

머리전달함수의 인지량적 평가 방법과 이를 이용한 음상 정위 기법의 연구

°정 완섭*, 황 신**, 방 승범**, 김 순협**

*: 한국표준과학연구원 음향진동그룹, **: 광운대학교 컴퓨터공학과

Evaluation method of Perception-based HRTFs and Its Usage for Spatial Sound-Image Localisation

°Wan-Sup Cheung*, Shin Hwang**, Seungbeum Bhang**, Soonhyub Kim**

요 약 문

금번 연구는 공간 음상 정위에 직면하는 주된 문제점인 음색왜곡과 음질저하의 영향 인자들과 개선방안을 고찰한다. 측정 머리전달함수로부터 청각기관의 공간 음상에 대한 인지양적 특성치 (양귀 음압레벨 차이 ILD와 음압 도달시간 차이 ITD)를 추정하는 새로운 방법의 제안, 공간 음상정위 특성치의 새로운 DB 구축, 그리고 이를 이용한 공간 음상 정위 구현방법의 새로운 방안을 소개한다. 그리고, 제안된 공간 음상 구현 기법은 음색 왜곡 및 음질저하를 최소화할 뿐 아니라 구현 방법의 간결성 때문에 제품화로 직접 적용할 수 있는 장점을 제공할 수 있음을 본 논문에서 보인다.

1. 서 론

80년대 말 이후 머리전달함수(Head-Related Transfer Function, HRTF)의 실험적 결과^[1-4]들이 학계에 소개된 이래 공간음원 정위에 대한 가능성과 구현 방법들의 연구^[5]가 활발하게 시작되었다. 이들 연구가 기대했던 들의 희망과는 달리 측정 HRTF를 이용한 공간 음상정위의 현 기술이 직면한 음색 왜곡과 음질 저하 때문에 국내 방송 및 음반 전문 음향 기사들조차 현실적 유용성에 부정적 견해를 갖고 있는 실정이다.

본 연구팀은 이미 측정 머리전달함수를 이용한 공간 음상 정위에 직면하는 문제점들^[6]을 이미 지적한 바 있으며, 이들 문제점을 체계적으로 해결하기 위하여 수행된 결과를 금번 연구에서 소개한다.

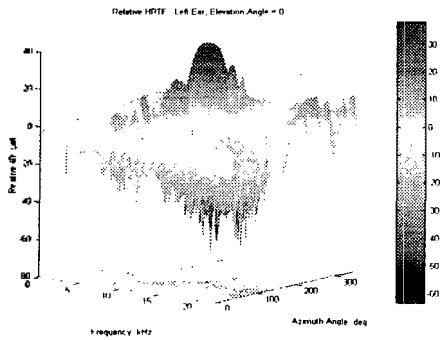
2. 공간 음상 정위 인자 추출 기법

양 귀를 이용한 3차원 공간 음의 인지 원리는 Lord Rayleigh^[7]가 처음 소개한 두

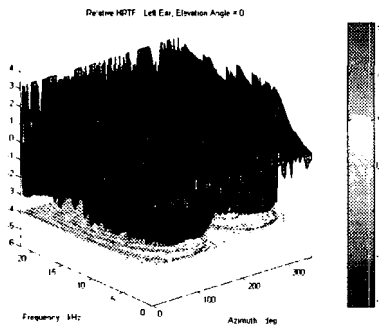
가지의 양, 즉 양귀 음압레벨 (Interaural Level Difference, ILD)과 음압 도달시간 차이 (Interaural Time Difference, ITD)로 정량화 될 수 있다. 이러한 고전적 개념은 최근 연구결과 들의 주요 내용^[8,9]의 핵심이 되고 있다. 사실, Lord Rayleigh의 고전적 음상 인식 개념은 양 귀의 음압레벨 차이와 시간 차이의 두 특성치를 동시에 조정할 때 청각 기관은 공간적 음상을 올바르게 인식한다는 점을 의미한다. 따라서, 양 귀 음압의 레벨차이와 도달 시간 설정용 "팬팟"의 동시 설정 방법은 삼차원 공간 음상 정위의 가장 핵심적 기술 요소이며 이를 개발하는 것이 본 연구의 목표였다.

Fig. 1은 거리 $r = 1.5$ m이고 고도각 $\varphi = 0^\circ$ 경우, 표준(연)에서 측정한 머리전달함수의 진폭과 위상 특성을 방위각에 따라 보여주고 있다. Fig.1 (a)와 (b)에 표시된 바와 같이 측정 머리전달함수의 진폭과 위상에 포함될 수 많은 피크치들이 원음의 음색 왜곡

과 음질의 저하를 초래하는 주된 인자들이다.



(a) Magnitude Responses



(b) Phase Responses

Fig. 1. Magnitude and phase characteristics of HRTFs measure at the distance $r = 1.5$ m and the elevation angle $\phi = 0^\circ$.

위와 같이 단순 측정 머리전달함수를 이용한 공간 음상 정위에 수반되는 음색 왜곡과 음질 저하는 아직도 삼차원 공간 음상 정위 기술이 공중파 방송 (TV, 라디오), 음반 그리고 영화의 응용분야에 활용되지 못하는 가장 주된 요인이 되고 있다. 사실, 실험적으로 측정된 머리전달함수는 음원 스피커의 음향 특성 (음향 출력 및 방향성 등), 양귀 음압 측정용 마이크로폰의 전기적 그리고 음향학적 특성, 청음자의 체위 인자들 (양 귀, 머리, 어깨, 및 상체의 크기 및 형상)에 의한 반사, 회절, 산란 등에 의한 음향학적 특성, 그리고 실험실의 음향 특성치 (잔향 시간, 반사 및 흡음 특성)에 의한 복합적 영향 인자들을 포함하고 있다.

이러한 문제점을 해결할 수 있는 방안을 소개한다. 사람의 청각기관이 과연 Fig 1 (a)의 잔폭 특성에서 보인 수 없는 최대 최

소 피크치 들을 식별하여 정확히 인식할 수 있는가 하는 점이다. 인간의 청각기관은 다수의 소리를 동시에 들을 경우 "Masking" 현상 (음압이 낮은 소리의 묻힘 현상) 때문에 최소치들에 대한 음향 성분은 인식이 불가능하며 그리고 근접한 두 최대 피크치의 미세한 식별 또한 불가능하다. 이러한 원리를 구체화한 예들이 음악의 음계 (Octave, 옥타브), 임계 밴드폭 (Critical Bandwidth)^[10], 혹은 Gammatone^[11] 등과 같은 인간 청각 기관의 인식 모델들이다. 이와 같이 청각기관의 주파수 대역에 대한 인지량에 직접 관련된 양으로 머리전달함수의 주파수 특성을 환산하는 방법을 본 논문에서 소개한다.

첫 번째 단계는 기준점의 좌우측 머리전달함수 $H_L(f; r_0, \theta_0, \phi_0)$ 과 $H_R(f; r_0, \theta_0, \phi_0)$ 에 대하여 임의 공간에서 측정된 좌우측 머리전달함수 $H_L(f; r, \theta, \phi)$ 과 $H_R(f; r, \theta, \phi)$ 의 상대적 양을 다음 식에 따라 환산한다.

$$R_{L,R}(f; r, \theta, \phi) = \frac{H_{L,R}(f; r, \theta, \phi) \cdot H_{L,R}(f; r_0, \theta_0, \phi_0)^*}{|H_{L,R}(f; r_0, \theta_0, \phi_0)|^2} \quad (1)$$

식 (1)에서 아래 첨자 "L,R"는 좌측 혹은 우측을 의미하며 위첨자 *는 공액 복소수를 표시한다. 그리고, 기준점에 대한 선정은 스피커를 구성하는 방법에 따라 선정하며, 고도각 $\phi_0 = 0^\circ$ 으로 고정하고 방위각 $\theta_0 = 0^\circ$ 와 $\theta_0 = 30^\circ$ 두 가지를 사용하였다. 식 (1)에서 보인 상대적 머리전달함수 환산 기법은 음원의 공간 정보와는 무관한 다음 4 가지 항목에 대한 머리전달함수의 영향인자의 효과를 최소화할 수 있는 효과적 방법이다. (1) 음원 스피커의 음향 특성 (음향 출력 및 방향성 등) 인자, (2) 양귀 음압 측정용 마이크로폰의 전기적 그리고 음향학적 특성 인자, (3) 실험실의 음향 특성 (잔향 시간, 반사 및 흡음 특성) 인자, 그리고, (4) 머리전달함수의 측정 및 분석 장치들에서 수반되는 측정 오차 인자들의 영향 또한 최소화 할 수 있다.

두 번째 단계는 식 (1)에 따라 환산된 결과를 이용하여 인간 청각 특성 즉 주파

수 대역별 Masking 특성에 따른 공간 특성 인자를 추정하는 방법이다. 즉, 1/3 옥타브, 임계 밴드, 혹은 Gammatone 모델의 선정 대역 중심주파수를 f_c , 하한 주파수와 상한 주파수를 각각 f_L 와 f_H 라 하자. 임의 밴드폭 내의 머리전달함수의 유효 진폭은 다음과 같이 환산한다.

$$L_{L,R}(f_c) = \left\{ \int_{f_L}^{f_H} |R_{L,R}(f; r, \theta, \varphi)|^2 df \div (f_H - f_L) \right\}^{1/2} \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 가청 주파수 범위인 (16 Hz ~ 25 kHz)에 대한 1/3-옥타브, 임계 밴드별, 혹은 Gammatone 모델의 선정 중심 주파수에 대한 좌/우측 머리전달함수의 진폭을 각각 계산할 수 있다. 그리고, 방위각과 고도에 따라 측정된 모든 머리전달함수들을 식 (2)에 따라 환산함으로써 새로운 인자량적 머리전달함수의 진폭에 대한 데이터베이스 즉 $\{L_L(f_c; r, \theta, \varphi), L_R(f_c; r, \theta, \varphi); 0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ, -60^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ\}$ 를 구축할 수 있다. Fig. 2는 지금까지 소개한 연산 과정에 따라 구한 인자량적 머리전달함수의 진폭 특성을 보여 주고 있다.

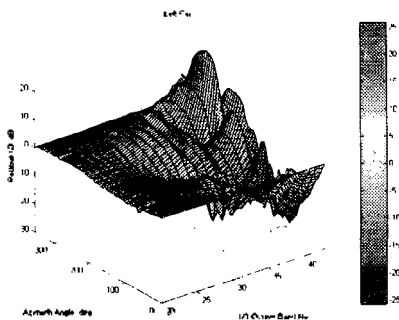


Fig. 2. An example of estimated perception-based ILD.

지금까지 소개한 두 번째 연산 단계는 청음자의 기준점에 대한 상대적 측정 음압의 크기를 이용함을 알 수 있다. 이는 다음과 같은 장점을 제공할 수 있다. (1) 머리전달함수 측정에 참여한 피시험자의 체격 인자 (양 귀, 머리, 어깨 및 상체의 크기 및 형상)에 대한 영향도 최소화: 기준점에 대한 피 시

험자별 변량 (Intervariability)이 최소화되는 기준점을 선정함으로써 청음자 자신의 체격에 맞는 상대적 감응량에 따라 인식도 부여. (2) 단순 물리량적 측정 머리전달함수에 수반된 수 많은 최소/최대 파크치에 의한 음색 왜곡 및 음질 저하를 최소화할 수 있는 방안 제공. (3) dB 단위로 연산된 양귀의 인지량적 음압 레벨 $\{L_L(f_c; r, \theta, \varphi), L_R(f_c; r, \theta, \varphi)\}$ 을 이용하여 기존의 이퀄라이저에 대한 대역별 레벨치를 직접 설정함으로써 공간 음상 정위의 새로운 구현 기법을 제공한다

지금까지는 양귀의 인지량적 음압레벨 차이 (PB-ILD)에 대한 소개를 하였다. 또 하나의 공간 음향 인지량은 양귀에 도달 음압의 시간차이 (ITL)에 대한 연산 기법을 고찰한다. 식 (1)에 따라 연산된 상대적 머리전달함수의 위상 성분에는 기준점에 대한 좌우측의 측정 음압 도달시간에 비례하는 선형 위상 (Linear Phase)성분이 존재한다. 이러한 선형적 위상 성분을 이용하면 기준점에 대한 상대적 음압 도달시간을 매우 정밀하게 추정하였다. 좌/우측의 상대적 머리전달함수의 위상을 $\Theta_L(f; r, \theta, \varphi), \Theta_R(f; r, \theta, \varphi)$ 라고 각각의 상대적 음압 도달 시간을 τ_L, τ_R 이라 하면, 다음 식 (3)에 주어진 최소 차승법의 추정 연산으로부터 정확히 환산된다.

$$\tau_{L,R}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{\int_{f_1}^{f_2} f \cdot \{\Theta_{L,R}(f; r, \theta, \varphi) - \Theta_{L,R}(f_1; r, \theta, \varphi)\} df}{f_2^3 - f_1^3} \quad (3)$$

위의 식 (3)에서 f_1 과 f_2 는 상대적 머리전달함수의 선형 위상 특성이 잘 만족하는 하단 주파수와 상단 주파수를 각각 나타내며, $\{\Theta_L(f; r, \theta, \varphi) - \Theta_L(f_1; r, \theta, \varphi)\}$ 는 하단 주파수 f_1 에 대한 주파수 f 에서의 상대적 위상이다. 본 연구팀은 상/하단 주파수는 $f_1 = 200$ Hz 그리고 상단 주파수 $f_2 = 1.25$ kHz의 대역에서 상대적 선형 위상을 측정할 수 있었다.

Fig. 3은 방위각과 고도가 0° 인 기준점을 선정하였을 때, 수평면에 위치한 음원의 방위각의 변화에 대한 좌우측 귀에 도달된 음압 도달 상대적 시간차를 각각 보이고

있다.

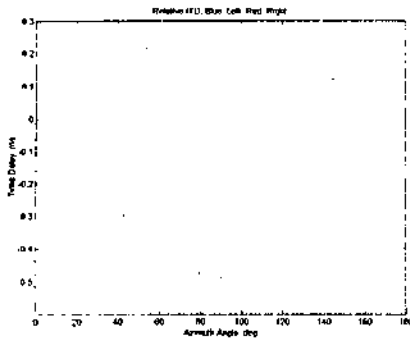


Fig. 3. Relative acoustic pressure-arrival time.

식 (1)의 상대 위상 정보와 식 (3)에 제시된 연산과정으로부터 모든 측정 머리전달함수에 대한 좌측 귀의 음압 도달시간 $\{\tau_L(r, \theta, \varphi), \tau_R(r, \theta, \varphi)\}$ 에 대한 데이터 베이스를 구축할 수 있다. 좌측 귀에 대한 음압 도달시간을 이용하여 양귀 사이의 도달 시간차이 (ITD)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_{L,R}(r, \theta, \varphi) = \tau_L(r, \theta, \varphi) - \tau_R(r, \theta, \varphi) \quad (4)$$

위 식은 좌측 귀에 대한 우측귀의 음압 도달 시간차이를 나타낸다. 물론 부호를 변경하면 우측 귀에 대한 좌측 귀의 도달 시간 또한 구할 수 있다. 이렇게 추정된 양귀 시간차이 $T_{L,R}(r, \theta, \varphi)$ 를 이용하여 공간에 원하는 음상을 정위하기 위하여는 사용자 선정이 가능한 시간 지연장치를 사용하여 원하는 채널에 시간지연을 적용함으로써 쉽게 수행할 수 있다.

지금까지 상대적 머리전달함수를 이용하여 인지량적 양귀 음압 도달시간 차이 $T(r, \theta, \varphi)$ 와 음압 레벨차이 $\{dB_L(f_c; r, \theta, \varphi), dB_R(f_c; r, \theta, \varphi)\}$ 를 환산하는 방법을 각각 소개하였다. 이러한 결과로부터 청음자와 음원의 상대적 위치 (r, θ, φ) 에 음상을 정위하는 문제는 최소한 양귀 음압 레벨차이 $\{dB_L(f_c; r, \theta, \varphi), dB_R(f_c; r, \theta, \varphi)\}$ 와 도달시간 차이 $T_{L,R}(r, \theta, \varphi)$ 를 동시에 설정을 필요로함을 알 수 있다. 그리고, 공간 음상 정위에 최소한의 필수 인자인 양귀 음압 레벨차이와 도달 시간차이를 실현하는 방법은 기존의 대역별 레벨 설정이 가능한 이퀄라이저와 디지털 시

간 지연기를 사용함으로써 실현할 수 있다는 점을 본 특허는 제안하고 있다.

3. 공간 음상 구현 방법

본 절에서는 앞서 소개한 공간 음상 정위를 위한 특성치 즉 인지량적 양귀 음압 레벨 차이 $\{L_L(f_c; r, \theta, \varphi), L_R(f_c; r, \theta, \varphi)\}$ 와 도달시간 차이 $T(r, \theta, \varphi)$ 에 대한 데이터베이스를 이용하여 원하는 삼차원 공간 음상 구현방법을 기술한다. 기존의 시간영역의 HRIR를 디지털 필터의 응답함수로 설정한 뒤 입력 음향 시간신호에 대한 디지털 필터링 연산 (FIR Filtering)을 수행함으로써 원음에 공간 정보를 코딩하게 된다. 이러한 HRIR를 직접 이용한 디지털 필터링 (FIR Filtering)기법의 자세한 연구는 William G. Gardner (1997년 MIT 박사학위 논문)에 자세히 소개되고 있으며, 국내의 대다수의 삼차원 음향 정위 기술은 이러한 디지털 필터링 (FIR Filtering) 기법에 속한다. 이러한 기존 기술은 최소한 FIR 필터를 실시간으로 구현할 수 있는 고속 디지털 연산 장치 (Digital Signal Processor, DSP)가 필요하며, DSP를 구현을 위한 연산 소프트웨어 또한 필요하게 된다. 이러한 구현 기법이 음향기기 시장에 현실적 뿌리를 내리지 못하고 있는 원인은 크게 두 가지 원인 때문이다.

첫째, 필터계수로 이용되는 시간영역의 단순 측정치인 HRIR값에 공간 음상정위에 전혀 불필요한 실험 인자들 (스피커의 음향학적 특성, 측정 마이크로폰의 전기/음향학적 특성, 피 시험자의 양귀 머리 상체의 크기 및 형상 변화, 측정 공간 음향 특성 등)이 내재되어 있어 불필요한 음색 왜곡과 음질 저하를 공간 음상 정위 시 피할 수 없다는 점이다. 수 많은 전문 음향 기사 및 연구 종사자들이 기존의 공간 음상정위 기술 분야에 지적하고 있는 첫 번째 문제점이 바로 음색 왜곡과 음질 저하이며, 기존 기술이 현실에 뿌리를 내리지 못하는 주된 요인이 되고 있다. 둘째, 디지털 필터링의 연산에 필요한 DSP 관련 하드웨어와 전문 소프트웨어로 구축한 음상재현 시스템은 성능과 고품위성은

최근 음향기기 기술과의 적지않은 거리감은 아직도 음향 설계분야 (음반, 방송, 영화, 멀티미디어 등)에서 매우 낮은 신뢰성을 얻고 있다는 점이다. 영국의 음상정위 관련 DSP 하드웨어와 소프트웨어 전문 기술진(영국 ISVR과 ARL 등)들도 기존의 단순 물리량적 측정 머리전달함수의 직접 사용에 의한 음색 왜곡과 음질저하에 대한 한계가 있다는 점을 인정하고 있으며, 효율적 공간 음상 정위를 위한 새로운 필터계수의 추정에 대한 필요성을 느끼고 있다.

기존의 측정 머리전달함수와 디지털 필터링 기술을 이용한 방법과는 달리 근면 특허에서는 청각기관의 공간인식에 대한 고전적 Lord Rayleigh의 개념인 양 귀의 음압레벨 차이와 도달시간을 이용하여 삼차원 음상 정위를 구현하는 기술이다. 음상정위의 두 가지 특성치인 양귀 음압레벨과 도달시간 차이를 최근의 실험적으로 구축된 머리전달함수를 이용하여 추정 방법과 이를 이용한 공간적 두 특성치의 데이터베이스 $\{dB_L(f_c; r, \theta, \varphi), dB_R(f_c; r, \theta, \varphi), T_{LR}(r, \theta, \varphi)\}$ 를 구축한다는 점이다. 이러한 특성치들의 공간에 대한 데이터베이스는 사용자가 음원과 청취자의 상대적 삼차원 좌표값 (r, θ, φ) 으로부터 양귀의 인지량적 음압레벨 차이 $\{dB_L(f_c; r, \theta, \varphi), dB_R(f_c; r, \theta, \varphi)\}$ 와 도달시간 차이 $T_{LR}(r, \theta, \varphi)$ 를 호출하여 사용하게 된다. 삼차원 좌표값 (r, θ, φ) 으로부터 호출된 양 귀의 인지량적 음압레벨 차이는 이퀄라이저의 대역별 레벨값의 설정에 각각 이용되며, 양귀의 도달 시간차이는 좌측 혹은 우측의 입력 신호에 대한 시간지연 장치의 설정치로 입력된다. 이러한 구현 방법은 앞서 설명한 DSP를 이용한 디지털 필터링 기법을 이용한 기존 삼차원 음향 설계 기술보다는 매우 간단할 뿐 아니라 현장 음향 전문 기술자나 연구자들이 사용하고 있는 음향장치 (이퀄라이저와 시간 지연기)로 구현이 가능하다.

제 4도는 이퀄라이저와 시간 지연기를 이용한 공간 음향 기록 구성도를 보이고 있다. 우선 청취자와 음원의 상대적 공간 정보 (r, θ, φ) 가 주어지면, 좌우 양 귀의 인지

량적 음압레벨 데이터베이스로부터 좌/우측 음향 채널의 대역별 이퀄라이저의 설정값 $\{dB_L(f_c; r, \theta, \varphi), dB_R(f_c; r, \theta, \varphi)\}$ 이 결정되며, 이들을 이용하여 좌우 채널의 이퀄라이저 이득율을 조정한다.

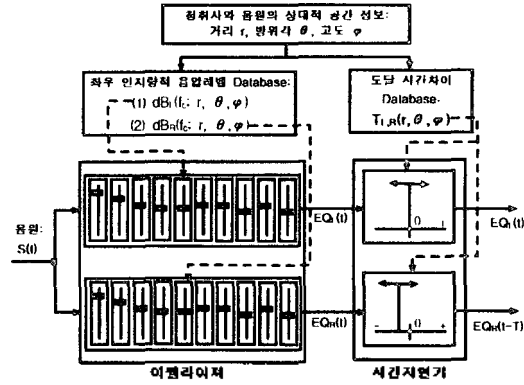


Fig. 4. Schematic diagram for recording spatial sound.

이렇게 설정된 좌우 이퀄라이저를 이용하여 입력된 원음 $S(t)$ 에 대하여 공간 음상 정위에 필요한 양귀 음압레벨 차이를 코당한 이퀄라이저의 출력신호 $EQ_L(t)$ 와 $EQ_R(t)$ 를 각각 얻게된다. 그리고, 설정 공간정보 (r, θ, φ) 에 따라 양귀 음압 도달 시간차이의 설정값 $\{T_{LR}(r, \theta, \varphi)\}$ 또한 결정되며, 이때 좌측과 우측 중 음압도달 시간이 늦은 채널에 상대적 지연시간을 설정한다. 만약 우측 채널의 음압 도달시간이 늦을 경우 즉 음원이 청취자의 좌측에 위치한 경우, 이퀄라이저의 출력신호 $EQ_L(t)$ 와 $EQ_R(t)$ 가 입력되면 시간 지연기는 $EQ_L(t)$ 와 $EQ_R(t-T_{LR})$ 신호를 출력한다 (Fig. 4 참고). 이와 같이 좌우측 이퀄라이저와 시간 지연기로 구성된 장치를 공간 음상 정보에 따라 동시에 설정하여 삼차원 공간 음상 구현을 가능하게 한다. 현재 상용화된 외장형 디지털 이퀄라이저와 디지털 딜레이의 구동은 컴퓨터 상에서 미디 컨트롤 혹은 시리얼 케이블을 통한 컨트롤이 가능하며 이들은 20 Bit 양자화와 48/96kHz 샘플링 (sampling rate) 성능을 동시에 제공하기 때문에 기존 CD 음질 이상의 고 음질 입체음향의 녹음을 실시간으로 구현할 수 있다.

지금까지의 구현 기술은 하드웨어로

구성된 음향장비를 이용한 삼차원 음향 녹음의 실 시간 기법을 설명하였다. 이러한 하드웨어 장치를 이용한 구현 기법을 디지털신호처리 소프트웨어로 또한 구현할 수 있다. 즉, 기존의 상용화되어 있는 신호처리 소프트웨어로 작성된 디지털 이퀄라이저 모사 장치와 디지털 시간 지연기의 모사 장치를 사용하여 앞서 제시된 하드웨어 장치의 설정방법과 동일하게 삼차원 공간 음상 정위를 또한 구현할 수 있다. 따라서, 신호처리용 소프트웨어를 이용하여 본 특허에서 제시한 양귀 인지량적 음압레벨 차이에 따라 대역별 이퀄라이저의 기능 수행과 좌우 채널간의 시간 지연을 수행하여 삼차원 공간에 음상을 정위하는 기법들은 본 특허 내용에 포함된다.

4. 결론

금번 연구는 측정 머리전달함수를 직접 이용한 공간 음상 정위에 직면하는 주된 문제점인 음색왜곡과 음질저하를 최소화할수 있는 방안을 제시하고 있다. 측정 머리 전달함수로부터 청각기관의 공간 음상에 대한 인지양적 특성치 (양귀 음압레벨 차이 ILD와 음압 도달시간 차이 ITD)를 추정하는 새로운 방법의 제안, 공간 음상정위 특성치의 새로운 DB 구축, 그리고 이를 이용한 공간 음상 정위 구현방법의 새로운 방안에 대한 연산 방법을 제시하였다. 그리고, 기존의 이퀄라이저와 시간 지연기의 구성으로 공간 음상을 구현하는 새로운 방법 또한 소개하였다. 특히, 본 논문에서 제시된 기법은 음색 왜곡 및 음질저하를 최소화할 뿐 아니라 구현 방법의 간결성 때문에 제품화로 직접 적용할 수 있는 장점을 제공한다.

끝으로, 본 연구 내용은 과기부 감성공학 과제(98-G-17-01-A-03-02)의 지원으로 수행되었으며, 본 논문의 주요 내용은 특허로 출원되어 있다.

Reference

- [1] F. Wightman and D. Kistler, "Headphone Simulation of Free-field Listening: I. Stimulus Synthesis," *J. Acoust. Soc. Am.*, 85(6), pp. 858-867, 1989
- [2] F. Wightman and D. Kistler, "Headphone Simulation of Free-field Listening: II. Psychophysical validation," *J. Acoust. Soc. Am.*, 85(6), pp. 868-878, 1989
- [3] H. Moller, *et al*, "Head-Related Transfer Functions of Human Subjects," *J. Audio Eng. Soc.*, 43(5), pp. 300-321, 1995
- [4] W. Gardner, *et al*, *HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone*, MIT Media Lab Perceptual Computing - Technical Report #280, MIT, 1994.
- [5] W. Gardner, *3-D Audio Using Loudspeakers*, Ph. D. Thesis, MIT, 1997
- [6] 정 완섭 외 3 인, "머리전달함수를 이용한 음상정위의 문제점 고찰," 1999년 한국음향학회 학술대회 논문집, 18 (1s), pp 149-152, 1999.
- [7] Lord Rayleigh, "On our perception of sound direction", *Philosophical Magazine*, 13, pp. 214-232, 1907
- [8] J. Blauert, *Spatial Hearing*, MIT Press, Cambridge:MA, 1983
- [9] D. R. Begault, *3-D Sound*, AP Professional, Chestnut Hill: MA:1994
- [10] E. Zwicker, H. Fastl, *Psychoacoustics: Facts and Models*, Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [11] R.D. Patterson, M. Allerhand, C. Giguere, "Time-domain modeling of peripheral auditory processing: A modular architecture and a software platform," *J. Acoust. Soc. Am.*, 98, pp. 1890-1894, 1995