

## 음장파라미터 추출을 위한 음선추적 시뮬레이터의 구현

### Implementation of ray tracing simulator for extracting sound field parameters

이 덕 수\*, 성 평 모\*\*  
(D.S.Lee\*, K.M.Sung\*\*)

#### 요 약

연주공간의 음장 파라미터를 효과적으로 추출하기 위하여 음원에서 발생한 음선들을 청취자위치에 도달하기까지 추적한 후 이를 영상음원으로 변환하여 연주공간의 방향성 충격응답을 구하는 방식인 혼성 음선추적법을 적용한 음장시뮬레이터를 구현하였다. 제안된 방법을 통해 측정동에 의한 방법보다 적은 시간과 경비로 방향성 충격응답을 정확히 구할 수 있다. 구현된 시뮬레이터를 이용하여 콘서트홀이나 교회등의 연주공간에서의 방향성충격응답을 구하여 초기반사음들의 크기와 방향을 추출할 수 있음을 보였다.

#### ABSTRACT

A sound field simulator is constructed to obtain the sound field parameters such as the magnitudes and directions of early reflections with moderate efforts. The proposed simulator is based on the hybrid ray tracing method that traces rays reached the listener position and convert them to image sound sources. By this approach, we can obtain the directional impulse response relatively easily with minimum costs. Simulation experiment results of several performance places are reported to show the versatility of the proposed simulator system.

#### I. 서 론

연주회장에서 듣는 음악과 녹음된 소스를 가정의 오디오 시스템을 통하여 듣는 경우의 가장 큰 차이는 청취공간에 의한 공간감이라고 할 수 있다. 일반적인 녹음 청취공간은 연주회장에 비해 매우 작은 것이 보통이므로 청취자가 느끼는 음향공간이 이에 따라 작게 된다. 보통의 청취공간에서도 커다란 연주회장에서 듣는 것과 유사한 공간감을 재현하기 위해서는 재

현하고자하는 공간에서의 반사음들 특히 직접음 이후 약 100ms 이내에 청취자에게 도달한 반사음으로 정의되는 초기반사음(early reflection)들의 묘사가 필수적이다. 좀 더 구체적으로 말해서 심리적인 음향공간의 크기, 모양, 그리고 주관적인 선호도등을 결정하는 가장 중요한 요소는 초기반사음이며, 어떤 연주공간의 초기반사음들중 주요한 몇개만의 크기 및 방향을 재현함으로써 다른 공간에서도 원래의 공간의 느낌을 재현할 수 있는 것으로 알려져 있다[1]. 완벽한 음장공간의 재현을 위해서는 녹음 및 재생과정에서의 공간의 영향을 배제하여야 하는데, 재생되는 녹음 소스가 무향녹음이고 재생공간 역시 무향실이거나

\*LG전자,

\*\*서울대학교 전자공학과

접수일자: 1995년 3월 11일

충분히 데드(dead)한 공간일 때가 가장 이상적인 환경이다. 일반적인 가정에서 어느정도의 잔향성분이 포함된 보통의 녹음을 듣는 경우는 녹음 및 재생공간의 전달함수가 귀로 인지되는 공간감에 많은 영향을 주기 때문에 특정한 공간의 재현은 불가능하지만 공간감의 향상을 이루는 것은 가능하며, 이를 고급 오디오 제품에 적용하기위한 연구가 이루어져왔다[2].

재생음장을 향상시키는 음장제어 프로세서 시스템을 구현하기 위해서는 먼저 좋은 음향특성을 갖는 연주회장의 반사음의 분포를 알아내야하는데, 이러한 정보는 해당 연주회장의 방향성 충격응답(directional impulse response)을 1점 4마이크 수음법(single-point quad-miking technique)등을 이용한 측정을 통하여 얻을 수 있다[2]. 그러나 충격응답을 측정에 의하여 구하는 작업은 측정하고자 하는 연주회장에 직접 가서 복잡한 장비를 사용하여서만 이루어질 수 있으므로 시간과 경비가 많이 소요되는 어려움을 갖고 있다.

본 논문에서는 음장제어 시스템에 적용하기 위한 초기반사음의 정보를 얻기위한 방법으로 비용이 많이 들고 복잡한 측정법대신 연주회장의 도면정보를 바탕으로한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 방향성 충격응답을 구하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 충격응답의 계산은 축소모형의 제작에 의한 측정방법과 함께 연주회장의 음장해석의 방법으로 실내음향학자들 사이에서 많이 이루어져 왔다[3]. 시뮬레이션의 방법은 반사음을 묘사하는 방법에 따라서 기본적으로 영상법(image method)과 음선추적법(ray tracing method)등의 2가지로 구분된다. 영상법은 어떤 반사음을 음원의 해당 반사벽에 대한 영상음원에서 방사된 음으로 모델링하는 방법[4]으로(그림 1), 초기반사음의 경우 반사음의 방향 및 크기등에 대한 정보를 비교적 정확히 알 수 있는 반면에, 구현이 어렵고 계산량이 매우 많은 단점을 갖고 있다. 음선추적법은, 음원이 무수히 많은 음선입자(sound ray particle)를 방사하고 각 음선입자는 벽면의 반사를 거쳐 감쇠된 후 청취자의 위치에 도달하게 되면 일정한 시간간격 내에 도달한 입자의 에너지를 모두 합하여 반사음을 측정하는 방식이다[5](그림 2). 이 방법은 구현이 비교적 간단하다는 장점이 있는 반면에 얻어진 충격응답은 통계적인 양이 되므로, 반사음의 정확한 에너지를 얻기가 불가능하다는 단점을 갖고 있다. 이상의 두가지 방법의 단점을 극복하면서 장점을 취하기 위하여 이들을 적절히 혼합한 방법들이 사용되고 있는

데, 그 구체적인 방법은 개발자에 따라 여러가지로 매우 다양하다[6, 7].

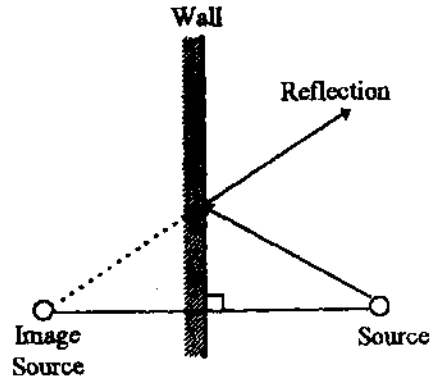


그림 1. 영상법의 원리.

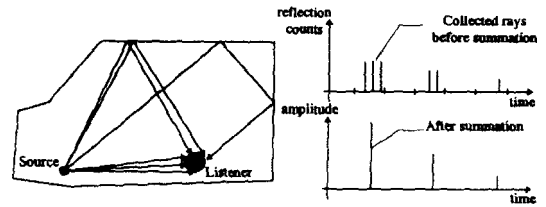


그림 2. 음선추적법의 원리.

본 논문에서는 음선추적법을 근간으로 영상법의 일부 장점을 취한 방법을 독자적으로 구현하였는데, 이를 혼성음선추적법(hybrid ray tracing method)라 부르기로 한다. 구현된 혼성음선추적 시뮬레이터는 영상법의 단점인 많은 계산량을 줄이기 위해 먼저 음선추적 시뮬레이션을 수행한 후, 청취자에 도달한

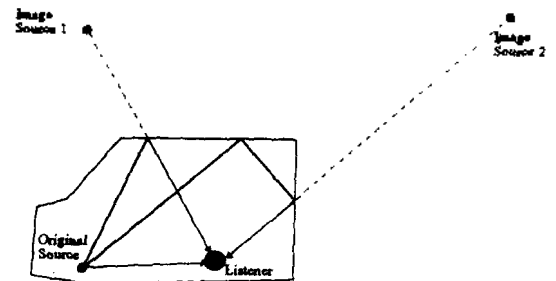


그림 3. 혼성 음선추적법의 원리.

음선입자의 도남시간과 방향으로부터 영상음원의 위치를 추정하여 초기반사음의 정확한 크기와 분포를 구해내도록 하였다 (그림 3). 또한 구현된 시뮬레이터를 사용한 몇가지 공간에 대한 시뮬레이션 실험을 통해 그 효용성을 알아보았다.

### II. 혼성 음선추적 시뮬레이터의 구현

시뮬레이션을 수행하기 위해서는 먼저 묘사하고자 하는 공간의 구성에 대한 값들을 구해야 한다. 필요한 정보로는 벽면의 좌표와 각 좌표에 의한 벽면의 구성, 그리고 벽면의 반사계수들이 있다. 벽면에 대한 값들이 구해지면 음선입자를 방사할 음원의 위치가 결정되어야 하고, 음원의 위치가 주어지면 해당 공간내의 모든 반사과정을 구해낼 수 있다.

벽면에 대한 정보가 구성되면 정해진 음원으로부터 많은 수의 음선입자가 방사되고 각 음선입자는 벽면과 만나면 감쇠를 거친후 반사를 거쳐 새로운 방향으로 방사된다. 각 반사과정은 모두 벡터양으로 보존되어 청취자와 만나는 경우를 검사하게 되는데 청취자와 만나는 경우 해당 반사음은 영상음원으로 변환되어 크기, 방향등이 결정된다.

#### 1. 공간의 구성 및 반사과정

음선추적 시뮬레이션을 위해서는 먼저 3차원 벡터 공간에서 주어진 공간 좌표로부터 반사벽면을 구성하는 작업이 이루어져야 한다. 벽면은 모서리점들로부터 계산되는 변들과 구해진 변들로부터 구해지는 해당 벽면의 내향 법선벡터(inward normal vector)로서 정의된다. 평탄한 벽면이  $a$ 개의 모서리벡터  $\vec{p}$  ( $x_i, y_i, z_i$ )로 구성된다면 평면위에 존재하는 두개의 선 벡터는

$$\vec{v}_1 = \vec{p}_{j+1} - \vec{p}_j, \vec{v}_2 = \vec{p}_{j+2} - \vec{p}_{j+1} \quad \text{단 } j < a-2 \quad (1)$$

와 같이 정의될 수 있으므로 내향 단위 법선벡터(inward unit normal vector)는 구해진  $\vec{v}_1$ 과  $\vec{v}_2$ 의 외적(cross product)을 이용하여

$$\vec{n} = \frac{\vec{v}_2 \times \vec{v}_1}{|\vec{v}_2 \times \vec{v}_1|} \quad (2)$$

와 같이 구해진다. 단, 여기서  $\vec{p}_i$ 의 순서는 공간의 안쪽에서 보아 시계방향으로 배열되어 있다고 가정한다

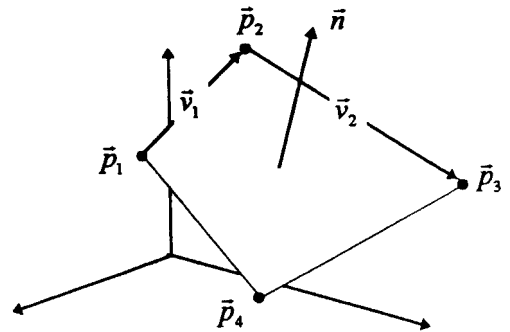


그림 4. 공간벡터의 구성.

다(그림 4).

구해진 내향 단위 법선벡터와 평면위의 임의의 한 점으로부터 3차원 평면의 식을 구할 수 있는데, 임의의 한 점을 모서리점으로 삼으면 다음과식 같이 표현된다.

$$x \cdot n_x + y \cdot n_y + z \cdot n_z = D \quad \text{단, } D = \vec{n} \cdot \vec{p}_i \quad (3)$$

위에서 구해진 식은 각 모서리점들을 포함하는 무한 벽면의 식이므로 벽면에 도달한 음선이 모서리점들이 표시하는 2차원 다각형내에 존재하는가의 여부를 검출해야 하는데, 이는 다각형의 각 변을 이루는 선벡터를 이용하여 반공간(half-space)테스트를 수행하여 알아낸다(그림 5). 어떤 선벡터의 내향 법선벡터와 임의의 점사이의 내적(inner product)은 선벡터의 안쪽 공간에 존재하는지에 대한 정보를 제공한다.

시계바늘 방향으로 구성된 변의 벡터들 모두에 대하여

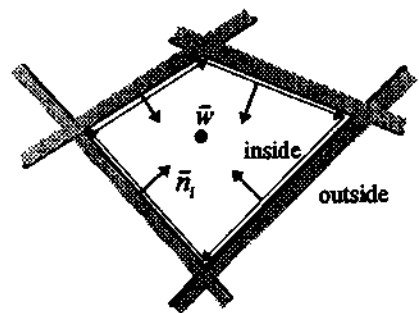


그림 5. 각 선벡터들에 대한 half-space 테스트.

$$\vec{n}_i \cdot (\vec{w} - \vec{p}_i) > 0 \quad (4)$$

를 만족하는 경우 각 선벡터의 안쪽 공간의 교집합 즉, 다각형 내에 존재함을 의미한다.

### 2. 음의 반사과정

음원은 어떤 방향성(directionality)을 갖고 음선들을 공간상으로 방사한다. 악기등의 실제 음원은 나름대로의 방향성을 가지고 있어서 필요하다면 시뮬레이션에서도 음원의 방향성을 고려해야 하지만, 본 연구에서는 간단히 일반적인 전방향성(omnidirectional) 음원을 약간 변형하여 음원의 위나 아래방향으로의 방사각을 제한 가능하도록 구현하였다(그림 6). 각 음선은 그 방향의 음향 에너지를 대표하는 것이라 볼 수 있으므로 구현상에 정확히 등간격으로 위치하도록 방향이 계산된다.

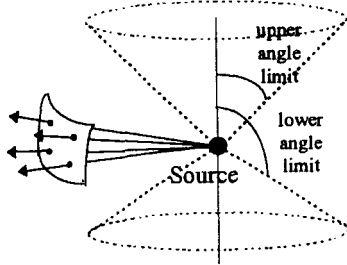


그림 6. 음원의 모델링.

각 음선은 내부적으로는 크기와 시간 방향을 갖는 벡터로 저장되며 일단 벽면과 만나면 반사음 즉, 새로운 음선 벡터가 생성되고 벽면의 반사계수에 따라서 크기도 감소되게 된다. 음선이 벽면과 만났는지는 두가지의 과정을 거쳐서 확인하게 되는데, 먼저 벽면을 이루는 무한평면과 음선이 만나는지의 여부는 무한 평면의 식 (3)과 음선벡터와의 관계로부터 알 수 있다. 즉, 시간이  $t$ 일때 점  $s_i$ 로부터 출발한 음선벡터를

$$\vec{r}(t) = \vec{s}_i + \vec{c}_i t \quad (5)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 음선의 방향을 표시하는  $\vec{c}_i$ 는 음속의 크기를 갖는다. 만일 이 음선이 시간  $t_h$ 에 어떤 무한평면  $\vec{n} \cdot \vec{r} = D$ 와 만난다면 이때 만나는

점  $\vec{p}_h$ 는 평면의 식과 식 (5)를 동시에 만족하게 되도록 만일  $\vec{n} \cdot \vec{c}_i$ 가 0이 아니라면

$$t_h = \frac{D - \vec{n} \cdot \vec{s}_i}{\vec{n} \cdot \vec{c}_i} \quad (6)$$

가 되고  $\vec{n} \cdot \vec{c}_i = 0$ 이라면 음선벡터와 벽면이 평행하여 영원히 만나지 않게 됨을 의미한다. 윗 식 (6)으로부터 무한 평면과 음선이 만나는 점  $\vec{p}_h$ 를 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{p}_h = \vec{r}(t_h) = \vec{s}_i + \vec{c}_i t_h \quad (7)$$

일단 음선이 평면과 만났다면 다음 단계는 만난 점  $\vec{p}_h$ 가 다각형으로 표현되는 벽면내부에 존재하는지의 여부를 판단해야 한다. 이는 1절에서 언급된 반공간(half-space)테스트를 통해 알 수 있다.  $\vec{p}_h$ 가 벽면과 만나는 점이라면 이 점으로부터 새로운 반사파에 해당하는 음선벡터를 다음식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{s}_{i+1} &= \vec{p}_h \\ \vec{c}_{i+1} &= \vec{c}_i - 2(\vec{c}_i \cdot \vec{n})\vec{n} \\ \vec{r}(t) &= \vec{s}_{i+1} + \vec{c}_{i+1} t \end{aligned} \quad (8)$$

이와 같이 모든 음선들에 대해서 정해진 시간까지의 모든 반사과정을 반복하면서 계산한다.

### 3. 청취자 위치에서의 반사음

시뮬레이션의 최종목적은 여러 벽면을 거쳐 반사된 음선벡터들중 청취자 위치에 도달하는 경우의 반사음의 정보를 추출하는 것이므로 각 음선은 청취자와 만나는가의 여부를 확인하여야 한다. 본 연구에서 청취자는 적당한 반지름을 갖는 구면으로 묘사하였다. 음선벡터가 청취자구(listener sphere)를 통과하는가를 알기 위해서 다음과 같은 과정을 거쳐서 선벡터와 구와의 교차점을 검출한다.

구면  $\vec{p}_h = (x, y, z)$ 는 중심점  $\vec{h}$ 로부터 반지름  $R$ 만큼 떨어진 모든 점들의 집합이므로

$$|\vec{p} - \vec{h}| = R \quad (9)$$

와 같이 표현된다. 벽면과의 만남의 경우와 마찬가지로 음선벡터와 구면이 만나는 경우 식 (7)과 (9)로부터

$$|\vec{s}_i + \vec{c}_i - t_k \vec{h}| = R \quad (10)$$

이 얻어진다. 편의상 윗 식의 양변을 제곱한 후 전개 하여  $t_k$ 에 대해 정리하면

$$t_k = -\frac{\beta}{\alpha} \pm \frac{\sqrt{\beta^2 - \alpha \cdot \gamma}}{\alpha} \quad \text{단, } \alpha = |\vec{c}_i|^2; \quad (11)$$

$$\beta = (\vec{s}_i - \vec{h}) \cdot \vec{c}_i, \quad \gamma = |\vec{s}_i - \vec{h}|^2 - R^2$$

을 얻을 수 있다. 여기서 는 항상 0 이 아닌 값을 가지므로 식 (11)의 해는 의 부호에 따라 다음과 같이 결정된다.

표 1. 방정식(11)의 해의 갯수와 교차점.

$\beta^2 - \alpha \cdot \gamma$	$t_k$	의미
< 0	없음	구와 음선은 만나지 않음
= 0	1	구면파 음선이 만남
> 0	2	음선이 구내부를 통과

방정식(11)의 해가 1개 또는 2개인 경우는 모두 음선이 청취자구와 만나는 경우로 간주되며, 특히 해가 2개인 경우는 만나는 시간이 두가지가 존재하게 되는데, 청취자구의 외부로부터 도달한 음선이 청취자구와 처음 만나는 시간, 즉 두 값들중 작은 쪽을 유일한 해로 선택하면 된다.

각 반사음들의 시간, 방향 및 크기가 구해지면 이를 모두 영상음원으로 변환하여 최종적인 방향성 충격 응답을 구한다. 음선추적법을 수행할 때 충분히 많은 음선을 방사하고, 청취자구가 점이 아닌 유한한 크기를 갖게 되므로 하나의 영상음원에 의한 반사음

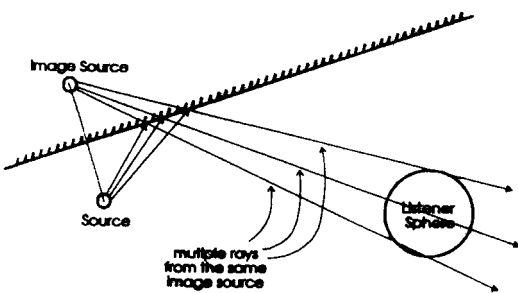


그림 7. 1개의 영상음원에 의한 다수의 음선들.

이 여러개로 검출되게 되지만(그림 7), 영상음원으로 변환하고 나면 하나의 영상음원 또는 반사음으로 합쳐지므로 최종적인 반사음의 밀도는 음선추적에 의해 구해진 것보다 대폭 줄어들게 된다.

### III. 시뮬레이션 결과

두개의 서로 다른 위치에 존재하는 음원의 초기 반사음들을 구하여 이를 2채널 스테레오 녹음 소스의 음장재현에 사용하기 위하여 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 공간내에서 하나의 음원만의 방향성 충격응답을 구하는 것이 아니라 음원의 위치를 무대의 좌,우 두지점에 설정하여 초기반사음을 구하였다. 일반적으로 사용되는 한개의 음원에 의한 음장이 아니라 2개 채널을 음원으로 설정하는 방법을 채택한 이유는 원음에 존재하는 정보를 최대한 활용함으로써 좀 더 현실적이고 입장감있는 공간이 묘사될 수 있기 때문이다.

#### 1. 콘서트홀의 음장

본 연구의 시뮬레이션에 사용된 콘서트홀은 1900년에 완성된 구두상자형(shoe-box type)의 음악당으로서, 객석은 2,600석정도이고 1kHz에서의 잔향시간은 1.8초이다. 이 홀은 현재도 가장 좋은 연주회장중의 하나로 꼽힐 정도로 음향이 우수한 것으로 알려져 있으며, 따라서 많은 음장제어 프로세서등에서 이 홀을 묘사하는 프로그램을 채용하고 있다. 그림 8에 시뮬레이션에 사용된 홀의 각 방향에서본 모양과 좌,우

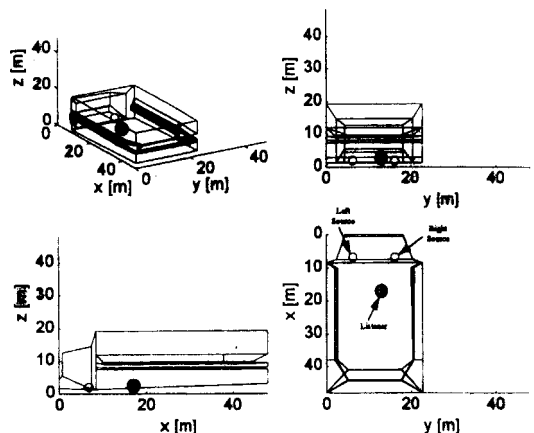


그림 8. 시뮬레이션에 사용된 콘서트 홀의 구조와 음원 및 청취자의 위치.

음원 및 청취자의 위치를 보였다.

시뮬레이션에서는 약 116,000개 정도의 음선을 각 방향으로 방사하여 가능한 모든 반사과정을 최대 450ms까지 추적하였다. 최종적으로 청취자에게 도달한 주요 반사음들은 그림 9에 보인 것과 같다. 그림 9의 (a)와 (b)는 시간의 경과에 따라서 반사음들의 분포를 그린 에코그램(echogram)인데, 음원에서 음선이 출발한 시간 즉, 음이 발생한 시간을 기준으로 측정하였기 때문에 가장 먼저 도달한 음인 직접음도 어느 정도의 지연시간을 갖게 되며, 직접음으로부터 첫 번째 초기반사음까지의 지연시간으로 정의되는 ITDG (initial time delay gap)는 약 27ms 정도이다. 또한 그림 9의 (c)와 (d)는 청취자를 원점으로 영상음원들의 방향에 따른 분포를 2차원 공간상에 보인 것인데,

청취자의 위치를 원점으로 하여 각 반사음을 공간상의 영상음원으로 표시한 것이다. 여기서 각 영상음원은 원의 중심에 위치하며 그 세기는 원의 크기로 표현된다. 이러한 표시방법으로 영상음원의 분포를 쉽게 파악할 수 있는데, 그림 (c)와 (d)를 비교하여 보면, 좌,우측 음원에 의한 초기반사음들이 서로 다른 분포를 나타냄을 쉽게 알 수 있다. 이렇게 반사음이 서로 다른 분포를 갖는다는 것은 이에 의해 창조되는 음장효과가 서로 다를 것을 의미하는데, 이미 언급된 바와 같이 본 연구의 결과를 이용하는 음장계어시스템은 2채널 스테레오 녹음의 각 채널음을 각기 다른 음장분포를 갖는 반사음의 묘사에 적용하고자 하는 것이므로, 합성된 음장이 그만큼 복잡하고 자연스러운 형태를 나타내게 될것임을 의미한다고 할 수 있다.

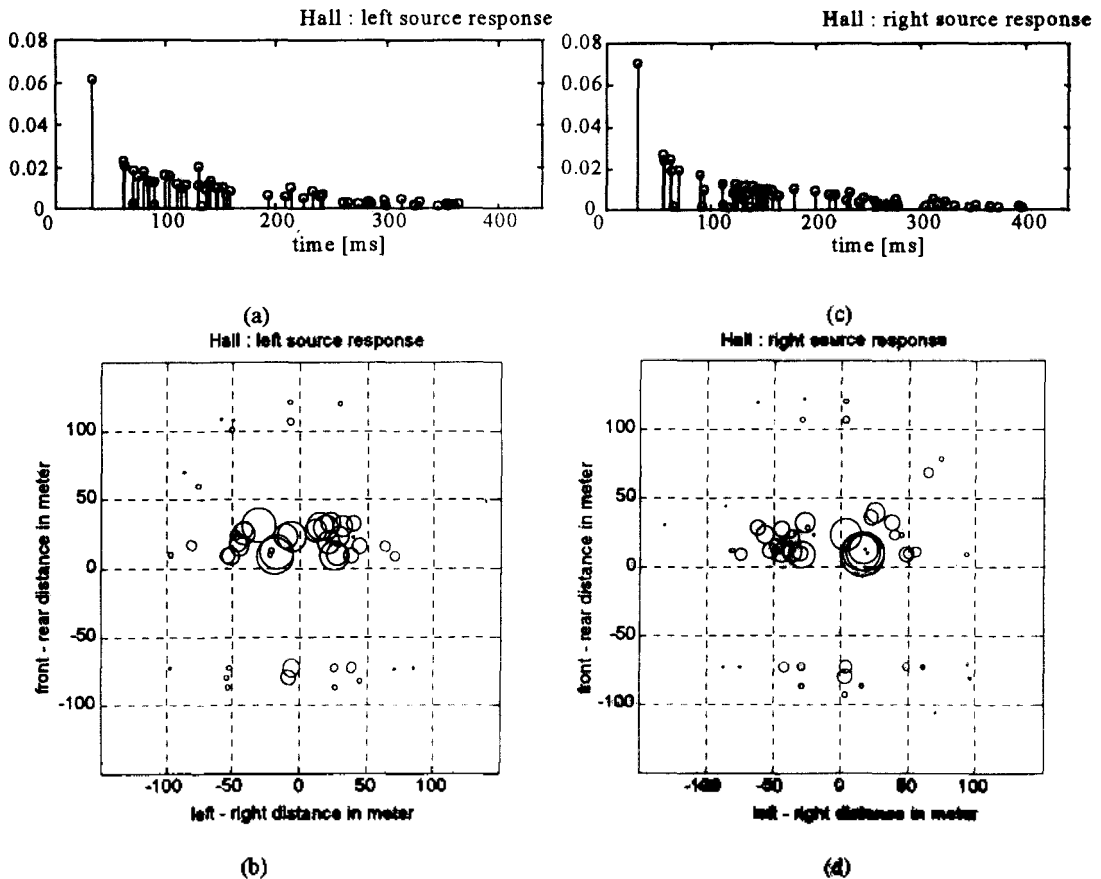


그림 9. 시뮬레이션에 의해 구해진 콘서트홀의 초기지연차.

(a)(b) 좌측음원에 의한 초기반사음 분포, (c)(d) 우측음원에 의한 초기반사음 분포.

2. 교회의 음장

시뮬레이션의 또 하나의 예로서 교회의 음장을 모델링하였다. 시뮬레이션에 사용된 교회는 1969년에 건축된 미국의 카톨릭 교회로서 3세기 로마교회의 건축양식을 기반으로하여 설계되어 청중이 2/3이상 찬상에서도 500Hz에서 5초이상의 매우 긴 잔향시간을 갖는 공간이다. 그 이유는 벽면이 일반적으로 흡음률이 매우 작은 콘크리트, 나무등의 재질로 이루어져 있기 때문이다. 그림 10에 사용된 공간의 구조와 좌,우측 음원 및 청취자의 위치를 보였다.

이 경우는 전방향으로 40,000개 이상의 음선을 방사하여 800ms까지의 반사과정을 추적하여 대략 600여개의 청취자구에 도달한 반사음을 추출할 수 있었다. 이러한 시뮬레이션의 결과를 그림 11에 보였다.

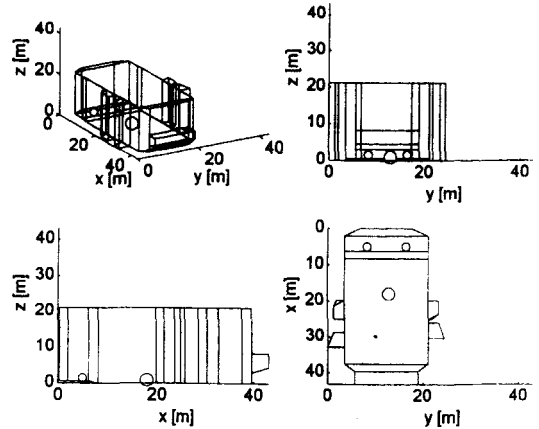
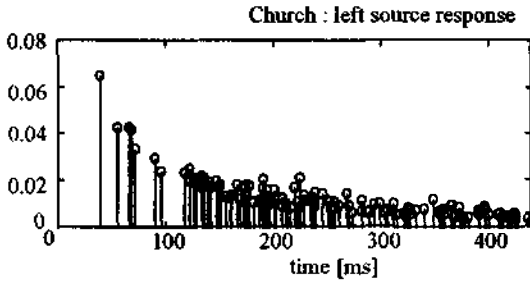
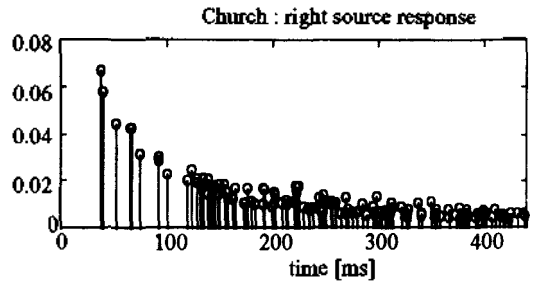


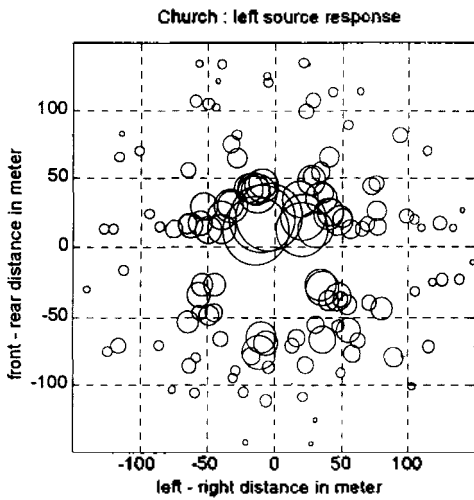
그림 10. 시뮬레이션에 사용된 교회의 구조와 음원 및 청취자의 위치.



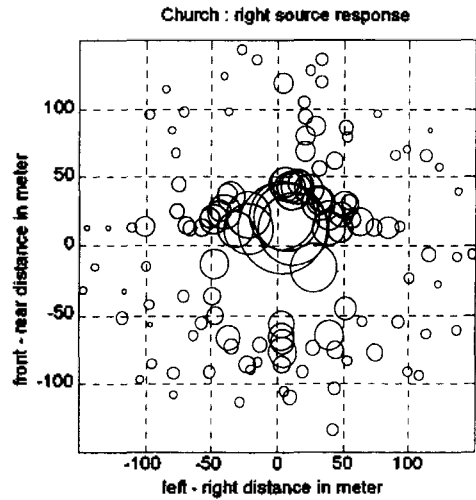
(a)



(c)



(b)



(d)

그림 11. 시뮬레이션에 의해 구해진 교회의 초기반사음.

(a)(b) 좌측음원에 의한 초기반사음 분포, (c)(d) 우측음원에 의한 초기반사음 분포.

벽면의 흡음이 앞에서의 콘서트홀의 경우보다 작으므로 같은 시간일 때 도달한 반사음들의 크기가 상당히 큼을 알 수 있다. 이 경우의 직접음 이후 가장 먼저 도달한 초기반사음의 지연시간은 2.9ms인데 음선의 방향으로 미루어 무대 바닥면으로 부터의 반사음인 것으로 추측되며, 그림 11에서는 알기 힘들지만 측 방향의 반사음들은 대략 16~24ms이후에 도달한다.

#### IV. 결 론

연주회장의 음장을 디지털 신호처리를 통하여 가정의 청취공간에 재현하는 음장제어 프로세서에 적용하기 위하여 임의의 공간의 초기반사음의 방향및 크기를 복잡한 측정을 거치지 않고 도면에 의한 모델링만으로 구해내는 혼성음선추적 시뮬레이터 시스템을 구현하였다.

제안된 혼성 음선추적법을 사용하여 영상법과 일반적인 음선추적법을 혼합하여 각 방법들의 장점만을 취하여 구현상의 복잡도와 계산량을 최소화하면서 디지털 음장제어 프로세서에 사용하기에 적합한 초기반사음의 분포를 구하였다. 또한 구현된 시뮬레이터를 사용한 실험을 통하여 실제로 존재하는 연주공간들의 반사음들의 분포를 구해내고 그 결과를 보임으로써 제안된 방법의 효용성을 알아보았다.

#### 참 고 문 헌

1. H. Kuttruff, Room Acoustics 3rd ed., Elsevier Science Publishers Ltd., New York, 1991.
2. I. Zucker, Reproducing architectural acoustical effects using digital soundfield processing, AES 7th Intl Conference, Toronto, 1989.
3. J. H. Rindel and G. Naylor, Computer modelling of sound fields in rooms-the state of the art and outlook to the future, ICA 14, Beijing, 1992.
4. J. Borish, Extension of the image model to arbitrary polyhedra, J. Acoust. Soc. Am, 75, pp. 1827-1836, 1978.
5. A. Krokstad, S. Strøm and S. Sørsdal Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique, J. Sound Vib. 8, pp. 118-125, 1968.
6. M. Vorländer, Simulation of the transient and steady state sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image source algorithm,

- J. Acoust. Soc. Am., 86, pp. 172-178, 1989.
7. B. I. Dalenback, P. Svensson, and M. Kleiner, Prediction and auralization based on a combined image source/ray model, ICA 14, Beijing, 1992.
8. F. S. Hill, Computer Graphics, Mcamullan Publishing Company, New York, 1990.

#### ▲이 덕 수

제8권5호 참조

현재 : LG전자 영상미디어연구소

#### ▲성 광 모

제12권5호 참조