

가상현실을 위한 스테레오 스피커 기반 3차원 입체음향 재생 시스템 구현

김 용 국, 이 영 한, 김 홍 국
광주과학기술원 정보기전공학부

An Implementation of a 3D Audio Production System Using Stereo Loudspeakers for Virtual Reality

Yongguk Kim, Young Han Lee, Hong Kook Kim

School of Information and Mechatronics
Gwangju Institute of Science and Technology
E-mail : {bestkyg, cpumaker, hongkook}@gist.ac.kr

Abstract

In this paper, we first implement an audio playback system for virtual reality by providing 3D audio effects to listeners. In general, such a 3D audio playback system utilizes a sound localization technique using head related transfer function (HRTF) to generate 3D audio effect. However, the 3D audio effect is degraded due to the crosstalk in the stereo loudspeaker environment. To enhance the 3D sound effect, we implement the crosstalk cancellation technique proposed by Atal and Schroeder and apply it to the 3D audio system.

I. 서론

최근 멀티미디어 기술의 발달과 더불어 가상현실감을 느낄 수 있도록 하는 많은 연구가 진행되고 있다. 기존에 입체영상 및 가상현실에 대한 연구와 함께 활발히 연구되고 있는 3차원 입체음향 기술은 개발자가 일반 음향에 공간정보를 담아 사용자가 그 음원으로부터 방향감과 거리감을 느낄 수 있도록 하는 기술이다. 이러한 3차원 입체음향의 생성을 위해서는 머리전달함수(HRTF; Head Related Transfer Function)를 통한 음상정위 기술이 필수적이다. 생성한 3차원 입체음향을 스테레오 스피커를 통해 재생하는 경우, 각 채널 출력신호가 청취자의 반대측 귀에도 영향을 끼치게 되는 상호간섭(crosstalk) 현상이 발생하게 되고 이는 3

차원 입체효과를 심각하게 감쇄시키는 요인이 된다. 따라서 본 논문에서는 KEMAR HRTF 및 HRTF 모델에 기반하여 3차원 입체음향을 생성하고, 스피커를 통한 음향 재생시 발생하는 상호간섭을 줄이기 위해 상호간섭 제거기를 구현한다. 이를 통해 가상현실에서 보다 충실한 3차원 입체음향 효과를 느낄 수 있도록 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2 장에서는 머리 전달함수에 대해서 기술하고, 제 3 장에서는 Atal-Schroeder에 의해 제안된 상호간섭 제거 기법[1]에 대해 알아본다. 제 4 장에서는 구현한 입체음향 재생시스템에 대해 기술한 뒤 제 5 장에서 입체음향 재생시스템에 적용된 KEMAR HRTF와 HRTF모델의 성능에 대해 분석하고 제 6 장에서 결론을 맺는다.

II. 머리전달함수

HRTF는 음원(sound source)에서 청취자의 고막까지 소리가 전파될 때까지의 음의 전달경로에 의한 단위충격응답(impulse response)으로 정의된다 [2]. 이러한 HRTF는 음원에서 고막까지 경로 상의 머리, 귀, 흉부 등에 의한 모든 반사 및 회절에 대한 효과를 포함하고 있다. 본 절에서는 KEMAR 모델에 근거하여 HRTF를 측정하는 방식과 이를 수학적으로 표현한 HRTF 모델을 다음의 2.1절 및 2.2절에 기술하기로 한다.

2.1 KEMAR HRTF

표 1은 MIT Media Lab에서 1994년에 미국인의 표준 두상을 기준으로 하여 KEMAR dummy head를 이용하여 측정한 HRTF의 사양을 나타낸다 [3]. 표 1에서 보는 바와 같이, 14개의 고도 및 각각의 방향각에 대한 710개 위치에서 측정한 HRTF를 배포하고 있으며, 측정된 HRTF의 단위충격응답 표본화 주파수는 44.1 kHz이며 각각의 HRTF의 필터차수는 512이다.

2.2 HRTF 모델

일반적으로 dummy head를 이용하여 측정한 HRTF로 입체음향 생성 및 상호간섭 제거를 한 경우 특정 사용자가 느끼는 입체음향 정위(Localization) 효과 및 상호간섭 제거효과가 감소될 수밖에 없다 [4]. 따라서 이들 효과를 높이기 위해서 청취자 개개인에 적합한 HRTF를 각각 측정해야 한다. 하지만 이 경우, 측정에 따른 높은 비용 및 실제 측정의 어려움이 있게 된다. 이러한 단점을 극복하기 위해 기존 HRTF를 근거리로 하여 HRTF를 수학적으로 모델링하는 방법을 연구해왔다 [5]-[7]. 이러한 HRTF 모델을 이용하면 방위각, 고도 및 거리를 변수로 가지기 때문에 각각의 경우에 대하여 HRTF를 측정하지 않아도 될 뿐만 아니라 입체음향의 재생 및 상호간섭 제거에 있어 메모리 사용면에서 효율적이라 할 수 있다. 또한 청취자의 신체조건을 변수로 표현하여, 청취자에 따라 적합한 HRTF를 만들 수도 있다.

본 논문에서 사용된 HRTF 모델은 기존의 구조적 HRTF 모델(structural HRTF model)에 거리변화에 따른 모델을 적용한 그림 1과 같은 모델을 사용하였다 [8]. 그림 1에서 보는 것과 같이 제안한 모델은 음의 레벨을 표준화하는 블록(Level Normalization Block)과 원거리 HRTF 모델 블록과 근거리 HRTF 모델 블록으로 나뉜다. 그리고 WAVE 파일 형식의 표현범위의 한계를 고려하여 표현 가능한 거리의 범위는 0.25 m에서 5 m로 제한한다. WAVE 파일 샘플 중 최대값이 4096이 넘을 경우 최대값이 4096이 되도록 전체적으로 음원 신호의 크기를 조절하여준다.

거리 변화에 따른 원거리 HRTF 모델은 기존의 구

표 1. KEMAR HRTF 측정사양

항목	Specification
표본화 주파수	44.1 (kHz)
해상도	16 (bit)
측정 위치수	710 (positions)
FIR 필터 차수	512 (samples)

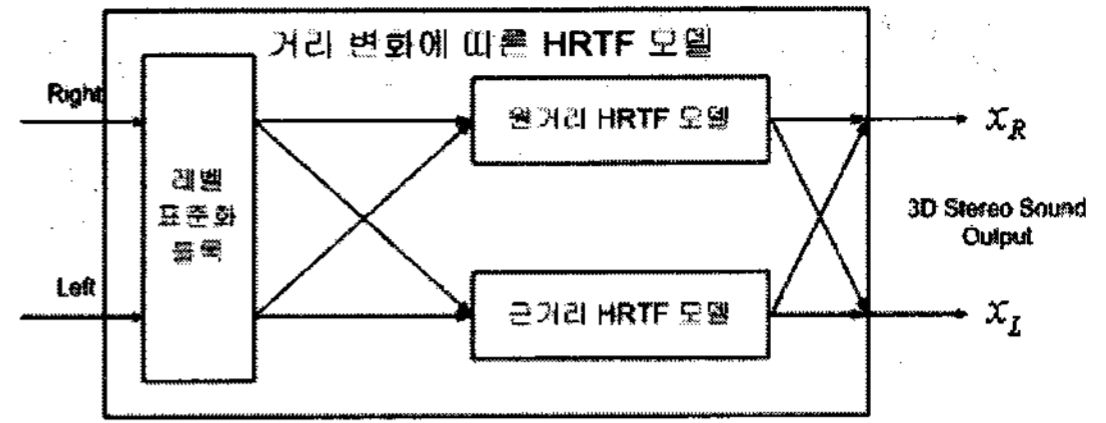


그림 1. 거리변화에 따른 모델의 세부 블록

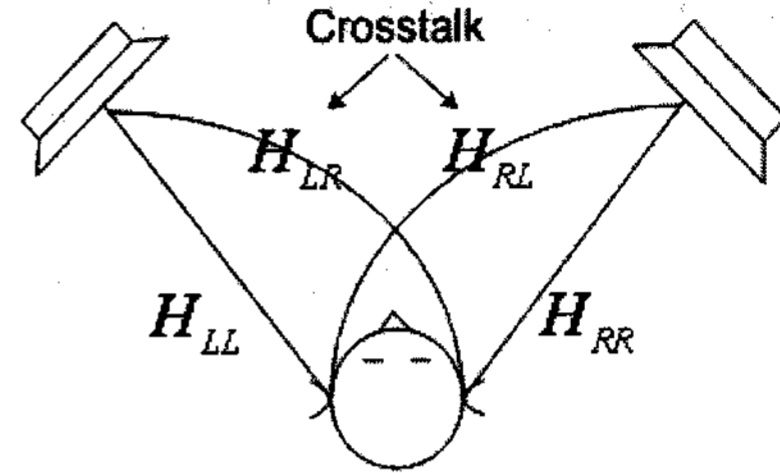


그림 2. 상호간섭 효과

조적 HRTF 모델로 생성된 left/right stereo 사운드에 inverse square law를 적용한다. 이를 위한 사운드 크기는 식 (1)을 통해 얻을 수 있다.

$$\frac{I_m}{I_{ref}} = \left(\frac{d_{ref}}{d_m}\right)^2 \quad (1)$$

여기서 I_m 는 거리에 따른 음의 크기이고, d_m 는 음원과 의 거리, d_{ref} 는 기준 거리인 1 m, I_{ref} 는 레벨 표준화 블록에 의해 표준화된 음의 크기이다.

근거리에서 far ear에 들리는 음의 크기를 효율적으로 구하기 위하여 다음과 같은 수식을 이용하여 모델링 한다.

$$\frac{I_{m, far ear}}{I_{ref}} = \left(\frac{d_m}{d_{ref}}\right) \quad (2)$$

여기서, $I_{m, far ear}$ 는 far ear 음의 크기이다. 또한, 식 (3)은 near ear를 위한 사운드 크기 조절 방식을 나타낸다.

$$\frac{I_{m, near ear}}{I_{ref}} = \left(\frac{d_{ref}}{d_m}\right) \cdot 2^{-\frac{|\text{azimuth}|}{90}} \quad (3)$$

III. 상호간섭 제거

3.1 상호간섭

그림 2는 상호간섭에 대한 개념도를 보여 준다. 여기서 H_{LL} 과 H_{RR} 은 동측 귀로 전파되는 신호를, H_{LR} 과 H_{RL} 은 서로 반대 측 귀로 전파되는 상호간섭을 나타낸다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 머리전달함수를 이

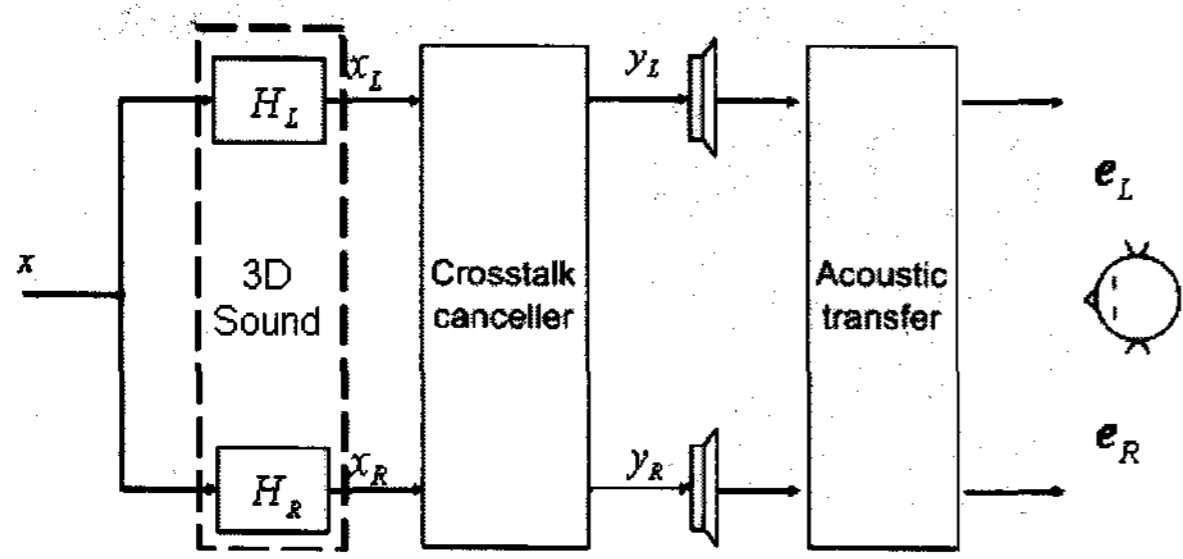


그림 3. 상호간섭 제거 개념도

용해 생성한 3차원 입체음향을 2개의 스피커로 재생하는 경우 H_{LR} 및 H_{RL} 과 같은 청취자의 반대측 귀에도 영향을 끼치는 상호간섭 현상이 필연적으로 발생하게 된다 [4].

이와 같은 상호간섭 현상은 3차원 입체음향으로부터 청취자가 느낄 수 있는 음상정위 효과를 현저히 감소시킨다. 특히 청취자의 머리 뒤쪽(위상에 90도에서 270 사이인 경우)으로의 음상정위 효과가 거의 생기지 않게 된다 [4]. 그러므로 보다 충실한 입체음향 효과를 위해서는 생성된 3차원 입체음향 신호에 대해서 스피커로 신호를 출력하기 전에 상호간섭을 최소화시켜주는 상호간섭 제거기가 필수적이다. 이에 대한 개념도는 그림 3과 같다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 스피커에서 청취자의 귀 경로까지의 음향전달함수 행렬의 역행렬을 구하여 상호간섭 제거기를 구성하고, 그림 1에서 생성한 입체음향 신호 x_L 과 x_R 을 스피커로 출력하기 전에 입체음향을 상호간섭 제거처리를 하게 된다 [4].

3.2 Atal-Schroeder 상호간섭 제거

상호간섭 제거는 Atal과 Schroeder에 의해 제시된 이래 지금까지 많은 연구가 진행되고 있다. 그림 4는 스피커로부터 청취자까지의 음향전달을 보여 준다. 그림 4에서 청취자의 양쪽 귀에 수신되는 ear signal은 식 (4)와 같이 정의할 수 있다 [4].

$$e = Ay \quad (4)$$

여기서 e 는 양쪽 귀에 수신되는 ear signal에 대한 열벡터, A 는 음향전달함수 행렬, 그리고 y 는 두 채널 스피커의 출력신호의 열벡터이다. 음향전달함수 행렬 A 는 식 (5)와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$A = HS \quad (5)$$

여기서 H 는 머리전달 함수 행렬을, S 는 스피커와 대기의 전달함수 행렬을 나타낸다. 생성한 3차원 입체음향 신호가 청취자의 양쪽 귀에 독립적으로 재생될 수 있도록 하기 위해서는 식 (6)을 만족하는 경우이다.

$$e = ACx = x \quad (6)$$

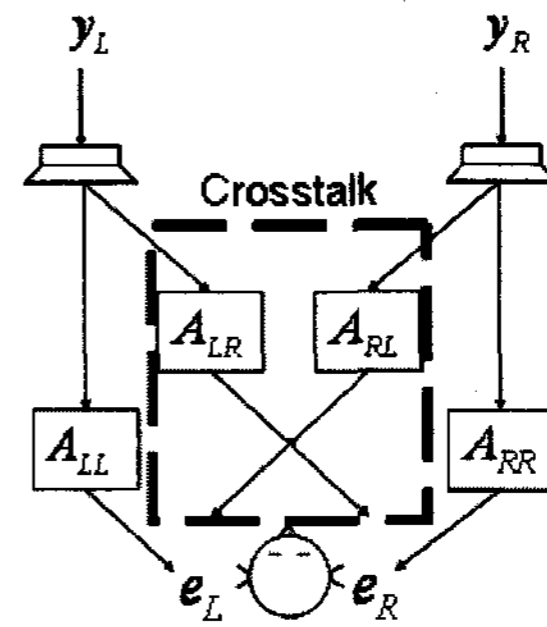


그림 4. 음향전달함수

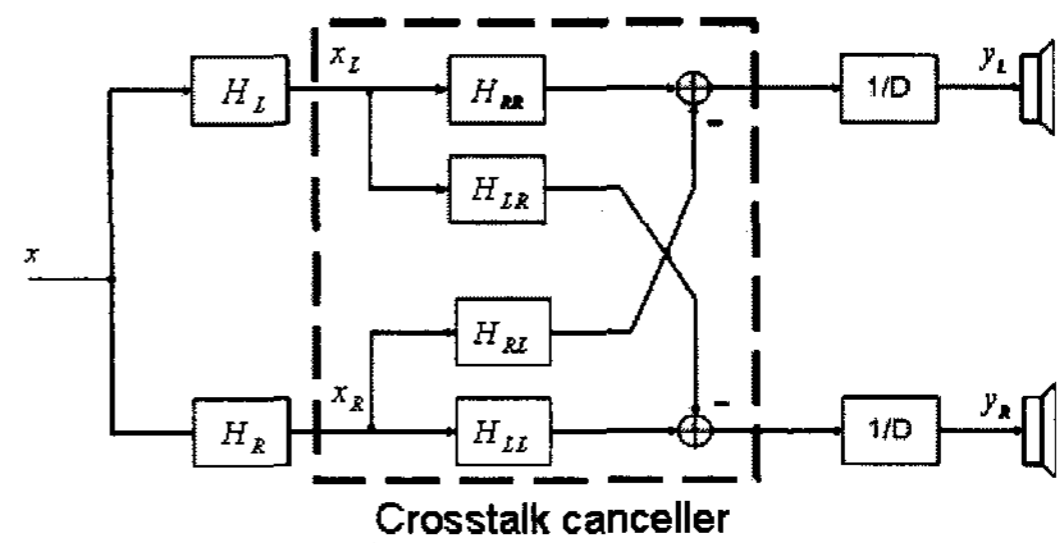


그림 5. Atal-Schroeder 상호간섭 제거기

여기서 x 는 3차원 입체음향 신호이고 C 는 상호간섭 제거기 행렬을 나타낸다. 그러므로 음향전달 행렬 A 와 상호간섭 제거기 행렬의 관계는 식 (7)과 같다.

$$I = AC \quad (7)$$

따라서 행렬 C 는

$$C = A^{-1} = S^{-1}H^{-1} \quad (8)$$

과 같고, 식 (8)에서 스피커와 대기의 전달함수, S 를 무시할 경우 식 (8)은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$C = H^{-1} \quad (9)$$

그러므로 상호간섭 제거기 행렬은 스피커에서 청취자의 양쪽 귀까지 경로에 해당하는 머리전달 함수 행렬의 역행렬로써 구성할 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 5는 Atal과 Schroeder에 제안된 상호간섭 제거기의 구조를 보여 준다. 상호간섭 제거기 행렬과 행렬식은 식 (10)과 같다.

$$H^{-1} = \begin{bmatrix} H_{RR} & -H_{RL} \\ -H_{LR} & H_{LL} \end{bmatrix} \frac{1}{D} \quad (10)$$

여기서 $D = H_{LL}H_{RR} - H_{LR}H_{RL}$ 이다.

IV. 입체음향 재생 시스템 구현

본 논문에서 구현한 입체음향 재생시스템은 그림 6과 같다. 입체음향 재생시스템은 헤드폰 또는 스피커를 통해 재생하는 두 가지 재생 모드를 선택할 수 있

다. 헤드폰으로 재생하는 경우 상호간섭 제거과정 없이 2.1 절의 KEMAR HRTF 또는 2.2 절의 수식에 의한 HRTF 모델을 이용해서 3차원 입체음향을 생성 및 재생되도록 설계되었다. 반면, 스피커로 재생하는 경우 헤드폰으로 재생하는 경우와 달리 3차원 입체음향을 생성한 뒤에 스피커에서 발생한 상호 간섭을 제거하기 위해 제 3 절의 상호간섭 제거기를 거쳐 재생하였다. 그림 6의 시스템은 사용자가 직접 마우스를 이용해 원하는 모의 방위각과 모의 거리에 해당하는 곳을 클릭함으로써 그 지점에서 음상이 정위되도록 하여 입체감을 느낄 수 있도록 하였다. 입체음향 재생시스템에 사용된 음원으로는 총소리와 컵의 깨지는 소리, 헬리콥터 소리를 사용해 사용자가 클릭하는 즉시 3차원 입체감을 느낄 수 있도록 설계하였다.

V. 성능실험

3차원 입체음향을 KEMAR HRTF를 이용해 생성하는 경우 음색이 변하는 문제가 발생하는 반면에 HRTF 모델의 경우 거의 원음에 가까운 입체음향을 생성할 수 있었다. 그 뿐만 아니라 HRTF 모델을 사용하여 상호간섭 제거기를 구현하였을 경우 KEMAR HRTF의 경우와 거의 비슷한 상호간섭 제거효과를 느낄 수 있었다. 또한 KEMAR HRTF의 경우 측정 시와 비슷한 환경(스피커와 청취자간의 거리 1.4 m, dummy head와 근사한 머리카기) 하에서 상호간섭 제거효과가 높지만 HRTF 모델을 사용하는 경우 재생환경이 변하더라도 그에 맞는 변수를 적용시켜 HRTF 모델을 생성함으로써 재생환경 변화에 유연한 상호간섭 제거기를 구현할 수 있었다.

VI. 결론

본 논문에서는 3차원 입체음향 생성 및 스피커 환경에서의 3차원 입체음향의 효과를 증강시키기 위한 상호간섭 제거기를 구현하였다. 상호간섭 제거기의 기본 구조는 Atal-Schroeder에 제안된 방식을 따랐으며, 실제 구현을 위해 KEMAR HRTF로부터 얻은 HRTF 행렬과 수식에 의한 HRTF 모델로부터 얻은 HRTF 행렬을 이용하였다. 또한, 구현된 방식은 3차원 입체음향 재생시스템에 적용하여 스피커 환경에서의 몰입감을 증강시킴을 확인할 수 있었다.

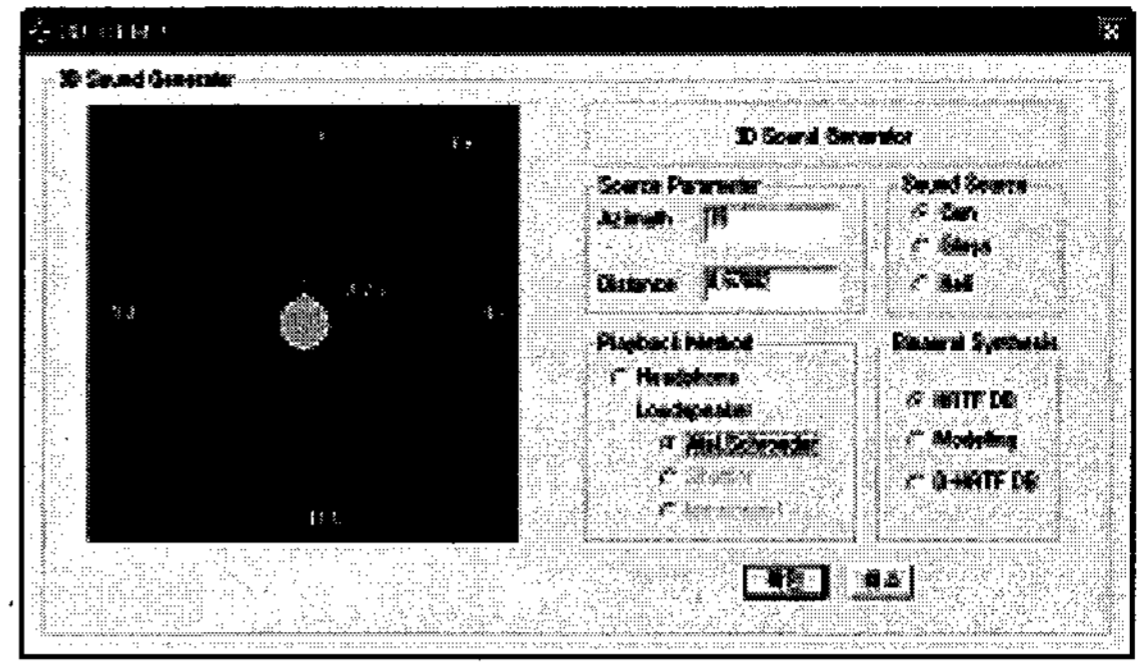


그림 6. 구현한 입체음향 재생시스템

감사의 글

본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업(IITA-2006-C1090-0603-0017)과 광주과학기술원 실감콘텐츠 연구센터(ICRC)를 통한 과학기술부 특정 연구개발사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] B. S. Atal and M. R. Schroeder, "Apparent sound source translator," *U.S. Patent* 3,236,949, Feb. 1966.
- [2] D. R. Begault, *3D Sound for Virtual Reality and Multimedia*, Academic Press, Cambridge, MA, 1994.
- [3] W. G. Gardner and K. D. Martin, "HRTF Measurements of a KEMAR," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 97, no. 6, pp. 3907-3908, June 1995.
- [4] W. G. Gardner, *3-D Audio using Loudspeakers*, Kluwers Academic Publishers, 1998.
- [5] C. P. Brown and R. O. Duda, "An efficient HRTF model for 3-D sound," in *Proc. WASPAA*, pp. 298-301, Oct. 1997.
- [6] 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. Amer.*, vol. 91, no. 3, pp. 1637-1647, Mar. 1992.
- [7] N. M. Cheung, S. Trautmann, and A. Horner, "Head-Related Transfer Function Modeling in 3-D Sound Systems with Genetic Algorithms," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 46, no. 6, pp. 531-539, June. 1998.
- [8] 이영한, 이길호, 김홍국, "가상현실 환경에서의 3차원 사운드 생성을 위한 거리 변화에 따른 구조적 머리전달함수 모델," *HCI2006 논문집*, pp. 632-637, 2006.