한국소음진동공학회 2009년 춘계학술대회논문집, pp.103~107

옷가지와 안경 착용에 따른 머리전달함수의 스펙트럼 왜곡

Spectral Distortion of Head-Related Transfer Function Due to Wearing Clothes and Glasses

조현*·황성목*·이윤재*·박영진† ·박윤식*

Hyun Jo, Sungmok Hwang, Yun-Jae Lee, Youngjin Park, and Youn-sik Park

Key Words : Head-Related Transfer Function(머리전달함수), spectral distortion (스펙트럼 왜곡)

ABSTRACT

Because individual HRTFs (Head-Related Transfer Functions) vary from a person to a person, a HRTF database has been measured by researchers to investigate the inter-subject variation, and to generate high fidelity virtual sound image. Individual HRTFs not only vary between subjects but also vary due to wearing clothes and glasses in daily life. However, influence of different dressing condition on the measured HRTF was not sufficiently investigated. To quantify the effect of wearing clothes and glasses, dummy's HRTF is measured in an anechoic chamber with various dressing condition, and is evaluated in the sense of spectral distortion. HRTFs are measured both in the median plane and in the horizontal plane. In the median plane, under 6kHz, effect of different wearing clothes and glasses is negligible. Over 6kHz, however, effect of clothing distorts HRTF about 6dB in the sense of spectral distortion. Moreover, at high frequencies, effect of glasses is no longer negligible. In the horizontal plane, at some azimuths, even additional light cloth over the dummy can change the spectrum of HRTF (6dB spectral distortion) especially when sound source is at contralateral positions. Therefore, HRTF measurement with different wearing conditions can broaden the capability of HRTF customization whose technique utilizes a HRTF database.

1. 서 론

시각정보나 심리적인 영향을 제외하고 사람이 음원의 위치를 인지하는 데에는 양이간시간차(ITD, Interaural Time Difference), 양이간음압차(ILD, Interaural Level Difference), 스펙트럼 변화(spectral modification) 등이 사용된다.[1, 2] 특히 양이간시간차와 양이간음압차의 경우에는 주로 수평면 상의 음원위치 추정에 사용되며 스펙트럼 변화는 양이간시간차와 양이간음압차가 거의 일정한 cone of confusion 상에서 사람이 음원의 고저각 변화를 알 수 있도록 해준다.

이러한 인지단서들은 머리전달함수(HRTF, Head-Related Transfer Function)[3]에 포함되어 있으며 음원(sound source)과 귀 고막 간의 전달함수인 머리전달함수를 사용함으로써 헤드폰이나 다채널 스피커 등을 이용해 3 차원 입체 음향을 구현하는 것이 가능하다.[4, 5]

머리전달함수는 음원의 위치에 따라 변화할 뿐만 아니라, 개개인 별 신체치수 차이로 인해 그 특성이 변화한다.[6, 7] 많은 피실험자를 이용하여 머리전달함수 데이터 베이스를 만드는 노력은 이러한 개개인 별 머리전달함수의 차이를 분석하여 공학적으로 활용하기 위해서 이다.[8] 한편, 머리전달함수 데이터 베이스로부터 맞춤형 머리전달함수를 이끌어 내는 등의 노력은 청취자의 머리전달함수를 직접 측정하지 않고도, 간접적으로 구현해내기 위함이다.[9, 10, 11]

머리전달함수는 음원과 귀 고막 간의 음향학적 전달함수이기 때문에 일상생활 속에서 옷가지나 액세서리 등의 착용여부에 따라서 전달함수의 특성이 달라질 수 있으나, 그에 대한 영향을 정량적으로 살펴본 연구는 아직 미미하다. 본 논문에서는 옷가지

† 교신저자; 정회원, KAIST 기계공학과
E-mail : yjpark@kaist.ac.kr
Tel : (042)350-3036, Fax : (042)350-8220
* KAIST, 기계공학과

Table1 Features and specifications for HRTF measurement.

Features	Specifications
Sampling frequency	48kHz
Resolution of speaker position	5 degree
NFFT (Number of FFT)	2048
Frequency resolution	about 23Hz

나 안경의 착용여부에 대해서 머리전달함수의 특성이 어떻게 달라질 수 있는지 살펴보고, 머리전달함수의 변화를 정량적으로 분석할 것이다.

2. 실험장치 설명

옷가지나 액세서리의 착용여부에 대한 머리전달함수의 변화를 살펴보기 위해, **Table1**의 조건 하에서 더미의 머리전달함수가 무향실(anechoic chamber)에서 측정되었다. 음원이 중앙면(median plane)과 수평면(horizontal plane)에서 변화할 때 스피커와 마이크로폰 간의 전달함수를 측정하였다. 자유음장(free-field)에서 머리중앙에 마이크로폰을 두고 전달함수를 추가적으로 측정함으로써 스피커의 동특성을 보상할 수 있었다. 머리전달함수의 측정은 옷가지와 안경의 변화에 따라 5번 수행하였다. 편의상, 추후의 논의에서는 더미에 아무런 착용이 없는 경우를 조건N, 가벼운 옷가지를 입혔을 경우를 조건L, 또 다른 옷가지(가벼운 옷보다는 두꺼운 잠바)를 입혔을 경우를 조건M, 두꺼운 옷가지를 입혔을 경우를 조건H, 그리고 안경을 착용시켰을 경우를 조건G라고 명명하겠다. 실험장치의 구성과 각각의 조건은 **Figure1**

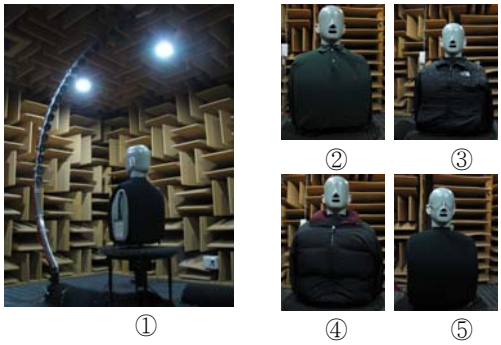

Figure1 HRTF measurement system (left) and 5 different dressing conditions. ①: nominal, ②: light clothing, ③: medium clothing, ④: heavy clothing, ⑤: taking glasses.

에서 확인할 수 있다.

3. 실험결과

3.1 머리전달함수 측정결과

(1) 좌표계 설명

머리전달함수는 중앙면과 수평면 상에 위치한 음원에 대해서 측정되었다. 본 논문의 모든 그래프에서 수평각(azimuth angle)은 반 시계 방향으로 정의되며, 0도가 음원이 정면에 위치할 때이고, 90도는 음원이 왼쪽 귀 방향으로 치우친 경우이고, 180도는 음원이 머리 뒤에 위치한 경우이다. 한편, 고저각(elevation angle)은 밑에서 위로 정의되며, 0도가 음원이 정면에 위치할 때이고, 90도가 음원이 머리 위에

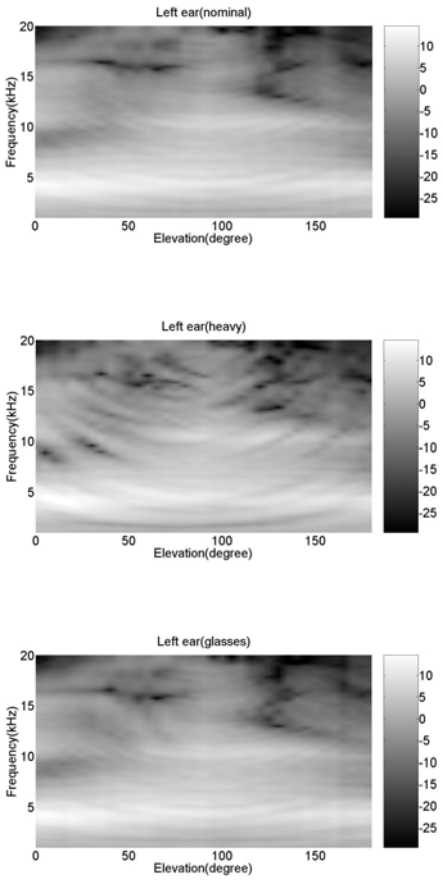

Figure2 Magnitude response of HRTF in median plane. Top panel is nominal HRTF, middle panel is HRTF of heavy clothing, and bottom panel is HRTF of taking glasses on the dummy.

위치할 때이고, 180도가 음원이 머리 뒤에 위치한 경우이다.

(2) 시간영역 결과

옷가지 및 안경의 착용여부에 따라서 머리전달함수의 시간영역 표현(HRIR, Head-Related Impulse Response)은 주된 peak 발생 후, 수 샘플 이후에서 변화하게 된다. 착용조건 변화에 따라서 peak의 위치는 변하지 않기 때문에 옷가지 및 안경의 착용여부의 변화는 시간영역에서 가장 중요한 파라미터인 양이간시간차에 영향을 주지 않는다.

(3) 주파수영역 결과

주파수 영역에서는 옷가지 및 안경의 착용여부에 따라서 물결모양의 스펙트럼 변화가 관찰된다. (**Figure2**) 30도 간격으로 머리전달함수의 측정결과를 살펴보면, 옷가지 변화에 따라서 깊은 노치가 발생할 수 있음을 확인할 수 있다. (**Figure3**) 이러한 깊은 노치는 조건M, 조건H에서 나타나며 고주파에서는 조건G에서도 나타남을 확인하였다.

3.2 스펙트럼 왜곡

측정된 머리전달함수를 정량적으로 살펴보기 위하여 스펙트럼 왜곡(spectral distortion)[12]을 이용해서 데이터를 분석하였다.

(1) 스펙트럼 왜곡의 정의

스펙트럼 왜곡은 다음 식과 같이 정의된다.

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left[20\log_{10}\left|\frac{H_{\text{nominal}}(f_k)}{H_{\text{condition}}(f_k)}\right|^2\right]}$$

관심 주파수 대역에서 스펙트럼 왜곡을 살펴봄으로써 머리전달함수의 주파수 대역 별 변화를 정량적으로 분석 가능하다.

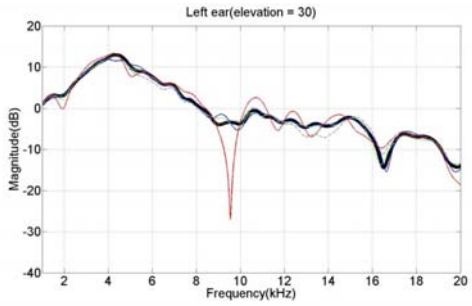

Figure3 Magnitude response of HRTFs at 30 degrees elevation angle. Black line is nominal condition, red line is heavy clothing condition, blue line is medium clothing condition, ivory line is light clothing condition, and dotted line is the condition of taking glasses.

(2) 스펙트럼 왜곡을 이용한 머리전달함수 분석

중앙면 상, 그리고 수평면 상에서 음원이 변화할 때 옷가지나 안경 착용 여부에 다른 머리전달함수의 변화를 스펙트럼 왜곡을 이용하여 분석하였다.

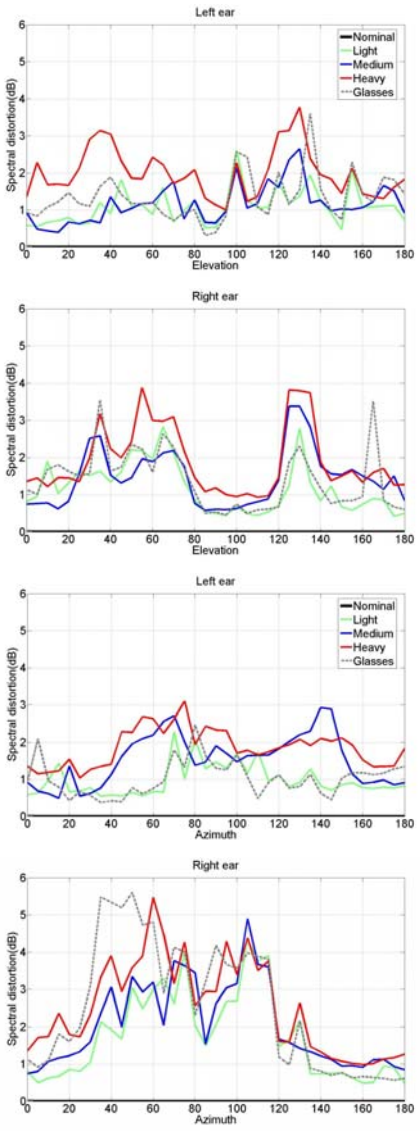

Figure4 Spectral distortion due to different dressing conditions (in the range of audio frequency). From the top panel to the bottom, left ear spectral distortion at median plane, right ear spectral distortion at median plane, ipsilateral spectral distortion at horizontal plane, and contralateral spectral distortion at horizontal plane are depicted.

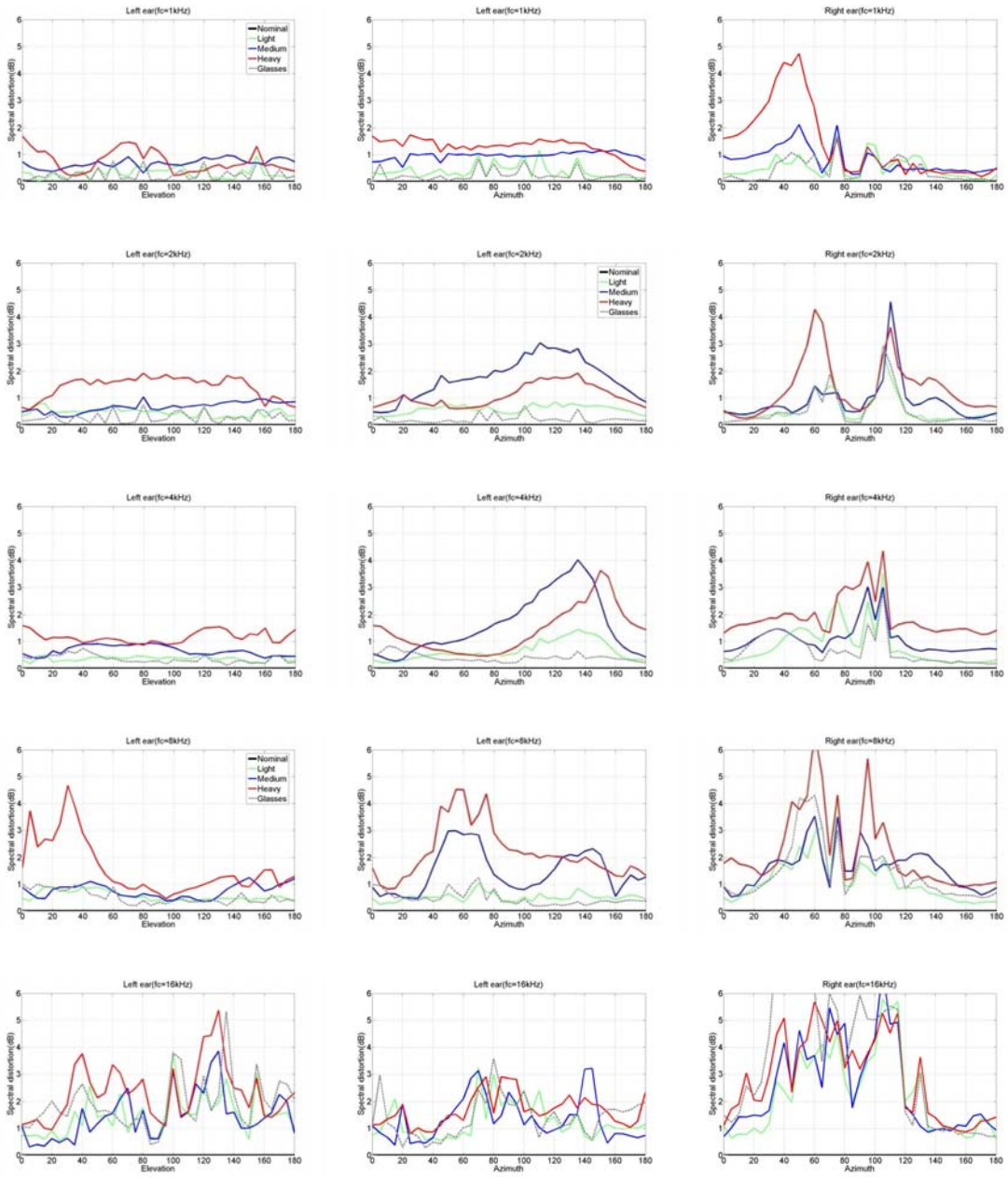

Figure5 Octave band analysis of spectral distortion due to different dressing conditions. Left column indicates the spectral distortion in median plane (left ear), middle column indicates the ipsilateral spectral distortion in horizontal plane, and right column indicates the contralateral spectral distortion in horizontal plane. From the top row to the bottom row, results of octave band analysis (center frequency of 1kHz, 2kHz, 4kHz, 8kHz, and 16kHz) are depicted.

Figure4는 전 가청주파수에서 스펙트럼 왜곡을 분석한 결과를 보여준다. 음원이 중앙면 상에서 변화할 때에도 왼쪽 귀와 오른쪽 귀의 스펙트럼 왜곡이 다르다. 이는 양쪽 귀의 머리전달함수가 귀의 비대칭으로 인해 다르기 때문이다. 한편, 음원이 수평면 상에서 변화할 때에는, 음원과 귀의 위치가 가까운 동측위치(ipsilateral position) 보다는 음원과 귀의 위치가 반대가 되는 대측위치(contralateral position)에서

스펙트럼 왜곡이 커짐을 확인할 수 있다.

Figure5는 스펙트럼 왜곡을 옥타브 밴드 별로 분석한 결과를 보여준다. 스펙트럼 왜곡의 관점에서, 중앙면 상에 음원이 위치하면 6kHz 미만에서 옷가지나 안경의 영향이 2dB 미만으로 작게 변화하는 반면, 6kHz 이상의 주파수에서는 스펙트럼 왜곡이 커지며 약 6dB 까지 증가함을 알 수 있다. 한편, 수평면 상에서는 대측위치에서 1kHz를 중심주파수로 가지는 옥타브 밴드에서도 스펙트럼 왜곡이 최고 5dB까지 발생함을 확인할 수 있었다. 6kHz 미만의 주파수에서 전반적으로 중앙면 상의 결과와 비교할 때 스펙트럼 왜곡이 큰 편이었으며, 6kHz 이상에서는 대측위치의 스펙트럼 왜곡이 두드러지게 커짐을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 스펙트럼 왜곡의 관점에서 옷가지나 안경 등의 영향이 머리전달함수에 미치는 영향을 살펴보았다. 옷가지나 안경 등의 영향으로 머리전달함수의 특정 주파수에서의 노치나 물결 등이 확인되었다.

특히 조건H의 경우에는 다른 조건과 비교하여 조건N에 비해 노치의 발생 및 스펙트럼 왜곡이 크기 때문에 주파수 영역의 머리전달함수에서 가장 큰 변화를 보였다. 또한 약 11kHz 이상에서 조건G의 경우에 스펙트럼 왜곡이 경우에 따라서 6dB 이상으로 커지는 현상이 발생하기 때문에 머리전달함수의 관심영역이 11kHz 이상이라면 안경의 착용도 고려해야 할 대상이 됨을 알 수 있었다. 조건L 처럼 얇은 옷을 착용하더라도 대측위치에서의 머리전달함수가 달라지기 때문에 조건N과는 다른 머리전달함수가 측정됨을 확인할 수 있었다.

따라서 옷가지나 안경 등의 착용은 개인의 머리전달함수를 바꾸는 요소가 되며, 머리전달함수 데이터베이스에 기초한 맞춤형 머리전달함수 구현에 옷가지 등의 차이를 가지는 다양한 머리전달함수를 측정함으로써 매일 달라지는 머리전달함수를 효율적으로 맞춰주는 것이 가능하다.

후 기

본 연구는 두뇌 한국 21프로젝트 및 한국과학재단을 통해 교육과학기술부의 국가지정연구실 사업으로부터 지원받아 수행되었습니다 (R0A-2005-000-10112-0).

참 고 문 헌

(1) D. R. Begault, 1994, *3-D sound for virtual reality and multimedia*, Academic press.

(2) J. Hebrand and D. Wright, 1974, “Spectral cues used in the localization of sound sources on the median plane,” J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 56, pp. 1829-1834.

(3) J. Blauert, 1983, *Spatial hearing*, MIT, Cambridge, MA.

(4) F. L. Wightman and D. J. Kistler, 1989, “Headphone simulation of free-field listening. I: Stimulus synthesis,” J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 85, pp. 858-867.

(5) O. Kirkeby, P. A. Nelson, F. Orduna-Bustamante, and H. Hamada, 1996, “Local sound field reproduction using digital signal processing,” J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 100, pp. 1584-1593.

(6) E. M. Wenzel, M. Arruda, D. J. Kistler, and F. L. Wightman, 1993, “Localization using nonindividualized head-related transfer functions,” J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 94, pp. 111-123.

(7) D. J. Kistler and F. L. Wightman, 1992, “A model of head-related transfer functions based on principal components analysis and minimum-phase reconstruction,” J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 91, pp. 1637-1647.

(8) CIPIC HRTF database files, released 1.1, August 21, 2001, CIPIC Interface Laboratory, U. C. Davis. (http://interface.cipic.ucdavis.edu/)

(9) C. P. Brown and R. O. Duda, 1998, “A structural model for binaural sound synthesis,” IEEE, SAP, 6(5), pp. 476~482.

(10) S. Hwang, Y. Park, and Y-S. Park, 2008, “Comparison of head-related transfer function models based on principal components analysis,” KSNVE, Vol. 18, No. 6, pp. 642-653.

(11) K. H. Shin and Y. Park, 2008, “Enhanced vertical perception through head-related impulse response customization based on pinna response tuning in the median plane,” IEICE trans. Fundamentals, Vol. E91-A, No.1, pp. 345~356.

(12) T. Nishino, N. Inoue, K. Takeda, F. Itakura, 2007, “Estimation of HRTFs on the horizontal plane using physical features,” Appl. Acoust. Vol. 68, Issue. 9, pp. 897~908.