

특집논문-08-13-5-02

가상환경용 3차원 입체음향 시스템 개발

양시영^{a)‡}, 김동형^{b)}, 정제창^{a)}

Development of three-dimensional sound effects system for virtual reality

Siyoung Yang^{a)‡}, Donghyung Kim^{b)}, and Jechang Jeong^{a)}

요 약

입체음향은 가상환경 시스템에서 중요한 부분을 차지하고, 청각 재생과 인간-컴퓨터 상호작용에서 점점 더 각광받고 있다. 본 논문은 가상환경을 위한 새로운 실시간 3차원 입체음향 재생 시스템을 제안한다. 먼저 가상공간에서의 임펄스 응답을 계산하는 방법을 제안한다. 입체음향과 관련된 가상공간 정보를 전달하기 위해서, 가상 환경을 위한 재질 정보를 포함하는 Enhanced DXF 파일 형식을 제안한다. 그리고 멀티채널 사운드 페닝 시스템을 구현하였다. 컴퓨터 환경에서 실험하여 제안한 방법의 유용성을 보여준다.

Abstract

3D sound is of central importance for the virtual reality system, and is becoming increasingly important for the auditory displays and for the human-computer interaction. In this paper, we propose a novel real-time 3D sound representation system for virtual reality. At first, we propose a calculation method of the impulse response for virtual space. To transmit the information of the virtual space, we propose an enhanced DXF file type that contains the material information. And then, we implement the multi-channel sound panning system. we perform the experiment based on computer simulation and prove the utility of the proposed method.

Keyword : three-dimensional sound effects, virtual reality, Enhanced DXF, sound impulse response, sound panning

1. 서론

최근 입체음향에 대한 일반적인 관심이 높아지면서 홈시어터와 같은 멀티채널 입체음향 시스템이 각광을 받고 있다. 원색세계백과사전^[1]에서는 입체음향을 “원음장을 충실하게 재현하고 음의 고저, 음색뿐만 아니라 방향이나 거

리감까지도 재생하여 입장감을 가지게 하는 음향”이라고 설명하고 있고, 일본음향학회가 발간한 음향용어사전^[2]에서는 “음향의 방향감, 거리감 등 음향 공간의 입체적인 인상과 입장감을 주는 음향”으로 입체음향을 기술하고 있다. [3]에서는 입체음향을 “음원이 발생한 공간에 위치하지 않은 청취자가 음향을 들었을 때 방향감, 거리감 및 공간감을 지각할 수 있도록, 음향에 공간 정보를 부가한 음향”으로 정의하였다. 음향 재생장치를 통하여 입체음향을 들으면 현장에 있지 않아도 현장에서 듣는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다.

입체음향은 공학 분야와 컴퓨터 음악 분야로 나누어서 연구가 진행되었다. 공학자는 음향을 입체적으로 표현하기 위해서 수학적으로 모델링 하는 방법에 주력하였고, HRTF

a) 한양대학교 전자통신전공학과

Department. of Electrical and Computer Engineering, Hanyang University.

b) 한라대학교 정보통신방송공학부

School of Information & Communication, Broadcasting Engineering, Halla University.

‡ 교신저자: 양시영(wirbel@ece.hanyang.ac.kr)

※ 본 연구는 서울시 산학연협력사업으로 구축된 서울 미래형콘텐츠 컨버전스 클러스터 지원으로 수행되었습니다.

(Head Related Transfer Function)^[4]에 기반을 두어 입체음향 개발이 꾸준히 진행되어 왔다. 반면, 컴퓨터 음악가들은 소리를 재생하기 위한 방법에 주력해왔고, 컨퍼런스나 워크숍 장소에서 실제로 컴퓨터 기반 음악 연주를 콘서트 형식으로 발표하거나 구현한 시스템 환경을 설치하여 시연을 통해서 논문의 성능을 입증한다. 그 밖에도 악기의 물리적 모델링 (Physical Modeling), 음악의 시각화, 컴퓨터 음악언어의 소프트웨어 및 하드웨어 구현 등등 음악과 관련된 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있다. 입체음향과 관련된 분야로는 음향을 실시간으로 재생하기 위한 시스템이나 음악 저작도구를 개발하여 시연을 통해서 논문의 성능을 보여준다^{[5][6]}. 본 논문은 공학자와 음악가의 관점에서 입체음향의 재생에 접근한다.

본 논문에서는 가상공간의 구성요소가 변할 때마다 발생하는 임펄스 응답을 실시간으로 계산하여, 가상공간의 음원을 실시간으로 재생하는 그림 1과 같은 시스템을 제안한다. 그림 1의 공간 A는 가상의 공간을 의미하며, '공간 B'는 4채널 오디오 출력을 이용해서 음원을 재생하는 실제 공간이다. 즉, 청취자는 존재하지 않는 가상공간에서 재생되는 음원의 입체음향 효과를 실제 공간에서 체험하게 되는 것이다.

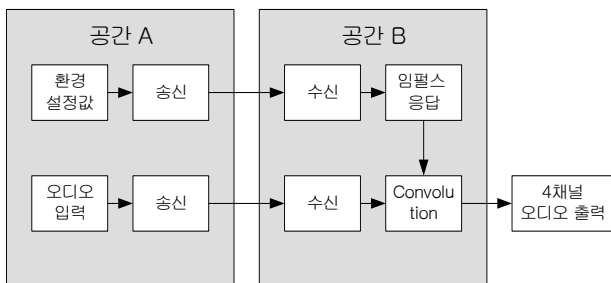


그림 1. 가상공간의 3차원 입체음향 재현 시스템
Fig. 1. 3D sound effect reproduction system in virtual reality

‘환경 설정값’을 송신장치로 전송하고 수신 장치로 수신 받아 임펄스 응답으로 데이터를 보낸다. ‘임펄스 응답’ 부분에서는 이 환경 설정값을 받아서 임펄스 응답을 구한다. ‘오디오 입력’ 장치는 오디오 데이터를 입력받아 송신장치를 통해 전송한다. ‘수신’ 장치로 오디오 데이터를 입력받는다. ‘컨볼루션(convolution)’에서는 임펄스 응답에서 나

온 임펄스 응답과 수신 장치에서 받은 오디오 데이터와 컨볼루션 한다. 컨볼루션한 오디오 데이터는 오디오 출력장치를 통해 내보내진다. 가상공간의 환경설정 값과 음원 데이터를 공간 B로 전송하여 공간 B에서 그 음원을 재생한다. 공간 B에 필요한 환경설정 값은 공간 A의 크기, 각 벽면의 재질, 음원과 청자의 위치이다.

본 논문에서 제안하는 시스템의 구현은 그림 2와 같다. 그림 2의 ‘공간 A’에서는 음원과 청자의 위치는 자유롭게 이동할 수 있음을 보여주며, ‘공간 B’에서는 청자의 위치는 고정이고 일정한 거리에 4개의 스피커가 위치한 것을 보여준다. 공간 A에서 환경설정 값과 음원데이터를 받으면 실제 공간에서 4채널 오디오 출력을 이용해서 음원을 재생한다.

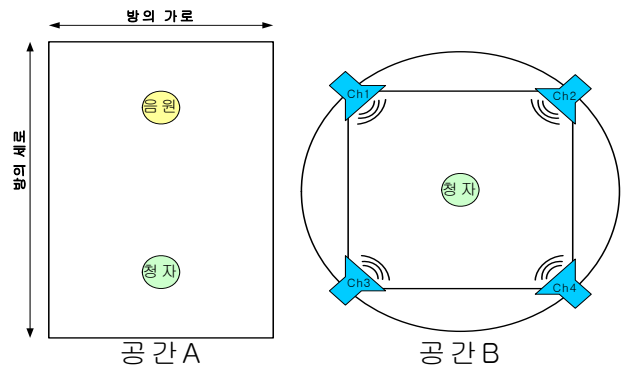


그림 2. 4채널 오디오 출력을 이용한 3차원 입체음향
Fig. 2. 3D Sound effect using 4 channel audio

일반적으로 어떤 공간에서의 음원의 전달은 그 공간의 임펄스 응답을 이용하여 구해지며, 이러한 입체음향 효과는 음악 편집 및 저작도구에서도 어렵지 않게 접할 수 있다. 이 때, 임펄스 응답을 실시간으로 적용하기 위해서는 미리 정의해 놓아야 한다. 보통 방법으로는 실제로 그와 비슷한 공간에서 소리를 녹음함으로써, 혹은 그 공간을 모델링함으로써 하나의 임펄스 응답을 정의한다. 그림 2에서와 같이 음원 및 청자의 위치가 변하는 경우에는 매번 임펄스 응답을 구해야 되므로, 소리를 녹음함으로써 임펄스 응답을 구하는 방법은 불가능 하다. 본 논문에서는 그림 2의 가상공간인 ‘공간 A’의 거리감과 공간감을 이용하여 실시간으로 임펄스 응답을 모델링하는 방법을 제안한다.

또한 임펄스 응답을 구하기 위해서는 ‘공간 A’의 재질 정보가 필요하며, 이 정보를 전달하기 위한 별도의 형식이 필요하다. 본 논문에서는 3차원 공간이 저장 가능한 미국 오토데스크(Autodesk) 사의 DXF (Drawing eXchange Format)를 개선하는 방법을 제안한다.

입체음향 효과를 보이기 위해서는 멀티채널 오디오를 사용해야 되므로, 본 논문에서는 멀티채널 오디오를 위한 사운드 패닝 기법을 제안한다.

본 논문에서는 4채널 오디오 출력을 이용해서 가상환경의 음원이 실제 공간에 존재하는 것처럼 재생하는 방법을 기술하고 구성은 다음과 같다. 2장에서는 잔향 임펄스 응답을 이용해서 공간감을 구현 방법을 제안하고, 3장에서는 사운드 잔향의 가장 중요한 요소인 재질 특성을 고려한 확장된 표준 파일 포맷인 Enhanced DXF (EDXF)를 제안한다. 4장에서는 임펄스 음원과 청자의 거리에 따라 감을 조절하였으며, 4채널에 균일 파워 패닝 기법을 사용해서 방향감을 구현하였다. 5장에서는 제안한 방법들을 소프트웨어로 구현한 결과를 보여주고 6장에서는 결론을 맺는다.

II. 임펄스 응답

1. 임펄스 응답 개요

실생활 속에서 우리가 듣는 소리는 벽, 천정, 바닥, 공기 등에 의해 흡수, 반사되어 우리의 귀에 도달하게 된다. 이때 공간의 형태 및 벽면 재질의 흡음률 등에 따라 전파되는 소리는 공간정보를 반영한 왜곡 특성을 보이게 되며, 이를 통해 청취자는 거리감과 공간감을 지각하게 된다⁷⁾. 공간에서 소리가 발생하면 소리가 직접 청자에게 들리기도 하지만 물체나 벽면에 부딪쳐서 청자에게 들리는 소리까지 더해지게 된다. 그래서 밀폐된 공간에서의 소리는 직접음(direct sound)과 초기반사음(early reflection), 잔향(reverberation)에 해당하는 소리의 합성으로 생각할 수 있다⁸⁾. 따라서 소리의 울림 정도를 나타내는 임펄스 응답은 그림 3과 같이 직접음, 초기반사음, 잔향으로 구성된다⁹⁾. 그림 4는 임펄스 응답의 예이다.

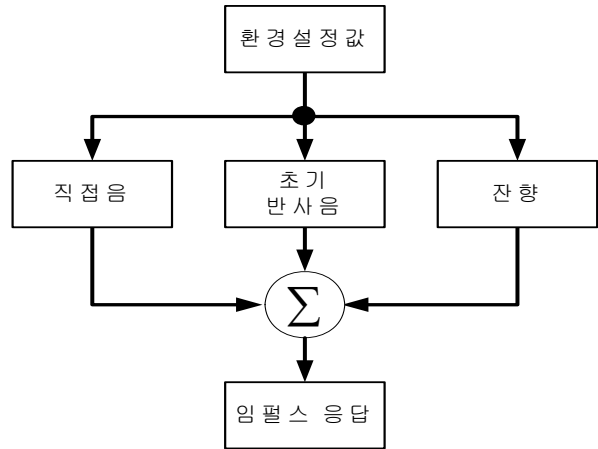


그림 3. 임펄스 응답 구성도
Fig. 3. Impulse response block diagram

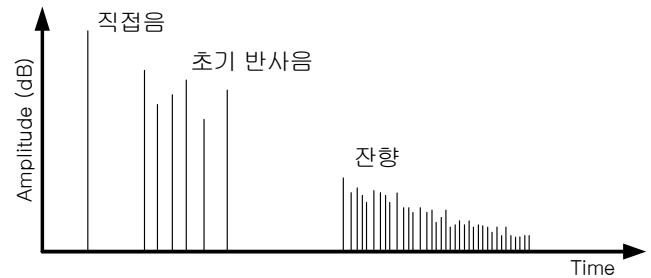


그림 4. 임펄스 응답 예제
Fig. 4. Impulse response example

가상환경을 구현하기 위해 공간에서의 잔향 모델을 계산한다. 직접음과 초기 반사음, 잔향에 대한 각각의 임펄스 응답을 구해서 시간축 상에서 합성하여 전체의 임펄스 응답을 구한다. 이렇게 구한 임펄스 응답을 저장하였다가 실시간으로 소리 파형에 컨벌루션을 해주면 공간에서 발생하는 소리의 잔향을 얻을 수 있다.

공간에서의 임펄스 응답을 구하기 위해서는 직육면체 공간의 크기와 각 벽면의 재질 특성, 임펄스의 발생위치(음원) 및 임펄스의 녹음위치(청자) 정보가 필요하다. 또한 잔향부분을 생성해주기 위해서는 잔향 시작시간과 잔향 조밀도가 필요하다. 즉, 필요한 가상공간의 정보는 음원의 위치, 청자의 위치, 공간의 크기, 좌측면, 우측면, 전면, 후면, 천장, 바닥의 흡음률과 잔향 시작시간과 조밀도가 된다.

2. 직접음

소리가 발생하면 약간의 지연 시간을 두고 사람이 소리를 듣게 되는데, 가장 먼저 듣게 되는 소리는 가장 짧은 거리를 통해 날아온 소리이다. 그림 5에서 보듯이, 이때 가장 짧은 거리를 직선 경로(direct path)라고 하고 직선 경로를 날아온 소리를 직접음이라고 한다. 직접음 계산 부분은 그림 6과 같다.

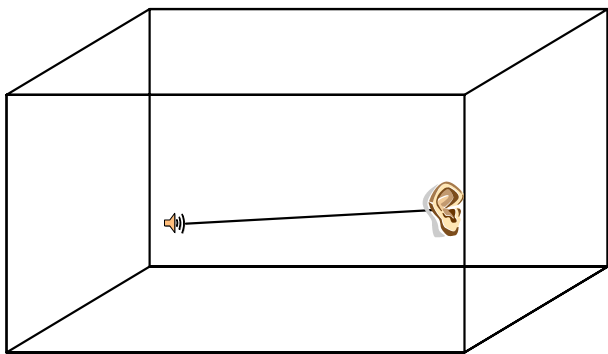


그림 5. 임펄스 응답의 직접음 예제
Fig. 5. Direct sound example in impulse response

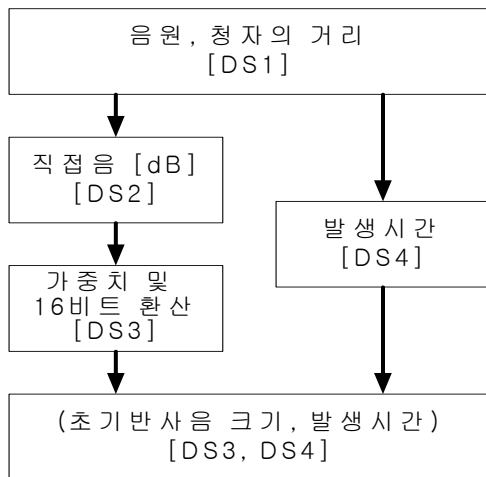


그림 6. 임펄스 응답의 직접음 계산
Fig. 6. Direct sound calculation in impulse response

환경 설정값에서 음원과 청자의 위치를 입력 받아서 음원과 청자의 거리(DS1)를 식 (1)과 같이 계산한다.

$$DS1 = \| \text{음원의 위치벡터} - \text{청자의 위치벡터} \| \text{ [meter]} \quad (1)$$

음원과 청자의 거리(DS1)를 식 (2)을 통해서 dB값으로 환산해 준다.

$$DS2 = 20 \times \log_{10}(DS1) \text{ [dB]} \quad (2)$$

dB값(DS2)에 가중치를 부여하고, 식 (3)과 같이 이 값을 16비트 데이터 값으로 변환해 준다.

$$DS3 = \int (3 \times 10^{\frac{DS2}{-20}} \times 2^{16}) \text{ [Amplitude]} \quad (3)$$

음원과 청자의 거리에서 구한 값(DS1)을 식 (4)을 통해서 발생시간(DS4)을 구해준다. 상수 2.9069는 거리에 따른 시간을 계산하기 위한 상온에서의 소리의 속도 344m/s의 역수이다.

$$DS4 = DS1 \times 2.9069 \text{ [msec]} \quad (4)$$

3. 초기 반사음

직접음이 들린 후에 벽이나 천장, 바닥에 부딪치고 도달한 소리를 초기 반사음이라고 하며 그림 7과 같다. 음원이나 청자가 이동하면 초기 반사음도 변하게 된다. 소리가 물

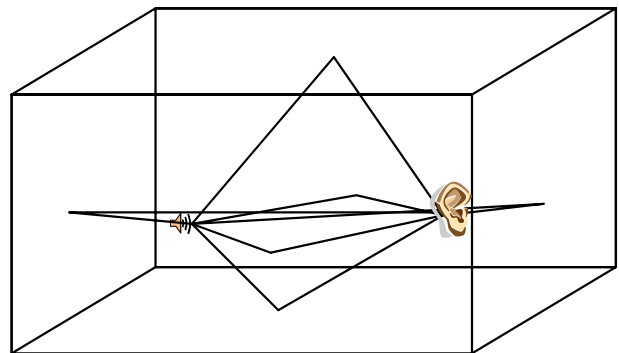


그림 7. 임펄스 응답의 초기 반사음 예제
Figure 7. Early reflection example in impulse response

체에 부딪치고 반사되어 청자까지 도달하는 거리는 '피타고라스의 정리'를 이용하여 구해진다. 소리의 강도와 지연 시간은 직접음을 계산할 때와 마찬가지로 도달거리를 이용하여 구한다. 이때, 소리는 물체에 부딪치면 물체의 흡음률에 따라 에너지가 흡수되어 약해지게 되므로, 초기 반사음의 소리 강도는 흡음률을 고려해서 계산해야 한다. 초기 반사음 계산은 그림 8과 같다.

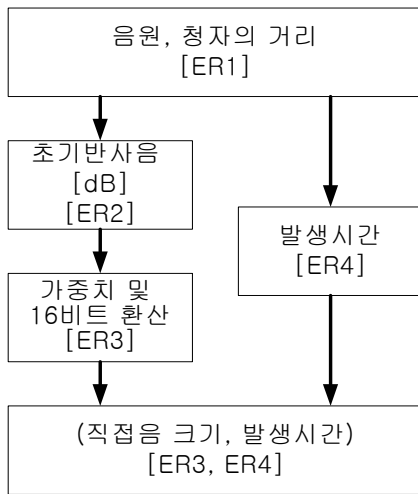


그림 8. 임펄스 응답의 초기 반사음 계산
Fig. 8. Early reflection calculation in impulse response

환경설정 값에서 음원과 청자의 위치와 방의 크기를 입력받아서 음원과 청자의 거리를 식 (5)와 같이 계산한다. 이때, $ER_i, 1, (i = 1 \sim 6)$ 은 각각 좌측면, 우측면, 천장, 바닥, 전면, 후면을 가리킨다.

$$ER1 = [ER_{11}, ER_{21}, ER_{31}, ER_{41}, ER_{51}, ER_{61}]^T \text{ [meter]}$$

$$ER_{i, 1} = \| \text{음원의 위치벡터} - \text{벽면의 반사점} \| + \| \text{벽면의 반사점} - \text{청자의 위치벡터} \| \quad (5)$$

음원과 청자의 거리($ER1$)를 식 (6)을 통해서 dB값으로 환산해 준다. 이때, $\alpha_i (i = 1 \sim 6)$ 는 각각 좌측면, 우측면, 천장, 바닥, 전면, 후면의 흡음률을 나타낸다.

$$ER2 = 20 \times \log_{10}(ER1) - 10 \times \log_{10}(1 - \alpha_i) \text{ [dB]} \quad (6)$$

dB값($ER2$)에 가중치를 부여하고, 식(7)과 같이 이 값을 16비트 데이터 값으로 변환해 준다.

$$ER3 = \int (10^{\frac{ER2}{-20}} \times 2^{16}) \text{ [Amplitude]} \quad (7)$$

음원과 청자의 거리에서 구한 값($ER1$)과 직접음 발생시간 값($DS4$)을 이용하여 식 (8)과 같이 발생시간을 구해준다. 상수 2.9069는 거리에 따른 시간을 계산하기 위한 상온에서의 소리의 속도 344m/s의 역수이다.

$$ERA = ER1 \times 2.9069 - DS4 \text{ [msec]} \quad (8)$$

4. 잔향

시간이 지나면서 소리는 각 벽면에 반복해서 부딪치게 되어 청자에게 도달하므로 소리가 감쇄되고 경로는 늘어나게 된다. 그림 9와 같이 직접음과 초기 반사음에 이어서 모든 방향에서 들리는 작은 소리를 잔향이라고 한다. 잔향은 청자의 거리에 영향을 받는 직접음이나 초기 반사음과는 다르게 작용한다. 사운드 파형은 공간의 다양한 면에 반사되면서 진행되기 때문에, 공간의 한 위치에서는 다른 도착 시간, 방향 및 진폭을 가지는 사운드 파형이 합쳐짐으로써 잔향이 구해진다. 안정적인 사운드 레벨에서는 공간에서의 위치에 따른 사운드의 양은 일정하다고 볼 수 있기 때문

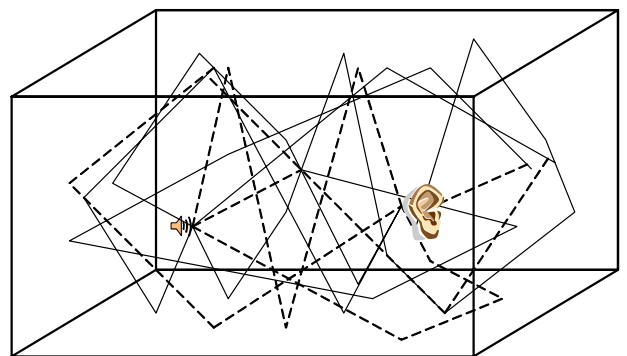


그림 9. 임펄스 응답에서의 잔향
Fig. 9. Reverberation example in impulse response

에 청자의 위치 변화에 상관없이 잔향의 양은 일정하다고 모델링이 가능하다^[8]. 잔향 계산은 그림 10과 같이 구한다.

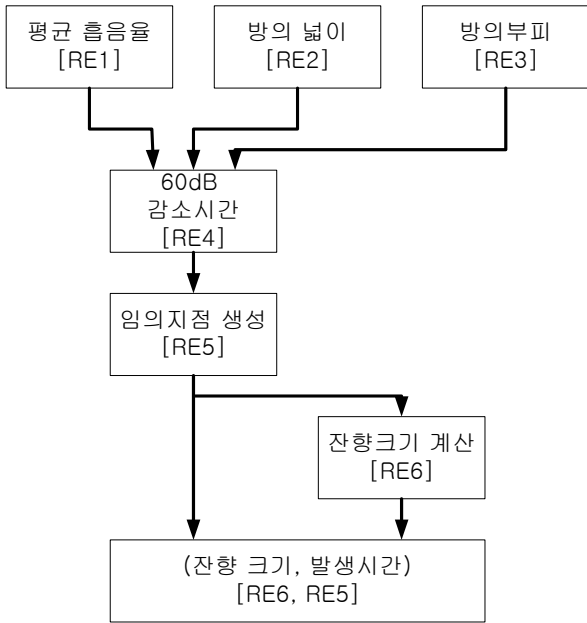


그림 10. 임펄스 응답의 잔향 계산
Fig. 10. Reverberation calculation in impulse response

좌측면, 우측면, 천장, 바닥, 전면, 후면의 흡음률을 평균하여 식 (9)와 같이 평균 흡음률($RE1$)을 구한다.

$$RE1 = \frac{W1 + W2 + W3 + W4 + W5 + W6}{6} \quad (9)$$

where, $W1 \sim W6$: 6면의 흡음률

방의 크기 정보를 이용하여 겹넓이($RE2$)를 식 (10)과 같이 구한다.

$$RE2 = (RL \times RW) \times 2 + (RL \times RH) \times 2 + (RW \times RH) \times 2 [\text{meter}^2]$$

where, RL : 방의 가로 길이 [meter] (10)
 RW : 방의 세로 길이 [meter]
 RH : 방의 높이 [meter]

방의 크기 정보를 이용하여 부피($RE3$)를 식 (11)과 같이

구한다.

$$RE3 = RL \times RW \times RH [\text{meter}^3]$$

where, RL : 방의 가로 길이 [meter] (11)
 RW : 방의 세로 길이 [meter]
 RH : 방의 높이 [meter]

평균흡음률($RE1$), 도 4의 “방의 겹넓이”에서 나온 겹넓이($RE2$), 방의부피($RE3$)를 이용하여 60dB 감소되는 시간이 잔향시간($RE4$)을 식 (12)와 같이 구한다^[8].

$$RE4 = \left(\frac{4 \times RE3}{RE2 \times 344} \right) \frac{\ln(10^{-6})}{RE2 \times \ln(1 - RE1)} [\text{msec}]$$

$$= \frac{-0.161 \times RE3}{RE2 \times \ln(1 - RE1)}$$
 (12)

잔향 시작 시간 [msec], 잔향 조밀도 [sample]를 입력 받아서 잔향부분을 구성한다. 임의의 시작 시간($RE5$)은 잔향 시작 시간 이후, 식 (13)과 같이 잔향시간($RE4$)사이에서 잔향 조밀도 만큼의 개수를 랜덤(random)함수를 이용하여 발생시킨다.

$$RE5 = (\text{잔향시작시간} - RE4) * \text{Random}(1) + \text{잔향시작시간} [\text{msec}] \quad (13)$$

잔향의 크기 계산은 평균흡음률($RE1$), 방의 겹넓이($RE2$), 도 4의 방의 부피($RE3$), 임의의 지점 생성($RE5$)을 이용하여 잔향의 크기($RE6$)를 식 (14)와 같이 구한다.

$$RE6 = \int (0.4 \times \left(\frac{\sqrt{a^b}}{t+100} \right) \times 2^{16}) [\text{Amplitude}]$$

where, $a = 1 - RE1$ (14)
 $b = RE5 \times \left(\frac{RE2 \times 344}{4 \times RE3} \right) \times \frac{1}{1000}$

직접음, 초기 반사음, 잔향을 구하면 최종 임펄스 응답 IR 은 식 (15)와 같고 그 예제는 그림 4와 같다.

$$IR(t) = DS3u[t - DS4] + \sum_{i=1}^6 ER3_i u[t - ERA] + RE6 \times u[t - RE5] \quad (15)$$

III. DXF 파일 포맷 형식

1. DXF 파일 형식 개요

1982년 캐드(CAD) 1.0버전 이후 DXF (Drawing eXchange Format, 데이터 교환 형식)는 업데이트되고 발전되었다. DXF는 미국 오토데스크(Autodesk)사에서 개발, 보급된 ASCII 및 바이너리(binary) 파일 형식으로서 IGES (Initial Graphics Exchange Specification)과 더불어 가장 널리 쓰이는 중립파일형식(neutral file format)중의 하나이다. 캐드 파일은 *.dwg는 압축 형식으로 기록이 되어있기 때문에 사용자들은 이를 직접 읽어오도록 하기 위한 프로그램을 작성하는 것은 비효율적이다. 그래서 오토캐드(AutoCAD)는 다른 프로그램사이에 도면을 주고받을 수 있도록 도와주는 dxf파일이 정의되어 사용한다. 이는 설계된 도면을 유한요소분석프로그램과 같은 강력한 컴퓨터로 응력과 변위, 속도, 파손정도 등등을 계산할 때 필요하다. 또한 제어머신을 사용할 경우에도 많이 이용되고 있다¹⁰⁾.

DXF파일은 ASCII 텍스트 파일이다. 이 형식은 타 기종의 컴퓨터에서 수행되는 Autodesk 사이에서, 또는 오토캐드와 다른 CAD/CAM 시스템 사이에서의 도면 정보를 쉽게 변환하여 처리할 수 있다. 전체 DXF파일은 블록정의, 선 종류, 도면층 정보, 문자유형, 치수유형, 좌표계 등등 모든 도면요소를 완전히 보존한다. 오토캐드에서는 이진 파일형식 ACIS솔리드, 사용자 객체 등의 DXF파일을 제공한다.

2. DXF 파일 구조

DXF 파일 형식은 다수의 그룹(group)으로 구성되며, 각 그룹은 그룹코드(group code)와 그룹 값(group value)의 2 줄로 구성된다. DXF 파일은 HEADER, CLASSES, TABLES, BLOCKS, ENTITIES, OBJECTS 등 모두 6개의 섹션 및 EOF(파일 끝 표시)로 구성된다. 엔터티(Entity)란 오토캐드에서 처리되는 최소 입력 단위로 선(LINE), 원(CIRCLE), 호(ARC), 레이어(LAYER), 블록(BLOCK), 폴리라인(POLYLINE) 등을 말한다.

3. 제안하는 EDXF 파일 구조

제안하는 Enhanced DXF (EDXF) 파일 형식은 기본 구조는 DXF를 상속받아서 사용한다. EDXF 파일은 DXF 파일의 기본의 데이터 교환 형식에서 건축물의 재질 정보가 추가되었다. 즉, EDXF 파일을 불러와서 사용하는 모든 어플리케이션은 DXF 파일을 불러올 수 있다. 단, DXF 파일만 사용하던 기존의 어플리케이션에서는 EDXF 파일을 사용할 수 없다. EDXF 파일 구조는 DXF 파일 구조와 같이 HEADER, CLASSES, TABLES, BLOCKS, ENTITIES, OBJECT Section으로 구성된다. DXF 파일 구조의 ENTITIES Section에 MATERIAL 항목을 추가하였고, MATERIAL 엔터티를 위한 그룹코드는 표 1과 같다.

표 1. EDXF의 MATERIAL 그룹코드

Table 1. MATERIAL group code of EDXF

Group codes	Description
0	Entity type
5	Handle
100	Subclass marker (AcDbMaterial)
10	X value of first corner
20	Y value of first corner
30	Z value of first corner
11	X value of second corner
21	Y value of second corner
31	Z value of second corner
12	X value of third corner
22	Y value of third corner
32	Z value of third corner
13	X value of fourth corner
23	Y value of fourth corner
33	Z value of fourth corner
70	Number of parameters for this element
40	Value of absorption

IV. 입체음향용 멀티채널 사운드 패닝

1. 사운드 패닝 개요

가상환경에서 음원의 위치가 변하는 경우, 입체음향으로 구현하면 음원의 발원지가 이동하는 것과 같고 이렇게 소리가 이동하는 것을 패닝이라 한다. 패닝 기법 중에서 선형 패닝(linear panning)은 스피커간의 소리를 선형적으로 변

화시키므로 소리의 이동이 부드럽지 못하다. 페닝 효과가 좋으면서도 연산이 복잡하지 않은 균일 파워 페닝(constant power panning)을 사용한다^[11]. 균일 파워 페닝은 각 스피커에서 재생되는 소리의 크기의 파워의 합을 1로 유지하여 소리의 이동을 자연스럽게 이동시킨 것이다. 그림 11과 같이 음원의 위치는 Ch1부터 Ch4까지의 스피커가 위치한 원을 따라 이동하게 되는 것이다. 그림 11의 θ 는 기준선과 음원사이의 각도로 4채널 페닝에 사용된다.

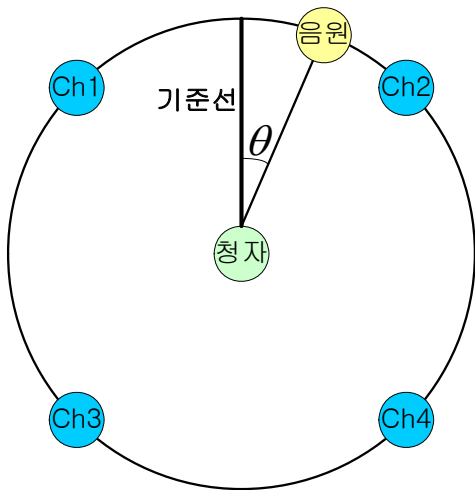


그림 11. 4채널 페닝
Fig. 11. Four channel panning

$$\begin{aligned}
 A_{Ch1} &= \cos\left(\theta + \frac{1}{4}\pi\right) \\
 A_{Ch2} &= \cos\left(\theta - \frac{1}{4}\pi\right) \\
 A_{Ch3} &= \cos\left(\theta + \frac{3}{4}\pi\right) \\
 A_{Ch4} &= \cos\left(\theta - \frac{3}{4}\pi\right) \\
 Amp_{Chi} &= \begin{cases} A_{Chi} & \text{if } (A_{Chi} > 0) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, 4
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

$Amp_{Chi} (i=1,2,3,4)$ 는 식 (16)을 통해서 구한다. 이렇게 구한 Amp_{Chi} 는 식 (17)에서 균일한 파워를 유지하는 것을 볼 수 있다.

$$Amp_{Ch1}^2 + Amp_{Ch2}^2 + Amp_{Ch3}^2 + Amp_{Ch4}^2 = 1
 \tag{17}$$

2. 사운드 페닝 구현

그림 12와 같은 입체음향 구현 블록 다이어그램에서 받는 데이터는 '환경설정 값'과 '음원데이터'를 받아서 데이터를 처리한 후에 ch1부터 ch4까지 4개의 스피커로 음원데이터

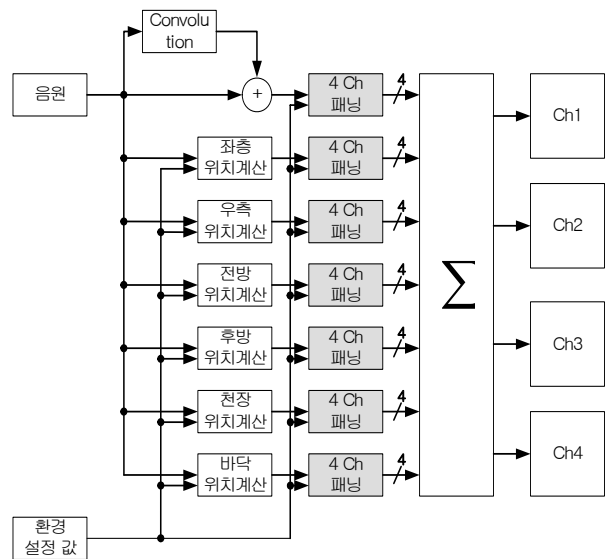


그림 12. 3차원 입체음향 구현 구성도
Fig. 12. 3D sound effect implementation block diagram

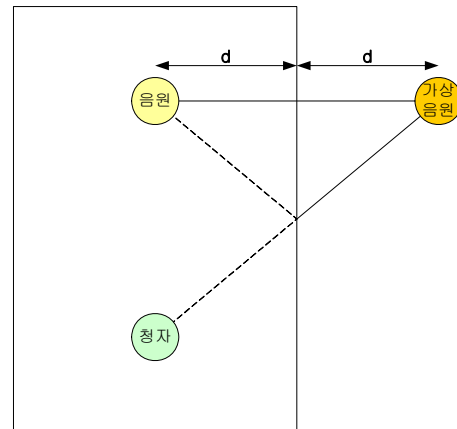


그림 13. 우측 위치 예제
Fig. 13. right position example

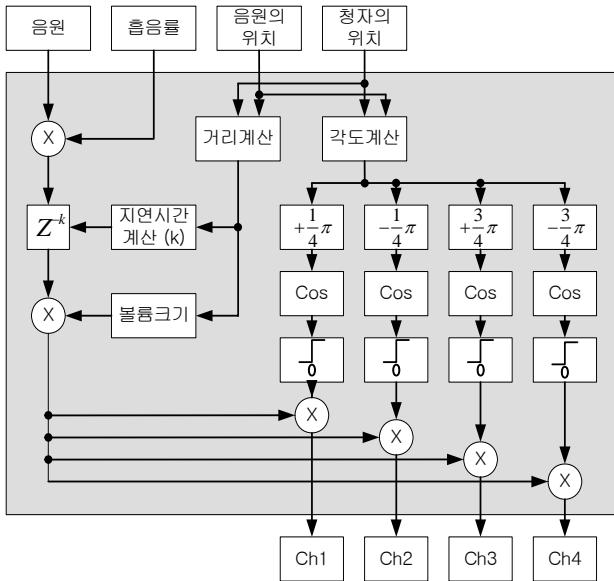


그림 14. 4채널 패닝 구성도
Fig. 14. Four channel panning block diagram

터를 내보낸다. 그림 12의 ‘위치계산’에서 초기 반사음을 계산한다. 그림 13은 우측 위치를 계산 부분으로 우측 초기 반사음을 구하기 위해서 음원을 우측의 가상음원을 만든

예를 보인다.

그림 14의 4채널 패닝은 그림 12를 세부적으로 살펴본 구성도이다. ‘흡음률’은 각 면의 재질마다 다른 값으로 설정가능하고, 흡음률에 따라 음원의 볼륨 크기가 결정된다. 음원과 청자의 위치로 거리와 각도를 계산한다. 각도는 균일 파워 패닝에 사용하고, 거리는 음원 데이터의 지연시간과 볼륨 크기를 계산하는데 사용된다.

V. 시뮬레이션 결과

1. 임펄스 응답 계산 소프트웨어

음원이 발생하는 공간의 크기와 공간을 구성하는 물질의 재질정보에 따른 효과적인 입체음향의 구현을 위해서 소프트웨어는 몇 개의 사용자 입력 그룹을 포함한다. 각 그룹은 독립적으로 입력되며, 각 그룹의 사용자 파라미터는 생성되는 임펄스 응답에 영향을 미친다. 그림 15는 임펄스 응답 계산 소프트웨어를 실행한 후, 임펄스 응답을 추출해 낸 실행화면이다.

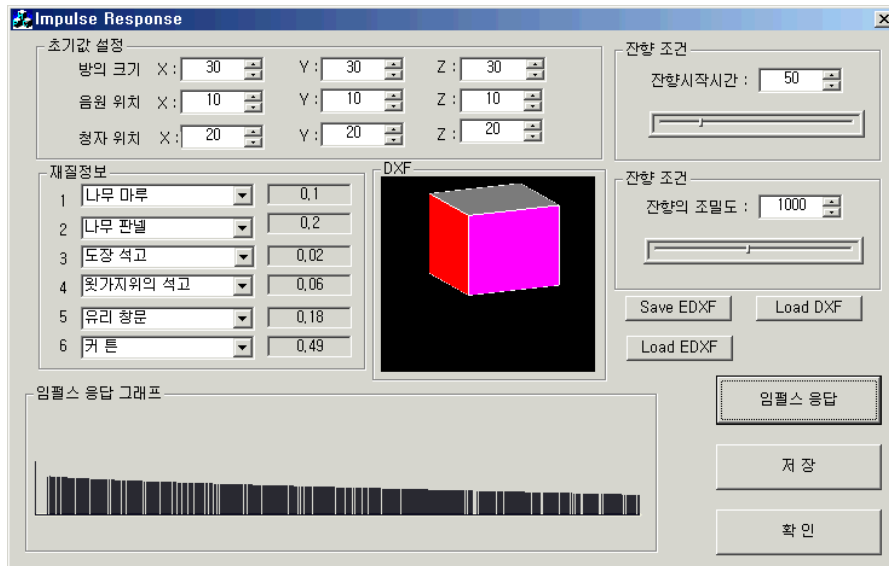


그림 15. 임펄스 응답 계산 소프트웨어
Fig. 15. Impulse response calculation software

‘초기값 설정’ 그룹은 가상공간의 방의 크기, 음원 및 청자 위치 정보를 나타낸다. 이 소프트웨어에서는 가상환경을 DXF 파일을 통해서 읽어 들이고, ‘재질정보’ 그룹을 설정한 후에 EDXF로 가상환경 정보를 저장한다. 재질정보는 표 2와 같이 8가지가 선택가능하며 [8] 추가로 입력가능하다. 1~6번은 직육면체의 각 면에 해당되며, 각각의 위치는 DXF 파일의 가상환경의 각 면과 같다.

표 2 벽면 재질별 흡음률
Table 2. wall type acoustic absorptivity

재질 (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
석고천장	0.14	0.10	0.06	0.05	0.04	0.03
콘크리트 바닥의 카펫트	0.02	0.06	0.14	0.37	0.6	0.65
나무 마루	0.15	0.11	0.1	0.07	0.06	0.07
페인트칠된 석고	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
석고 보드 벽	0.29	0.10	0.05	0.04	0.07	0.09
유리창문	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04
나무판자	0.30	0.25	0.2	0.17	0.15	0.10
커튼	0.07	0.31	0.49	0.81	0.66	0.54

‘잔향 조건’에서 ‘잔향음 시작시간’은 임펄스 응답의 형태에 상당한 영향을 미치므로, ‘10~200[msec]’ 범위 내에서 적절히 선택한다. ‘잔향의 조밀도’는 잔향의 시작시간으로부터 잔향이 끝나는 시간까지의 임펄스 응답 내에 포함되는 샘플의 수를 의미한다. 이 역시 임펄스 응답에 상당한 영향을 끼치므로 ‘100~2000 [sample]’의 범위 내에서 적절히 선택한다. 일반적으로 잔향의 조밀도가 높을수록 보다 효과적인 입체음향의 구현이 가능하나, 임펄스 응답의 생성, 또는 다른 어플리케이션으로 적용시 계산량이 증가한다. 따라서 복잡도를 고려하여 적절한 조밀도를 선택하는 것이 바람직하다.

‘임펄스 응답 그래프’ 그룹은 계산된 임펄스 응답을 개략적으로 보여준다. 이 임펄스 응답은 16bit mono 웨이브 형식으로 저장가능하며, 이는 독일 스타인버그(Steinberg)사의 Cubase SX와 같은 음악편집 소프트웨어에서도 활용가능하다^[12].

2. 멀티채널 오디오를 이용한 입체음향 소프트웨어

이 소프트웨어는 음원 파일을 읽어 들여 2개 혹은 4개의

채널을 가진 디바이스를 통해 청자와 음원의 위치를 고려한 음장을 만들어내는 기능을 한다^[13]. 소프트웨어가 실행되기 위해서는 4채널 이상 지원되는 사운드카드가 필요하며, 사운드 카드를 지원하기 위한 ASIO 드라이버가 필요하다. 소프트웨어를 시뮬레이션 할 때는 Digiasio 5. 3. 3b ASIO 드라이버를 사용하였으며, EMI 2/6 사운드 카드를 사용하였다^[14]. 실행화면은 그림 16과 같다.

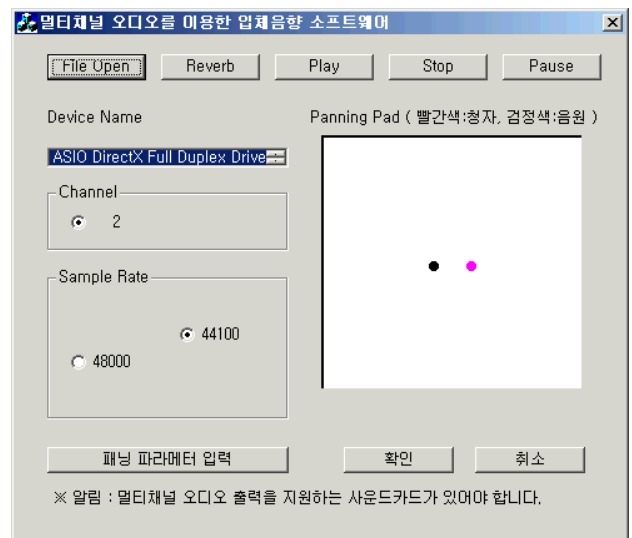


그림 16. 멀티채널 오디오를 이용한 3차원 입체음향 소프트웨어
Fig. 16. 3D sound effect software using multichannel audio

패닝 연산 시 2개의 파라미터가 필요하다. 첫 번째로 ‘PixelInOneMeter’은 1미터 당 픽셀값으로 청자와 음원의 위치를 실제 공간 크기에 맞추기 위한 스케일링 팩터(scaling factor)이다. 두 번째로 ‘min.dist.InMeters’는 청자와 음원의 위치가 일치할 경우를 방지하기 위한 음원과 청자의 거리의 최소값이다. 패닝은 기본적으로 거리에 소리의 크기가 비례하므로 청자와 음원의 위치가 같을 경우 소리의 크기는 무한대가 되므로 이를 방지하기 위해서 이 값을 이용한다.

임펄스 응답 소프트웨어를 통해서 구한 임펄스 응답을 그림 16의 ‘Reverb’를 통해 가상공간에서의 3차원 입체음향 효과를 입력함으로써 가상환경에서의 입체음향을 구현하였다. 실험은 음원과 청자의 위치를 실시간으로 변화시

키면서, 그에 따른 입체음향을 구현하였고 다수의 청취자를 대상으로 시연하여 입체음향 효과를 보였다. 스테레오로 재구성된 입체음향은 실제 공간에서 재현할 때, 좌측과 우측에서만 재현시키므로 실제 음향효과와는 다르다. 멀티채널로 4채널을 사용해서 음원을 재현시키므로 가상공간의 음원을 실제 공간에 유사하게 입체음향으로 재현시키는 효과가 있다. 오디오 출력으로 4채널이 아닌 6채널이나 8채널을 사용하면, 좀 더 현실감 있는 입체음향 효과가 구현 가능하다.

VI. 결 론

본 논문에서는 음원과 청자의 위치를 실시간으로 변화시키면서 그에 따른 입체음향을 구현하였다. 입체음향을 구현하기 위해서 임펄스 응답을 구하는 방법과 가상정보를 저장하기 위한 EDXF 형식을 제안하였고, 본 논문의 5장 1절의 '임펄스 응답 계산 소프트웨어'를 통해 그 결과를 보였다. 멀티채널로 4채널을 사용하여 음원을 재현시키는 방법을 제안하였고, 본 논문의 5장 2절의 '멀티채널 오디오를 이용한 입체음향 소프트웨어'를 통해 가상공간의 음원이 실제 공간에서 입체음향으로 재생되는 시스템을 구현하였다.

가상환경에서 음원의 재생을 실제 공간에서 실시간 재생하는 새로운 시스템을 개발하였기때문에 다른 시스템과 정량적으로 비교를 하는 데에는 한계가 있다는 문제점을 가지고 있다. 공학 부분에서는 기존에 이와 관련된 시스템이 없어서 비교하기 어렵고, 컴퓨터 음악 분야에서는 시스템 개발하는 것 자체를 하나의 성과로 보고 있다. 소리의 경우 영상처럼 객관적 화질(예를 들어 PSNR)이나 주관적 화질을 평가하는 것과 다르게 논문에 표기하는 것이 어렵기 때문에, 다수의 청취자들 앞에서 시연을 통하여 입체음향 효과를 보였다. 컴퓨터 음악 관련 음악가 10명, 전자공학 관련 연구원 20명을 대상으로 시연을 하였으며, 임펄스 응

답은 재질에 따라 소리의 울림이 달라지는 것을 인지하여 가상환경을 체감하였다. 또한 음원의 위치를 변화시킴에 따라 음원의 위치를 인식함으로써 입체음향을 인지하였다.

본 논문의 목표는 가상환경의 음원을 실제 공간에서 실시간에서 재생하는 것이었고, 다른 컴퓨터 음악 분야의 논문들과 마찬가지로 실제 재생되는 소리를 들음으로써 입체음향 효과를 입증했다. 차후에는 가상공간을 단순히 직육면체가 아닌 복잡한 공간의 임펄스 응답을 모델링하고 4채널 이상의 멀티채널로 입체음향을 구현하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] 동아프라이ム 편집부, 원색세계백과사전, 동아프라이ム, 대한민국, 1990.
- [2] 日本音響學會, 音響用語辭典, Tokyo, Corona Publishing Co. Ltd., 일본, 1994.
- [3] 김용원, 명현, 정혁, 김기호, "3D Sound 기술", 한국정보과학회지, 제 19권, 제5호, pp. 30~37, 2001년 5월.
- [4] D. J. Kistler and F. L. Wightman, "A model of head related transfer functions based on principal components analysis and minimum phase reconstruction," J. Acoust. Soc. Am., vol. 91, no. 3, pp. 1637-1647, March 1992.
- [5] R. H. Torchia and C. Lippe, "Techniques for Multi-Channel Real-Time Spatial Distribution Using Frequency-Domain Processing," in Proc. of Int. Computer Music Conf. 2003 (ICMC 2003), pp. 41-44, Singapore, 29 Sep.-4 Oct. 2003.
- [6] L. Wyse, "A Sound Modeling and Synthesis System Designed for Maximum Usability," in Proc. of Int. Computer Music Conf. 2003 (ICMC 2003), pp. 447-451, Singapore, 29 Sep.-4 Oct. 2003.
- [7] Durand R. Begault, 3-D sound for virtual reality and multimedia, Academic Press, USA, 1994
- [8] David M. Howard and James Angus, Acoustic and Psychoacoustics, Focal Press, USA, 1996
- [9] 정재철, 김동형, 정제창, "재질특성을 고려한 효과적인 잔향 모델의 구현", 제16회 신호처리 합동 학술 대회 논문집, vol 16, No.1, 2003
- [10] Autodesk, DXF Reference 2004, Autodesk, USA, 2003.
- [11] Curtis Roads, The Computer Music Tutorial, MIT Press, USA, 1996
- [12] Steinberg, <http://www.steinberg.net/>
- [13] 양시영, 이돈용, 정제창, "가상환경에서의 4채널 오디오 출력을 이용한 실시간 입체음향 구현", 2003년도 한국방송공학회 정기총회 및 학술대회 논문집, pp.237-240, 한국방송공학회, 2003년 11월 15일
- [14] Port Audio, <http://www.portaudio.com>

저 자 소 개



양 시 영

- 2001년 2월 : 한양대학교 전자전기공학부 졸업 (공학사)
- 2003년 2월 : 한양대학교 전자통신전파공학과 졸업 (공학석사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 전자통신전파공학과 박사과정
- 주관심분야 : 영상처리 및 영상압축



김 동 형

- 1999년 2월 : 충북대학교 전자공학과 (공학사)
- 2001년 8월 : 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2007년 2월 : 한양대학교 전자통신전파공학과 (공학박사)
- 2007년 8월 : 한양대학교 BK21 Post Doc.
- 2008년 8월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2008년 8월 ~ 현재 : 한라대학교 정보통신방송공학부 전임강사
- 주관심분야 : 영상처리 및 영상압축



정 제 창

- 1980년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1982년 2월 : KAIST 전기전자공학과 졸업 (공학석사)
- 1990년 3월 : 미국 Univ. of Michigan 전기공학과 졸업 (공학박사)
- 1982년 2월 ~ 1986년 7월 : KBS 기술연구소 연구원 (디지털 TV 및 뉴미디어 연구)
- 1990년 8월 ~ 1991년 1월 : 미국 Univ. of Michigan 전기공학과 연구교수
- 1991년 1월 ~ 1995년 2월 : 삼성전자 멀티미디어 연구소 (MPEG, HDTV 및 멀티미디어 연구)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수 (영상통신 및 신호처리 연구실)
- 1998년 : 과학기술자상 수상.
- 1998년 : 정보통신부장관상 표창.
- 주관심분야 : 영상처리 및 영상압축