

한국인 평균 두형 실험더미의 제작과 머리전달함수의 측정

Development of Experimental Dummy and Measurements of Head-related Transfer Functions(HRTF) for Averaged Korean Head Shape

이 두 호* · 안 태 수*

Dooho Lee and Tae-Soo Ahn

(2008년 4월 25일 접수 ; 2008년 8월 4일 심사완료)

Key Words : Korean Head Shape(한국인 머리모양), Head-related Transfer Function(HRTF, 머리관련 전달함수)

ABSTRACT

Based on the averaged Korean head shapes that are the results of digital Korean project by KISTI and Catholic university, experimental apparatus of head dummies of Korean male and female are developed in order to measure head-related transfer functions(HRTF) by using a reverse engineering and rapid prototyping techniques. For the Korean dummies, HRTFs are measured using the substitution method over 12kHz frequency bands. At every azimuth angle 15° HRTFs are measured for elevation angles -30° , 0° and 30° . The measured HRTFs are compared with those of KEMAR(knowles electronic manikin for acoustic research) dummy head, which shows 3~5 dB difference over 4~5 kHz kHz frequency band.

1. 서 론

사람의 뇌가 소리의 인식을 위해서 사용하는 특성은 전해진 소리의 음색(spectral cue), 양쪽 귀에 전달된 소리 전달 시간 차이(interaural time difference, ITD), 음의 크기 차이(interaural level difference, ILD), 위상차이(interaural phase difference) 등으로 알려져 있다⁽¹⁾. 소음원의 음색을 제외하고 소리의 인지에 사용되는 특성은 소음원과 청각기관 사이의 전달함수인 소리전달함수(sound transfer function, STF)를 양쪽 귀에 대하여 계산하면 알 수 있다. 소리전달함수는 머리부분의 영향을 나타내는 머리관련 전달함수(head-related transfer function, HRTF)와 청각기관에 의한 전달함수의 합으로 표시될 수 있다. 머

리관련 전달함수는 소음원로부터 귀까지의 소리의 전달함수로 정의되고 음원과 고막 사이의 기하학적 형상 및 표면의 반사특성에 의하여 결정된다.

머리전달함수는 음원으로부터 이도 입구까지 소리가 전달되는 특성을 포함하고 있기 때문에 인간이 인지하는 소리의 자연스러운 재현을 위해서는 반드시 고려해야 하는 특성이다. 그러므로 머리전달함수는 가상현실, 게임소프트웨어, 음향기기 및 디지털 방송장비 등의 멀티미디어 산업에서 삼차원의 입체 음향을 구현하기 위하여 필수적인 정보로 사용되고 있다^(2,6). 대표적인 사용되는 HRTF 정보는 MIT의 미디어랩에서 측정한 KEMAR(knowles electronics mannequin for acoustic research) 더미헤드에 대한 데이터⁽³⁾가 있으며 인터넷을 통하여 공유되고 있기 때문에 많은 음향장비가 이 데이터를 이용하여 입체음향을 구현하고 있다. 그러나 HRTF는 두형의 기하학적 형상에 좌우되기 때문에 서구인을 기준으로 한 KEMAR의 HRTF는 한국인의 소리인지 특성

† 교신저자 ; 정희원, 동의대학교 기계공학과

E-mail : dooho@deu.ac.kr

Tel : (051)890-1658, Fax : (051)890-2232

* 동의대학교 대학원 기계공학과

과는 다를 수 있으며 보다 정확한 한국인의 특성에 맞는 삼차원 입체음향을 구현하기 위해서는 한국인의 특성에 맞는 HRTF 정보를 이용하는 것이 바람직하다. 이와 관련하여 이형 더미를 이용한 HRTF의 측정이 이루어져 기존의 KEMAR 더미의 HRTF와 입체음향 특성이 다를 수 있음을 증명하였고⁽⁴⁾, 한국 전자통신연구원에서 한국인의 특성을 고려한 남성 두형 및 몸통에 대한 HRTF를 측정하는 연구가 행하여졌으나⁽⁵⁾ 한국인 남성 표준 두형 인체 데이터에 대한 정확한 기술은 찾아볼 수 없었다.

정확한 한국인의 표준 체형을 과학적으로 측정하기 위하여 한국과학기술정보연구원(KISTI)에서는 최근 가톨릭의과대학 응용해부학연구소와 함께 Digital Korean 프로젝트를 수행하여 한국인의 평균 두형을 제작한 바 있다. 이 한국인 평균 두형은 시신의 정밀한 측정을 통하여 얼굴의 겉모습만 평균한 것이 아니라 피부 안쪽의 골격과 피부두께, 무게중심 및 관성주축까지를 고려한 종합적인 평균화 기법을 도입하여 제작하여 보다 자연스럽게 완벽한 한국인의 두형을 표현한 것에 의미가 있다. 이 연구에서는 이 한국인 평균 두형 데이터를 이용하여 HRTF를 측정할 수 있는 실험더미를 제작하고 HRTF를 측정하여 기존의 KEMAR 더미헤드로 측정된 HRTF와의 차이를 비교 검토하는 것을 목적으로 한다.

2. 한국인 평균 두형 더미제작

2.1 한국인 평균 머리모양

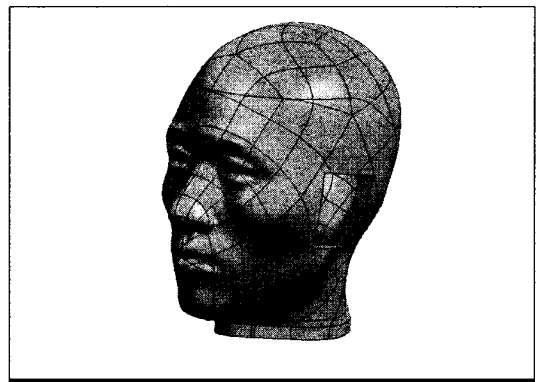
2005년 한국과학기술정보연구원에서는 남녀 한국인 각각 50구의 시신을 정밀 CT촬영하여 한국인 평균 인체데이터를 구축하는 프로젝트를 진행하였다⁽⁷⁾. 이 프로젝트의 결과물로 한국인 골격에 대한 정량적이 데이터가 구축되었고, 이 데이터를 바탕으로 한국인 남녀의 평균 두형을 제작하였다. 한국인 평균 두형의 제작에는 골격 수치를 기준으로 하고 피부의 두께 및 뼈와 피부의 무게중심 및 관성주축까지를 고려하는 평균화 기법이 사용되었다. Fig. 1은 제작된 한국인 남녀의 평균 두형의 모습이다.

2.2 한국인 평균 두형 실험 더미의 제작

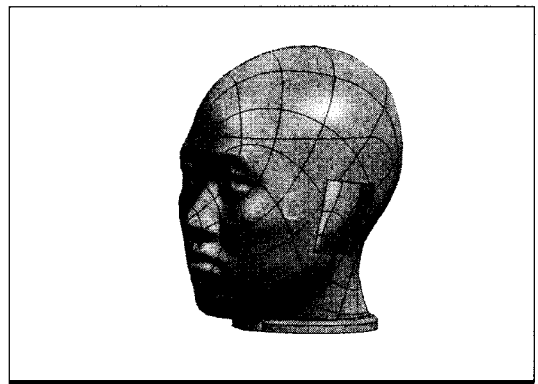
한국과학기술정보원에서 개발한 한국인의 인체특성 데이터(Digital Korean Data)를 바탕으로 제작된



Fig. 1 Averaged Korean head shapes by KISTI

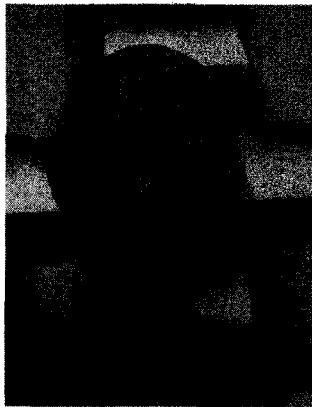


(a) Male head

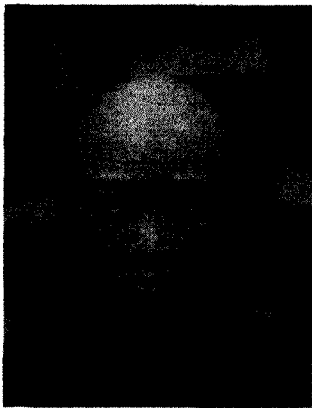


(b) Female head

Fig. 2 CAD geometry of the Korean dummy heads



(a) Male dummy



(b) Female dummy

Fig. 3 Developed Korean dummy heads

한국인의 남녀 머리부분 형상을 이용하여 머리관련 전달함수를 측정할 수 있는 실험장치를 제작하였다. 먼저 석고상의 형태로 존재하는 한국인 평균 두형 머리모양을 접촉식 삼차원 측정기를 이용하여 각 부위의 삼차원 좌표를 얻은 후 Unigraphics CAD 소프트웨어를 이용하여 삼차원 곡면데이터 파일로 변환하였다. 얻어진 곡면을 재정리한 후 두형 관련 전달함수를 측정하기 위한 두형 더미를 곡면 데이터를 이용하여 설계하였다. Fig. 2에 측정된 삼차원 좌표 데이터를 이용하여 설계된 남녀 각각의 두형 더미를 나타내었다. 머리 전달함수 측정 실험 시 귀 부분은 별도로 제작된 실험용 귀를 사용하기 위하여 실험용 귀를 탈착하기 위한 부분을 고려하였으며 마이크로폰 등을 장착하기 위하여 두형을 2개의 부분으로 나누었다. CAD파일로 변환된 한국인 평균 두형은 쾌속조형장비를 이용하여 두형을 성형하고 경화시켜

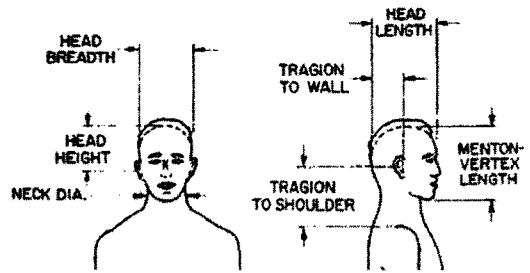


Fig. 4 Antropometric measures of the head dummies⁽⁸⁾

Table 1 Head dimensions of the experimental dummies in millimeters

Units(mm)	Male	Female	KEMAR
Head breadth	156	150	152
Head length	208	196	191
Head height	133	126	125
Tragion to wall	96.2	94.8	96.5
Tragion to shoulder	204	175	175
Neck diameter	110	107	113

도색 하였고 마이크로폰 및 실험귀의 설치 등에 필요한 장착부와 KEMAR 실험장치의 몸통부에 연결할 부위 등을 제작하여 두형 실험 더미를 완성하였다. Fig. 3에 완성된 한국인 남녀 평균 두형을 갖는 머리 관련 전달함수 실험장치를 보였다. Fig. 4와 Table 1 에는 각 실험더미의 대표치수 정의와 치수를 나타내었다.

3. HRTF의 측정

3.1 HRTF의 측정방법

머리관련 전달함수(head-related transfer function, HRTF)는 임의의 음원에서 이도 입구까지의 음향전달특성을 나타내는 전달함수이다. 머리관련 전달함수의 측정은 여러 측정 방법이 있으나 이 연구에서는 치환법(substitution method)를 사용하여 HRTF를 측정하였다⁽⁸⁾. 치환법은 두형이 놓일 위치에 자유 음장이 일정한 크기가 되도록 스피커의 입력단을 제어하여 입력신호를 얻고 동일한 신호의 스피커 가전을 행했을 때 이도 입구 등의 위치에서 음압을 측정함으로써 머리 모양이 음장에 미치는 영향을 측정하는 방법이다. 이 방법은 두 단계로 구성된다. 첫 번

제 단계에서는 두형더미가 놓여있지 않은 자유음장에서 두형더미의 머리부 중앙의 위치에서의 음압(p_r)이 일정하게 유지되는 스피커 입력단의 크기를 결정한다. 스피커 입력단의 크기는 스피커의 음향방사 특성에 따라서 주파수의 함수로 결정된다.

두 번째 단계에서는 두형더미를 정해진 위치에 위치시키고 전 단계에서 결정된 크기의 입력으로 스피

커를 가진 하면서 이도 입구에서의 음압(p_e)을 측정한다. 그러면 두형더미에 의한 음향응답의 이득 G 는 다음과 같은 간단한 식으로 계산할 수 있다.

$$G(dB) = 20 \log \left(\frac{p_e}{p_r} \right) \quad (1)$$

이 연구에서는 유효 크기가 3200 mm × 3200 mm × 2500 mm인 완전무향실에서 자유 음장을 구현하였으며 하나의 드라이버를 갖는 Bose Model 32SE 스피커를 이용하여 가진 하였다. Fig. 5에 머리관련 전달함수 측정을 위한 시험 셋업을 보였다. Fig. 6에는 측정 시 사용된 방위각과 고도의 기준을 나타낸다. 스피커와 토르소를 포함하는 두형 더미와의 거리는 1.5 m였으며 측정밴드는 100 Hz에서 12 kHz까지 로그 스케일로 0.3%씩 주파수를 증가시키면서 총 958 주파수에 대하여 수행하였다. 입력단의 제어와 측정은 CADA-X step-sine 모니터 소프트웨어와 Scadas III 프론트엔드를 사용하여 수행하였다.

Fig. 7에는 두형 더미가 없는 자유음장 상태에서

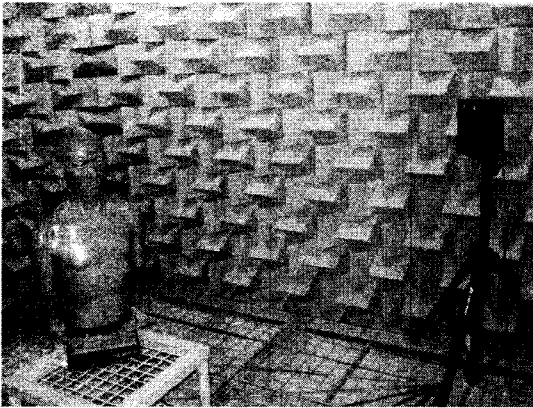


Fig. 5 Experimental set-up for HRTF measurements

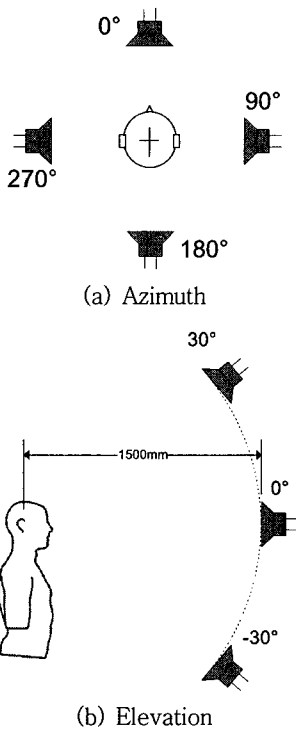
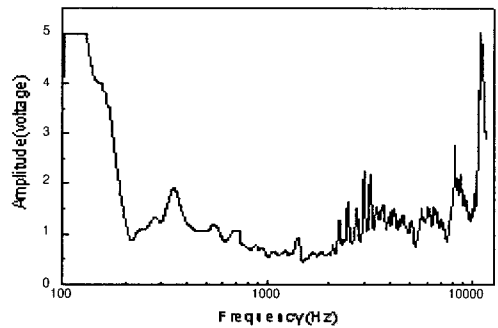
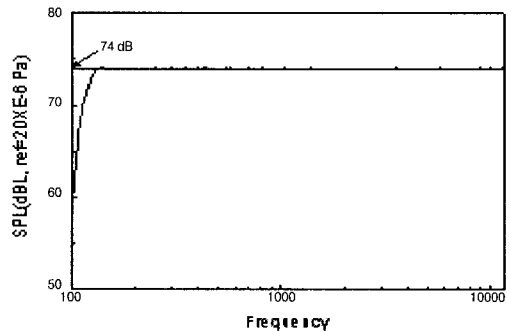


Fig. 6 Sign conventions of azimuth and elevation



(a) Excitation voltage of the speaker



(b) SPL at the position of head center

Fig. 7 Excitation signal and controlled sound pressure level

머리 중앙부 위치에 0.1 Pa(74 dB(ref = 20XE-6 Pa))의 응답을 주는 스피커의 입력단 전압과 그 때의 음향 응답 그래프를 보였다. 그림을 보면 초기의 스피커 가진 전압은 약 130 Hz 영역까지 5 V로 일정하게 유지되고 있는 것을 볼 수 있는데 이는 SCADAS-III frond-end의 D/A 단자 출력이 최대 5 V로 고정되어 있기 때문이다. 즉 이 주파수 영역에서 두형의 중앙부분에 일정한 자유음장의 음압을 유지하기 위해서는 가진 스피커의 낮은 방사효율 때문에 더 높은 스피커의 출력이 요구되나 H/W의 한계로 인하여 충분한 가진을 하지 못하고 있는 것이다. Fig. 7(b)를 보면 해당 영역의 음압이 목표값(74 dB)에 못 미치는 것을 확인할 수 있다.

3.2 HRTF의 측정

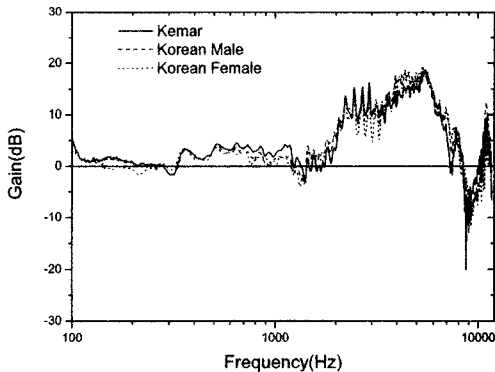
머리관련 전달함수의 측정은 KEMAR 더미와 한국인 평균형 남자 두형, 한국인 평균형 여자 두형에

대하여 각각 수행하였으며 고도를 고정한 후 0°에서부터 15°씩 방위각을 증가시키면서 측정하였다. HRTF는 -30°, 0°, +30°의 고도를 갖는 경우에 대하여 반복하여 측정하였다. 또한 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 한국인 평균 두형 더미의 HRTF의 측정을 위해서 몸통의 변화효과는 고려하지 않고 KEMAR 더미의 몸통더미를 사용하여 실험을 수행하였다. 이형(pinna)은 G.R.A.S.사의 KB0060, 61로 이루어진 작은 귀(small ear)를 기준으로 측정하였다.

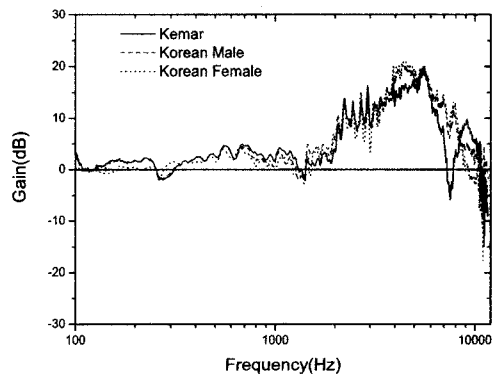
4. 측정결과 및 토론

4.1 두형더미 형상의 영향

Figs. 8~9에는 KEMAR 더미와 한국인 남녀 두형 더미의 측정된 HRTF 일부를 비교하여 그렸다. 그림에서 이득의 값은 자유음장일 때의 음압을 기준값으로 하는 데시벨 스케일로 식 (1)을 이용하여 계산하

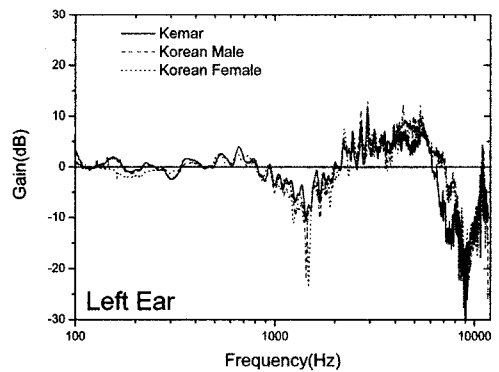


(a) Left ear

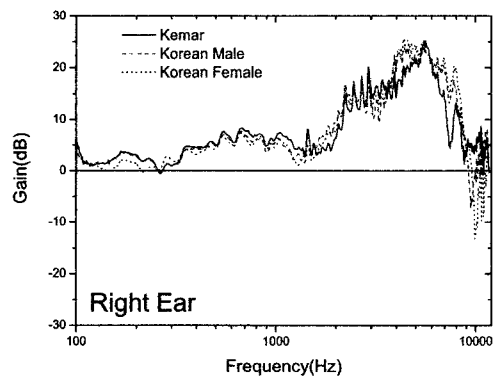


(b) Right ear

Fig. 8 Comparison of HRTFs between KEMAR and the Korean dummies(azimuth 0°, elevation 0°)

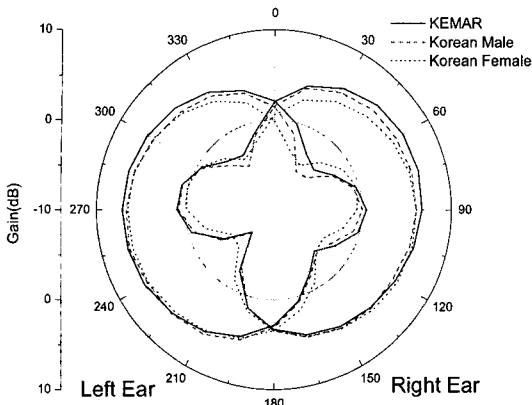


(a) Left ear

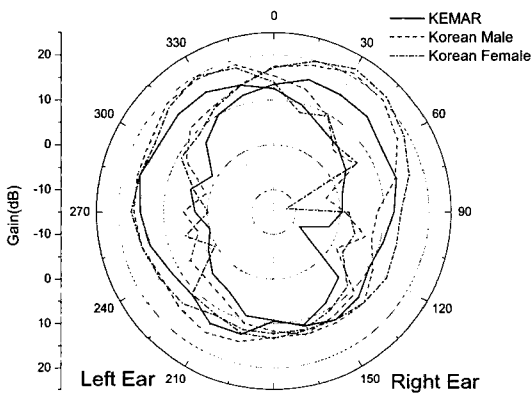


(b) Right ear

Fig. 9 Comparison of HRTFs between KEMAR and the Korean dummies(azimuth 45°, elevation 0°)



(a) 1 kHz

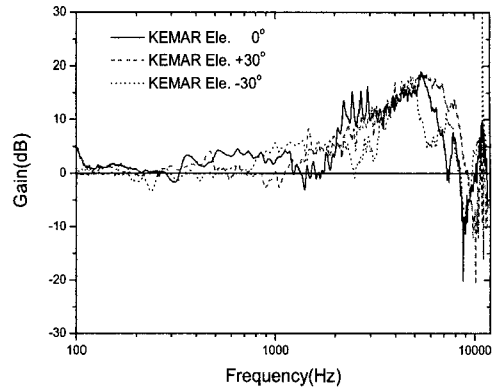


(b) 4 kHz

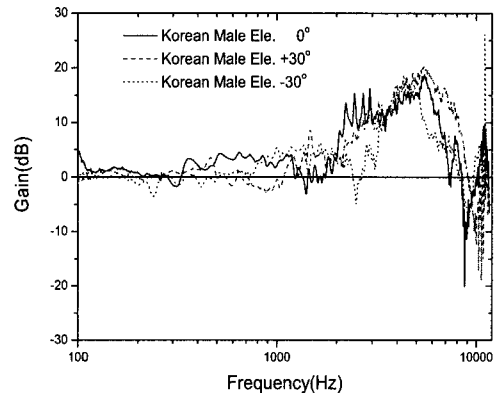
Fig. 10 Comparison of HRTFs between KEMAR and the Korean dummies(azimuth 0°)

였다. 그림을 살펴보면 KEMAR와 한국인 표준형 두형의 경우 방위각이 0°인 경우를 보면 4~5 kHz 대역의 소리 응답이 한국형 머리 응답의 경우 기존 KEMAR 더미 응답보다 최대 약 5 dB 이상 높아지는 것을 볼 수 있다. 또한 500~1000 Hz의 중주파수 영역에서는 1~2 dB 낮은 이득값을 보이고 있음을 볼 수 있다. 이러한 응답의 차이는 KEMAR 두형 더미와 한국인 평균 두형 더미의 크기와 형상에 따라서 달라지는 특성으로 이해할 수 있으며 방위각에 따라서 그 특성이 달라진다. 또한 남녀 두형의 차이는 KEMAR 더미와의 차이에 비하여 적게 나타나는 것을 볼 수 있다.

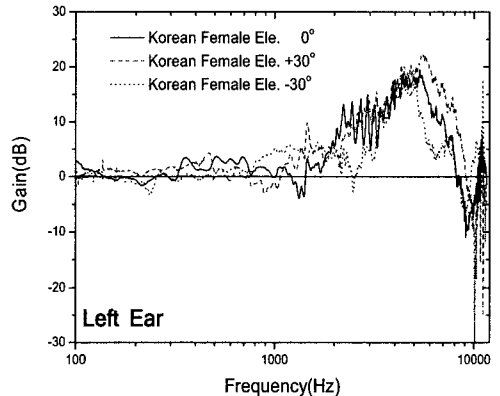
각각의 방위각에서 두형더미의 형상이 전달함수의 이득값이 미치는 영향을 보기 위하여 극좌표계를 이용하여 관심 주파수에서의 이득값을 Fig. 10에 그렸다. 그림을 보면 4 kHz 대역에서 음원이 정면에 있



(a) KEMAR



(b) Korean male



(c) Korean female

Fig. 11 The elevation change effects of HRTFs in the Korean dummies(left ear, azimuth 0°)

을 때 보다는 좌우로 30~60°에 음원이 위치했을 때 KEMAR 더미와 한국인 평균 두형 더미의 응답이 더 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 하지만 이와 같은 방위각에 따른 특성도 주파수에 따라 변하는 것에 유의하여야 한다.

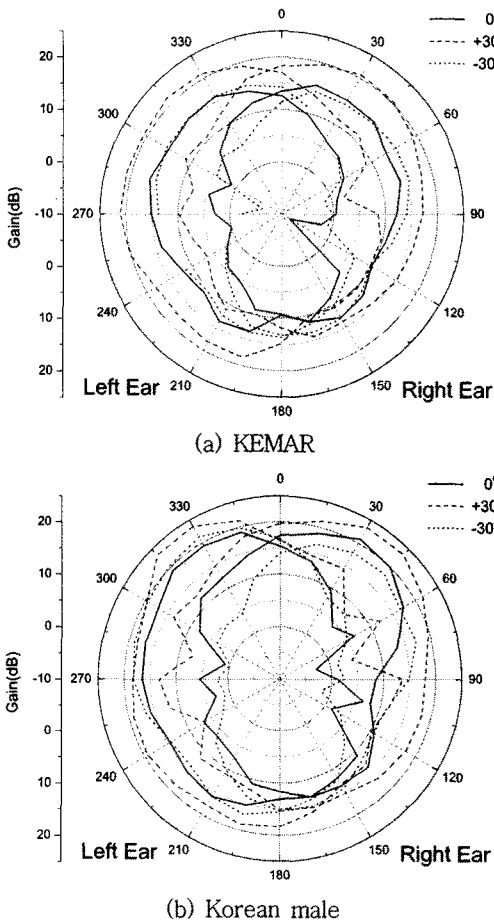


Fig. 12 Comparison of elevation change effects at 4 kHz(left ear)

4.2 음원 고도에 따른 영향

HRTF는 음원의 고도에 따라 변한다. 음원의 고도에 따라서 각각의 두형 더미가 나타내는 특성을 Fig. 11에 비교하여 그렸다. 그림을 보면 KEMAR와 한국인 남녀 두형 더미의 소음원 고도의 변화에 따른 주파수 이득특성은 전체적으로 유사하다고 할 수 있다. 음원의 고도가 귀와 수평인 상태에서 상하로 움직임에 따라 소리전달함수의 이득이 감소하는 주파수 영역이 많으나 그림에서 보듯이 1~2 kHz 대역에서는 증가하는 특성을 보이고 있다. 또한 5~8 kHz 영역에서는 소음원의 위치가 귀보다 높은 경우가 이득이 큼을 볼 수 있다. 그러나 특정 주파수영역에서 KEMAR 더미와 한국인 남녀 두형 더미의 HRTF 이득값은 그 크기가 틀리며 특정 주파수에서의 예를 Fig. 12에 예시하였다.

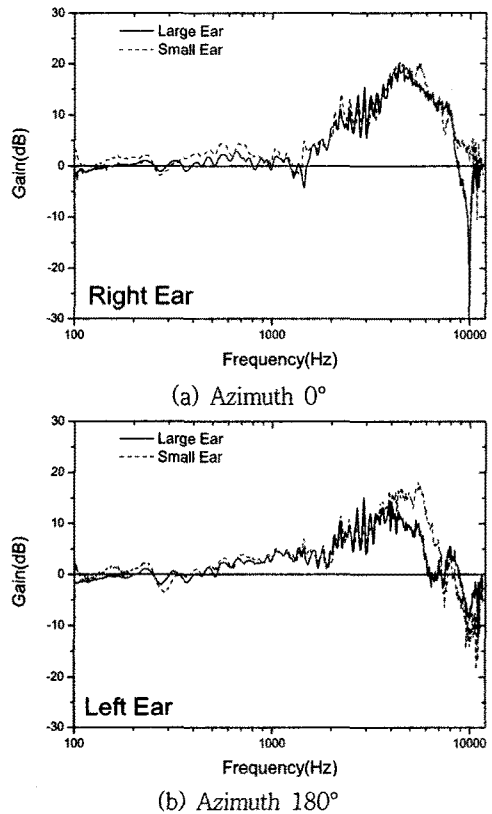


Fig. 13 The effects of ear size in the Korean male dummy(left ear)

4.3 귀의 크기 영향

귀의 이형은 HRTF의 이득에 영향을 미치는 중요한 인자의 하나이므로 귓바퀴의 크기에 따른 이득을 살펴보았다. 측정기준으로 사용한 작은 귀의 측정과 동일한 방법으로 K.R.A.S사의 큰 귀(large ear, KB0065, 66)를 장착했을 때 HRTF를 측정하고 이를 Fig. 13에 작은 귀의 결과와 비교하여 왼쪽 귀를 기준으로 그렸다. 그림을 보면 작은 귀가 큰 귀보다 5~6 kHz 주파수 대역에서 큰 이득을 갖고 있으며 그 영향은 소음원의 위치가 전면에 있을 때보다 후방에 있을 때가 차이가 커짐을 알 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 한국과학기술정보연구원에서 수행한 한국인 남녀 평균 두형 더미 데이터를 이용하여 실험더미를 제작하여 머리관련 전달함수를 측정하고 기존의 KEMAR 더미와 특성을 비교하였다. 비교 결

과 한국인 평균 두형 더미는 HRTF가 4~5 kHz의 중고주파수 대역에서 의미 있는 차이를 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 측정된 HRTF 정보를 이용하여 보다 한국인의 두형에 맞는 입체음향의 구현하기 위한 정위감(localization)의 개선 등에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

향후의 연구로 한국인의 두형 특성으로 인한 HRTF의 변화원인을 수치적인 방법을 통해서 확인하는 작업이 필요하며, 또한 측정된 HRTF 데이터를 이용하여 실제 두형의 효과를 고려했을 경우 삼차원 입체음향의 구현에 있어서 정위감의 개선 정도를 파악하는 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2007-000-10986-0). 한국인 평균 두형 석고상 사용을 허락해주신 가톨릭의과대학 응용해부학연구소 광대순박사와 두형 제작에 도움을 준 광정명, 신현식, 임채영 학생에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Schnupp, J., Booth, J. and King, A., 2003 "Modeling Individual Differences in Ferret External Ear Transfer Function", J. Acoust. Soc. Am., Vol.

113, pp. 2021~2030.

(2) Kim, Y. T. and Kim, S. M., 2005, "New HRTFs and Applications to the Virtual Acoustic Imaging Systems", Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 616~619.

(3) Gardner, W. and Martin, K., 1994, "HRTF Measurement of a KEMAR Dummy-Head Microphone," Technical Report #280, MIT Media Lab.

(4) Suh, S., Kim, J., Lee, M. and Kim, Y., 1998, "A Measurement of Head-related Transfer Functions Using the Neumann Dummy Head", Proceedings of Annual Spring Conference of Korean Society for Emotion & Sensibility, pp. 201~205.

(5) Kang, K. O., Kang, D. G., Hahn, M. S., Jho, M. J. and Jeong, D. G., 1997, "HRTF Measurement and Its Application for 3-D Sound Localization", The Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 16, No. 3E, pp. 50~55.

(6) Kim, J. H., Jeong, S. B., Yang, H. S. and Hahn, M. S., 2001, "Implementation of 3-D Audio Using Korean-type HRTF", The Proceedings of the Korean Society of Broadcast Engineers, pp. 63~67.

(7) Digital Korean Homepage, <http://digitalman.kisti.re.kr>

(8) Manikin Measurements, 1978, Proceedings of a Conference Organized by M.D. Buckhard.