

# 확장 라디오시티법에 의한 실내음향 예측에 있어 고차형태계수의 영향

이 회원<sup>1)</sup>, 고 일두<sup>1)</sup>, 오 양기<sup>2)</sup>, 두 세진<sup>3)</sup>, 정 대업<sup>4)</sup>

1)서울산업대학교, 2)목포대학교, 3)동아방송대학, 4)전북대학교

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

Heewon Lee\*, Ildu Goh\*, Yangki Oh\*\*, Sejin Doo\*\*\*, Dae-up Jeong\*\*\*\*

(\*)Seoul National Univ. of Tech. fireroot@snut.ac.kr,

(\*\*)Mokpo National Univ., (\*\*\*)Dong-Ah Broadcasting College, (\*\*\*\*)Chonbuk National Univ.

### 요약

컴퓨터에 의한 실내음향 예측에 있어 확산반사의 고려는 매우 중요한 요소의 하나로 간주된다. 지난 수년 동안 음선추적법을 이용하여 실내음향을 예측하는 경우에 확산 반사를 고려하기 위한 방안들이 다양하게 제시되었으나 경면반사를 근본으로 하는 영상법에서는 확산 반사를 고려하기가 어려운 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 컴퓨터 그래픽 분야에서 제안된 확장 라디오 시티법을 적용하여 영상법에서 확산반사를 고려하는 방안을 제시하였다. 부분적으로 확산성을 갖는 반사면에서의 음향에너지 반사는 확산반사와 경면반사의 형태로 나누어 볼 수 있으며 반사의 횟수를 거듭함에 따라 확산-확산, 확산-경면, 경면-확산, 경면-경면의 형태로 반사에너지의 전환이 이루어진다. 본 연구에서는 고차 형태계수의 개념을 이용하여 이 네가지 형태의 반사음 전달과정을 모두 고려할 수 있도록 함으로써 실내의 벽면을 부분적 확산반사의 특성을 갖는 반사면으로 모델링 할 수 있도록 하였다. 본 논문에서는 확장라디오 시티법의 개념과 이에 따른 고차형태계수의 근사 계산법을 제시하고 고차형태계수가 실내음향 시뮬레이션의 결과에 미치는 영향 등을 분석해 보았다.

[본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구 (과제번호 1999-1-310-004-3)의 자원에 의한 연구결과의 일부임]

### 1. 서론

실내의 벽면에 반사된 음향에너지의 일부는 표면의 거칠기와 반사면 크기의 유한성으로 인해 정반사 이외의 방향으로 흩어지게 마련이다. 실내음향의 전파를

예측하기 위한 기하음향학적 컴퓨터모델에서는 이러한 난반사 현상을 고려하기 위해 확산계수(d)를 정의하고 확산계수에 비례하는 만큼의 반사음 에너지가 확산반사 형태로 전달되고 나머지(1-d)는 정반사형태로 전달되는 것으로 모델링하고 있다. 실내에서의 반사횟수가 증가함에 따라 경면-경면, 확산-경면, 경면-확산, 확산-확산 등을 조합한 형태로 음에너지의 전달이 이루어지게 되며(Fig. 1 참조) 일반적으로 기하음향학적 컴퓨터 모델에서는 경면-경면으로 이어지는 반사음 전달만을 고려하고 Sabine이나 Eyring의 간향식은 확산-확산으로 이어지는 실내음 전파만을 고려하여 유도된 예측식이라 할 수 있다.

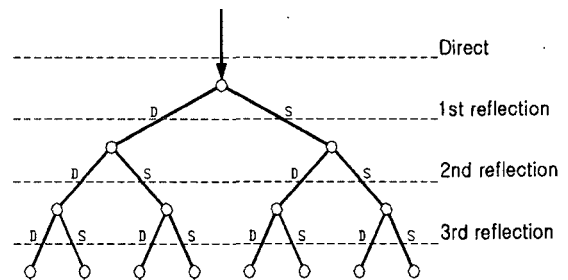


Fig. 1 Type of sound reflections in rooms: D(diffuse), S(specular)

최근 몇 년 동안 다수의 연구자들이 음선 추적법과 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 입사 방향과 대칭되게 반사되는 정반사 성분과 모든 방향으

로 균일하게 반사되는 확산반사 성분으로 나누고 확산 반사의 방향을 확률적으로 랜덤하게 결정하는 음선추적 알고리즘을 제안하였다. Lam[2]과 Drimme[3]은 beam 추적법에서 형태계수 (form factor)의 개념을 도입하여 면과 면사이의 확산반사를 계산하는 방법을 제안하였고 Korany는 영상법에서 확산반사와 정반사간의 에너지 변환을 고려하는 확장 라디오시티법의 도입을 제안하였다. [4] 이 방법은 형태계수 개념을 확장시킨 고차 형태계수 (higher order form factor)를 사용하여 확산반사를 계산하는 방법으로 반사에 의해 형성된 허상 공간과 실제공간 사이에서 음원과 벽면패치, 벽면패치와 또 다른 패치, 패치와 수음점간의 형태계수를 각각 구하여야 하는 복잡하고 많은 연산을 요하는 방법이다. 고차형태계수란 부분적 확산반사의 특성을 지닌 반사면에서 반사횟수가 증가함에 따라 확산반사 에너지의 일부가 정반사 형태로 변환되어 전달되는 현상을 고려하기 위한 것으로 본 연구에서는 확장라디오시티법에 의한 실내음향 예측에서 고차형태계수의 개념을 적용하는 구체적인 방안을 다루고 있다. 고차형태계수의 고려여부가 계산결과에 미치는 영향을 분석함으로써 실제 적용 가능한 고차형태계수의 차수를 찾아보았고 고차형태계수의 근사적 계산을 위한 방안도 제시하였다.

## 2. 확장 라디오시티법

### 2.1 확산반사의 계산: 라디오시티법

면과 면사이의 확산반사에 의한 에너지 전달은 복사열 전달에서의 유사하게 형태계수의 개념으로 계산할 수 있다. 형태계수(form factor)는 음원 패치가 방출하는 확산에너지에  $I_j$  대한 수음 패치의 흡수 에너지  $I_j$ 의 비율을 나타내는 무차원 값으로 다음과 같은 관계를 가진다.

$$I_j = F_{ij} \cdot I_i \quad (1)$$

면요소  $i$ 에서 면요소  $j$ 로의 형태계수는 면의 형상만 주어지면 다음 식으로 계산된다.

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

### 2.3 부분적인 확산반사: 확장 라디오시티법

반사면의 특성상 완전 확산이나 완전 경면반사가 아닌 부분적 확산반사의 경우에는 확산반사 에너지의 일부는 다시 정반사를 거쳐 전달될 수 있다. 이를 들어 면요소  $i$ 에서 면요소  $j$ 로 1차 경면반사를 거쳐 전달되는 확산에너지는 다음과 같이 임펄스 응답 형태로 표현될 수 있다.

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

여기서  $F_{\bar{i},1}$ 은 면요소  $i$ 의 1차 경면반사면에 대한 허상으로부터 면요소  $j$ 로의 형태계수를 의미한다.  $\alpha_{\bar{i}}$ 과  $d_{\bar{i}}$ 은 경면반사면의 흡음율과 확산계수를 뜻하며,  $r_{\bar{i}}$ 는 면요소  $i$ 의 허상으로부터 면요소  $j$ 에 이르는 거리를 각각 나타낸다.

$i$ 에서  $j$ 에 이르는  $N$ 개의 경면반사 경로를 모두 고려하여 확산음 에너지의 전달을 임펄스 응답의 형태로 표현하면 다음 식과 같다.

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

여기서  $F_{\bar{i},k(n)}$  고차형태계수로  $i$ 면의  $k$ 차 허상으로부터  $j$ 면에 이르는 확산음 전달비율을 뜻한다.

따라서 음원으로부터 면요소  $i$ 에 전달되는 확산음에너지는 다음 식으로 표현된다.

$$h_{si}(t) = \frac{W}{\Delta A_i} \sum_{n=0}^N \left( F_{si,k(n)}\delta\left(t-\frac{r_{si,k(n)}}{c}\right) \right) \quad (5)$$

여기서  $W$ 는 음원의 음향파워를 의미하며, 직접경로를 포함하여  $i$ 에서  $j$ 에 이르는 모든 경면반사 경로에 대한 형태계수를 포함한다.

유사한 방법으로 면요소  $j$ 에서 수음점으로 향하는 확산음 전달은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h_{jr}(t) = d_j(1-\alpha_j) \sum_{n=0}^N F_{jr,k(n)}\delta\left(t-\frac{r_{jr,k(n)}}{c}\right) \quad (6)$$

여기서  $d_j$ 와  $\alpha_j$ 는 면요소  $j$ 의 확산계수와 흡음율을 의미한다. (4)(5)(6)식을 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 Convolution 적분을 의미한다.

영상법은 음원에서 수음점에 이르는 정반사 에너지를 당연히 고려해야 한다. 다음 식은 정반사만을 고려한 임펄스응답을 표현하며,

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

(7)식의 정반사와 (8)식의 확산반사를 합하여 음원에서 수음점에 이르는 총합임펄스응답은 다음 식으로 표현된다.

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

## 2.4. 고차형태계수의 근사계산

식(4)에서 고차형태계수  $HF_{ij}(t)$  는 면요소  $i$ 에서 면요소  $j$ 로 직접 확산 전달되는 형태계수 뿐만아니라  $n$ 차 경면반사를 거쳐 전달되는 확산에너지를 고려하는 개념이므로 복잡한 계산작업을 필요로 한다. 두 개의 면요소 간의 모든 조합에 대해 정해진 차수만큼의 경면 반사 경로를 산출해야 하고 각 경면반사 경로에 대해 형태계수를 산출해야 하기 때문에 단순한 직육면체 형상이 아니면 엄밀한 계산이 불가능 할 정도로 계산량이 많고 할 수 있다. 본 연구에서는 음원과 수음점 간의 경면반사 경로의 산출결과를 활용하여 고차형태계수를 근사계산 하는 방법을 도입하였다. 식(4)를 반사차수 별로 분리하여 보면,

$$HF_{ij}(t) = \sum_{n=1}^M F_{ij,k(n)} \delta\left(t - \frac{r_{ij,k(n)}}{c}\right) \left( (1-\alpha_p)(1-d_p) \right) + \sum_{n=1}^M F_{ij,k(n)} \delta\left(t - \frac{r_{ij,k(n)}}{c}\right) \prod_{i=1}^{k(n)} \left( (1-\alpha_p)(1-d_p) \right) \quad (10)$$

....

여기서  $N_k$  는  $k$ 차 반사경로의 갯수를 의미한다. 고차 형태계수의 근사계산을 위하여 (10)식의 각 항을 다음의 근사값으로 대치시킬수 있다.

$$r_{ij,k(n)} \approx (k+1)\bar{r}_{ij} \quad (\text{평균전과거리의 } (k+1)\text{배})$$

$$F_{ij,k(n)} \approx \bar{F}_{ij} \frac{1}{(k+1)^2} \quad (\text{평균형태계수에 거리감쇄를 고려})$$

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

따라서  $k$ 차 반사까지 고려한 고차형태계수를 다음과 같이 근사 계산 할 수 있다.

$$HF_{ij}(t) \approx N_1 \times \bar{F}_{ij} \frac{1}{(k+1)^2} \delta\left(t - \frac{2\bar{r}_{ij}}{c}\right) (1-\bar{\alpha})(1-\bar{d}) + N_2 \times \bar{F}_{ij} \frac{1}{(k+1)^2} \delta\left(t - \frac{3\bar{r}_{ij}}{c}\right) (1-\bar{\alpha})^2 (1-\bar{d})^2 + \dots + N_k \times \bar{F}_{ij} \frac{1}{(k+1)^2} \delta\left(t - \frac{(k+1)\bar{r}_{ij}}{c}\right) (1-\bar{\alpha})^k (1-\bar{d})^k \quad (11)$$

## 3. 시뮬레이션 결과 및 토론

### 3.1. 형태계수의 계산

2장에서 제시한 근사계산법에 따라 고차형태계수비(평균 형태계수 값에 대한 고차형태계수의 비)를 산출한

예가 아래 표 1과 같다. 반사면의 흡음률과 확산계수에 따라 그 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 되고 계산상의 복잡성도 고려할 때 고차형태계수를 2차까지만 계산하는 경우가 많다.[4] 그러나 표에서 보듯이 차수가 높을수록 반사경로의 갯수는 많아지므로 이를 곱한 값은 6차 반사까지도 무시할 수 없는 크기가 된다. 본 연구에서는 고차형태계수를 최대 9차까지 계산할 수 있도록 하였다.

Table 1. Sample values of HOF (Higher Order Formfactor) 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 (①x②)	0.72	0.47	0.26	0.13	0.03	0.0066

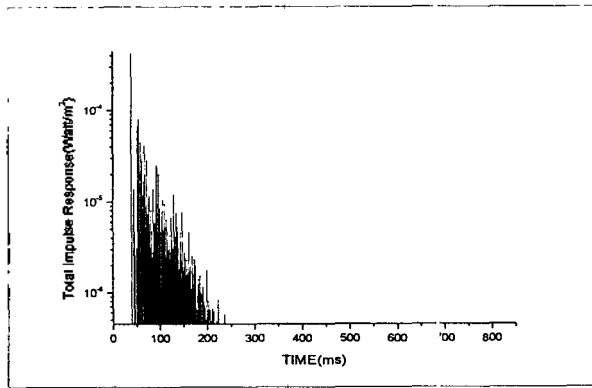
### 3.2. 고차형태계수의 영향

Fig.2은 음원에서 수음점으로의 임펄스 응답을 계산한 결과를 보이고 있다. 시뮬레이션에서 정반사는 10차까지 고차형태계수는 7차까지 고려하였으며 확산계수는 모든 면에 동일하게 0.6으로 가정하였다. 계산 결과, 확산 반사음의 크기는 정반사음에 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 주게된다. 시뮬레이션 대상 홀에 대한 기본 데이터는 표 2와 같으며 1kHz 주파수대역에 대한 결과만을 대표로 수록하였다.

Fig. 2와 같은 임펄스응답을 Schroeder의 역진적분법으로 적분하면 잔향시간을 구할 수 있다. Table 3에서는 확산계수를 0.6으로 가정하고 고차형태계수의 최고차수를 변화시키면서 잔향시간 산출 결과를 비교하여 보았다. Table 1에서 살펴본 바와 같이 각각의 경면반사 경로에 대한 고차형태계수 값은 매우 작지만 경면반사의 경로의 개수가 많기 때문에 고차형태계수를 무시할 수 없게 된다. Table 3의 계산결과는 이러한 고차형태계수의 영향을 잘 나타내고 있으며 5차 이내에서는 고차형태계수의 차수에 따라 잔향시간 산출치가 차이를 보이지만 그 이상의 차수에서는 단일한 산출결과를 주고 있다.

**Table 2. Basic data of the simulated room**

Room dimension	20m x 30m x 10m	
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
Reverberation Time		
Sabine RT	0.94 sec	
Eyring RT	0.70 sec	



**Fig. 2 Simulated impulse response**

**Table 3. Predicted RT's with the variation of HOF (Higher Order Formfactor)**

RT (sec)	Considered order of HOF				
	1st	2nd	3rd	5th	7th
	0.62	0.75	0.78	0.80	0.80

Table 4에서는 확산계수 값을 변화시키면서 고차형태 계수를 고려한 경우(7차까지 고려)와 고려하지 않은 경우의 잔향시간 산출결과를 비교하였다. 표에서 확산계수 0.0일때의 결과는 확산반사가 고려되지 않고 경면반사만이 고려된 잔향시간 예측결과를 의미하며 확산계수가 1.0인 경우는 경면반사가 무시되고 직접음 에너지와 확산반사 에너지만 고려된 예측결과라 할 수 있다. 대상 홀의 잔향시간이 0.7~0.94 초임에 비해 고차형태 계수를 고려하지 않는 경우는 경면반사만 고려할 때보다도 잔향시간 예측의 오차가 크다는 것을 알 수 있다. 고차형태 계수를 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 있는데 이는 확산반사만으로 계속 반사되는 경우, 각 반사면 요소간의 무수히 많은 고차 확산반사의 조합이 고려되어야 하지만 확산반사의 조합을 2차까지만 고려한 데서 비롯된 결과로 판단된다.

**Table 4. Predicted RT's according to the diffusion coefficients variation: with and without consideration of HOF (Higher Order Formfactor)**

RT (sec)	Diffusion Coefficients					
	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

#### 4. 결론

본 연구에서는 영상법에서 부분적인 확산반사를 고려하는 방법으로 확장 라디오시티법을 적용하였으며 이에 따른 고차형태 계수의 계산을 위한 근사식을 제안하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 고차형태 계수에 대한 고려가 잔향시간의 예측오차를 줄이는데 기여할 수 있음을 보였고 최소한 5차 이상의 고차형태 계수를 고려해야 함을 제안하였다. 실험결과와의 비교를 통해 제안된 알고리즘을 검증하고 보완하는 추가적인 연구가 필요하겠지만 기존의 잔향시간 예측식이나 여타 상용 소프트웨어를 활용한 예측결과와의 비교를 통해 제안된 방법이 영상음원의 분포를 예측하는데 유리한 영상법의 장점을 유지하면서 확산반사를 고려하지 못하는 영상법의 단점을 보완함으로써 실내음향 특성을 예측하는 효율적인 도구로 발전될 수 있음을 보여 주었다.

#### 5. 참고문헌

- 1) M. Hodgson, "Evidence of diffuse surface reflections in rooms" J. Acoust. Soc. Am., Vol. 89, 765-771, 1991
- 2) Lam Y.W., "A comparison of three diffuse reflection modelling methods used in room acoustics computer models", J. Acous. Soc. Am. 100(4), pp.2181-2192, 1996
- 3) Ian Drumm, "The Development and Application of an Adaptive Beam tracing Algorithm to Predict the Acoustics of Auditoria" Ph.D. dissertation, Salford Univ.
- 4) N. Korany, J. Blauert, O. Abdel Alim, "Acoustic simulation of rooms with boundaries of partially specular reflectivity", Applied Acoustics 62 (2001) 875-887
- 5) 이희원, 외4, "영상법에 의한 실내음향 예측에 있어 확산반사의 고려방안", 한국음향학회 학술발표대회 논문집 pp.951 - 954, 2001. 7.