로부터 반사면에 대한 영상음원을 고려하여 Ray의 전파경로를 찾아내고 이로부터 임펄스 응답을 얻는 방법이다. 이와 같이 알고리즘이 다르기 때문에 서로 장, 단점이 존재한다. 즉, Ray 추적법에서는 Ray의 갯수에 한정이 있으므로 수음점은 어느 정도의 크기를 가져야 한다. 따라서 음원과 수음점 간의 엄밀한 Ray의 전파경로를 구할 수 없기 때문에 오차의 원인이 생긴다. 따라서 이 오차를 줄이기 위하여 적절한 Ray의 수와 수음점의 크기를 결정하는 문제가 있다. 그러나 알고리즘이 간단하고 실내의 형상이 복잡하여도 컴퓨터의 기억용량을 적게 차지하며 계산 시간도 짧다. 또 음원에서 발생하는 Ray가 갖는 에너지에 임의의 분포를 줌으로써 음원의 방향성도 쉽게 고려할 수 있다. 이에 비하여 영상음원법은 음원과 수음점 간의 Ray의 전파경로를 엄밀하게 구할 수 있으므로 Ray 추적법에서의 오차를 제거할 수 있다. 그러나 반사횟수가 많아지고 실내의

형상이 복잡해질수록 컴퓨터의 기억용량과 계산시간이 크게 늘어나게 된다. 따라서 효율적인 알고리즘의 개발이 필요하다.<sup>12</sup>

## 2.2 음의 감쇠곡선(Sound Decay Curve)

위의 방법으로 수음실에서 얻어진 임펄스 응답으로부터 실내의 잔향 에너지곡선은 식(1)과 같이 쓰여진다.<sup>13,14</sup>

$$Bd(t) = \int_0^t p^2(\tau) d\tau \quad (1)$$

여기서  $Bd(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 실내의 잔향에너지이며,  $p^2(\tau)$ 는 수음점에서 임펄스 응답이다. 그런데 시뮬레이션에 의해 얻어진 임펄스 응답은 시간에 제한이 있어서 무한대의 시간까지 적분할 수 없으므로 이를 보정해야 할 필요가 생긴다. 즉, 식(1)을 다시 쓰면,

$$\begin{aligned} Bd(t) &= \int_0^t p^2(\tau) d\tau \\ &= \int_0^{t_2} p^2(\tau) d\tau - \int_{t_2}^t p^2(\tau) d\tau \\ &= \int_0^{t_2} p^2(\tau) d\tau + \int_{t_2}^t p^2(\tau) d\tau - \int_{t_2}^t p^2(\tau) d\tau \\ &= B1 + B2 - \int_{t_2}^t p^2(\tau) d\tau \quad (2) \end{aligned}$$

이 된다. 여기서  $t_2$ 는 계산에서 제한되는 시간이고

$$B1 = \int_0^{t_2} p^2(\tau) d\tau, \quad B2 = \int_{t_2}^{\infty} p^2(\tau) d\tau \quad (3)$$

이다. 즉, B1은 시뮬레이션의 결과로 얻어지는 값이고, B2는 보정되어야 할 잔향에너지가 된다.

그런데 Byring의 잔향에너지식:

$$Ee(t) = E_0 \exp\left[-\frac{cS}{4V} t \ln(1-\bar{\alpha})\right] \quad (4)$$

$E_0$ : 초기 에너지

$c$ : 음속

$S$ : Room의 표면적

$V$ : Room의 체적

$\bar{\alpha}$ : 평균 흡음계수

을 이용하면 식(2)와 식(4)로부터  $t=0$ 에서

$$E_0 = B1 + B2, \quad (5)$$

또  $t=t_2$ 에서

$$B2 = E_0 \exp\left[-\frac{cS}{4V} t_2 \ln(1-\bar{\alpha})\right], \quad (6)$$

따라서 식(5)와 식(6)으로부터 보정할 에너지 B2는

$$B2 = B1 \frac{\exp\left[-\frac{cS}{4V} t_2 \ln(1-\bar{\alpha})\right]}{1 - \exp\left[-\frac{cS}{4V} t_2 \ln(1-\bar{\alpha})\right]} \quad (7)$$

로 주어진다. Fig. 3, 4, 5에 수음점의 위치에 따른 음의 감쇠곡선을 나타내었다.

## 2.3 음의 명료도(Speech Intelligibility)

음의 명료도는 말어 청중들에 의해 얼마나 잘 인지되는가를 나타낸다. 음의 명료도를 나타내는 계수로는 AI(Articulation Index), 임펄스 응답에서의 초기와 후기의 에너지비로 얻어지는 계수(C35, C50, C80, C95), 그리고 MTF(Modulation Transfer Function)로 얻어지는 STI(Speech Transmission Index) 등이 주로 쓰인다. 최근 Bradley는 이 세가지의 계수 사이에는 매우 밀접한 correlation이 있음을 실험을 통하여 확인하였다.<sup>15</sup> 여기서는 C35, C50, C80, C95를 계산하여 수음실에서 음의 명료도를 추정하였다. 이들 계수는 다음과 같이 정의된다:

$$\begin{aligned} C35 &= 10 \log \left( \frac{\int_0^{0.035} p^2(t) dt}{\int_{0.035}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \\ C50 &= 10 \log \left( \frac{\int_0^{0.05} p^2(t) dt}{\int_{0.05}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \quad (8) \end{aligned}$$

$$C95 = 10 \log \left( \frac{\int_{0.01T}^{0.05T} p^2(t) dt}{\int_{0.01T}^{0.05T} p^2(t) dt} \right)$$

수음점 수분 :  $\int_0^T$

그리고 Lochner와 Burger가 제시한 계수 C95는  
 $\int_0^T p^2(t) dt$  (A)와  $\int_0^T p^2(t) dt$  (B)를 이용하여

$$C95 = 10 \log \left( \frac{\int_{0.01T}^{0.05T} p^2(t) dt}{\int_{0.01T}^{0.05T} p^2(t) dt} \right) \quad (9)$$

$$\alpha = A + BT$$

$$A = 2.30 - 0.6RA^{0.7}$$

$$B = 0.0248 + 0.00177RA^{1.39}$$

이다. 여기서 T는 수음점에 도달한 각 Ray의 도달시간이며 RA는 음원에서 수음점까지 직접 도달한 Ray의 에너지와 벽면에서 반사되어 도달한 Ray의 에너지비이다. 표(1)에서 알의 잔향질에 대한 계산된 계수를 나타내었다.

Table 1. Calculated values of the decay coefficient  $\alpha$  for various rooms.

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에서 나타났듯이 Ray 추적법에서는 음의 감쇠곡선은 방향음원법 측정에 의해 얻어진 감쇠곡선보다 더 큰 감쇠를 나타내었다. 또 Fig. 5의 음의 방포도에서도 Ray 추적법에 의한 감쇠곡선이 방향음원법에서부터 Ray 추적법에서는 실제의 방포도에서부터 나타났듯이 방향음원법에서는 음원에서 발생한 Ray가 수음점에 도달하면 그 Ray에 대한 수직이 우향도 변화하는 Ray의 개수가 유한하기 때문에 방향음원법 측정법의 모든 정보만을 구할 수 없다. 또, 실제의 방포도에서는 한번 수음점에 도달한 Ray가 몇 번의 반사 후에 다시 수음점에 도달할 수 있다. 이 경우 Model로 사용된 방음계수가 작은 잔향성이기 때문에 나중에 다시 도달한 Ray는 (부차적) 방향의 에너지를 가지고 있다. 따라서 Ray 추적법에서는 실제의

결과는 방향음원법이 크게 개선되는 것이다. 그러나 이 오차는 실내가 불수록, 또 음을 계속가 불수록 작아질 것이다.

(9) M. R. Schroeder, B. S. Atal and G. B. Bird, "Digital computers in room acoustics," 4-th Int. Congr. Acoust. (1962)

[2] A. Krokstad, S. Storm and S. Sorndal, "Calculating the Acoustical room response by the use of a ray tracing technique," J. Sound Vib. pp118-125 (1968)

[3] M. R. Schroeder, "Digital simulation of sound transmission in reverberant spaces," J. Acoust. Soc. Am. vol. 41 pp461-471

[4] J. J. Embrechts, "Sound field distribution using randomly traced sound ray techniques" Acustica vol. 15 pp 288-295 (1982)

[5] J. L. Wayman, "Computer simulation of sound fields using ray methods" Ph. D. Thesis, University of California (1980)

[6] J. P. Walsh and P. Dastgoun, "The design and development of Godot : a system for computer-aided room acoustics modeling and simulation 101st meeting" Acoust. Soc. Am., Ottawa, Canada, paper p7 (1981 may)

[7] J. B. Allen and D. A. Berkley "Image method for efficiently simulating small-room acoustics" J. Acoust. Soc. Am., vol. 65 pp 943-950 (1979)

[8] B. W. Bitchell, "Determination of acoustic ray paths in enclosed spaces," M.S. Thesis Virginia Polytechnic Institute, and State University (1975)

[9] D. E. Baxa, "A strategy for the optimum design of acoustic space," Ph. D. Thesis, University of Wisconsin-Madison (1976)

[10] M. F. E. Barron, "The effect of early reflections on subjective acoustical quality in concert halls," Ph. D. Thesis University of Southampton (1974)

[11] J. Borish, "Electronic simulation of auditorium acoustics," Ph. D. Thesis Stanford University

[12] H. W. Lee, "Acoustical design of an auditorium using image method," Ph. D. Thesis KAIST (1987 submitted)

[13] M. R. Schroeder, "New method of measuring reverberation time," J. Acoust. Soc. Am. vol. 37 pp409-412 (1965)

[14] A. Kulowsky, "Relationship between impulse response and other types of room acoustical response," Applied Acoustics vol. 15 pp3-10 (1982)

[15] J. S. Bradley, "Predictors of speech intelligibility in rooms," J. Acoust. Soc. Am. vol. 80 pp837-845 (1986)

[16] J. P. L. Lochoer and J. F. Burger, "The influence of reflections on auditorium acoustics," J. Sound Vib. vol. 1 pp426-454 (1964)

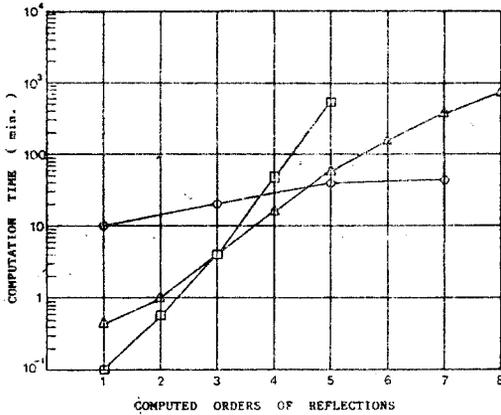


Fig. 1. Comparison of the computation times.

- 1) Using the conventional image method after Kersh<sup>13</sup> (○—○)
- 2) Using the ray-tracing technique after Kulowski<sup>14</sup> (◇—◇)
- 3) Using the proposed algorithm (△—△)

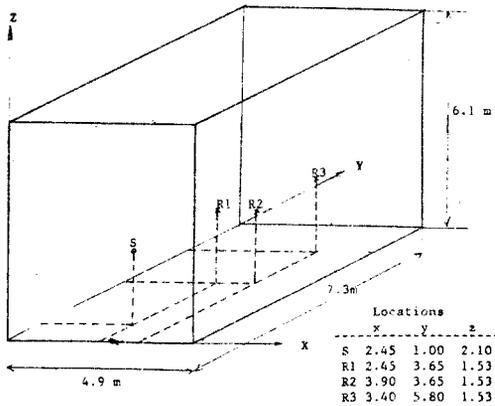


FIG. 2 Isometric view of the room for the experimental measurement

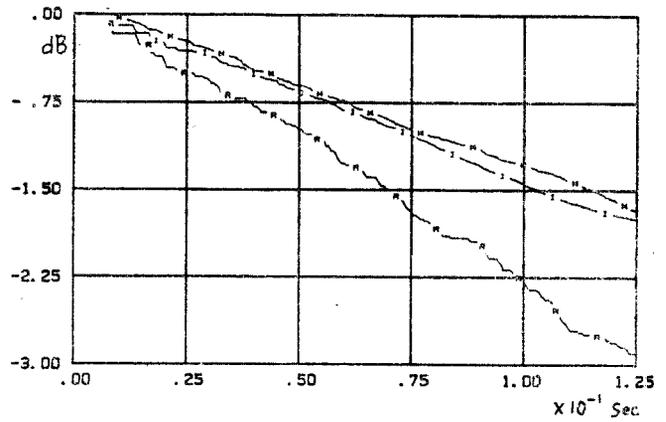


Fig. 3 Sound Decay Curves at Receiver 1

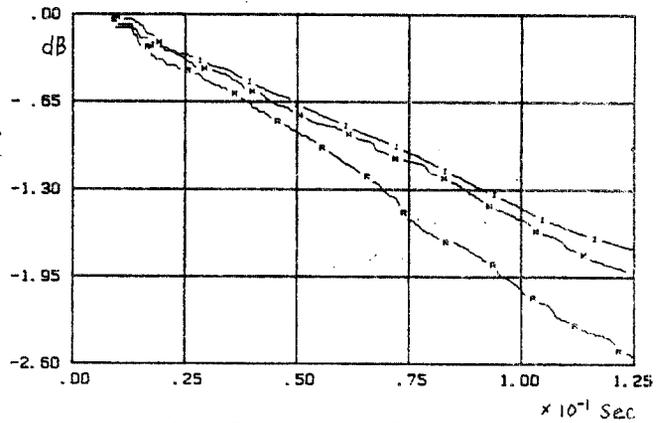


Fig. 4 Sound Decay Curves at Receiver 2

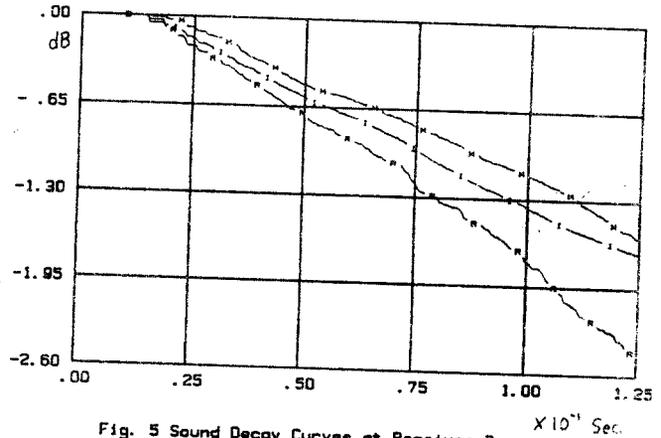


Fig. 5 Sound Decay Curves at Receiver 3

I : 영상 음원법  
R : Ray 추적법  
M : 측정 Data

Table 1. Comparison of the useful/  
detrimental energy ratio.

		R1	R2	R3
C35	Image Method	-9.31	-9.18	-9.30
	Ray Tracing	-8.29	-8.44	-8.73
	Measured	-9.09	-8.89	-9.29
C50	Image Method	-7.85	-7.68	-7.93
	Ray Tracing	-6.87	-7.13	-7.43
	Measured	-7.46	-7.63	-8.04
C80	Image Method	-5.54	-5.55	-5.54
	Ray Tracing	-4.89	-5.16	-5.25
	Measured	-5.29	-5.44	-5.63
C95	Image Method	-6.25	-6.20	-6.37
	Ray Tracing	-4.14	-4.39	-4.36
	Measured	-6.45	-6.21	-6.87