

고역 주파수 영역에서 HRTF의 간략화에 관한 연구

A study on the simplification of HRTF within high frequency region

이채봉*

Chai-bong Lee*

요약

본 연구에서는 머리전달함수(Head-Related Transfer Function : HRTF) 고역 주파수 영역에서의 간략화가 음상정위에 미치는 영향에 관하여 검토하였다. 이를 위해 HRTF를 측정하였으며 측정된 HRTF에 대하여 분석한 결과, 음원 반대편(음원에서 멀리 떨어진 귀)의 HRTF 고역 주파수 특성은 회절의 성질을 고려하면 머리에 의해 거의 감쇄가 된다. 이와 같이 감쇄된 주파수 영역에 대해서는 정위에 미치지 않는다고 가정하면 간략화가 가능하다.

간략화는 경계 주파수를 차단 주파수로 하는 저역통과 필터를 삽입하여 고역의 주파수 진폭특성을 평탄하게 함으로서 간략화를 하였다. 간략화를 한 HRTF를 평가하기 위하여 청취실험을 하였다. 청취실험의 결과, 정위오차에 대해서는 HRTF의 주파수 특성을 간략화 하여도 방향 지각에 영향이 없다는 것이 나타났다. 진후 혼란율에 대해서는 HRTF의 8kHz 이상의 주파수 특성을 간략화 하여도 영향이 없음이 나타났다. 최종적으로는 HRTF의 8kHz 이상의 주파수 특성에 본 연구의 간략화를 적용하여도 음상정위에 영향을 미치지 않는다는 것이 나타났다.

Abstract

In this study, we investigated the effect of the simplification for high frequency region in Head-Related Transfer Function (HRTF) on the sound localization. For this purpose, HRTF was measured and analyzed. The result in the HRTF frequency characteristic of the back sound source showed that the decrease level of high frequency was smaller than that of low frequency region, which means the possibility of simplification in the high frequency region. Simplification was performed by flattening of the high frequency amplitude characteristics with the insertion of the low-pass filter, whose cutoff frequency is given by boundary frequency. Auditory experiments were performed to evaluate the simplified HRTF. The result showed that direction perception was not influenced by the simplification of the frequency characteristics of HRTF for the error of sound localization. The rate of confusion for the front and back was not affected by the simplification of the frequency characteristics over 8kHz of HRTF. Finally, we made it clear that the sound localization was not affected by the simplification of frequency characteristics of HRTF over 8kHz.

Keywords : Head-Related Transfer Function(HRTF), Sound Localization, Stereophonic Sound System, Impulse Response, Spatial Disparity, Spatial Perception

I. 서론

입체 음장 시스템은 음을 녹음 재생 할 때 삼차원적인 음의 방향이나 거리 등을 지각할 수 있도록 음의 환경을 제어하는 시스템이다. 입체 음장 시스템이 실용화가 되면 다른 장소에 있는 사람이 같은 장소에서 실제로 대화하고 있는 것처럼 느낀다든지, 원격 통신회의 시스템에서 일반적인 통신 수단보다는 보다 높은 현장감을 주는 것이 가능하다. 이러한 입체 음장 시스템의

실현에는 청취자의 방향과 거리에 음원 위치를 지각하는 능력이 깊이 관련되어 있다.

이러한 능력을 음상정위라고 한다. 음상정위는 음원에서 좌우 귀까지의 시간차, 레벨차나 양귀에 입사하는 음의 주파수 특성이 중요한 수단이 된다고 알려져 있다[1]. 임의의 방향·거리에 있는 음원에 대한 양귀간의 시간차·레벨차 및 음의 전달특성은 음원에서 청취자의 각 귀까지 전달함수를 측정하는 것으로 얻을 수가 있다[2, 3]. 전달함수의 측정은 양귀에 삽입한 마이크로폰으로 음원에서 양귀까지의 임펄스 응답을 측정하고 푸리에 변환을 적용하는 것으로 이루어진다[4]. 이와 같이 측정된 전달함수를 머리전달함수(Head-Related Transfer Function : HRTF)라고 한다. HRTF는 음상정위의 수단을 종합적으로 포함하고 있으며

* 동서대학교

투고 일자 : 2010. 12. 3 수정완료일자 : 2011. 1. 17

게재확정일자 : 2011. 2. 2

* 이 논문은 2010년도 동서대학교 교내 특별연구과제 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

HRTF와 같은 특성을 가진 필터를 음원에 첨가하면 양귀에 입사하는 음이 재현되어 음원의 방향·거리에 음상정위가 되는 것이 가능하다[5, 6]. 머리나 귓바퀴의 형태는 청취자마다 다르기 때문에 HRTF도 개인마다 다르다. HRTF는 개인마다 모든 방향에 대한 데이터가 필요하기 때문에 데이터 양이 많게 된다. 이러한 문제점 해결의 방법으로는 데이터 양의 간략화가 있다. 음상정위에는 영향을 미치지 않고 적은 데이터 양으로 HRTF를 재현하는 연구가 있다.

HRTF의 간략화 표현으로서 처음 측정된 HRTF를 몇 개의 변수로 근사시키는 모델화 연구가 있으며 대표적인 것은 하나의 극·영점 모델화를 들 수 있다. 극·영점 모델의 최대 특징은 진폭의 최대치를 독립시킨 변수에 의해 정의 되도록 하였다[7, 8]. 이러한 연구에 의하면 5~10kHz나 7~15kHz 등의 대역에서 주파수 진폭특성의 최대·최소를 소수의 변수로 재현하는 것이 가능하며, HRTF의 간략화에 유효하다는 것을 나타내었다. 또 다른 연구는 HRTF에 있어서 응답 데이터의 샘플 수를 저감하는 것으로 간략화를 하였다. 청취 실험을 통하여 간략화를 한 HRTF의 평가에 의해 10.24ms 이상의 시간과형은 정위에 영향을 미치지 않기 때문에 그 부분을 없애는 것으로서 간략화가 가능하다는 것을 나타내었다[9~11]. 그러나 일반적으로 샘플 수를 줄이면 그만큼 HRTF 주파수 특성의 재현정도는 저하한다. 간략화에 관한 연구는 HRTF의 주파수 특성에서 모든 주파수에 대하여 간략화를 하는 것이 대부분이다. 그러나 모든 주파수 영역이 일정하게 음상정위에 영향을 미치고 있다고 할 수 없다. 낮은 주파수의 음은 높은 주파수의 음에 비하여 회절하기 쉬운 특성을 가진다. 따라서 낮은 주파수의 음은 머리에 의해 감쇄되기 어렵기 때문에 음원방향에 의한 차이가 작으므로 방향 의존성이 작다고 볼 수 있다. 이러한 방향 의존성이 작은 저역의 주파수 특성이 정위에 영향을 미치지 않는다면 저역의 주파수 특성을 간략화 함으로서 데이터 양의 저감이나 신호처리 지연의 저감을 가능하게 할 수 있다[12]. 그리고 음원에서 멀리 떨어진 귀의 고역 주파수 특성은 회절의 성질을 고려하면 머리에 의해 거의 감쇄가 된다. 이와 같이 감쇄된 주파수 영역에 대해서는 음상정위에 영향을 미치지 않는다면 간략화가 가능하다. 이와 같이 음상정위의 영향이 작은 영역이 존재하면 그 영역을 간략화 함으로서 모든 주파수 영역을 간략화 하는 것보다도 높은 음상정위 수단을 가지며, 과거의 연구보다도 소수의 변수로 표현할 수 있고 효율이 좋은 HRTF의 간략화가 표현되는 가능성이 있다.

본 연구에서는 HRTF의 고역 주파수 특성의 간략화가 음상정위에 미치는 영향에 관하여 검토하였다. 그리고 고역 주파수 특성을 부분적으로 간략화 한 HRTF를 청취실험에 의해 평가함으로서 음상정위에 영향을 미치지 않는 대역을 검토하였다.

II. HRTF의 측정 및 간략화 방법

2.1 측정 및 분석

HRTF는 음원에서 청취자 좌우 귀의 외이도 입구까지 전

달함수 H_L 및 H_R 과 머리중심에 해당하는 점의 전달함수 H_M 의 비로 구할 수 있다. 즉, 좌우 귀의 HRTF는 식(1)과 같다. H_L , H_R 및 H_M 을 얻기 위해서는 음원에서 외이도 입구까지의 임펄스 응답 즉, 머리중심에 해당하는 위치에서 임펄스 응답을 측정하고 각각에 푸리에 변환을 적용하는 방법이 알려져 있다[9]. 본 연구에서는 이 방법으로 HRTF를 얻는 것으로 하였다.

$$\frac{H_L}{H_M}, \frac{H_R}{H_M} \quad (1)$$

측정한 HRTF를 음신호에 첨가하여 청취자에게 헤드폰으로 제시하는 방법으로 하였다. 헤드폰으로 재생하는 경우는 헤드폰 자체가 가지는 특성 즉, 헤드폰의 주파수 특성과 외귀의 특성이 신호음에 포함되므로 이러한 특성을 보정할 필요가 있다. 헤드폰의 특성을 H_{hpL} 및 H_{hpR} 이라고 하면 보정 후의 HRTF는 다음 식(2)와 같이 된다.

$$\frac{H_L}{H_M \cdot H_{hpL}}, \frac{H_R}{H_M \cdot H_{hpR}} \quad (2)$$

H_{hpL} 및 H_{hpR} 는 헤드폰의 입력단자에서 외이도 입구까지 삽입한 마이크로폰 출력단자까지의 임펄스 응답을 측정하고, 푸리에 변환을 적용하는 것으로 얻을 수가 있다.

측정에 사용한 신호는 TSP(Time-Stretched Pulse)로 샘플링 주파수는 48kHz, 신호길이는 0.683s로 하였다[13]. H_L 및 H_R 은 피실험자의 좌우 외이도 입구에 소형 마이크로폰(KE4-211-2, SENNHEISER)을 삽입하고 머리를 고정시켜 의자에 앉도록 하였으며, 스피커(Q1, KEF)에서 TSP 신호를 출력하여 피실험자 좌우 귀의 마이크로폰으로 녹음하여 얻은 신호에 역 TSP 신호를 넣어 임펄스 응답으로 측정하였다. 피실험자와 스피커와의 거리는 1.5m로 하였으며 피실험자가 앉은 의자를 회전시켜 각 방향에서 측정을 하였다. H_M 은 피실험자가 없는 상태에서 1.2m 높이의 위치에서 임펄스 응답을 측정하였다. H_{hpL} 및 H_{hpR} 는 헤드폰(HD-650, SENNHEISER)에서 피실험자의 양귀에 삽입한 마이크로폰까지의 임펄스 응답을 측정하였다. 측정된 HRTF의 방향 수는 12방향이며 정면 방향을 0도로 하고, 0도에서 330도까지 30도 간격으로 측정하였다.

그림 1은 측정된 음원측(음원에서 가까운 귀)과 음원 반대편(음원에서 멀리 떨어진 귀)의 HRTF 주파수 진폭특성(60도 방향)을 나타내었다. 그림 1을 보면 음원 반대편인 그림 (a)에서 9kHz 이상의 주파수 진폭특성은 음원측(그림 (a))에 비하여 다수의 최고·최소치가 생기며 복잡한 형태가 나타났다. 이것은 높은 주파수의 음일수록 회절이 어렵고, 주파수가 높게 됨에 따라 청각의 주파수 분해 능력이 저하한다[6]. 이것을 고려하면 음원 반대편의 고역 주파수 특성의 복잡성이 음상정위에 모두 이용되지 않는다는 것을 생각할 수 있다. 음원 반대편의 HRTF 고역 주파수 특성이 음상정위에 영향을 미치지 않는다면 저역의 주파수 특성의 간

략화 방법을 적용하여 HRTF의 데이터 양 감소가 가능하다.

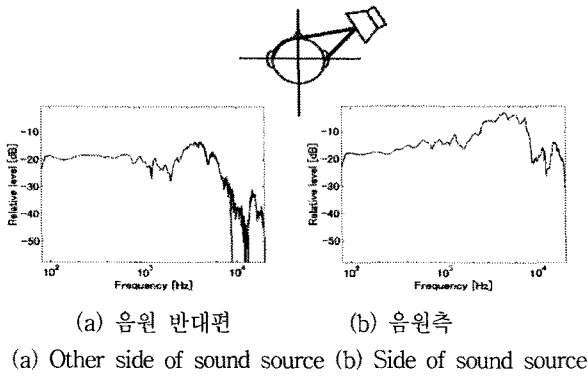
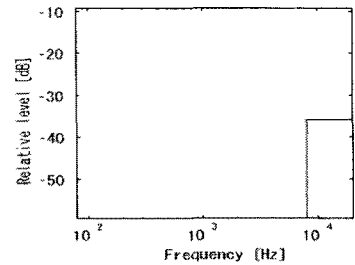
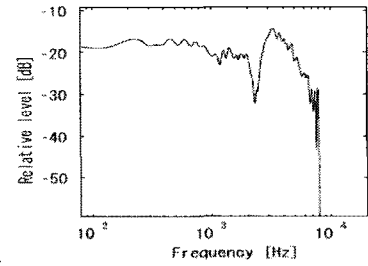
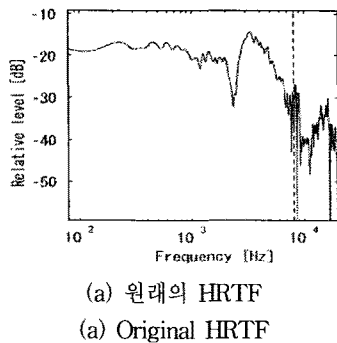


그림 1. 양귀의 HRTF 주파수 특성
Fig. 1. HRTF frequency characteristic of the ears

2.2 HRTF의 간략화 방법

간략화의 처리는 고역의 주파수 진폭특성을 평탄하게 하는 것으로 하였으며 음원 반대편에만 적용하였으며 음원측은 적용하지 않았다. 그리고 정 중앙과 후방(0도 방향 및 180도 방향)은 음원측과 음원 반대편과 구별이 되지 않으므로 간략화를 하지 않았다. 간략화는 다음과 같이 하였다.

- (1) 측정된 HRTF에 대하여 그림 2(a)와 같이 경계 주파수를 정한다. 그림에서는 예로서 8kHz로 하였다.
- (2) 경계 주파수와 같은 차단 주파수를 가진 저역통과 필터를 음원 반대편의 HRTF에 삽입하여 그림 2(b)와 같이 경계 주파수 보다 고역의 주파수 진폭특성을 감쇄시킨다.
- (3) 필터 삽입에 의한 초기 지연시간의 증가에 의해 원래의 HRTF의 ITD(Interaural Time Difference)가 소멸되는 것을 막기 위해 각 귀에 삽입되는 저역통과 필터의 필터 차수는 같은 값으로 하여 같은 지연시간을 각 귀에 주는 것으로 ITD를 유지하도록 하였다.
- (4) 그림 2(b)와 같이 감쇄한 영역을 통과역으로 하는 대역 통과필터를 시간 영역에서 일치 시킨다. 이 고역통과 필터를 그림 2(c)에 나타내었다. 고역통과 필터의 통과역의 파워레벨이 그림 2(c)의 경계 주파수 이하의 파워레벨과 일치하도록 이득을 조절하였다. 위의 처리를 하여 간략화 된 HRTF를 그림 2(d)에 나타내었다.



(c) ILD를 유지하기 위한 고역통과 필터
(c) High-pass filter for ILD

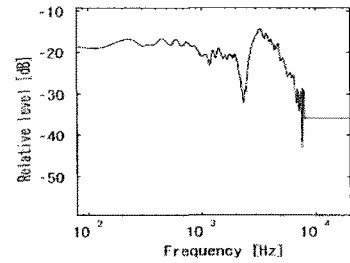


그림 2. HRTF의 간략화 방법
Fig. 2. Simplified method of HRTF

III. HRTF가 음상정위에 미치는 영향 평가

3.1 청취실험 방법

간략화를 한 HRTF가 음상정위에 미치는 영향을 평가하기 위해 간략화를 한 HRTF를 포함한 자극음을 제시하고 그 자극음이 어느 방향에서 들리는가를 피실험자에게 응답하게 하는 실험을 하였다. 실험은 반무향실에서 하였으며 피실험자는 연령이 20대로 정상 청력을 가진 남성 4명으로 하였다. 간략화를 한 HRTF를 포함한 음신호는 샘플링 주파수 48kHz의 핑크 노이즈로 0.08~20kHz까지 대역 제한을 하였다. HRTF의 측정방향 수는 측정된 수평면 내의 12방향(30도 간격으로 정면 방향을 0도)으로 하고 HRTF의 간략화 경계 주파수는 0, 0.5, 1, 2, 4, 8, 20kHz로 하였다. 경계 주파수 20kHz의 경우는 간략화를 하지 않은 원래의 HRTF이다. 그리고 0kHz의 경우는 모든 주파수에 대하여 간략화를 하였다. 음자극 신호는 헤드폰의 역특성을 첨가하였고 재생시간은 1초로 하였다. 음자극 제시 후 4초 동안

응답을 하도록 하였다. 하나의 자극음에 대하여 시행 횟수는 5회로 하였으며 제시순서는 랜덤으로 하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

제시된 자극음의 방향과 지각된 음상의 방향 관계를 피실험자 마다 그림 3~7로 나타내었다. 그림에서 가로축은 제시된 HRTF의 측정방향을 나타내며 세로축은 피실험자가 정위한 방향을 나타내고 있다. 피실험자의 제시방향과 정위방향이 일치하는 경우는 대각선상에 ○로 표시하였다. 그리고 제시방향이 0도인 자극음을 180도로 정위한다든지 30도의 자극음이 150도로 정위하는 경우 즉, 귀 축에 대하여 대칭으로 전후를 잘못 정위하는 경우는 점선상에 ○를 표시하였다. 그림 위에는 간략화의 경계 주파수를 표시하였다.

그림 3, 4를 보면 피실험자 1, 2에 대해서는 원래의 신호인 경우에는 대각선상에 응답이 집중되어 있고 자극음의 제시방향과 정위한 방향이 거의 일치하고 있다. 0kHz의 경우에는 정위방향이 90, 270도에 응답이 집중하고 있음을 알 수 있다. 피실험자 3, 4에 대해서는 그림 5, 6에서 나타난 것과 같이 원래의 신호인 경우에는 피실험자 1, 2에 비하여 전방에 대한 지각을 후방으로 지각하는 경우가 많이 나타났다. 특히, 피실험자 4에 대해서는 전방에 대한 지각이 거의 후방으로 지각하고 있다.

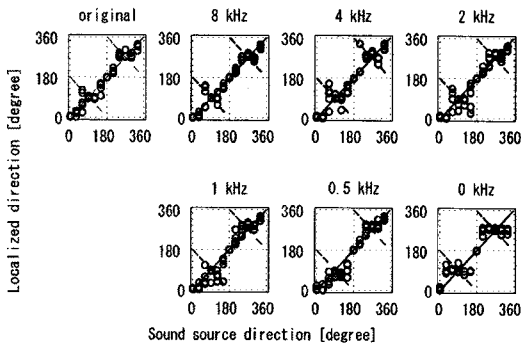


그림 3. 피실험자 1의 음상정위 결과

Fig. 3. Result of sound localization(subject 1)

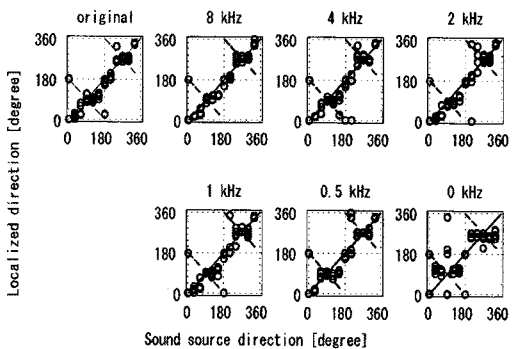


그림 4. 피실험자 2의 음상정위 결과

Fig. 4. Result of sound localization(subject 2)

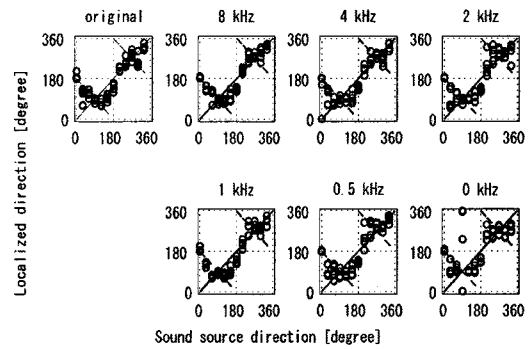


그림 5. 피실험자 3의 음상정위 결과

Fig. 5. Result of sound localization(subject 3)

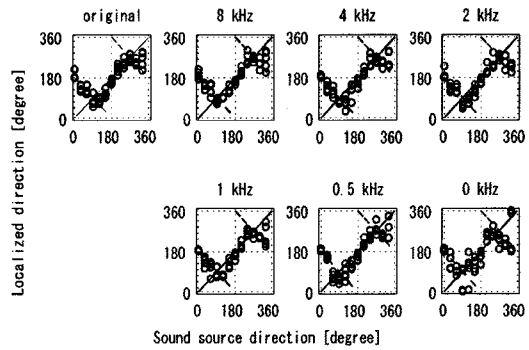


그림 6. 피실험자 4의 음상정위 결과

Fig. 6. Result of sound localization(subject 4)

IV. 간략화가 방향지각에 미치는 영향

HRTF의 간략화에 의한 음상정위의 영향을 정위 오차율에 의해 평가하였다. 본 연구에서는 자극음의 제시방향과 피실험자가 정위한 방향과의 차를 절대값으로 나타낸 것을 정위오차라고 하였다. 각 피실험자의 모든 방향의 정위오차를 평균한 것을 그림 7에 나타내었다. 그림에서 가로축은 경계 주파수를 나타내며 세로축은 평균 정위오차를 나타내고 있다. 이것을 보면 경계 주파수가 0.5kHz 이상의 경우에는 피실험자 모두 경계 주파수 20kHz의 경우와의 차이가 5도 이내로 되어 있으며 변동도 작게 나타났다. 그러나 피실험자 모두 0kHz 경우에는 경계 주파수 20kHz 인 경우보다도 10~30도 정도 크게 나타남이 확인되었다. 이상의 결과로부터 정위오차에 대해서는 음원 반대편의 HRTF 주파수 특성은 전 대역을 간략화 하지 않는 한 음상정위에 영향을 미치지 않는다는 것이 나타났다.

하나의 자극음에 대하여 시행 횟수 5회 가운데 전후 오차가 생긴 비율을 전후 혼란율이라고 하였으며, 각 피실험자의 전후 혼란율을 음원방향에 대하여 평균한 것을 그림 9에 나타내었다. 이것을 보면 피실험자 1에 대해서는 경계 주파수가 0.5~4kHz 인 경우에 경계 주파수가 20kHz 인 경우에 비하여 전후 오차율이 증가함을 알 수 있으며 0kHz의 경우에도 증가하고 있음을 알 수 있다. 피실험자 2에 대해서는 경계 주파수가 8kHz 이하의 경우에는 경계 주파수가 0kHz

인 경우에 비하여 전후 오차율이 증가하고 있다. 피실험자 3, 4에 대해서는 피실험자 1, 2 보다도 경계 주파수가 20kHz 인 경우에는 전후 오차율이 크게 됨이 확인되었다. 그리고 경계 주파수가 낮을수록 전후 오차율이 증가하고 있음이 보이지 않으며 간략화의 영향은 그다지 없음이 보인다.

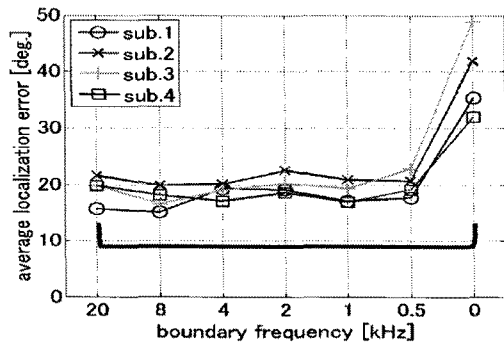


그림 7. 경계 주파수에 의한 평균 정위오차의 변화
Fig. 7. Localization error by boundary frequency

제시방향이 후방인 경우(120, 150, 210, 240도)에 대해서는 거의 정확하게 전후 지각이 되기 때문에 전방의 지각보다도 간략화의 영향을 보기 쉽게 하기 위해 제시방향이 후방인 경우에만 분석을 하였다.

제시방향이 후방인 경우에 전후 오차율을 그림 9에 나타내었다. 이것을 보면 각 피실험자 모두 경계 주파수가 20kHz인 경우에는 전후 오차율이 낮고, 거의 정확하게 전후 판단이 되었다고 보여진다. 그리고 경계 주파수가 8kHz 및 0kHz 인 경우에 대해서는 경계 주파수가 20kHz인 경우와 거의 같은 결과가 나타났다. 그러나 경계 주파수가 0.5~4kHz인 경우에는 전후 오차율이 증가하고 있는 피실험자가 보인다.

이상의 분석에 의해 전후 오차율에 대해서는 음원 반대편의 HRTF 주파수 특성 8kHz 이상을 간략화 하여도 정위에 영향을 미치지 않는다는 것이 나타났다.

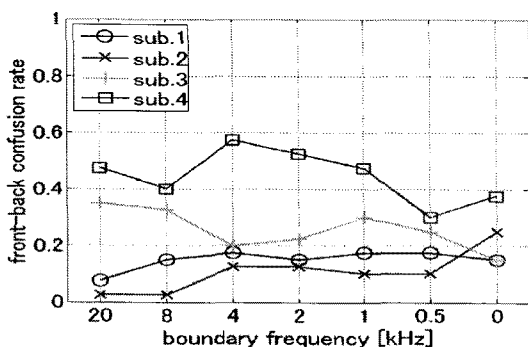


그림 8. 경계 주파수에 의한 전후 혼란율의 변화
Fig. 8. Front-back confusion rate by boundary frequency

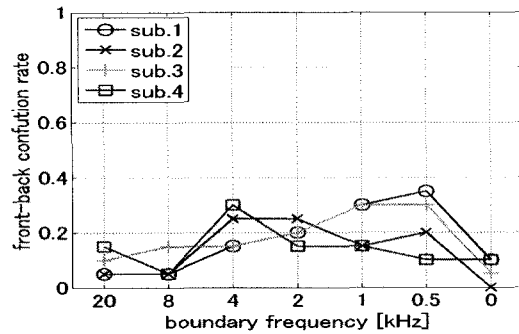


그림 9. 경계 주파수에 의한 전후 혼란율의 변화 (제시방향이 후방)
Fig. 9. Front-back confusion rate by boundary frequency(back of head)

V. 결론

본 연구에서는 HRTF 고역 주파수 영역에서의 간략화가 음상정위에 미치는 영향에 관하여 검토하였다. 측정된 HRTF에 대하여 분석한 결과, 음원의 반대편은 음원측에 비하여 고역에 다수의 최대·최소치가 발생하고 있고 상대적인 레벨도 작게 되고 있음을 확인하였다. 그리고 청각의 주파수 분해능은 주파수가 높게 됨에 따라 저하되는 것을 고려하면 고역의 복잡한 주파수 특성이 음상정위에 전부 이용된다고 생각되지 않으므로 음원 반대편 측의 고역 주파수 특성은 간략화 가능성이 있다. 간략화 방법에 대해서는 음원측은 원래의 신호를 재현하고 음원 반대편의 고역 주파수 진폭특성은 평탄하게 하였다. 그리고 간략화를 한 HRTF를 평가하기 위하여 청취실험을 하였다. 청취실험의 결과, HRTF의 주파수 특성을 전부 간략화 한 경우에는 피실험자 모두가 방향지각에 영향이 나타났다. 실험결과에 대한 정위오차, 전후 오차율을 산출함으로써 HRTF 주파수 특성의 간략화에 있어서 음상정위의 영향을 분석하였다. 정위오차에 대하여서는 음원 반대편 HRTF의 주파수 특성은 전체 영역을 간략화 하지 않는 한 음상정위에 영향이 없다는 것이 나타났다. 전후 오차율에 대해서는 음원 반대편 HRTF에 8kHz 이상의 주파수 특성을 간략화 하여도 영향이 없다는 것이 나타났다. 이상의 내용으로 음원 반대편의 HRTF는 8kHz 이상의 주파수 특성을 간략화 하여도 음상정위에 영향이 없다는 것이 나타났다.

참고 문헌

- [1] 한국음향학회 편, "음향용어사전", 교학사, 2003.
- [2] J. W. Strutt, "On our perception of sound direction", Philosophical Magazine 13, 1984.
- [3] W. Mills, "Auditory localization", Foundations of Modern Auditory Theory, New York, 1972.
- [4] Bill Gardner, "HRTF measurement of a KEMAR

- dummy-head microphone", MIT Media Lab, 1994.
- [5] E. A. G. Shaw and R. Teranishi, "Sound pressure generated in an external-ear replica and real human ear by a nearby sound source", J. Acoust. Soc. Am, 44, 240-249, 1968.
- [6] Brian. C. J. Moore, " An introduction to the Psychology of Hearing", Academic Press Limited, 1989.
- [7] 領木英男, "極零モデルを用いた周波数応答関数のカーブ", 電子情報通信學會技術研究報告, EA, 應用音響, 1-8, 2002.
- [8] Kazuhiro Iida, Motokuni Itoh, Atsue Itagaki and Masayuki Morimoto, "Median plane localization using parametric model of the head-related transfer function based on spectral cues ", Applied Acoustics, 68(8), 835-850, 2007.
- [9] A. Kulkarni and H. S. Colburn, "Infinite-impulse-response models of the head-related transfer function", J. Acoust. Soc. Am, 115(4), 1714-1728, 2004.
- [10] Senova Melis A., Mcanaly Ken I. and Martin Russell L., "Localization of Virtual Sound as a Function of Head-Related Impulse Response Duration", Japanese Association for Sound Ecology, 50, 57-66, 2002.
- [11] H. Moller, M. F. sorensen, C. B. Jensen and D. Hammershoi, " Binaural technique", J. Audi Eng. Soc., 44(6), 451-469, 1996.
- [12] Chai-bong Lee, "A study on the simplification of HRTF within low frequency region", KISPS Fall Conference Proceedings 2010, 11(2), 487-490, 2010.
- [13] N. Aoshima, "Computer-generated pulse signal applied for sound measurement", J. Acoust. Soc. Am., 69(55), 1484-1488, 1981.



이 채봉(Chai-Bong Lee)

1985년 2월 : 동아대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 1988년 3월 : 동북대학교 대학원 전기통신공학과 졸업
 (공학석사)
 1992년 3월 : 동북대학교 대학원 전기통신공학과 졸업
 (공학박사)

1993 ~ 현재 : 동서대학교 전자공학과 부교수

※ 주 관심분야 : 신호처리, 음향공학