
저역 주파수 영역에서 HRTF의 간략화에 관한 연구

이재봉*

A study on the simplification of HRTF within low frequency region

Chai-bong Lee*

요 약

본 연구에서는 머리전달함수(Head-Related Transfer Function : HRTF) 저역 주파수 영역에서의 간략화가 음상정위에 미치는 영향에 관하여 검토하였다. 이를 위해 HRTF를 측정하였으며 측정된 HRTF에 대하여 분석한 결과, HRTF 주파수 특성의 표준편차를 보면, 저역의 주파수 특성은 고역에 비하여 방향 의존성이 작음이 나타났다. 이것은 저역의 주파수 영역에서 간략화의 가능성을 나타낸다. 간략화는 경계 주파수를 차단 주파수로 하는 고역통과 필터를 삽입하여 저역의 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. 전후 혼란율에 대해서는 HRTF의 1kHz 이하의 주파수 특성을 간략화 하여도 영향이 없음이 나타났다. 최종적으로는 HRTF의 1kHz 이하의 주파수 특성에 본 연구의 간략화를 적용하여도 음상정위에 영향을 미치지 않는다는 것을 명확히 하였다. 본 연구는 음성이 가진 방향성 속성을 훼손하지 않으면서 음성정보의 크기를 줄이는 방법으로도 활용될 것으로 기대된다.

ABSTRACT

In this study, we investigated the effect of the simplification for low frequency region in Head-Related Transfer Function (HRTF) on the sound localization. For this purpose, HRTF was measured and analyzed. The result in the standard deviation of HRTF showed that the directional dependence of low frequency was smaller than that of high frequency region, which means the possibility of simplification in the low frequency region. Simplification was performed by flattening of the low frequency amplitude characteristics with the insertion of the high-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 within 1kHz of HRTF. Finally, we made it clear that the sound localization was not affected by the simplification of frequency characteristics of HRTF within 1kHz. The result is expected to be utilized to reduce the size of speech information with no deterioration of the directional characteristics of the speech signal.

키워드

머리전달함수(HRTF), 입체 음장 시스템, 임펄스 응답, 양귀 간의 시간차 및 레벨차, 음상정위

* 동서대학교 전자공학과(lcb@dongseo.ac.kr)

접수일자 : 2010. 10. 05

심사(수정)일자 : 2010. 11. 09

게재확정일자 : 2010. 12. 10

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 귀까지의 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 전달함수는 머리전달함수(Head-Related Transfer Function : HRTF)라고 한다. HRTF는 음상정위의 수단을 종합적으로 포함하고 있으며 HRTF와 같은 특성을 가진 필터를 음원에 첨가하면 양귀에 입사하는 음이 재현되어 음원의 방향·거리에 음상정위가 되는 것이 가능하다[5, 6]. 머리카 바퀴의 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 몇개의 변수로 근사시키는 모델화의 연구가 있으며 대표적인 것은 하나의 극·영점 모델화를 들 수 있다. 극·영점 모델의 최대 특징은 진폭의 최대치를 독립시킨 변수에 의해 정의 되도록 하였다. HRTF의 주파수 진폭특성에 있어서 5~10kHz나 7~15kHz 등의 대역에 어떤 특징적인 최대치는 음상정위를 하는 중요한 수단이 된다는 결과를 나타내었으며 주파수 진폭 특성의 최대·최소를 소수의 변수로 재현하는 것이 가

능하며 HRTF의 간략화에 유효하다고 나타내었다[7].

또 다른 연구는 HRTF에 있어서 응답 데이터의 샘플 수를 저감하는 것으로 간략화를 하였다. 청취실험을 하면서 간략화를 한 HRTF의 평가에 의해 10.24ms 이상의 시간과형은 정위에 영향을 미치지 않기 때문에 그 부분을 없애는 것으로서 간략화가 가능하다고 보고하고 있다[8, 9, 10]. 그러나 일반적으로 샘플 수를 줄이면 그만큼 HRTF의 주파수 특성의 재현정도는 저하한다.

간략화에 관한 연구는 HRTF의 주파수 특성에서 모든 주파수에 대하여 간략화를 하는 것이 대부분이다. 그러나 모든 주파수 영역이 일정하게 정위에 영향을 미치고 있다고 할 수 없다. 낮은 주파수의 음은 높은 주파수의 음에 비하여 회절하기 쉬운 특징을 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 않는다고 가정을 하면 저역의 주파수 특성을 간략화 함으로서 데이터 양의 저감이나 신호처리 지연의 저감을 가능하게 할 수 있다. 이와 같이 정위의 영향이 작은 영역이 존재하면 그 영역을 간략화 함으로서 모든 주파수 영역을 간략화 하는 것보다도 높은 정위 수단을 가지며, 과거의 연구보다도 소수의 변수로 표현할 수 있고 효율이 좋은 HRTF의 간략화가 표현되는 가능성이 있다.

본 연구에서는 일부의 영역에 있어서 HRTF의 주파수 특성의 간략화가 정위에 미치는 영향에 관하여 검토 하였다. 그리고 주파수 특성을 부분적으로 간략화한 HRTF를 청취실험에 의해 평가함으로써 정위에 영향을 미치지 않는 대역을 검토 하였다.

II. HRTF의 측정 및 간략화 방법

2.1 측정 및 분석

HRTF는 음원에서 청취자 좌우 귀의 외이도 입구까지의 전달함수 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 응

답 즉, 머리중심에 해당하는 위치에서 임펄스 응답을 측정하고 각각에 푸리에 변환을 적용하는 방법이 알려져 있다[8]. 본 연구에서는 이 방법으로 HRTF를 얻는 것으로 하였다.

$$\frac{H_L}{H_M} \frac{H_R}{H_M} \dots\dots\dots (1)$$

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

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

H_{hpL} 및 H_{hpR} 는 헤드폰의 입력단자에서 외에도 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 0.683s으로 하였다[11]. H_L 및 H_R 은 피실험자의 좌우 외에도 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 수평면 12방향에서 측정된 HRTF 주파수

진폭특성의 평균치와 표준편차를 나타내었다. 그림에서 표준편차는 8kHz 이상의 대역에서는 20~40dB가 됨을 알 수 있다. 그리고 주파수가 낮게 됨에 따라 HRTF의 표준편차가 작게 되며, 0.5kHz 이하의 대역에서는 음원방향에 대한 변동이 2~5dB정도가 되고 있다. 2~3kHz 이상은 주파수 진폭특성의 평균치 변동이 크고, 4kHz 부근의 최대치와 10kHz 부근에서 최소치와의 차는 20dB 이상이 되고 있다. 이것에 대하여 2~3kHz보다 낮은 대역에서는 변동이 작고, 최대 약 5dB가 되고 있다. 이와 같이 HRTF의 저역 주파수 진폭특성은 고역에 비하여 방향 의존성이 작고, 특성의 변동이 작기 때문에 진폭을 평탄하게 하는 것으로 간략화 하는 것이 가능하다.

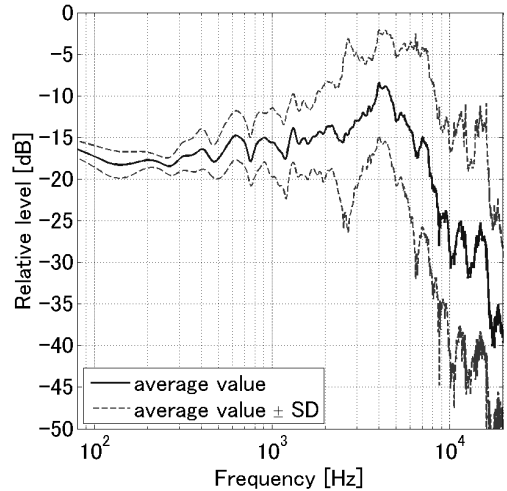


그림 1. HRTF의 주파수 특성의 평균치와 표준편차
Fig. 1 Average value and standard deviation of frequency property(HRTF)

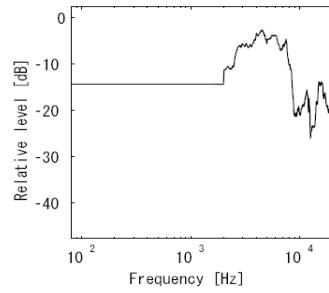
2.2 HRTF의 간략화 방법

간략화의 처리는 다음과 같이 하였다.

- (1) HRTF의 진폭특성에 대하여 그림 2(a)와 같이 경계 주파수를 정한다. 이 주파수는 간략화를 하는 영역과 하지 않는 영역으로 나누는 것이다. 그림에서는 예로서 2kHz로 하였다.
- (2) 그림(b)와 같이 경계 주파수를 차단 주파수로 하는 고역통과 필터를 삽입하여 저역의 주파수 진폭특성을 감쇄 시킨다.
- (3) 필터 삽입에 의한 초기 지연시간의 증가에 의

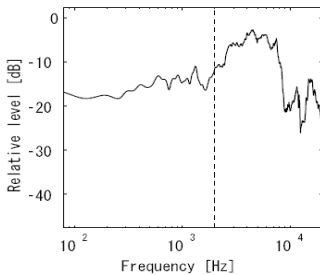
해 원래의 HRTF의 ITD(Interaural Time Difference)가 소멸되는 것을 막기 위해 각 귀에 삽입되는 고역통과 필터의 필터 차수는 같은 값으로 하여 같은 지연시간을 각 귀에 주는 것으로 ITD를 유지하도록 하였다.

- (4) 원래의 HRTF에 있어서 ILD(Interaural Level Difference)가 유지되도록 그림(b)에서 감쇄된 영역을 통과역으로 하는 저역통과 필터를 시간 영역에서 일치시킨다. 이 저역통과 필터를 그림(c)에 나타내었다. 저역통과 필터의 통과역의 파워레벨이 그림(c)의 경계 주파수 이하의 파워레벨과 일치하도록 이득을 조절하였다.

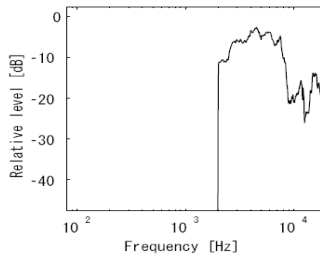


(d) 간략화가 적용된 HRTF
(d) Simplification of HRTF

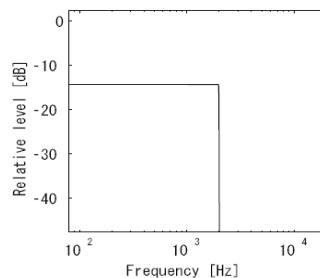
그림 2. HRTF의 간략화 방법
Fig. 2 Simplified method of HRTF



(a) 원래의 HRTF
(a) Original HRTF



(b) HRTF에 고역통과 필터 적용
(b) Application of high-pass filter in HRTF



(c) ILD를 유지하기 위한 저역통과 필터
(c) Low-pass filter for ILD

III. HRTF가 정위에 미치는 영향 평가

3.1 청취실험 방법

간략화를 한 HRTF가 정위에 미치는 영향을 평가하기 위해 간략화를 한 HRTF를 포함한 자극음을 제시하고 그 자극음이 어느 방향에서 들리는가를 피실험자에게 회답하게 하는 실험을 하였다. 실험은 반무향실에서 하였으며 피실험자는 20대 남성 4명과 여성 1명으로 하였다. 간략화를 한 HRTF를 포함한 음신호는 샘플링 주파수 48kHz의 핑크 노이즈로 0.08~20kHz까지 대역 제한을 하였다. HRTF의 측정방향수는 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 0kHz의 경우는 간략화를 하지 않은 원래의 HRTF이다. 그리고 20kHz의 경우는 모든 주파수에 대하여 간략화를 하였다. 음자극 신호는 헤드폰의 역특성을 첨가하였고 재생시간은 1초로 하였다. 음자극 제시 후 4초동안 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 실험자 마다 그림 3~7로 나타내었다. 그림에서 가로축은 제시된 HRTF의 측정방향을 나타내며 세로축은 피실험자가 정위한 방향을 나타내고 있다. 피실험자의 제시방향과 정위방향이 일치하는 경우는 대각선 상에 ○가 표시되어진다. 그리고 제시방향이 0도인 자

극음을 180도로 정위한다든지 30도의 자극음이 150도로 정위하는 경우 즉, 귀 축에 대하여 대칭으로 전후를 잘못 정위하는 경우는 점선상에 ○를 표시하였다. 그림의 위에는 간략화의 경계 주파수를 표시하였다.

그림 3~6을 보면 피실험자 1~4에 대해서는 경계 주파수가 대각선상에 응답이 집중하고 있으며 제시방향과 정위방향이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고 2kHz 이하에서도 거의 같은 결과가 나타났다. 그러나 피실험자 1~3은 경계 주파수 4kHz 이상의 경우에는 제시방향이 전방인 경우에, 전후 정위에는 혼란을 가져오는 경향이 나타났다. 피실험자 4는 8kHz 이상에서 전후 혼란의 증가가 나타났다. 그림 7의 피실험자 5는 다른 피실험자에 비하여 간략화의 경향은 그다지 나타나지 않으나 전체 경계 주파수의 경우에서 전후 혼란이 많음을 나타내고 있다. 그리고 각 피실험자 공통으로 경계 주파수에 따라서는 전후 혼란이 보이며 정위방향이 크게 벗어난 것은 그다지 보이지 않았다.

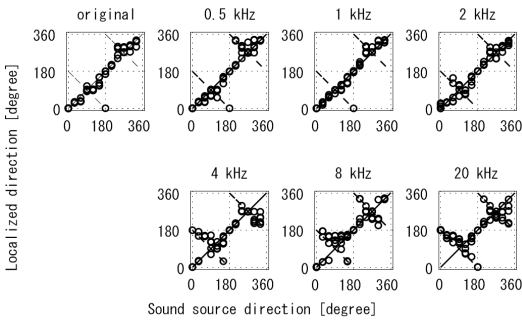


그림 3. 피실험자 1의 음상정위 결과
Fig. 3 Result of sound localization(subject 1)

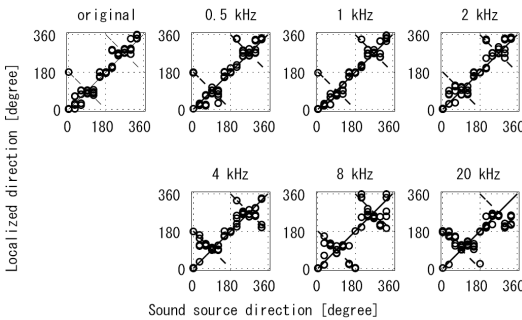


그림 4. 피실험자 2의 음상정위 결과
Fig. 4 Result of sound localization(subject 2)

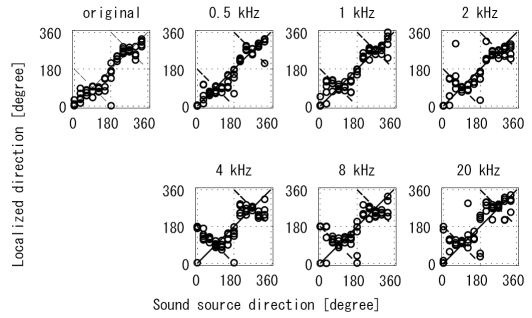


그림 5. 피실험자 3의 음상정위 결과
Fig. 5 Result of sound localization(subject 3)

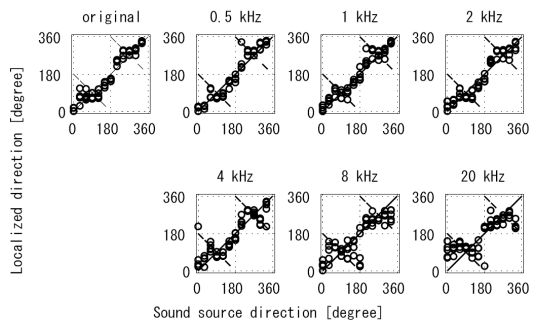


그림 6. 피실험자 4의 음상정위 결과
Fig. 6 Result of sound localization(subject 4)

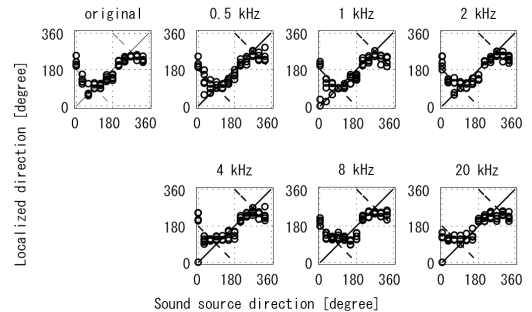


그림 7. 피실험자 5의 음상정위 결과
Fig. 7 Result of sound localization(subject 5)

IV. 간략화가 방향지각에 미치는 영향

HRTF의 간략화에 의한 정위의 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 8에 나타내

었다. 그림에서 가로축은 경계 주파수를 나타내며 세로축은 평균 정위오차를 나타내고 있다. 이것을 보면 피실험자 1, 3, 4는 경계 주파수가 높을수록 간략화가 진행되고 있음을 나타내고 0kHz의 경우에 비하여 5도에서 10도 정도 평균 정위오차가 크게 되고 있음을 알 수 있다. 그러나 다른 피실험자는 어떤 경계 주파수에서도 평균 정위오차의 변동은 작고, 간략화의 영향은 그다지 없는 것으로 보인다.

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 5를 제외한 모든 피실험자가 경계 주파수 4kHz 이상의 경우에서 원래의 신호보다도 전후 혼란율이 증가하고 있음을 확인 할 수 있다. 피실험자 5는 원래의 신호에서 다른 피실험자 보다도 전후 혼란율이 크게 되고 있으며, 경계 주파수가 높게 되어도 전후 혼란율의 변동은 작다.

그리고 회절의 성질에 의해 HRTF의 저역 주파수 특성은 방향 의존성이 작다. 여기서 청취자의 머리를 구로서 가정하여 반경을 9, 10cm로 하고 청취자의 옆

방향에 있는 음원 측의 귀와 반대편 귀에 도달하는 경로차를 d_1 혹은 d_2 라고 하면 다음 식(3)과 같이 된다.

$$d_1 = (9 \times \frac{\pi}{2}) + (9 \times \sin \frac{\pi}{2}) \approx 23cm, \dots\dots\dots (3)$$

$$d_2 = (10 \times \frac{\pi}{2}) + (10 \times \sin \frac{\pi}{2}) \approx 26cm$$

음속을 340m/s라고 하면 1Hz의 음이 가지는 파장은 340m이므로 머리회절에 의해 감쇄되는 영역은 $340/0.23 \approx 1.48kHz$, $340/0.26 \approx 1.31kHz$ 에 의해 1.3~1.5kHz 이상이 된다. 약 1.3 kHz 이하의 영역은 거의 감쇄되지 않기 때문에 방향 의존성이 작다고 생각되어진다. 이러한 이유로 본 연구의 간략화는 1kHz 이하에 적용 가능한 것으로 생각되어진다.

V. 결론

본 연구에서는 HRTF 저역 주파수 영역에서의 간략화가 음상정위에 미치는 영향에 관하여 검토하였다. 측정된 HRTF에 대하여 분석한 결과, HRTF의 주파수 특성의 표준편차를 보면 저역의 주파수 특성은 고역에 비하여 방향 의존성이 작음이 나타났다. 이것은 저역의 주파수 대역에서 간략화의 가능성을 나타낸다. 간략화는 경계 주파수를 차단 주파수로 하는 고역통과 필터를 삽입하여 저역의 주파수 진폭특성을 감쇄시키는 방법으로 하였다. 그리고 간략화를 한 HRTF를 평가하기 위하여 청취실험을 하였다. 청취실험의 결과, 많은 피실험자가 경계 주파수 4kHz 이상의 경우에 전후 혼란을 가져왔다. 그리고 실험결과에 대한 정위오차, 전후 혼란율을 산출함으로써 HRTF의 주파수 특성의 간략화에 있어서 정위에 미치는 영향을 방향 지각과 전후 지각의 관점에서 분석하였다. 정위오차에 대해서는 HRTF의 주파수 특성을 간략화 하여도 방향 지각에 영향이 없다는 것이 나타났다. 전후 혼란율에 관해서는 HRTF의 1kHz 이하의 주파수 특성을 간략화 하여도 영향이 없다는 것이 나타났다. 최종적으로 HRTF의 1kHz 이하의 주파수 특성에 본 연구의 간략화를 적용하여도 정위에 영향을 미치지 않는다는 것을 명확히 하였다. 차후로는 고역의 주파수

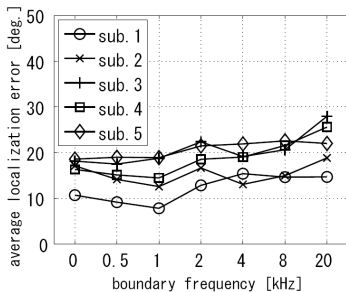


그림 8. 경계 주파수에 의한 평균 정위오차의 변화
Fig. 8 Localization error by boundary frequency

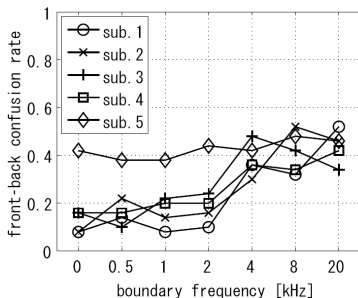


그림 9. 경계 주파수에 의한 전후 혼란율의 변화
Fig. 9 Front-back confusion rate by boundary frequency

특성의 간략화에 대하여 정위에 미치는 영향에 대하여 검토 할 예정이다.

저자 소개

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 KE-MAR dummy-head microphone," MIT Media Lab, 1994.
- [5] E. A. G. Shaw, 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] 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.
- [8] A. Kulkarni, H. S. Colburn, "Infinite-impulse-response models of the head-related transfer function," J. Acoust. Soc. Am, 115(4), 1714-1728, 2004.
- [9] Senova Melis A., Mcanally Ken I., 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.
- [10] H. Moller, M. F. Sorensen, C. B. Jensen, and D. Hammershoi, "Binaural technique," J. Audi Eng. Soc., 44(6), 451-469, 1996.
- [11] N. Aoshima, "Computer-generated pulse signal applied for sound measurement," J. Acoust. Soc. Am., 69(55), 1484-1488, 1981.



이채봉(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

※ 관심분야 : 신호처리, 음향공학