

확장 라디오시티법에 의한 실내음향 예측에 있어 고차 형태 계수의 영향

Effect of Higher Order Form Factors on the Prediction of Room Acoustics by Extended Radiosity Method

이 희 원*, 고 일 두**, 오 양 기***, 두 세 진****, 정 대 업*****
(Hee-Won Lee*, Il-Du Goh**, Yang-Ki Oh***, Se-Jin Doo****, Dae-Up Jeong*****)

* 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부, ** 서울산업대학교 건축학부, *** 목포대학교 건축조경학부,
**** 동아방송대학 방송기술과, ***** 전북대학교 건축학부

(접수일자: 2002년 9월 30일; 수정일자: 2002년 12월 27일; 채택일자: 2003년 1월 6일)

컴퓨터에 의한 실내음향 예측에 있어 확산반사의 고려는 매우 중요한 요소의 하나로 간주된다. 지난 수년동안 음선추적법과 빔추적법에서 확산반사를 고려하기 위한 방안들이 활발하게 연구되었으나 경면반사를 근본으로 하는 영상법에서는 아직 충분한 연구가 이루어지지 않고 있다. 부분적으로 확산성을 갖는 반사면에서의 음향에너지 반사는 확산반사와 경면반사의 형태로 나누어 볼 수 있으며 반사를 거름함에 따라 확산-확산, 확산-경면, 경면-확산, 경면-경면의 형태로 반사에너지의 전환이 이루어진다. 본 연구에서는 실내의 벽면을 부분적으로 확산반사의 특성을 갖는 반사면으로 모델링하여 경면반사음은 기존의 영상법으로 계산하고 확산반사음은 라디오시티법을 적용하여 산출하는 확장라디오시티법을 도입하였다. 본 논문에서는 확장라디오시티법의 개념과 이에 따른 고차형태계수의 계산법을 제시하고 고차형태계수가 실내음향 시뮬레이션의 결과에 미치는 영향 등을 분석해 보았다.

핵심용어: 라디오시티법, 실내음향, 확산반사, 형태계수, 영상법

투고분야: 건축음향 분야 (7,1)

Numerous investigations have demonstrated that diffused reflection is one of the most important factors in predicting room acoustics by computer simulation. Recent studies have suggested several computational algorithms in order to account for diffused reflections in the ray tracing or beam tracing method. In this study, a computational algorithm for the calculation of diffuse sound reflections in the image method is suggested and a computer simulation system is developed based on the suggested algorithm. The methodology adopted in our computer simulation system is similar to the extended radiosity method, which is developed for the computer graphics. In a real room, sound energy is reflected in a partially diffused manner which results in four reflection combinations: diffuse-diffuse, specular-specular, diffuse-specular and specular-diffuse. In this study, higher order form factor is introduced to handle the four types of reflection combinations so that the partially diffused reflection could be modeled. In this paper, the concept of extended radiosity method is described and the approximate method of calculating higher order form factor is suggested. Finally, the effect of higher order form factors on the simulation of reverberation time is investigated.

Keywords: Radiosity method, Room acoustics, Diffused reflection, Form factor, Image method

ASK subject classification: Architectural acoustics (7,1)

I. 서론

실내의 벽면에 반사된 음향에너지의 일부는 표면의 거칠기와 반사면 크기의 유한성으로 인해 정반사 이외의 방향으로도 흩어지게 마련이다. 실내음향의 전파를 예측하기 위한 기하음향학적 컴퓨터 모델에서는 이러한 난반사 현상을 고려하기 위해 확산계수 (d)를 정의한다. 그림 1과 같이, 흡수되지 않고 반사된 에너지 중에서 확산계수 (d)에 비례하는 만큼이 확산반사 형태로 전달되고 나머지 ($1-d$)는 경면반사형태로 전달되는 것으로 모델링할 수 있다. 그림 2와 같이 실내에서의 음향반사는 반사횟수가 증가함에 따라 경면-경면, 확산-경면, 경면-확산, 확산-확산 등을 조합한 형태로 음향에너지의 전달이 이루어지게 된다. 일반적으로 영상음원법의 컴퓨터 모델에서는 경면-경면으로 이어지는 반사음 전달만을 고려하고 Sabine 이나 Eyring의 잔향식은 확산-확산으로 이어지는 실내 음 전파만을 고려하여 유도된 예측식이라 할 수 있다.

최근 몇 년 동안 다수의 연구자들이 음선 추적법과 빔 (beam) 추적법에서 난반사 현상을 고려하기 위한 기하음향학적 컴퓨터 수치모델을 제안하였으나 영상법에 의한 컴퓨터 시뮬레이션에서는 아직 충분한 연구가 이루어지지 못하고 있다. Hodgson[1]은 반사음 에너지를 입사방향과 대칭되게 반사되는 경면반사 성분과 모든 방향으로 균일하게 반사되는 확산반사 성분으로 나누고 확산반사

의 방향을 확률적으로 랜덤하게 결정하는 음선추적 알고리즘을 제안하였다. Lam[2]과 Drumme[3]은 빔 추적법에서 형태계수 (form factor)의 개념을 도입하여 면과 면 사이의 확산반사를 계산하는 방법을 제안하였고 Korany [4]는 컴퓨터 그래픽스 분야에서 처음 사용된 확장 라디오시티법을 실내음향 전파에 적용하여 확산반사와 경면반사간의 에너지 변환을 고려하는 방안을 연구하였다. Korany의 연구에서는 형태계수 개념을 확장시킨 고차형태계수 (higher order form-factor)를 도입하여 확산반사 에너지의 일부가 경면반사 형태로 변환되어 전달되는 현상을 고려하였다. 부분적 확산반사의 특성을 지닌 반사면에서는 반사 횟수가 증가함에 따라 확산반사에너지의 일부가 경면반사를 통해 다른 면에 전달될 수 있다. 이를 계산하려면 반사에 의해 형성된 허상공간과 실제공간 사이에서 음원과 벽면면요소, 벽면면요소와 또 다른 면요소, 면요소와 수음점간의 형태계수를 각각 구하는 복잡하고 많은 연산을 필요로 한다. 고차형태계수는 이와 같이 확산-경면 반사가 복합적으로 일어나는 면요소간의 에너지 전달을 계산하기 위해 도입된 것이다. 본 논문에서는 확장라디오시티법에 의한 실내음향 예측에서 고차형태계수의 개념을 적용하는 구체적인 방안을 다루고 있다. 연산의 복잡성으로 인해 차수를 제한하여 계산하는 고차형태계수의 근사적 계산법을 제시하고, 고차형태계수의 고려 정도에 따라 실내음향 평가지표의 계산결과에 미치는 영향을 분석함으로써 실제 적용 가능한 고차형태계수의 계산방법을 찾아보았다.

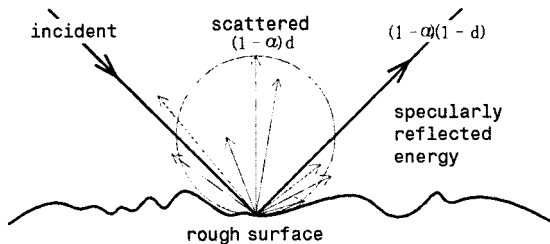


그림 1. 거친 면에서의 음에너지 반사 모델링
Fig. 1. Modeling of sound energy reflection on a rough surface.

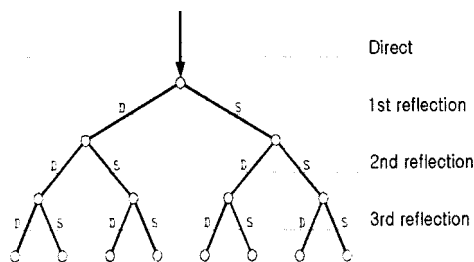


그림 2. 실내에서의 연쇄적인 음반사 형태
Fig. 2. Type of successive sound reflections in rooms: D (diffuse), S (specular).

II. 확장 라디오시티법

2.1. 직접 확산반사

난반사에 의해 확산되는 음에너지의 양은 Lambert의 코사인 법칙에 따른다고 가정한다. 이에 따라 면요소와 면요소사이의 확산반사에 의한 에너지 전달은 복사열전달과 유사하게 형태계수의 개념으로 계산할 수 있다. 형태계수 (form factor)는 음원 면요소가 방출하는 확산에너지에 I_i 대한 수음 면요소의 흡수 에너지 I_j 의 비율을 나타내는 무차원 값으로 다음과 같은 관계를 가진다.

$$I_j = F_{ij} \cdot I_i \tag{1}$$

면요소 i 에서 면요소 j 로의 형태계수는 면의 형상과 위치만 주어지면 다음 식으로 계산된다.

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r_{ij}^2} dA_j dA_i \quad (2)$$

2.2. 부분적인 확산반사: 확장 라디오시티법

대부분의 실제 반사면에서는 완전 확산이나 완전 경면 반사가 아닌 부분적 확산반사가 일어나며, 이때 확산반사 에너지의 일부는 다시 경면반사를 거쳐 전달될 수 있다. 예를 들어 면요소 i 에서 면요소 j 로 1차 경면반사를 거쳐 전달되는 확산에너지는 다음과 같이 임펄스 응답 형태로 표현될 수 있다[5].

$$h_{\bar{i},1}(t) = F_{\bar{i},1}(1 - \alpha_{p1})(1 - d_{p1})\delta\left(t - \frac{r_{\bar{i},1}}{c}\right) \quad (3)$$

여기서 $F_{\bar{i},1}$ 은 면요소 i 의 1차 경면반사면에 대한 허상으로부터 면요소 j 로의 형태계수를 의미한다. α_{p1} 과 d_{p1} 은 경면반사면의 흡음율과 확산계수를 뜻하며, $r_{\bar{i},1}$ 은 면요소 i 의 허상으로부터 면요소 j 에 이르는 거리를 각각 나타낸다. i 에서 j 에 이르는 n 차 경면반사 경로를 모두 고려하여 확산음 에너지의 전달을 임펄스 응답의 형태로 표현하면 다음 식과 같다.

$$h_{\bar{i},n}(t) = \sum_{m=1}^{(n)} F_{\bar{i},m}\delta\left(t - \frac{r_{\bar{i},k(n)}}{c}\right) \prod_{l=1}^n ((1 - \alpha_{pl})(1 - d_{pl})) \quad (4)$$

여기서 $F_{\bar{i},m}$ 은 고차형태계수로 면요소 i 의 n 차 허상으로부터 면요소 j 에 이르는 확산음 전달비율을 뜻한다. 따라서 최대 N 차 경면반사까지 고려한 면요소 간의 확산반사음 전달은 $n=0$ 부터 $n=N$ 까지의 모든 직접 및 경면반사 경로에 대해 고차형태계수를 구하여 합산해야 한다. 또한 음원에서 면요소 i 에 이르는 확산음 전달도 유사한 방법으로 고차형태계수를 구하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$h_{si,n}(t) = \frac{W}{\Delta A_i} \sum_{m=1}^{(n)} \left(F_{si,m}\delta\left(t - \frac{r_{si,m}}{c}\right) \right) \quad (5)$$

여기서 W 는 음원의 음향파위를 의미하며, $F_{si,m}$ 은 직접 경로를 포함하여 음원에서 면요소 i 에 이르는 모든 경면 반사 경로에 대한 고차형태계수를 포함한다.

유사한 방법으로 면요소 j 에서 수음점으로 경면반사를 거쳐 전달되는 확산음 에너지는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h_{jr,n}(t) = d_j(1 - \alpha_j) \sum_{m=1}^{(n)} F_{jr,m}\delta\left(t - \frac{r_{jr,m}}{c}\right) \quad (6)$$

여기서 d_j 와 α_j 는 면요소 j 의 확산계수와 흡음율을 각각 의미한다. 식 (4)~(6)을 종합하면, 음원에서 반사면을 거쳐 수음점에 이르는 확산음의 에너지 전달은 다음과 같이 표현된다.

$$h_{sr}(t)_{diff} = \sum_i \sum_j h_{si}(t) \otimes h_{ij}(t) \otimes h_{jr}(t) \quad (7)$$

여기서, \otimes 기호는 콘벌루션 적분을 의미한다.

영상법은 기본적으로 음원에서 수음점에 이르는 경면 반사 에너지를 고려해야 하므로 경면-경면반사로 이어지는 에너지 전달은 다음식과 같이 임펄스응답 형태로 표현된다.

$$h_{sr}(t)_{spec} = \sum_{n=0}^N \frac{W}{4\pi r_{sr,k(n)}^2} \delta\left(t - \frac{r_{sr,k(n)}}{c}\right) \prod_{i=1}^n ((1 - d_{si})(1 - \alpha_{si})) \quad (8)$$

여기서 일반적인 영상법과 달리 확산되지 않은 경면반사 에너지만을 고려해야 하므로 흡음율 α_{si} 외에 확산계수 d 가 수식에 포함된다. 따라서 음원에서 수음점에 이르는 총합임펄스응답은 식 (7)의 확산반사음 전달과 식 (8)의 경면반사음 전달을 합하여 다음 식으로 표현된다.

$$h_{sr}(t)_{total} = h_{sr}(t)_{spec} + h_{sr}(t)_{diff} \quad (9)$$

2.3. 고차형태계수의 근사계산

식 (4)에서 고차형태계수 $h_{ij}(t)$ 는 면요소 i 에서 면요소 j 로 직접 확산 전달되는 형태계수뿐만 아니라 n 차 경면반사를 거쳐 전달되는 확산에너지를 고려하는 개념이므로 복잡한 계산작업을 필요로 한다. 두 개의 면요소 간의 모든 조합에 대해 정해진 차수만큼의 경면반사 경로를 산출해야 하고 각 경면반사 경로에 대해 고차형태계수를 산출해야 한다. 때문에 단순한 직육면체 형상이 아니면 엄밀한 계산이 불가능할 정도로 계산량이 많다고 할 수 있다. 본 연구에서는 면요소 간의 직접확산 에너지 전달은 형태계수의 정의에 따라 정확히 계산하고, 각 요소간의 경면 반사경로로부터 산출되는 고차형태계수는 근사적으로 계산하는 방법을 도입하였다. 식 (4)를 반사차수 별로 분리하여 보면,

$$h_{ij}(t) = \sum_{m=1}^M F_{\bar{i},m}\delta\left(t - \frac{r_{\bar{i},m}}{c}\right) ((1 - \alpha_{p1})(1 - d_{p1})) + \sum_{m=1}^M F_{\bar{i},m}\delta\left(t - \frac{r_{\bar{i},m}}{c}\right) \prod_{l=1}^2 ((1 - \alpha_{pl})(1 - d_{pl})) \dots \quad (10)$$

여기서 N_n 는 n 차 반사경로의 갯수를 의미한다. 고차형 태계수의 근사계산을 위하여 식 (10)의 각 항을 다음의 근사값으로 대체시킬 수 있다.

$$r_{\bar{u},m} \approx (n+1)\bar{r}_{\bar{u}} \quad (\text{평균전파거리의 } (n+1)\text{배}) \quad (11)$$

$$F_{\bar{u},k(n)} \approx \bar{F}_{\bar{u}} \frac{1}{r_{\bar{u},m}^2} \quad (\text{평균형태계수에 거리감쇄를 고려}) \quad (12)$$

$$\alpha_p \approx \bar{\alpha} \quad (\text{평균흡음율}), d_p \approx \bar{d} \quad (\text{평균확산계수}) \quad (13)$$

따라서 k 차 반사까지 고려한 고차형태계수를 다음과 같이 근사계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} HF_{\bar{u}}(t) = & N_1 \times \bar{F}_{\bar{u}} \frac{1}{2^2} \delta\left(t - \frac{2\bar{r}_{\bar{u}}}{c}\right) (1-\bar{\alpha})(1-\bar{d}) \\ & + N_2 \times \bar{F}_{\bar{u}} \frac{1}{3^2} \delta\left(t - \frac{3\bar{r}_{\bar{u}}}{c}\right) (1-\bar{\alpha})^2 (1-\bar{d})^2 \\ & \dots \\ & + N_k \times \bar{F}_{\bar{u}} \frac{1}{(k+1)^2} \delta\left(t - \frac{(k+1)\bar{r}_{\bar{u}}}{c}\right) \\ & (1-\bar{\alpha})^k (1-\bar{d})^k \end{aligned} \quad (14)$$

III. 시뮬레이션 결과 및 토론

3.1. 형태계수의 계산

2장에서 제시된 방법에 따라 개발된 프로그램으로 그림 3과 같은 직육면체 형상의 강당 (20 m × 30 m × 10 m)에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림은 우측하단의 면요소로부터 다른 면요소로의 형태계수 값을 나타낸 것으로 인접한 면요소에서 최고 0.2로부터 멀리 있는 면요소에서 0.004 정도의 값을 갖는 것으로 계산되었다.

2장에서 제시한 근사계산법에 따라 고차형태계수비 (평균 형태계수 값에 대한 고차형태계수의 비)를 산출한 예가 표 1과 같다. 반사면의 흡음률과 확산계수에 따라 정도의 차이는 있겠지만, 각각의 경면반사 경로에 대한 고차형태계수 값은 반사차수가 높아짐에 따라 급격히 감소하여 (3차 이상에서는 1/100이하로 감소) 3차 이상은 무시할 수 있을 정도의 크기가 된다. 때문에 계산상의 복잡성을 고려하여 고차형태계수를 2차까지만 계산하는 경우가 많다[5]. 그러나 표에서 보듯이 차수가 높을수록 반사경로의 갯수는 많아지므로 이를 곱한 값은 6차 반사까지도 무시할 수 없는 크기가 된다. 본 연구에서는 고차형태

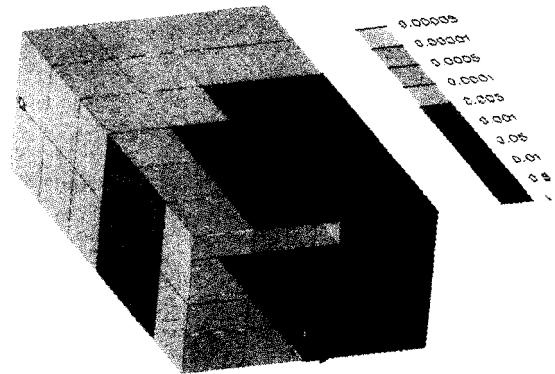


그림 3. 면요소 간의 직접확산 형태계수 계산 예
Fig. 3. Example calculation of direct patch to patch form factors.

표 1. 고차형태계수 산출 예 ($\bar{\alpha}=0.2, \bar{d}=0.4$)
Table 1. Sample values of HOF (higher order form factor) for $\bar{\alpha}=0.2, \bar{d}=0.4$.

order	1st	2nd	3rd	4th	6th	8th
① HOF ratio of each path	0.12	.026	.0069	.0021	.00025	.000035
② Number of possible paths (N _k)	6	18	37	63	124	188
HOF ratio (①×②)	0.72	0.47	0.26	0.13	0.03	0.0066

계수를 최대 9차까지 계산할 수 있도록 하였다.

3.2. 임펄스 응답의 계산

그림 4는 음원에서 수음점에서의 임펄스 응답을 계산한 결과를 보이고 있다. 그림 4(a)는 경면반사만을 고려한 임펄스 응답, 4(b)는 확산반사만을 고려한 경우, 4(c)는 둘다 고려한 임펄스응답을 표현하고 있다. 시뮬레이션에서 경면반사는 10차까지 고차형태계수는 7차까지 고려하였으며 확산계수는 모든 면에 동일하게 0.6으로 가정하였다. 계산 결과, 확산 반사음의 크기는 경면반사음

표 2. 시뮬레이션 대상 실의 기본 데이터
Table 2. Basic data of the simulated room.

Room dimension	20 m x 30 m x 10 m	
Source Position	(2.5, 15, 3)	
Receiving Position	(15, 10, 4)	
The absorption and diffusion coefficients		
Floor	0.9	0.6
Ceiling	0.1	0.6
Long side walls	0.3	0.6
Short side walls	0.6	0.6

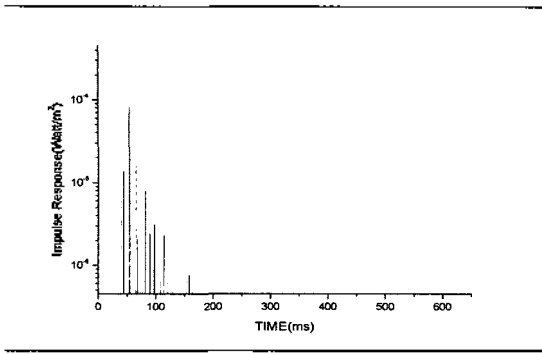


그림 4(a). 경면반사 충격응답
Fig. 4(a). Specular impulse response.

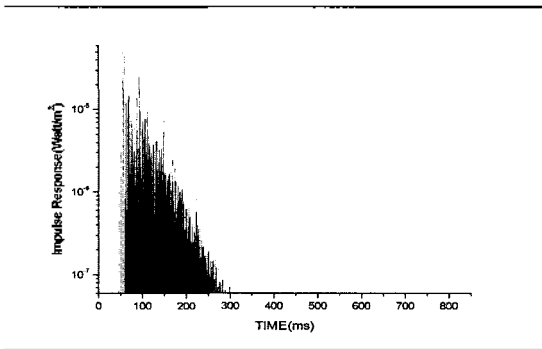


그림 4(b). 확산반사 충격응답
Fig. 4(b). Diffuse impulse response.

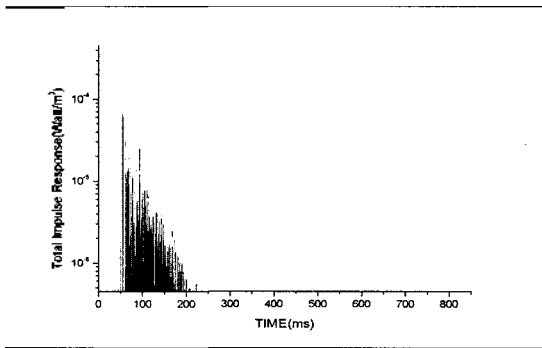


그림 4(c). 총합 충격응답
Fig. 4(c). Total impulse response.

에 비해 1/10 이하의 크기지만 매우 조밀한 분포를 지니는 특성을 보였다. 이는 각각의 크기는 크지 않더라도 대량의 전파경로 조합으로 전달되는 확산반사의 특성을 잘

반영하고 있는 결과라 할 수 있고 임펄스응답 자체보다는 이를 적분한 잔향곡선에 더 큰 영향을 주게 된다. 시뮬레이션 대상 홀에 대한 기본 데이터는 표 2와 같으며 1 kHz 주파수대역에 대한 결과만을 대표로 수록하였다.

3.3. 고차형태계수의 영향

그림 4와 같은 임펄스응답을 Schroeder의 역진적분법으로 적분하여 잔향시간을 구할 수 있고 기타 임펄스 응답으로부터 얻어지는 실내음향 평가지표들을 산출할 수 있다. 표 3에서는 고차형태계수의 최대차수를 변화시키면서 대표적인 실내음향 평가지표를 산출한 결과를 정리한 것이다.

표 1에서 살펴본 바와 같이 각각의 경면반사 경로에 대한 고차형태계수 값은 매우 작지만 경면반사경로의 갯수가 많기 때문에 고차형태계수를 무시할 수 없게 된다. 표 3의 계산결과는 비록 단편적인 예이지만 이러한 고차형태계수의 영향을 잘 나타내고 있으며 최소한 5차 이상까지 고차형태계수를 고려하여야 오차를 줄일 수 있음을 보여주고 있다.

표 4에서는 고차형태계수를 고려한 경우 (7차까지 고려)와 고려하지 않은 경우, 확산계수 값을 변화시키면서 잔향시간 산출결과를 비교하였다. 표에서 확산계수가 0.0일 때의 결과는 경면반사만이 고려된 잔향시간 예측 결과를 의미하고 확산계수가 1.0인 경우는 반대로 확산반사 에너지만 고려된 예측결과라 할 수 있다. Sabine과 Eyring 공식에 의한 잔향시간이 각각 0.8초와 1.1초임을 감안할 때, 고차형태계수를 고려하지 않는 경우는 경면반사만 고려하는 경우보다도 잔향시간 예측의 오차가 크다는 것을 알 수 있다. 또한 고차형태계수를 고려하면 예측오차는 줄어들지만 적절한 확산계수 값의 선택이 중요함을 알 수 있다. 특히 확산계수가 1.0인 완전확산의 경우에는 Sabine이나 Eyring 잔향시간에 더욱 가까운 값으로 계산되어야 함에도 오차가 커지는 결과를 주고 있다. 이는 확산반사만으로 계속 반사되는 경우, 각 반사면 요소간의 무수히 많은 고차 확산반사의 조합이 고려되어야

표 3. 고차형태계수의 최대차수에 따른 실내음향 평가지표 예측 값의 변화

Table 3. Predicted room acoustic measures according to the maximum order of HOF (higher order form factor).

	H.O.F.								
	1st.	2nd.	3rd.	4th.	5th.	6th.	7th.	8th.	9th.
RT (Sec)	0.62	0.75	0.78	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
D (%)	66.06	60.89	59.73	59.48	59.43	59.41	59.41	59.41	59.41
CS0L (dB)	2.89	1.92	1.71	1.67	1.66	1.66	1.66	1.65	1.65
C80L (dB)	7.45	5.53	5.16	5.08	5.06	5.06	5.06	5.06	5.06

표 4. 확산계수 변화에 따른 잔향시간 예측 값의 변화
 Table 4. Predicted RT's according to the diffusion coefficients variation: with and without consideration of HOF (higher order form factor).

RT (sec)	Diffusion Coefficient					
	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
without HOF	0.70	0.45	0.44	0.45	0.46	0.46
with HOF	0.70	1.14	1.01	0.80	0.60	0.44

하지만 확산반사의 조합을 2차까지만 고려한 데서 비롯된 결과로 판단된다. 본 연구에서 구체적으로 검토되지는 않았지만 확산반사의 차수를 증가시킬 경우, 계산량은 기하급수적으로 늘어나는 반면에 고차 확산 반사음 에너지의 크기는 급격히 감소한다. 따라서 난반사의 차수를 높여 계산하기보다는 누락된 임펄스응답의 후반부를 대수감쇠로 가정하여 보정하는 방법을 채택하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

3.4. 영상음원 분포의 예측

영상법은 초기 반사음을 형성하는 영상음원의 분포를 음선추적법에 비해 정확히 예측할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서 제안된 방법도 영상법을 기반으로 하고 확산 반사를 추가적으로 고려하여 예측정도를 높이는 기법이므로 영상법의 장점인 영상음원 분포의 예측을 수행할 수 있다. 그림 5는 경면반사 임펄스 응답으로부터 구해진 영상음원의 분포를 3차원 그래픽으로 표현한 것으로 구의 크기는 영상음원의 강도를 나타낸다.

IV. 결론

본 연구에서는 영상법에서 부분적인 확산반사를 고려하는 방법으로 확장 라디오스티티법을 적용하였으며 이에 따른 고차형태계수의 계산을 위해 근사계산식을 제안하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 고차형태계수에 대한 고려가 잔향시간을 비롯한 실내음향 평가지표의 예측오차를 줄이는데 기여할 수 있음을 보였고 최소한 5차 이상의 고차형태계수를 고려해야 함을 확인하였다. 기존의 잔향시간 예측식에 의한 계산값과 비교한 결과, 제안된 방법은 영상음원 분포를 예측하는데 유리한 영상법의 장점을 유지하면서도 확산반사를 고려하지 못하는 단점을 보완할 수 있음을 보여주었다. 앞으로 실측치와의 비교연구를 통해 시뮬레이션 모델을 보완해 나아가면 실내음향

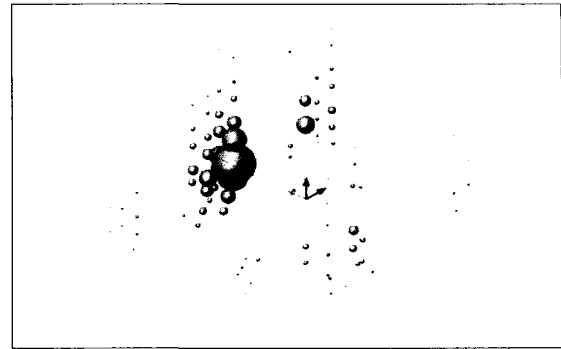


그림 5. 영상음원 분포도 (3차원 영상)
 Fig. 5. Spreads of image sources (3D graphic view).

특성을 예측하는 효율적인 도구로 발전될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구 (R01-1999-000-00304-0)의 자원에 의한 연구결과물의 일부이며 지원에 감사합니다.

참고 문헌

1. 이희원, 고일두, 오양기, 두세진, 정대업, "영상법에 의한 실내음향 예측에 있어 확산반사의 고려방안," 한국음향학회 하계학술발표대회 논문집, 951-954, 2001.
2. M. Hodgson, "Evidence of diffuse surface reflections in rooms" *J. Acoust. Soc. Am.*, **89**, 765-771, 1991.
3. Y. W. Lam, "A comparison of three diffuse reflection modelling methods used in room acoustics computer models," *J. Acous. Soc. Am.*, **100** (4), 2181-2192, 1996.
4. I. Drumm, *The Development and Application of an Adaptive Beam Tracing Algorithm to Predict the Acoustics of Auditoria*, Ph. D. Dissertation, Salford Univ., 1997.
5. N. Korany, J. Blauert, O. Abdel Alim, "Acoustic simulation of rooms with boundaries of partially specular reflectivity," *Applied Acoustics*, **62**, 875-887, 2001.
6. H.-W. Lee and B.-H. Lee, "An efficient algorithm for the image model technique," *Applied Acoustics*, **24**, 87-115, 1988.
7. Y. W. Lam, "Surface diffusion," *Applied Acoustics*, **60** (2), 111-112, 2000.
8. M. J. Howarth, and Y. W. Lam, "An assessment of the accuracy of a hybrid room acoustics model with surface diffusion facility," *Applied Acoustics*, **60** (2), 237-251, 2000.
9. Michael F. Cohen and John R. Wallace, *Radiosity and Realistic Image Synthesis*, Chapter 4, Academic Press, Boston, 1993.

저자 약력

◆ 이 희 원 (Hee-Won Lee)



1979년: 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
1981년: KAIST 기계공학과 (공학석사)
1988년: KAIST 기계공학과 (공학박사)
1984년 ~ 현재: 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부 교수

◆ 고 일 두 (Il-Du Goh)

1978년: 서울대학교 건축학과 (공학사)
1980년: 서울대학교 건축학과 (공학석사)
1989년: 서울대학교 건축학과 (공학박사)
1985년 ~ 현재: 서울산업대학교 건축학부 교수

◆ 오 양 기 (Yang-Ki Oh)



1984년: 서울대학교 건축학과 (공학사)
1986년: 서울대학교 건축학과 (공학석사)
1990년: 서울대학교 건축학과 (공학박사)
1991년 ~ 현재: 목포대학교 건축조경학부 교수

◆ 두 세 진 (Se-Jin Doo)



1983년: 서울대학교 전자공학 (공학사)
1987년: 서울대학교 전자공학 (공학석사)
1994년: 서울대학교 전자공학 (공학박사)
1994년 ~ 1995년: 자동차부품연구원 선임연구원
1995년 ~ 1997년: PAS A/V 컨설팅 대표
1997년 ~ 현재: 동아방송대학 방송기술과 부교수

◆ 정 대 업 (Dae-Up Jeong)



1987년: 연세대학교 건축공학과 (공학사)
1989년: 연세대학교 건축공학과 (공학석사)
1997년: The Univ. of Sydney, Architectural Design Science (Ph.D.)
2003년 ~ 현재: 전북대학교 건축학부 조교수