

논문 2005-42SP-1-10

HRTF를 이용한 헤드폰 기반의 다채널 입체음향 생성

(Headphone-based multi-channel 3D sound generation using HRTF)

김 시 호*, 김 경 훈**, 배 건 성*, 최 송 인***, 박 만 호***

(Siho Kim, Kyunghoon Kim, Keunsung Bae, Songin Choi, and Manho Park)

요 약

본 논문에서는 5.1채널 입체음향 오디오 신호를 2채널의 헤드폰으로 재생하기 위한 HRTF (Head Related Transfer Function) 기반의 입체음향 생성 시스템에 대하여 다룬다. 각 채널의 모노 입력신호는 HRTF를 이용한 바이노럴(binaural) 필터링을 통해 가상적으로 음상정위되며, 입체감과 공간감을 증가시키기 위해 잔향효과가 추가된다. 연산량 감소를 위해 음상정위 성능을 저하시키지 않는 범위에서 HRTF의 임펄스 응답 탭 수를 줄였으며, 잔향효과를 위한 음상제어부에서는 초기반사열 중 주요한 성분만을 지연기로 모델링하였다. 또한 비개인화된 HRTF DB에 의한 앞/뒤 혼돈 문제를 줄이기 위하여 앞/뒤 스펙트럼의 차를 가중치로 하여 HRTF 스펙트럼을 강조하는 방법을 적용하였다. 구현한 시스템의 성능 평가 결과, 단순한 스테레오 방법이나 2채널 Down Mixing 방식에 비해 현실감 있고 방향성 있는 입체음향을 느낄 수가 있었다.

Abstract

In this paper we implement a headphone-based 5.1 channel 3-dimensional (3D) sound generation system using HRTF (Head Related Transfer Function). Each mono sound source in the 5.1 channel signal is localized on its virtual location by binaural filtering with corresponding HRTFs, and reverberation effect is added for spatialization. To reduce the computational burden, we reduce the number of taps in the HRTF impulse response and model the early reverberation effect with several tens of impulses extracted from the whole impulse sequences. We modified the spectrum of HRTF by weighing the difference of front-back spectrum to reduce the front-back confusion caused by non-individualized HRTF DB. In informal listening test, we can confirm that the implemented 3D sound system generates live and rich 3D sound compared with simple stereo or 2 channel down mixing.

Keywords : 3D sound, HRTF, source localization, headphone, 5.1 channel

I. 서 론

최근 입체음향에 대한 일반인의 관심이 높아지면서 DVD (Digital Video Disc) 홈시어터와 같은 다채널 입체음향 시스템이 각광을 받고 있다. 이러한 입체음향에 대한 관심은 단순한 통신수단을 넘어서 휴대폰의 멀티미디어 서비스에도 반영될 전망이다. 그러나 대부분의

입체음향 재생 시스템은 다채널의 스피커를 통해 재생되기 때문에 휴대폰과 같이 소형단말기에서는 사용이 제한적이다. 따라서 DVD와 같은 다채널의 입체음향을 휴대폰과 같은 소형 단말기에서 재생하기 위해서는 헤드폰과 같은 2채널 기반의 입체음향 재생 기술이 요구된다. 특히 2채널 헤드폰을 통한 입체음향 재생은 공간적 제약이 적기 때문에 휴대폰 뿐만 아니라 일반 휴대용 오디오 기기, 기내와 같이 협소한 장소에서의 DVD 재생 등에 유용하게 사용될 수 있다.

다채널 입체음향을 2채널의 헤드폰으로 재생하는 기법은 단일 음원에 대한 음상정위 기술을 각 채널별로 적용함으로써 구현 가능하다. 즉, 단일 채널 음상정위 기법을 사용하여 각 채널별로 해당 스피커의 위치에 음원을 가상 배치하고 동시에 들려줌으로써 청취자는 실

* 정희원, 경북대학교 전자공학과
(Electronics, Kyungpook National University)
** 정희원, 삼성탈레스 제조개발본부 Product Eng.
(H/W Group R&D Team, Samsung Thales Co.,LTD)
*** 정희원, 한국전자통신연구원 이동A/V연구팀
(Mobile A/V Research Team, ETRI)
※ 본 연구는 한국전자통신연구원 이동통신연구소 이
동부호화연구팀의 연구비 지원으로 수행되었습니다.
접수일자: 2003년12월11일, 수정완료일: 2005년1월11일

제 다 채널 스피커를 통해 듣는 것과 같은 입체감을 느낄 수가 있다. 일반적으로 단일 채널에 대한 입체음향 생성 과정은, HRTF 바이노럴 필터링을 통한 음상정위, 이득조절을 통한 거리감 제어, 그리고 잔향생성을 통한 공간감 부여 등 3가지 과정으로 이루어진다.

본 논문에서는 다 채널의 음향신호를 2채널 헤드폰에서 재생하여 스피커 재생과 유사한 입체음향 효과를 얻는 것을 목적으로 5.1채널 입체음향 재생 시스템을 구현하였다. 다 채널 입체음향 시스템은 음상정위와 음장제어 과정을 채널마다 수행하여 많은 연산량을 요구하기 때문에 연산량 감소를 위한 기법이 적용되었다. 또한 비개인화된 HRTF DB에 의한 앞/뒤 혼돈 문제를 해결하기 위하여 HRTF 스펙트럼을 강조하는 방법도 적용하였다. 구현한 시스템의 성능평가 결과 DVD에서 제공하는 스테레오 음원이나 돌비 Down Mixing 방식에 비해 현실감 있고 방향성 있는 입체음향을 느낄 수 있었다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 II장에서 HRTF를 이용한 단일채널 입체음향 생성 기법에 대하여 설명하고 III장에서 헤드폰 기반의 다채널 입체음향 생성 기법에 대하여 설명한다. IV장에서 구현한 입체음향 시스템의 청감 평가 결과를 제시하고 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. HRTF를 이용한 입체음향 생성

1. 머리전달함수(HRTF)

인간의 청각 시스템에서 음원의 방향을 지각할 수 있는 주된 요인은 오른쪽 귀와 왼쪽 귀에 들어오는 두 소리의 세기차(IID: Interaural Intensity Difference)와 시간차(ITD: Interaural Time Difference)이다. 그 밖에 입사파가 내이에 도달하기까지 몸통, 머리, 외이와의 상호작용과 직접음의 반사와 회절에 의한 음의 스펙트럼 변화 등 다양한 요인들이 방향지각에 영향을 미친다. 이러한 특성을 포괄적으로 가지고 있는 것이 HRTF인데, 본 논문에서는 MIT Media Lab에서 KEMAR 더미헤드를 사용해서 측정된 HRTF DB와 U.C. David CIPIC Interface Lab에서 43 사람과 2 종류의 컷바퀴 형태에 대해서 KEMAR 더미헤드로 측정된 HRTF DB를 사용하였다^[1-5]. HRTF DB는 모두 시간영역에서의 임펄스 응답인 HRIR (Head Related Impulse Response)의 형태로 제공되는데, 그림 1은 MIT HRTF DB와 CIPIC HRTF DB에 대해서 고도 0, 방위각 30 방향에 대한 HRIR 예를 보이고 있다.

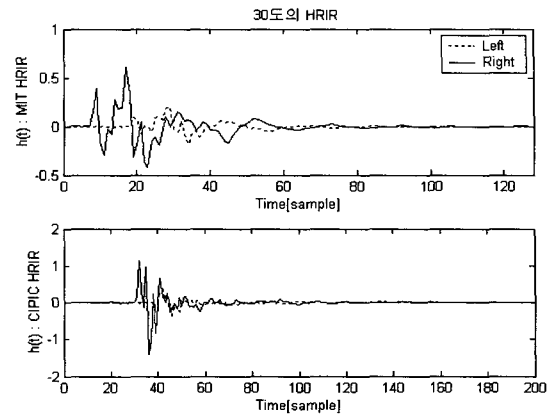


그림 1. MIT DB와 CIPIC DB에 대한 고도 0, 방위각 30 방향의 HRIR 예

Fig. 1. Examples of HRIR with altitude 0° and azimuth 30° for MIT DB and CIPIC DB.

2. 방향감 제어를 위한 음상정위

방향감이 없는 모노 신호에 대해서 방향감을 부여하는 음상정위 과정은 특정 방향에서 두 외이에 도달하는 물리적 단서로써 측정된 HRTF와의 필터링을 통해 구현된다. 식 (1)은 특정 방향의 HRIR과 모노 신호에 대한 컨벌루션 과정을 나타낸 식이다.

$$y(n) = \sum_{m=0}^{M-1} x(m)h(n-m) \quad (1)$$

여기서, $x(n)$ 은 음원샘플, $h(n)$ 은 HRIR 필터계수, $y(n)$ 은 필터링된 출력신호, M 은 HRIR의 탭 개수를 의미한다. 단일 모노 음원에 대해서 특정 방향으로 음상정위 시키기 위해서는 해당 방향의 좌/우 HRTF 필터 계수에 대해서 각각 식 (1)과 같은 필터링을 수행한다. 그러나 음원이 정면이나 후면 혹은 수직면 상, 즉 두 귀축을 중심으로 원추형 방향에 있는 경우에 대해서 바이노럴 필터링된 결과를 헤드폰으로 들어보면 전/후 방향과 고/저에 대한 혼돈(Cone of Confuse)이 생기게 된다. 이것은 음원이 정면이나 후면 또는 수직면 상에 존재할 때에 방향지각의 주 요소인 ITD나 IID가 좌/우 채널에서 차이가 없기 때문이다. 따라서 HRTF에서 앞/뒤, 상/하를 구별할 수 있는 것은 ITD, IID 외에 복합적인 요소들로 이뤄진 스펙트럼 단서에 의한 것인데, 자신의 HRTF가 아닌 더미헤드에서 측정된 HRTF를 이용할 경우에 자기에게 맞는 정확한 스펙트럼 단서를 제공하지 못하므로 방향지각에 혼돈을 일으킬 수 있다.

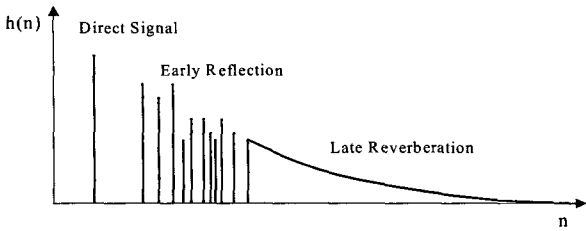


그림 2. 실내에서의 반향 특성
Fig. 2. Typical reflection characteristics in a room.

3. 공간감과 거리감 제어

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 된다. 따라서 방향감만 고려된 음상정위 결과만으로는 실제감 있는 소리를 재생하기가 어렵다. 또한 헤드폰 재생시에는 소리가 머리 안에 머무는 현상이 입체감을 저하시키는 요인으로 작용하는데 이러한 문제를 해결하기 위해서는 청취공간정보를 부여하는 잔향효과가 필수적이다. 그림 2는 음원에서 청취자의 귀까지 소리가 전달되는 공간 전달함수의 일반적인 임펄스 응답 특성을 나타내고 있다. 일반적으로 소리의 세기는 기준 음에 대해 거리가 2배 될 때마다 6dB씩 감소한다고 알려져 있는데 이러한 법칙을 적용하면 거리감을 제어할 수 있다^[6]. 추가적으로 잔향이 존재할 경우에는 직접음과 잔향음의 비율이 거리감 형성에 매우 중요한 요소로 작용하기 때문에 이러한 점도 고려된다. 즉, 잔향 레벨이 실내의 모든 공간에 대해 거의 일정한데 반해 직접음은 음원에서 멀어질수록 감소하므로 직접음 대 잔향음의 비를 조절하여 거리감을 제어할 수가 있다^[7].

III. 헤드폰 기반의 다채널 입체음향 재생

DVD 오디오와 같은 다채널 입체 음향은 일반적으로 채널 수 만큼의 스피커를 공간적으로 배치하여 재생함으로써 입체음향을 생성할 수가 있다. 그림 3은 다채널 입체음향 재생을 위해서 ITU-R에서 권장하고 있는 스피커 배치도를 나타내고 있다^[8]. 구현한 헤드폰 기반의 입체음향 시스템은 그림 3의 스피커 배치도를 기준으로 5개의 각 채널 음원을 가상 배치 하였다. 즉, 앞쪽에 중앙 채널을 배치하고, 앞쪽 ±30도 방향에 좌/우 스피커를, 그리고 뒤쪽 ±110도 방향에는 서라운드 좌/우 스피

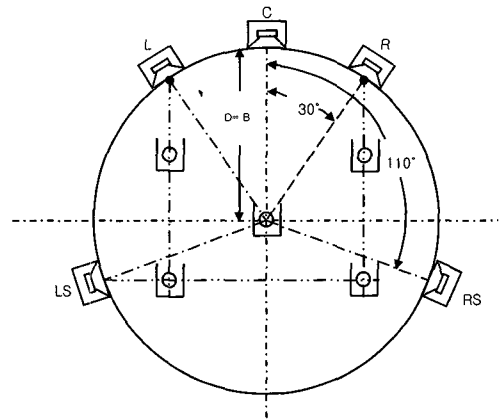


그림 3. ITU-R 권장 리스닝 룸의 스피커 배치도
Fig. 3. Speaker arrangement based on ITU-R recommendation.

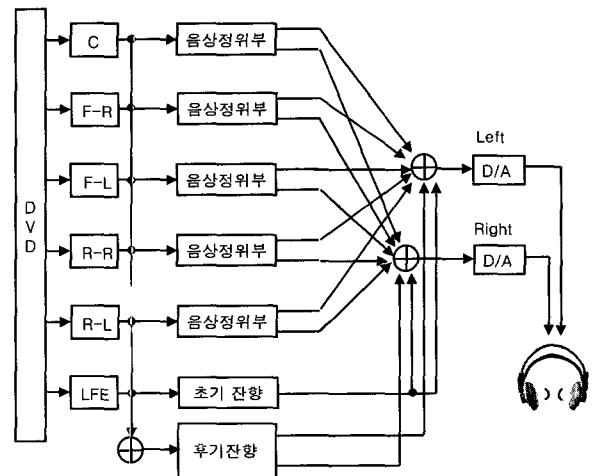


그림 4. 구현한 다채널 입체음향 재생기의 전체 구성도
Fig. 4. Block diagram of implemented multi-channel 3D sound generation system.

커를 가상 배치하였다. 그림 4는 그림 3의 스피커 배치도를 모델로 하여 구현한 다채널 입체음향 시스템의 전체 구성도를 나타내고 있다. DVD에서 추출된 각 채널 음원은 음상정위부를 통해 특정 방향으로 음상정위되며, 공간감 부여를 위해 잔향을 생성하는 음상제어 과정을 거친다. 이렇게 방향감과 공간감이 부여된 각 채널의 신호는 좌/우 채널별로 합쳐져 2채널 헤드폰으로 출력된다. 여기서 LFE(Low Frequency Effects)는 아주 낮은 저음을 강조해 주는 부분으로서, 사람이 듣기에 방향을 구별할 수 없는 대역의 신호이므로 방향감 제어를 하지 않았다.

1. 음상정위부와 음상제어부

각 채널별로 사용된 음상정위부는 각 채널의 모노 신

호를 스피커가 위치할 방향의 HRTF와 컨벌루션하는 과정으로 이루어진다. 이러한 과정은 그림 5에 잘 나타나 있으며, HRTF DB로는 MIT DB와 CIPIC DB 두 가지를 모두 사용하였다. 그림에서 'Modified HRTF'는 앞/뒤, 상/하 혼돈 문제를 개선하기 위하여 앞/뒤 스펙트럼의 차를 가중치로 하여 HRTF 스펙트럼을 변형시키는 방법^[9]을 가리킨다.

음장제어를 위한 잔향은 크게 직접음을 보장하여 음의 명료성을 높이거나 공간감을 느끼게 하는 초기잔향

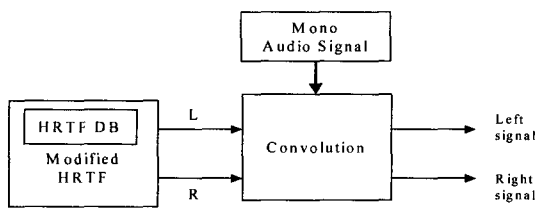


그림 5. 각 채널에 대한 음상정위부 구성도
Fig. 5. Block diagram of sound localization part for each channel.

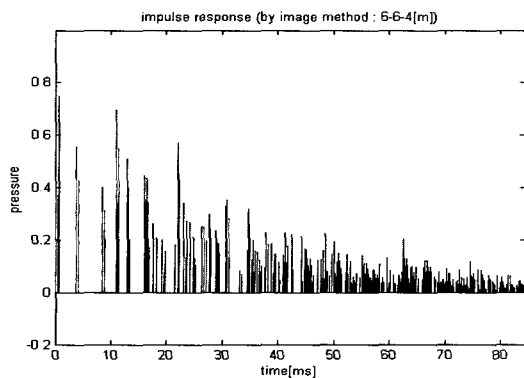


그림 6. Image method를 이용해 생성한 초기 잔향의 임펄스 응답(room size : 6m-6m-4m)
Fig. 6. Impulse response of early reflection generated by image method.

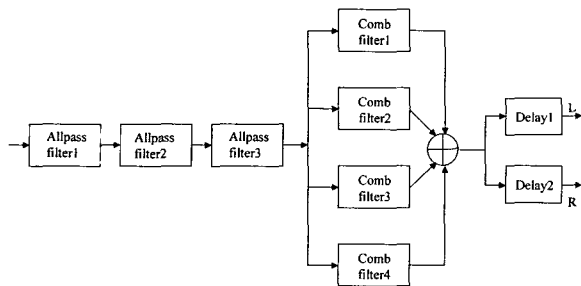


그림 7. Comb filter와 allpass filter로 구성된 후기 잔향기
Fig. 7. Late reflector consisting of comb filter and allpass filter.

과 음의 지속성을 나타내는 후기잔향으로 나누어진다. 두 가지 잔향 효과 중 초기잔향은 음의 외재화에 특히 중요한 역할을 한다. 구현한 시스템에서 초기잔향은 그림 6과 같이 image method^[10]를 사용하여 FIR 형태로 구현하였고, 후기잔향은 그림 7처럼 comb filter와 allpass filter를 사용하여 IIR 형태로 구현하였다^[11].

2. 연산량 감소를 위한 적용기법

구현한 입체음향 재생 시스템에서 사용하는 두 가지 DB 중에서 CIPIC DB는 MIT DB와는 다르게 200개의 탭을 가져 상대적으로 많은 연산량을 요구한다. 따라서 200 탭의 CIPIC HRTF를 MIT DB와 같도록 128 탭으로 줄여서 사용하였다. 200 탭의 CIPIC HRIR를 관찰해보면 앞부분의 약 20 샘플과 150 샘플 이후의 뒤 샘플은 거의 0에 가깝다. 따라서 5개 각 채널에 대해서 전체 스펙트럼에 거의 영향을 주지 않는 앞/뒤 경계치를 분석하여 최종적으로 15~142 샘플사이를 유효 탭으로 취하였다. 128개의 탭으로 감소한 HRTF의 스펙트럼은 원래의 스펙트럼과 거의 차이를 보이지 않았으며, 실제 HRTF 필터링된 결과를 청취하여도 차이를 느낄 수 없었다. 그림 8은 0 방향에 대해서 탭 수가 128인 경우와 200인 경우에 대한 스펙트럼을 비교하고 있는데 거의 차이가 없음을 볼 수 있다.

FIR과 IIR의 조합으로 이루어진 잔향기에서 현실감 있는 잔향 생성을 위해서는 수천 탭의 FIR 초기 반사열이 필요하다. 각 채널별로 HRTF 필터링, 초기 반사를 위한 수천 탭의 컨벌루션 연산 그리고 후기잔향을 위한

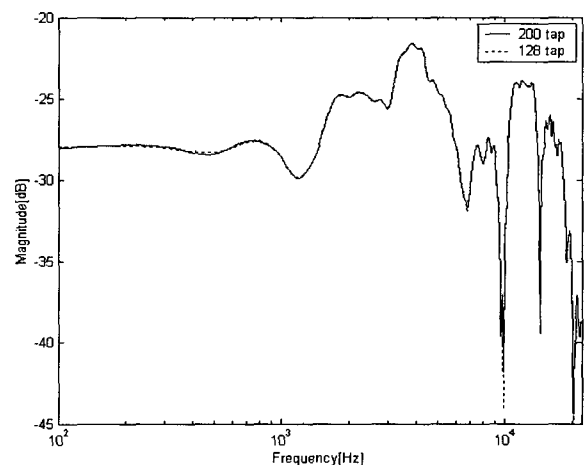


그림 8. HRTF 탭 수 감소 전/후의 스펙트럼 비교 (0 방향)
Fig. 8. Spectra of HRTF before and after reducing the number of taps.

IIR 필터링 과정은 상당히 많은 계산량을 필요로 한다. 따라서 연산량을 줄이기 위한 한 방법으로 후기잔향의 경우 음원의 방향에 무관하고 초기 반사의 경우도 각 채널별로 생성하지 않더라도 공간감을 느끼는데 큰 차이가 없기 때문에 잔향효과는 각 채널의 모노 소스의 합에 대해 한번만 적용하였다. 또한 5.1채널에서 LFE는 매우 낮은 주파수의 신호로서 방향성이 없기 때문에 음상정위 과정은 생략하고 잔향 처리만을 수행하였다. 또한 초기 반사열의 필터링에서 계산량을 줄이기 위해 초기 반사열 중에 공간감 형성에 크게 기여한다고 판단되는 펄스만을 찾아 지연기와 곱셈기로 구현하는 방법을 사용하였다. 이때 초기 반사열은 그림 9(a)의 image method를 통해 생성된 2000개(약 45msec)의 펄스열에서 청감 테스트를 통해 공간감 형성에 영향을 미치는 24개의 펄스열을 그림 9(b)와 같이 추출하여 지연기로 구현하였다. 그 결과 유효한 24개의 펄스를 사용한 방법이 2000개의 탭 중에서 앞부분의 연속적인 1000 탭을 사용하는 방법보다 잔향생성에서 보다 자연스럽게 양호한 성능을 나타내었으며 계산량도 줄일 수 있었다. 구현한 입체음향 재생 시스템은 C/C++로 프로그래밍 되었으며, 펜티엄-4(2GHz), 메모리 256Mbytes의 PC에서 전체 연산 능력의 약 50%를 소모하며 실시간으로 동작하였다.

IV. 청감 평가 실험

구현한 입체음향 시스템과 기존의 2채널 재생 방식과의 성능 비교를 위해 청감 평가를 수행하였다. 비교 대상으로는 DVD 타이틀에서 AC3나 MPEG-2의 다채널 소스와 함께 제공하는 PCM STEREO의 출력과 다채널 소스를 디코더에서 2채널로 Down Mixing^[12]한 결과를 사용하였다. 제안한 시스템은 DVD 타이틀에서 테스트 음원에 해당하는 6채널의 웨이브 파일을 추출하여 입체감을 부여한다. 청감 평가에는 영화, 효과음, 음악 등으로 구성된 5가지 음원을 사용하였으며, 실험과정은 각 음원에 대해서 3가지 방식을 임의로 들려준 후 입체감 정도에 따라 우선 순위를 정하게 하였다. 입체감에 대한 개인적 견해를 고려하여 입체감이 우수하다는 기준을 동적인 음원의 특성이 잘 표현되고 채널이 잘 분리되는 특성과 공간감이 강조되는 특성을 가지는 것으로 미리 정의하였다. 청감 평가는 비전문가 8명에 대해 수행하였다. 표 1은 청감 평가 결과를 나타내고 있으며 각 음원 샘플에 대해서 입체감이 가장 높게 평가된 경

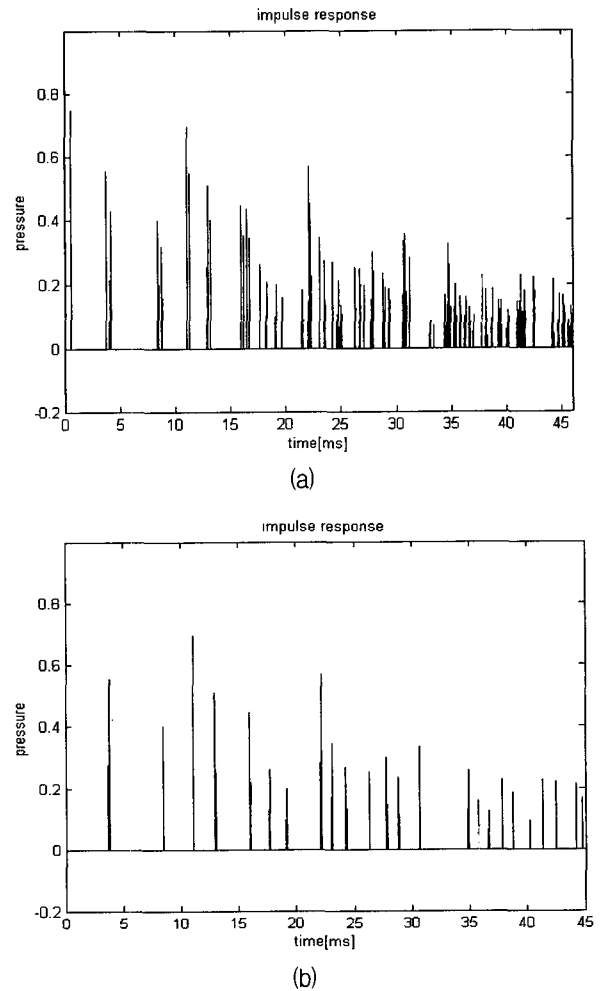


그림 9. 초기 반사열의 임펄스 응답 탭 수 감소 (a) 감소 전 (2000탭) (b) 감소 후 (24탭)

Fig. 9. Reduction of the number of taps for early reflection sequences (a) Before reduction (2000 tap) (b) After reduction (24 tap).

표 1. 청감 평가 결과

Table 1. Result of informal listening test.

음원	Down Mixing	Stereo	Proposed System
오토바이 인진(효과음)	1	1	6
영화 'Gladiator'의 일부(영화)	1	3	4
Jazz 연주(음악)	0	2	6
전투기 비행(효과음)	1	2	5
지하철(효과음)	4	0	4

우를 표시하고 있다. 실험 결과 제안한 알고리즘이 5개의 샘플 중에서 4가지 경우에 대해서 입체감이 가장 우수한 것으로 나타났다. 특히 동적인 음원을 가진 소스에 대해 입체감 개선의 효과가 잘 나타났다. 한편 제안한 알고리즘의 음색을 다른 알고리즘과 비교했을 때 중

저역이 다소 모자란다는 주관적인 평가도 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 5.1 채널의 DVD 오디오 신호를 2 채널의 헤드폰으로 재생하는 다채널 입체음향 재생 시스템을 구현하였다. ITU-R에서 권장하는 스피커 배치도에 따라 각 채널을 바이노럴 HRTF 필터링을 통해 가상적으로 음상정위 하였으며, 공간감과 입체감을 주기 위해 초기잔향은 FIR 필터로, 후기잔향은 IIR 필터를 사용하여 음장제어 과정을 추가하였다. 음상정위 과정은 LFE를 제외한 5개의 채널에 각각 적용하였으며, 잔향효과는 계산량을 줄이기 위해 각 채널의 모노 소스의 합에 대해 한번만 적용하였다. 연산량 감소를 위해 음상정위 성능을 저하시키지 않는 범위에서 HRTF의 임펄스 응답 탭 수를 줄였으며, 잔향효과를 위한 음장제어부에서는 초기반사열 중 주요한 성분만을 지연기로 모델링하였다. 또한 비개인화된 HRTF DB에 의한 앞/뒤 구분의 혼동 문제를 개선하기 위하여 앞/뒤 스펙트럼의 차이를 가중치로 스펙트럼을 조절하는 방법을 적용하였다. 구현한 시스템에 대한 시스템의 주관적 청취 평가 결과, 단순한 스테레오 방법이나 2채널 Down Mixing 방식에 비해 더 현실감 있고 방향성 있는 음향을 느낄 수가 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Gardner. W, "HRTF Measurement of a KEMAR Dummy-Head Microphone", Technical Report# 280, MIT Media Lab, 1994
- [2] <http://sound.media.mit.edu/KEMAR.html>
- [3] V. R. Algazi, R. O. Duda, D. P. Thompson, and C. Avendano. "The CIPIC HRTF database", Proc. IEEE WASPAA01, New Paltz, NY, pp. 99-102
- [4] http://interface.cipic.ucdavis.edu/CIL_tutorial/3D_HRTF/3D_HRTF.htm
- [5] 강성훈, 강경욱, "입체음향", 기전연구소, 1997
- [6] 김영오, 고대식, "멀티캐스트 화상회의를 위한 3-D 음향시스템 설계", 한국통신학회 Vol.25, No.1B, pp. 71-76, 2000
- [7] Durand R. Begault, "3-D sound for virtual reality and multimedia", Academic Press, 1994
- [8] ITU-R BS.775.1: "Multichannel Stereophonic Sound System With and Without Accompanying Picture" (Geneva, 1992-4)
- [9] 김경훈, 김시호, 배건성, 박만호, "헤드폰 기반의

- 입체음향 생성에서 앞/뒤 음상정위 특성 개선," 2003년 한국음향학회 하계학술대회, 2003
- [10] Jont B. Allen, David A. Berkley, "Image Method for Efficiently Simulating Small-Room Acoustics," J. Acoust. Soc. Am. Vol. 65, No. 4, pp. 943-950, April 1976
 - [11] William G. Gardner, "The Virtual Acoustic Room," Master thesis, 1992
 - [12] <http://www.dolby.com/tech/>

저 자 소 개



김 시 호(정회원)
 1998년 경북대학교 전자공학과
 학사 졸업
 2001년 경북대학교 전자공학과
 석사 졸업
 현재 경북대학교 전자공학과
 박사과정

<주관심분야: 음성신호처리, 오디오/음성 코딩,
 적응신호처리, 오디오 워터마킹, DSP>



김 경 훈(정회원)
 2002년 경북대학교 전자공학과
 학사 졸업
 2004년 경북대학교 전자공학과
 석사 졸업
 현재 삼성탈레스 제조개발본부
 Product Eng. 팀

<주관심분야: 음성신호처리, 디지털신호처리, 오
 디오 코딩 등>



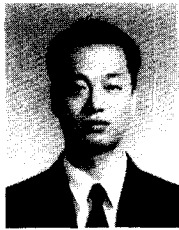
배 건 성(정회원)
 1977년 서울대학교 전자공학과
 학사 졸업
 1979년 한국과학기술원 전기 및
 전자공학과 석사 졸업
 1989년 University of Florida
 공학박사

현재 경북대학교 전자·전기공학과부 교수
 <주관심분야: 음성신호처리, 디지털신호처리, 디
 지털통신, 웨이브렛이론, 오디오신호처리 등>



최 승 인(정회원)
 1982년 광운대학교 응용전자
 공학과 학사 졸업
 1987년 광운대학원 전자계산기
 공학과 석사 졸업
 현재 한국전자통신연구원 이동
 A/V연구팀 책임연구원

<주관심분야: 이동통신, 음성신호처리, 영상신호
 처리 등>



박 만 호(정회원)
 1998년 경북대학교 전자공학과
 학사 졸업
 2000년 경북대학교 전자공학과
 석사 졸업
 현재 한국전자통신연구원 이동
 A/V연구팀 연구원

<주관심분야: 이동통신, 음성신호처리, 음향신호
 처리 등>

