

확장된 음향적 시차 모델을 이용한 음상 거리정위의 모델화

Modeling of Distance Localization by Using an Extended Auditory Parallax Model

김 해 영*
(Hae-Young Kim*)

* 동명정보대학교 정보공학부 멀티미디어공학과

(접수일자: 2003년 9월 7일; 수정일자: 2003년 11월 28일; 채택일자: 2003년 12월 17일)

본 연구는 3차원 공간상에 있어서의 음상정위를 제어하기 위한 디지털 신호처리 기술, 특히, 음상의 거리정위에 있어서의 머리전달함수(HRTF)의 역할에 착안한 신호처리 기술을 확립하기 위한 것을 목적으로 한다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 본 논문에서는 청각에 있어서의 거리 지각을 제어하기 위한 중요한 요소를 밝혀내기 위해 기존의 Hirsch-Tahara 모델과 음향적 시차 모델에 대해서 청각 실험을 행했다. 그 결과 이 두 모델에 있어서는 음상의 거리지각을 설명하기에는 한계와 전 방향에 있어서는 적용할 수 없는 문제점이 있었다. 이러한 문제점들을 고려해 본 논문에서는 음향적 시차 모델을 전 방향에 있어서 적용 가능하도록 확장된 음향적 시차 모델을 제안해 그 유효성에 대해 청취 실험을 통해 고찰했다. 그 결과, 본 논문에서 제안한 확장된 음향적 시차 모델을 이용하면 수평면 상의 전 방향에 있어서 약 2 m 까지의 범위 내에서는 실제 음원에서 지각할 수 있는 거리와 거의 같은 수준으로 음상의 거리를 제어함으로써 본 모델의 유효성을 인간을 대상으로 한 청취실험을 통해 증명했다.

핵심용어: 음상정위, 청각계의 거리정위, 머리전달함수(HRTF), 음상정위의 제어, 음향적 시차, 거리정위의 모델링

투고분야: 건축음향 분야 (7.7), 음악음향 및 심리음향 분야 (8.3)

This study aims at establishing a digital signal processing technique to control 3-D sound localization, especially focusing our eyes on the role of information provided by Head-Related Transfer Function (HRTF). In order to clarify the cues to control the auditory distance perception, two conventional models named Hirsch-Tahara model and auditory parallax model were examined. As a result, it was shown that both models have limitations to universally explain the auditory distance perception. Hence, the auditory parallax model was extended so as to apply in broader cases of auditory distance perception. The results of the experiment by simulating HRTFs based on the extended parallax model showed that the cues provided by the new model were almost sufficient to control the perception of auditory distance from an actual sound source located within about 2 m.

Keywords: 3-D sound localization, Auditory distant perception, HRTF, Control of sound localization, Auditory parallax, Modeling of distant perception

ASK subject classification: Architectural acoustics (7.7), Musical acoustics and psychoacoustics (8.3)

I. 서론

입체음향을 이용한 청각 디스플레이 시스템을 구성함에 있어서 3차원 음향 공간내의 음상정위의 제어는 가장 중요한 기반 기술 중의 하나이다. 이러한 음상의 제어

에는 자유공간에서의 음원으로부터 청취자의 귀까지의 전달특성으로 정의되는 머리전달함수를 합성하는 방법이 유효하다. 이와 같은 방법에 의한 수평면이나 정중앙면 정위와 같은 방향정위의 제어는 어느 정도 정확하게 제어가 가능한 것으로 알려져 있다[1,2].

한편, 거리정위의 제어에 있어서는 두 귀에 입력되는 신호의 크기나 반사음 성분의 에너지를 제어함으로써, 음상의 원근감의 제어가 어느 정도는 가능하지만, 귀 입

책임저자: 김해영 (hykim@tit.ac.kr)
608-711 부산시 남구 용당동 535
동명정보대학교 정보공학부 멀티미디어공학과
(전화: 051-610-8418; 팩스: 051-610-8848)

력신호의 크기나 반사음성분의 제어만으로는 음상을 임의의 위치에 제시하는 것이 어렵다[3,4]. 이론상으로는 머리전달함수를 모의함으로써 근거리 음상의 거리정위는 어느 정도까지는 제어가 가능하다[5-7]. 그러나, 머리 전달함수의 어떠한 요인이 음상의 거리감에 영향을 미치는가와 그 구조에 관해서는 그다지 명확하게 알려져 있지 않다.

본 논문에서는 머리전달함수의 어떠한 요인 (cue)을 이용하여 거리지각을 하고 있는가, 또한 어떠한 구조로 거리정위를 하고 있는가를 알기 위해, 머리전달함수를 이용한 근거리에서의 음상거리지각을 모델화해서 그 유용성에 대해서 인간을 대상으로 한 청취실험을 통해 검토했다.

II. 모든 방향에 적용 가능한 확장된 음향적 시차 모델의 제안

필자는 지금까지 근거리에서의 음상의 거리지각의 모델로서, Tahara 등에 의한 음원거리에 따른 양 귀사이의 시간차 (ITD)와 레벨차 (ILD)의 변화에 착안한 Hirsch-Tahara 모델[8,9]과 음원거리가 변화하면 양 귀에서 음원을 들여다본 음향적 시차가 변화하는 것에 착안한 음향적 시차 모델을 제안해 그 유효성과 한계에 관해서 고찰해 왔다[10].

이 장에서는 Tahara-Hirsch 모델과 필자가 제안했던 음향적 시차 모델의 원리와 문제점에 대하여 논한다. 또한, 두 모델의 문제점을 보완하여 모든 방향의 거리정위에 대하여 일반적으로 적용하기 위해 음원으로부터 양 귀까지의 경로 차에 의한 양 귀간 시간차와 레벨차를 고려한 확장된 음향적 시차 모델을 제안한다.

2.1. Hirsch-Tahara 모델

그림 1에 음원의 위치와 양 귀간의 시간차와 레벨차의 관계를 나타내었다. Hirsch-Tahara 모델에서는 그림 1과 같이 양 귀를 포함한 수평면상에서 양 귀 및 음원위치를 $A(-a, 0)$, $B(a, 0)$, $P(x, y)$ 라고 하면, 머리의 영향을 무시하면 양 귀에 대한 거리차 ($\Delta d = PA - PB$) 및 거리의 자승비 ($k = PA^2 / PB^2$)가 일정하게 되는 P점 ($x, y > 0$)의 궤적은 각각 식 (1)의 쌍곡선 및 식 (2)의 원으로 나타낼 수 있다.

$$x^2 - \frac{\Delta d^2}{(2a + \Delta d)(2a - \Delta d)} \cdot y^2 = \left(\frac{\Delta d}{2}\right)^2 \quad (1)$$

$$\left\{x - \left(\frac{k+1}{k-1}\right)a\right\}^2 + y^2 = \left(\frac{2\sqrt{ka}}{k-1}\right)^2 \quad (2)$$

Hirsch-Tahara 모델에서는 음원으로부터 양 귀까지의 시간차 Δt 와 레벨차 ΔL 이 주어지면 음원으로부터 양 귀까지의 거리차 Δd 와 레벨비 k 가 구해져, 식 (1)과 식 (2)의 교점에서 음상의 위치가 지각된다고 가정하고 있다.

그러나, 실제에서는 머리와 귓바퀴의 영향을 받아 Δt 와 ΔL 이 일정하게 되는 궤적은 단순한 쌍곡선이나 원으로는 되지 않는다. 또한, Hirsch-Tahara 모델은 머리카 귓바퀴에 의한 머리전달함수의 변화를 고려하지 않은 점과 두 귀에 입력되는 음의 시간차와 레벨차가 생기지 않는 정면 방향이나 정후면 방향에는 적용할 수 없다는 문제점이 있다.

2.2. 음향적 시차 모델

음원의 거리에 의한 머리전달함수는 머리카 귓바퀴가 음향필터로 작용함으로써 많은 변화를 받게된다. 이 음향필터의 특성은 음원의 방향에 크게 의존하고 있는 것으로부터 음상의 거리정위는 양 귀와 음원이 이루는 방향에 의해 크게 영향을 받는다고 가정할 모델이 음향적 시차 모델이다[10].

그림 2에 양 귀에서 음원이 이루는 방향과 거리의 관계

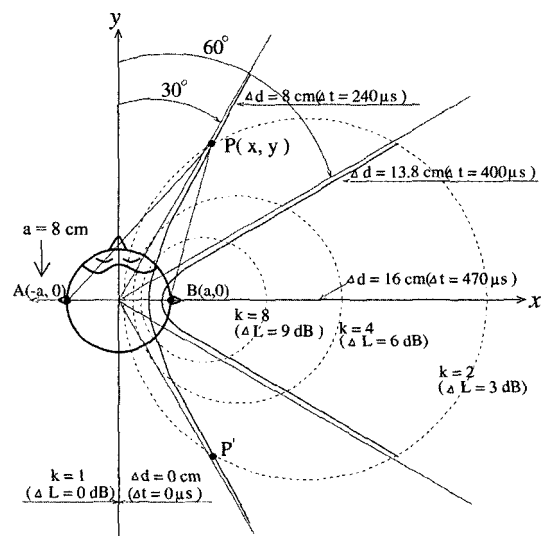


그림 1. 음원위치와 양 귀간 시간차 및 레벨차와의 관계
Fig. 1. Relation of interaural time difference and level difference of the sound source position shown by Tahara[8].

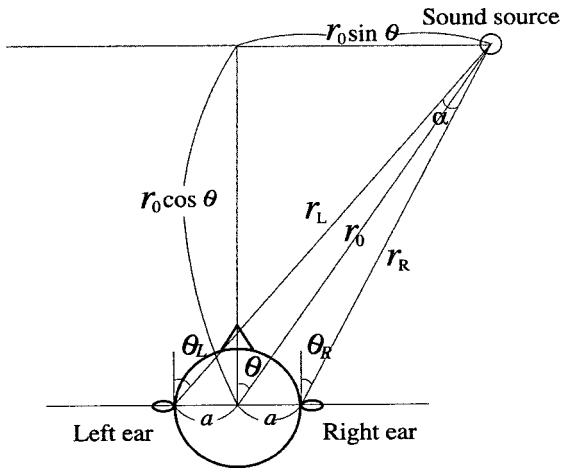


그림 2. 음원위치로부터 양 귀까지의 경로차
 Fig. 2. Difference of the length of sound propagation paths from sound source to both ears.

를 나타내었다. 그림 2와 같이 음원에서 머리의 중심까지의 거리가 r_0 일때, 양 귀와 음원이 이루는 방위각 θ_L , θ_R 과 음원과 머리의 중심이 이루는 방위각 θ 와의 관계는 각각 식 (3) 및 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_L = \tan^{-1}((r_0 \sin \theta + a)/r_0 \cos \theta) \quad (3)$$

$$\theta_R = \tan^{-1}((r_0 \sin \theta - a)/r_0 \cos \theta) \quad (4)$$

여기서, 양 귀와 음원이 이루는 방위각의 차를 음향적 시차 α 라 하면, $\alpha = |\theta_L - \theta_R|$ 로 나타낼 수 있다. 이 음향적 시차 α 는 음원까지의 거리 r_0 가 멀어짐에 따라 점점 작아짐을 알 수 있다. 음향적 시차 모델에서는 음원과 양 귀가 이루는 방위각의 차인 α 의 크기에 의해서 지각되어

지는 거리가 달라진다고 가정하고 있다. 이 가정으로부터 음향적 시차 모델에 의한 음상의 거리정위의 모의계는 2채널 스피커에 의한 모의방법[5-7]으로 실현할 수 있다.

그림 3에 음향적 시차 모델 음상을 실현하기 위한 모의계를 나타내었다. 이 모델에 의한 음상의 거리정위의 제어 위해 머리전달함수를 합성할 때에는 음원의 방향변화에 의한 머리전달함수가 받는 스펙트럼의 변화만을 거리정위의 실마리 (cue)로 제공하기 위해 음원으로부터 양 귀까지의 경로를 $D_{AR} = D_{BL} = L$ 로 일정하게 함으로써 시간차와 레벨차를 생기지 않게 한다. 그림 3에서 파선으로 표시되는 D_{AR} 과 D_{BL} 은 각각 가상음원 A로부터 오른쪽 귀까지의 전달함수와 가상음원 B로부터 왼쪽 귀까지의 머리전달함수이며, 점선으로 표시된 전달함수 D_{AL} 과 D_{BR} 은 0으로 둔다. 이들 전달함수 D_{AR} , D_{BL} 및 D_{AL} , D_{BR} 은 2채널 스피커를 이용한 모의방법[5-7]에 의해 합성한 디지털 필터 X_1 와 X_2 로 실현할 수가 있다. 여기서 합성한 디지털 필터 X_1 와 X_2 에 자극음을 가해 스피커 SP_1 과 SP_2 를 이용해 제시하면 가상음원 A와 오른쪽 귀, 가상음원 B와 왼쪽 귀를 연결한 선의 교차점 P에 음상이 지각된다고 가정하고 있다. 그러나, 음향적 시차 모델에서는 음향적 시차가 생기지 않는 옆 방향에는 적용할 수 없으며, 또한 음원이 정면외의 방향에 있을 경우에는 음원으로부터 양 귀 사이까지의 경로차가 발생하지만 이를 고려하지 않은 문제점이 있다.

2.3. 확장된 음향적 시차 모델의 제한

앞에서 기술한 두 모델의 문제점을 보완하여 모든 방향

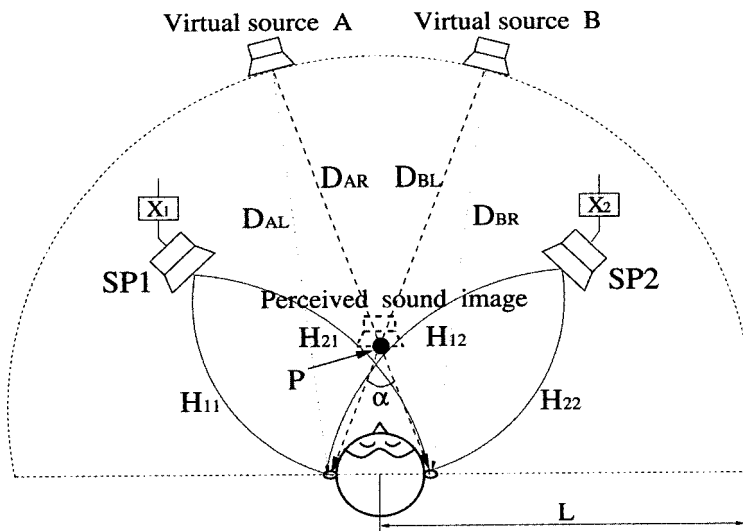


그림 3. 음향적 시차 모델에 위한 전달함수의 모의계
 Fig. 3. Schematic diagram of the simulation system base on the auditory parallax model[10].

의 거리정위에 대하여 일반적으로 적용하기 위해 음원으로부터 양 귀까지의 경로 차에 의한 양 귀간 시간차와 레벨차를 고려한 확장된 음향적 시차 모델을 제안한다.

어떤 음원으로부터 양 귀까지의 거리와 경로 차의 관계를 나타내는 그림 2에서, 음원으로부터 머리의 중심까지의 거리가 r_0 일 때, 음원으로부터 좌우 각각의 귀를 들어다 본 방위각 θ_L, θ_R 과 음원으로부터 좌우의 귀까지의 거리 r_L, r_R 의 관계는 각각, 식 (5)과 식 (6)로 표현된다.

$$r_R = r_0 \cos \theta / \cos \theta_R \quad (5)$$

$$r_L = r_0 \cos \theta / \cos \theta_L \quad (6)$$

여기서, $\theta \neq 90^\circ$ 이다. 단, $\theta = 90^\circ$ 일 때는, 머리의 반경을 a 라고 할 때, $r_L = r_0 + a, r_R = r_0 - a$ 이다. 따라서, 이 두 식으로부터 음원으로부터 양 귀까지의 경로차 Δd 는 식 (7)으로 주어진다.

$$\Delta d = |r_L - r_R| \quad (7)$$

그러므로, 경로차 Δd 가 결정되면, 음속을 c 로 하였을 때의 양 귀간의 시간차 Δt 와 양 귀간 레벨차 ΔL 은 식 (8) 및 식 (9)로 나타내어진다.

$$\Delta t = \Delta d / c \quad (8)$$

$$\Delta L = 10 \log_{10} (r_L^2 / r_R^2) \quad (9)$$

그림 4에 확장된 음향적 시차 모델에 기초한 음상거리 정위의 제어제를 나타낸다. 확장된 음향적 시차 모델에서는 음향적 시차 모델에 기초해서 정해진 가상적인 두

개의 음원으로부터 좌우의 귀까지의 전달함수에 각 음원 거리에 의한 양 귀간의 시간차와 레벨차를 더해주는 것에 의해 임의의 방향에 대한 임의의 거리에서 음상의 위치가 정위되어진다고 가정한다.

그러므로, 확장된 음향적 시차 모델에서 제어해야 할 머리전달함수는 스피커 A로부터는 우측 귀까지의 머리 전달함수와 스피커 B로부터는 좌측 귀까지의 머리 전달 함수에 음원위치로부터 양 귀까지의 경로 차에 의한 시간차 Δt 와 레벨차 ΔL 을 부여한 것이다. 음원이 옆 방향에 있는 경우에는 양 귀간의 시간차는 음원 거리에 관계없이 일정한 값을 가지기 때문에, 식 (9)에 의한 양 귀간 레벨차만이 변화한다. 여기서, 양 귀간에 부여된 시간차와 레벨차는 식 (8) 및 식 (9)를 이용하여 계산할 수 있다.

그리고, 식 (8) 및 식 (9)에 의해 구해진 양 귀간 차를 음향적 시차 모델에 의해서 측정된 머리전달함수에 부가할 때에는 음원 측의 우측 귀를 기준으로 음원과 반대 측에 있는 좌측 귀의 전달함수에 양 귀간의 시간차와 레벨차를 더한 것으로 한다. 즉, 우측 귀의 경우에는 확장된 음향적 시차 모델은 음향적 시차 모델에 의해 측정된 전달함수를 그대로 사용한다. 음원과 반대측에 있는 좌측 귀의 경우에는 음향적 시차 모델에 의해 측정된 머리 전달 함수에 양 귀간의 시간차와 레벨차를 더해줌으로써 실현 가능하다. 여기서 정면 방향 및 정후면 방향의 경우에는 음원으로부터 양 귀까지의 경로차가 생기지 않기 때문에 확장된 음향적 시차 모델로부터 양 귀에서 실현되는 전달 함수는 음향적 시차 모델에 기초해서 측정된 머리 전달 함수와 동일하게 된다. 이런 전달함수를 2개의 스피커를 이용한 머리전달함수의 모의방법[5-7]에 의해서 실현한다.

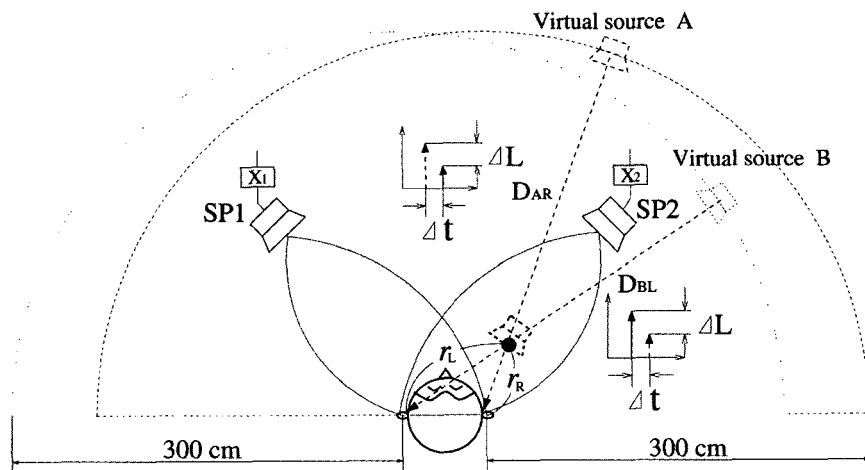


그림 4. 확장된 음향적 시차 모델에 기초한 음상거리의 제어제
 Fig. 4. Schematic diagram of the simulation system based on the extended auditory parallax model.

III. 청취실험에 의한 주관평가

인간을 대상으로 한 청취실험은 무향실 (세로: 7.0 m, 가로: 4.6 m, 높이: 2.5 m)에서 하였다. 청취자는 정상적인 청력을 가진 20대의 성인 남자 4명으로 본 연구에서 진행된 모든 실험에 참가했다. 실험에 사용된 신호원은 20 kHz 이하에 대역 제한된 핑크노이즈 (pink noise)를 사용하였다. 또한, 귀 입력 신호의 세기가 거리판정의 실마리가 되는 것을 막기 위해 어떠한 거리에 있어서도 청취자의 머리 중심 위치에서의 음압레벨이 일정하게 되도록 제시했다. 청취자에게는 무작위로 제시되는 자극음의 음상거리를 판단하고 0~5 m 까지의 범위에서 10 cm 간격으로 눈금을 그은 회답용지에 음상의 위치를 표시하도록 지시했다.

3.1. 실제 음원에 의한 음상의 거리정위실험

여기서는 실제 음원의 거리를 어느 정도 정확하게 지각하는지에 대해서 조사했다. 그림 5는 실제 음원을 이용한 음상의 거리정의 실험계의 구성을 나타낸다. 음원은 청취자의 귀의 높이에 설치한 가동 음원 (폴 레인지 스피커, Postex SP-100)을 사용했다. 또한, 음원과 청취자와의 사이에는 커튼을 쳐서 음원에 관한 시각 정보를 주지 않도록 했다. 가동음원이 이동할 때 발생하는 음을 마스크 하기 위해 음원의 이동 중에는 별도의 스피커로부터 잡음 (white noise)을 방사했다. 자극음은 무작위하게 각각의 거리에 대해서 20 회씩 제시했다. 실제 음원의 방향과 거

리는 수평면 내의 정면 방향, 우측 45° 방향, 우측 90° 방향, 우측 135° 방향, 정후면 방향에 대해서 각각 음원거리를 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200 cm로 했다.

3.2. 머리전달함수 모의에 의한 음상거리의 제어실험

모의한 음원은 실제 음원에서 설정한 것과 같은 방향, 같은 거리에서 머리전달함수를 측정했다. 측정한 각각의 거리에서의 머리전달함수를 2개의 스피커를 이용한 전달함수 모의 방법[5-7]으로 제어용 필터를 설계했다. 제어용 스피커는 청취자의 머리의 중심에서부터 120 cm 의 거리의 전방좌우 45° 에 배치했다. 자극음은 설계한 제어용 필터에 20 kHz 이하의 대역 핑크노이즈를 가해서 무작위하게 선택된 각각의 거리에 대해 6회씩 제시했다.

3.3. Hirsch-Tahara 모델에 의한 음상거리의 제어실험

Hirsch-Tahara 모델에 기초해서 양 귀 사이의 시간차와 레벨차 만을 이용해 가상음상의 거리를 제어하기 위한 실험을 행했다. 모의한 음원의 거리는 우측 30° 방향, 우측 45° 방향, 우측 60° 방향의, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 150, 200 cm로 했다. 각 방향의 각각의 거리에 대한 양 귀 사이의 시간차와 레벨차를 계산하여 2개의 스피커를 이용한 전달함수의 모의방법[5-7]을 이용해 전 주파수대역에서 평탄하고 양 귀 사이의 시간차와 레벨차 만을 가진 펄스신호에 핑크노이즈를 더하여 자극음을 합성했다. 자극음의 제시는 무작위하게 각각의 거리에 대

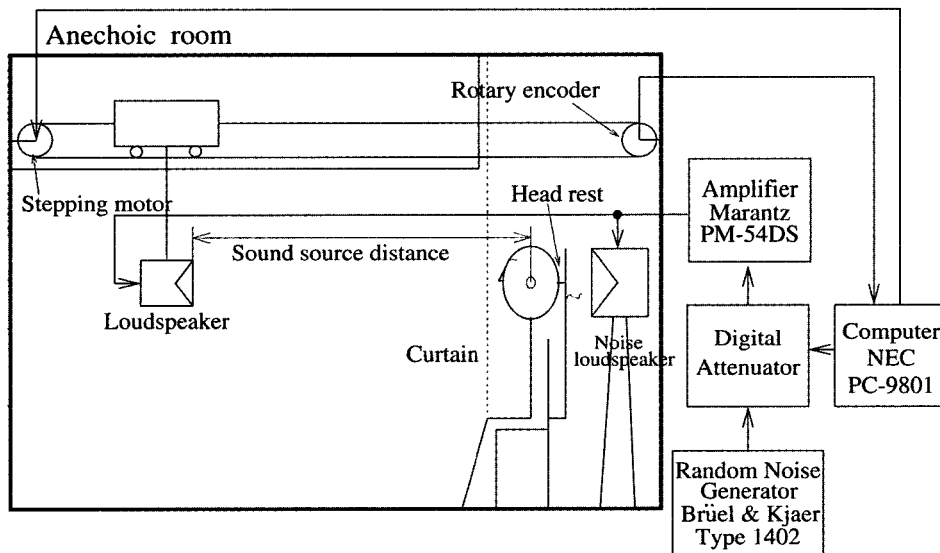


그림 5. 실제 음원을 이용한 청취실험계의 구성

Fig. 5. Schematic diagram of the experimental arrangement for distance perception with actual sound source.

해 6회씩 제시했다.

3.4. 음향적 시차 모델에 기초한 거리정위의 제어실험

음향적 시차 모델에 기초한 거리정위 제어실험을 그림 3와 같은 방법으로 머리전달함수를 측정해 2개의 스피커를 이용한 전달함수의 모의방법[5-7]에 의해 합성했다. 음향적 시차 모델에 기초해서 모의한 음원의 방향과 거리는 정면 방향, 우측 45° 방향, 우측 135° 방향, 정후면 방향의 각 방향에 대해 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 125, 150, 175, 200 cm이다.

3.5. 확장된 음향적 시차 모델에 기초한 음상거리의 제어실험

음향적 시차 모델을 옆 방향을 포함하는 모든 방향의 거리정위에 대해서 일반적으로 적용하기 위해 음원으로 부터 양 귀까지의 경로차에 의한 양 귀간의 시간차 및 레벨차를 고려하고 청취실험을 통해서 그 유효성에 대해 고찰했다. 확장된 음향적 시차 모델에서 모의하고자 하는 머리전달함수는 음향적 시차 모델에 기초해서 측정된 머리전달함수에 식 (8) 및 식 (9)에서 계산한 각 음원으로 부터 양 귀까지의 시간차와 레벨차를 가해줌으로써 얻을 수 있다. 모의에 이용한 가상음원은 정면 방향, 우측 45° 방향, 우측 90° 방향, 우측 135° 방향, 정후면 방향에 대해서 각각의 음원거리는 10, 20, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 125, 150, 175, 200 cm로 정했다. 자극음은 그림 4의 실험계에 의해 설계된 제어용 필터에 20 kHz 이하의 대역을

제한한 핑크노이즈를 가해서 각각의 거리에 대해서 무작위하게 6회씩 제시했다.

IV. 청취실험 결과 및 고찰

그림 6에 실제 음원에 의한 음상의 거리정위 실험 결과를, 그림 7에 2개의 스피커를 이용한 전달함수의 모의에 의한 음상거리의 제어실험 결과를, 그림 8에 Hirsch-Tahara 모델에 기초한 음상거리의 제어실험 결과를, 그림 9에 음향적 시차 모델에 기초한 음상거리의 제어실험 결과를, 그림 10에 확장된 음향적 시차 모델에 기초한 음상거리의 제어실험 결과를 나타내었다. 그림의 횡축은 제시한 거리를, 종축은 지각된 음상의 거리를 청취자 4명의 평균치로 나타내고 있다. 그림에서 나타난 오차봉은 ± 1 표준편차의 범위를 나타내고 있다.

먼저, 그림 6의 실제 음원에 의한 음상거리정위의 실험 결과를 보면, 1~1.5 m 정도까지의 근거리에서 있어서는 음원거리가 증가함에 따라 지각한 음상거리가 증가하지만, 음원거리가 멀어짐에 따라 음상거리의 증가의 비율이 작아 진다. 이러한 결과로부터 반사음이 존재하지 않고 청취자 위치에서의 음압레벨이 일정한 조건하에서는 실제 음원의 거리정위가 가능한 범위는 1~1.5 m 이내의 근거리라는 것을 알 수 있다.

그림 7의 각 거리에서 측정된 머리전달함수를 모의한 경우의 결과를 보면 모의한 거리가 1 m 이내에서는 모의

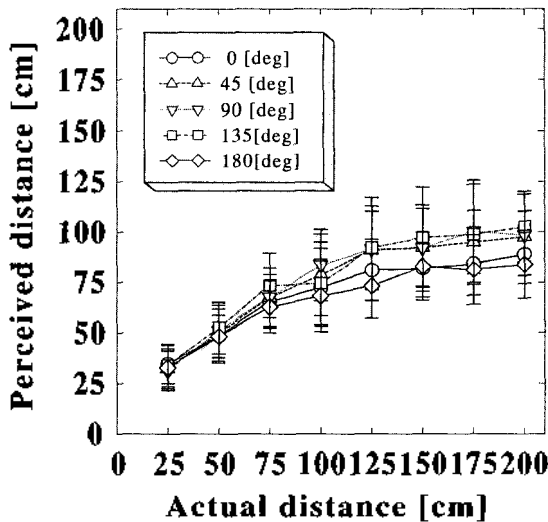


그림 6. 실제 음원에 의한 음상거리정위의 실험결과
Fig. 6. Perceived distance from an actual sound source to a listener when the sound level at the subject's position was kept constant.

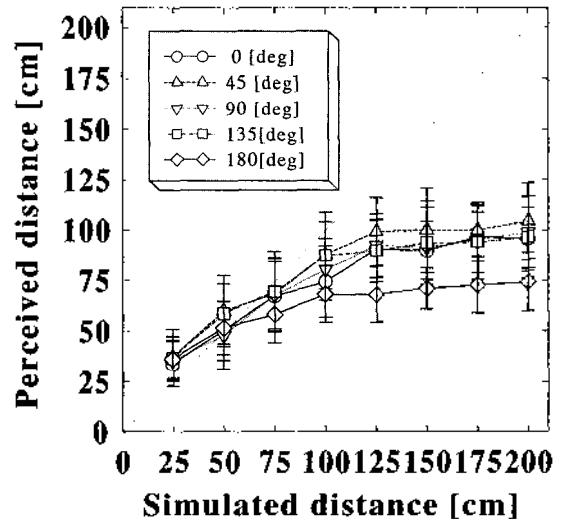


그림 7. 머리전달함수의 모의에 의한 음상거리의 제어실험 결과
Fig. 7. Perceived distance from a simulated sound source to a listener with synthesized HRTFs.

한 거리의 증가에 따라 지각한 거리가 증가하고 있으나, 거리가 멀어짐에 따라 지각한 거리의 증가가 점점 작아지는 경향이 있다. 이 결과는 실제 음원을 이용한 실험결과와 같은 경향을 나타내고 있다.

그림 8의 Hirsch-Tahara 모델에 의한 음상거리의 제어 실험의 경우에는 모든 방향에 대해서 약 40 cm 정도까지의 근거리에서는 모의한 음상거리에 대해서 지각된 음상거리가 증가하지만 음원의 거리가 멀어짐에 따라서 음상거리의 증가는 거의 변하지 않았다.

그림 9의 음향적 시차 모델에 기초한 음상거리의 제어 실험결과로부터 실험을 행한 전 방향에 있어서 근거리의

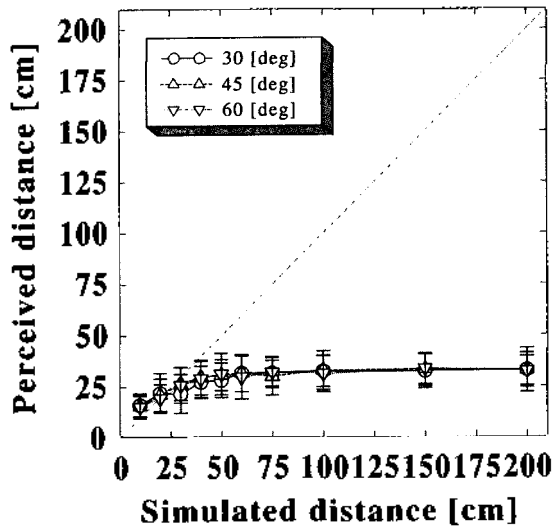


그림 8. Hirsch-Tahara 모델에 의한 음상거리의 제어 실험결과
Fig. 8. Perceived distance from a simulated sound source to a listener with the interaural time difference and interaural level difference of the sound.

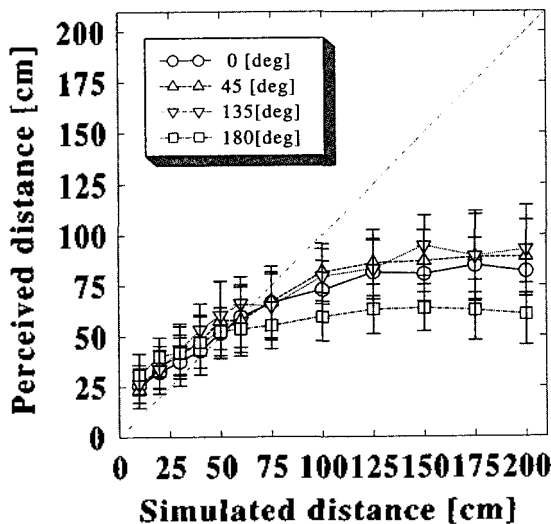


그림 9. 음향적 시차 모델에 기초한 음상거리의 제어 실험결과
Fig. 9. Perceived distance from simulated sound source to a listener with parallax information.

경우는 모의한 거리의 증가에 따라 지각한 거리가 약 1 m 이내에서는 증가하고 있으나 거리가 멀어짐에 따라서 지각한 거리의 증가가 원만해졌다. 그러나, 측면 90° 방향에서는 음향적 시차가 발생하지 않으므로 적용이 불가능하다.

그림 10의 확장된 음향적 시차 모델에 기초한 음상거리의 제어 실험결과는 실제 음원에 의한 음상거리의 정위 실험결과와 비슷하게 약 1.25 m 까지의 거리에서는 모의

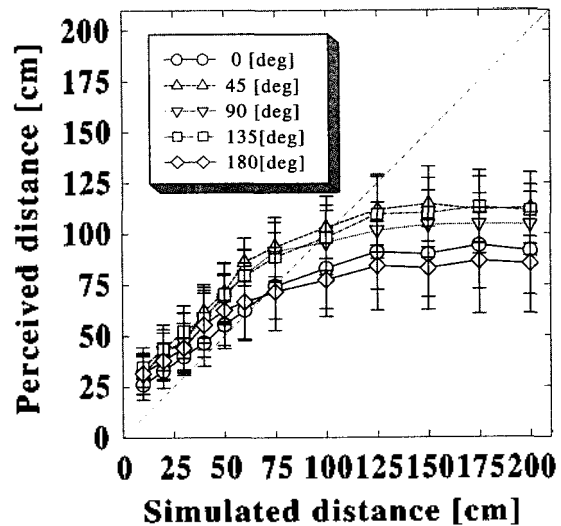


그림 10. 확장된 음향적 시차 모델에 기초한 음상거리의 제어 실험결과
Fig. 10. Perceived distance from simulated sound source to a listener with parallax information and interaural difference.

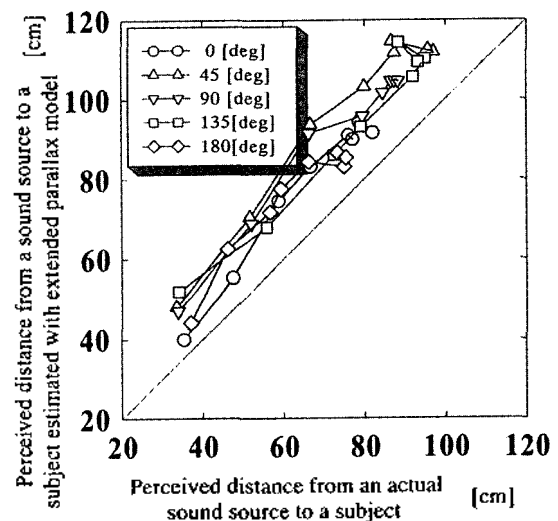


그림 11. 실제 음원과 확장된 음향적 시차 모델에 의해 지각된 음상거리의 비교
Fig. 11. Comparison of the perceived distances from actual sound source and simulated sound source to a listener with parallax information and interaural difference.

한 거리의 증가에 따라 지각한 거리가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그 이상의 거리에서는 모의한 음원의 거리가 멀어짐에 따라 지각한 거리에 포화하는 경향을 나타내고 있다.

이것은 음원거리가 멀어질수록 음원에서 양 귀를 본 음향적 시차의 변화가 작아 지는 것과 음원거리가 어느 정도 멀어지면 음원에서부터의 양 귀까지의 경로차에 의한 시간차 및 레벨차가 작아져서 음상거리의 변화를 지각하기가 어려워지는데 원인이 있다고 생각되어진다.

그림 11은 확장된 음향적 시차 모델에 기초한 방법에 의해 지각된 음상거리를 같은 조건하에서 실제 음원에 의해 지각된 음상거리와 비교해서 청취자 4 명의 평균치로 나타냈다. 그림의 횡축은 실제 음원에 의해 지각된 음상 거리를, 종축은 확장된 음향적 시차 모델에 의해 지각된 음상거리를 나타내고 있다. 그림으로부터 실제 음원을 이용해서 각 거리에서의 자극음을 제시한 경우와 확장된 음향적 시차 모델에 기초해서 음상거리를 모의한 경우 모두 약 1.25 m 까지의 거리에서는 모의한 거리의 증가에 따라 지각한 거리가 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 그 이상의 거리에서는 모의한 음원의 거리가 멀어짐에 따라 지각한 거리가 포화하는 경향이 보여진다. 또한, 확장된 음향적 시차 모델에 기초한 방법에 의해 지각된 음상거리는 실제 음원에 의해 지각된 음상거리보다 멀리 지각되어졌다. 그러나, 그 비율은 각 거리나 방향에 의하지 않고 거의 일정하며, 지각되어진 음상거리가 대각선을 따라서 거의 평행하게 대응하고 있다는 것을 알 수 있다.

함수의 음향적 시차정보에 더해져진 양 귀간의 시간차와 레벨차가 머리의 존재를 무시한 조건에서의 값이기 때문에 실제 음원으로부터 양 귀까지의 양 귀간 차와는 약간의 차가 있다는 점을 들 수 있지만, 그 경향은 각 거리에서 거의 같은 값을 가지고 있다. 이러한 점들로부터 확장된 음향적 시차 모델에 의해 음상의 거리정위가 모든 방향에서 어느 정도 제어가능 하다고 할 수 있다.

앞에서 기술한 바와 같이 실제 음원에 의한 실험결과와 확장된 음향적 시차 모델에 기초한 거리정위의 제어실험의 결과가 거의 같은 경향을 나타내고 있으므로 머리전달함수의 어떠한 요인을 이용해서 거리의 지각이 행해지고 있는가를 생각할 때 머리전달함수 및 양 귀간 차의 유사성을 들 수 있다. 그래서, 이들의 주파수 스펙트럼의 상대적 유사성에 대해서 조사했다.

우선, 상대적인 스펙트럼의 유사성을 조사하기 위해 임계대역과 가장 가까운 1/3 옥타브밴드 레벨에 기초한 해석을 행했다. 그림 12에 각 거리에서 측정된 머리전달

함수와 각 방법에 의해 실현된 머리전달함수의 1/3 옥타브밴드 레벨의 레벨차의 평균치가 최소가 되도록 상대레벨을 정해 두 신호의 각 대역별 평균 레벨차를 도시했다.

그림 12의 횡축은 각 음원의 거리를 나타내며 종축은 측정된 머리전달함수와 각 방법에 의해 실현된 머리전달함수와의 레벨차를 나타내고 있다. 이 결과로부터 각 거리에서의 측정된 머리전달함수와 2개의 스피커를 이용한 모의방법에 의해 실현되어진 머리전달함수간의 평균오차는 0.35 dB 이하로 충분한 모의가 되어졌다.

음향적 시차 모델 및 확장된 음향적 시차 모델에 기초해서 실현되어진 머리전달함수 실제의 머리전달함수와는 전체적인 포락의 형상이 닮은 점으로부터 각 대역에서의 평균 레벨차는 1.5~2.0 dB 정도로 비교적 작은 값을 나타내고 있다. 여기서, 확장된 음향적 시차 모델은 음향적 시차 모델에 기초해서 측정된 전달함수에 양 귀간 시간차와 레벨차를 더한 것이기 때문에 두 모델에 의해 실현된 전달함수와 실제의 머리전달함수와의 상대적인 평균 레벨차는 동일한 값을 가진다.

한편, Hirsch-Tahara 모델에 의해 실현된 머리전달함수의 경우에는 각 대역별로 레벨의 변화가 거의 없으므로 많은 피크(peak)와 딥(dip)을 갖는 실제의 머리전달함수와의 평균 레벨차는 7~8 dB 의 큰 값을 나타내고 있다. 이와 같은 머리전달함수의 전체적인 포락(envelope)

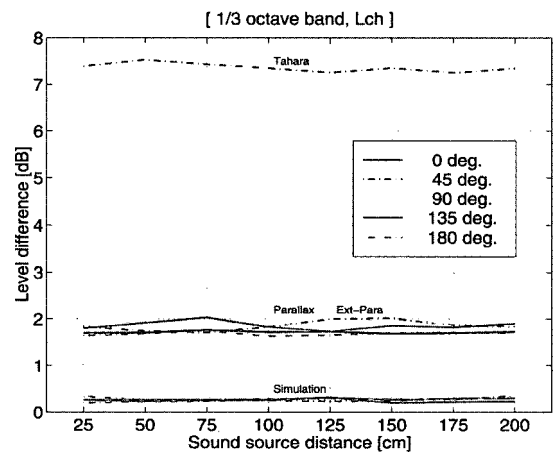


그림 12. 각 음원거리로 부터 측정된 머리전달함수와 각 방법에 의해 실현되어진 머리전달 함수와의 1/3옥타브 밴드 레벨의 상대 레벨차 (좌측귀, 전 청취자의 평균치)
 Fig. 12. Examples of relative level difference in 1/3 octave band analysis (Simulation:measured HRTF's vs synthesized HRTF, Tahara:measured HRTF's vs synthesized HRTF's based on the Hirsch-Tahara model, Parallax: measured HRTF's vs synthesized HRTF's based on the parallax model, Ext-para: measured HRTF's vs synthesized HRTF's based on the extended parallax model).

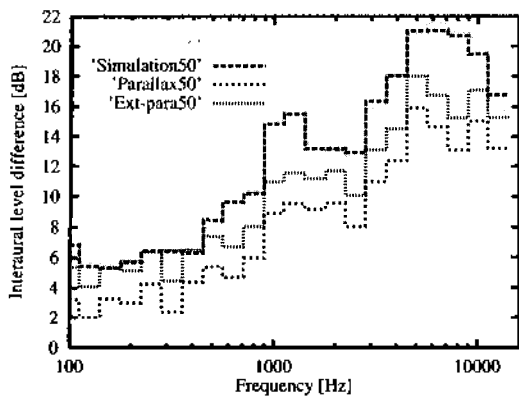


그림 13. 각 방법에 의해 실현된 1/3 옥타브 밴드별의 양 귀간 레벨차 (방위각: 45 방향, 거리: 50 cm)
 Fig. 13. Examples of interaural level difference in 1/3 octave band analysis (azimuthal angle: 45, distance: 50 cm, HRTF: measured HRTF's at each distance, Simulation: synthesized HRTF's, Tahara: synthesized HRTF's based on the Hirsch-Tahara model, Parallax: synthesized HRTF's based on the parallax model, Ext-para: synthesized HRTF's based on the extended parallax model).

의 형상의 유사성이 청취실험결과에도 영향을 미쳤다고 생각되어진다.

또한, 그림 13에 머리전달함수의 양 귀간 레벨차를 1/3 옥타브밴드별로 계산해 우측 45° 방향의 50 cm 거리에 예를 나타내었다. 그림의 횡축은 주파수를, 종축은 각각의 1/3 옥타브밴드별 양 귀간 레벨차의 청취자 4명의 평균치를 나타내고 있다. 그림에서 양 귀간 레벨차의 포락의 변화가 측정된 머리전달함수 및 머리전달함수를 가능한 정확히 모의한 경우에 비해서, 음향적 시차 모델이나 확장된 음향적 시차 모델에 기초해서 머리전달함수를 합성한 경우에는 절대레벨은 차이는 있으나 양 귀간의 스펙트럼 차의 상대적 형상은 전체적으로 유사함을 알 수 있다. 이러한 점으로부터, 근거리에서는 양귀 간에 도달하는 신호의 레벨차의 전체적 포락의 변화의 유사성이 청취 실험결과에도 영향을 미치고 있다고 생각되어진다. 한편, Hirsch-Tahara 모델을 이용한 경우에는 전 대역에서의 스펙트럼의 변화가 거의 없으므로 음상거리의 지각이 어렵다고 생각된다.

V. 결론

본 논문에서는 기존의 Hirschi-Tahara 모델과 음향적 시차 모델을 모든 방향의 거리정위에 있어서 일반적으로 적용하지 못하는 문제점을 극복하기 위하여, 음향적 시

차 모델에 양 귀간의 시간차와 레벨차를 고려한 확장된 음향적 시차 모델을 제안해 그 유효성에 대해 인간을 대상으로 한 청취실험을 통해서 고찰했다.

그 결과, 본 논문에서 제안한 확장된 음향적 시차 모델은 Hirsh-Tahara 모델과 음향적 시차모델의 문제점을 동시에 해결할 수 있는 모델로서 음상의 거리정위의 지각을 모든 방향에서 설명이 가능하며, 실제음원에서 지각할 수 있는 거리와 거의 같은 수준으로 음상의 거리를 제어 가능하다는 것을 인간을 대상으로 한 청취실험을 통해 증명했다.

감사의 글

본 연구의 일부는 2003학년도 동명정보대학교 학술지원연구비의 지원을 받아 수행되었다. 또한, 본 연구를 수행함에 있어 많은 조언을 주신 日本 秋田縣立大學의 曾根 徹夫 教授, 高根 昭一 助教授, 東北大學 電氣通信研究所 鈴木陽一 教授님과 부경대학교 전기계측공학부 김천덕 교수님께 감사 드립니다.

참고 문헌

1. M. Morimoto and Y. Ando, "On the simulation of sound localization," *J. Acoust. Soc. Jpn* (E), **29**, 167-174, 1980.
2. F. Asano, Y. Suzuki and T. Sone, "Role of spectral cues in median plane localization," *J. Acoust. Soc. Amer.*, **88** (1), 159-168, 1990.
3. D. R. Begault, *3-D Sound for virtual reality and multimedia* (Cambridge, MA, AP Professional, 1994).
4. Jens Blauerl, *Spatial Hearing - The psychophysics of human sound localization*, Revised Edition (Cambridge, MA, The MIT Press, 1995).
5. M. R. Schroeder and B. S. Atal, "Computer simulation of sound transmission in rooms," *IEEE Inter. Conv. Rec.*, Part 7, 150-155, 1963.
6. Yamakoshi K, Watanabe K, and Yoshikawa S, "Sound localization control system using FIR-filter," IEICE Technical Report EA81-34, 1981. (in Japanese)
7. Hae-Young KIM, Shouichi TAKANE, Yoji SUZUKI and Toshio SONE, "A study on control to distance perception by simulation of HRTF," *Proc. of the Virtual Reality Soc. Jpn.*, **1**, 55-58, 1996. (in Japanese)
8. Tahara Y, Sakurai H, "A tentative model for the localization of sound based on simultaneity of time difference and level difference of the sound between ears," *Proc. Cong. of Acoust. Soc. Jpn.* 161-162, 1974. (in Japanese)
9. Hirsch H, R, "Perception of the range of a sound source of unknown strength," *J. Acoust. Soc. Amer.*, **43**, 273-374, 1968.

10. Hae-Young KIM, Yoiti SUZUKI, Shouichi TAKANE and Toshio SONE. "Control of auditory distance perception based on auditory parallax model," *Applied Acoustics*, 62 (3), 245-270, 2001.

저자 약력

● 김 해 영 (Hae-Young Kim)



1989년 2월: 부경대학교 전자통신공학과 (공학사)
1995년 3월: 日本 東北大學 大學院 情報科學
研究科 (情報科學 修士)
1999년 3월: 日本 東北大學 大學院 情報科學
研究科 (情報科學 博士)
1999년 4월: 東北大學 電氣通信研究所 助手
2000년 4월: 日本 秋田縣立大學 System 科學
技術學部 助手
2003년 3월~현재: 동양정보대학교 정보공학부 전
임강사
※ 주관심분야: 음향신호처리, 입체음향, 음상정위
및 제어, 음향을 이용한 virtual
reality 등