

경계요소법을 이용한 한국인 머리관련 전달함수의 특성 해석[§]

이두호^{*†} · 안태수^{*} · 기동환^{*}

* 동의대학교 기계공학과

Boundary Element Analysis for Head-Related Transfer Function in the Case of Korean Adults

DooHo Lee^{*†}, Tae-Soo Ahn^{*} and Donghwan Ki^{*}

* Dept. of Mechanical Engineering, Dongeui Univ.

(Received March 9, 2010 ; Revised June 16, 2010 ; Accepted June 16, 2010)

Key Words: Head-Related Transfer Function(HRTF, 머리관련 전달함수), Averaged Korean Head Shape(한국인 평균두형), Ear Canal Resonance(이도 공명), Boundary Element Analysis(경계요소해석)

초록: 머리관련 전달함수는 음원으로부터 이도의 입구까지 소리의 전달함수로 인간이 소리의 위치를 판단하는데 중요한 역할을 하는 함수이다. HRTF 는 개인간의 편차가 크게 나는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 한국인의 평균두형에 관해서 HRTF 를 해석하는 경계요소해석 모델을 개발하고 해석 결과와 실험결과와의 비교를 통해서 모델을 검증하였다. 또한 특정 성인에 대하여 CT 촬영을 통하여 두형, 귓바퀴 및 이도의 형상을 획득하여 이를 바탕으로 이도 내의 음향응답을 전 가청주파수에서 해석할 수 있는 모델을 개발하고 실험과의 비교를 통하여 모델을 검증하였다. 개발된 모델을 이용, 경계요소 해석을 수행하고 한국인 HRTF 의 특성에 영향을 미치는 인자를 살펴보았다.

Abstract: Head-related transfer function (HRTF) is an acoustic transfer function from a sound source to the ear canal entrance position. HRTFs are very important information in the construction of virtual sound fields. HRTFs also vary for different individuals. In this study, characteristics of HRTF for an average Korean are investigated numerically by comparing with the HRTF for a standard Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research (KEMAR). A boundary element (BE) model for an adult Korean is developed using the computerized tomography (CT) data in order to investigate the variation in HRTFs for different individuals. The boundary conditions of the BE model are identified by comparing the numerical results with the experimental results. The numerical model shows that accurate HRTFs can be calculated efficiently over full audible frequency range for individuals.

1. 서 론

1.1 머리관련 전달함수

외부 음향자극에 대하여 인간의 청각기관이 작동하기 전까지 음향응답은 크게 머리전달함수(head-related transfer function, HRTF)와 이도 내에서의 응답특성에 의하여 변형되며 변형된 음향특성이 양이에서 고막의 진동을 일으켜 인간이 소리를 인지하게 된다. 머리관련 전달함수는 소음원로부터 이도 입구까지의 음향전달함수이다. 머리관련 전달함수는 사람이 외부의 소음원에 노출될 때

소음원의 위치를 판별하는 데 필요한 정보를 가지고 있는 중요한 함수이다.⁽¹⁾ 그러므로 삼차원 음장의 재구성이 필요한 가상현실, 로봇틱스, 오락기기, 화상회의 시스템 등에서 머리관련 전달함수의 추정은 매우 중요한 작업이 된다. 머리관련 전달함수는 개인간의 편차가 크며 이도 내에서의 응답 특성도 이도의 길이나 형상에 따라서 편차가 있으며 이의 정확한 고려가 보청기와 같은 청각보조기구의 설계에 있어서 중요하다. 그러나 머리관련 전달함수의 특성은 많은 경우 서구인을 대상으로 한 인체더미를 이용하거나 간단한 형상을 이용함으로써 한국인의 특성에 대한 체계적인 반영이 이루어지지 않았고 정확히 개인간의 특성을 파악하여 해석하는 연구가 이루어지지 않아 이에 대한 연구가 필요한 시점이다.

[§] 이 논문은 2010 년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2010. 3. 4.-5., 서울대) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, dooho@deu.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

정확한 삼차원 음장을 각 개인에 맞추어 구현하기 위해서는 각 개인의 머리전달함수 특성을 반영해야 하며 개인 특성을 반영하기 위한 다양한 연구들이 많이 진행되고 있다.⁽²⁻⁴⁾ 수치적인 방법으로 개인간의 소리전달 특성을 해석하는 연구로는 무한영역을 편리하게 다룰 수 있기 때문에 경계요소법이 많이 사용되고 있다.⁽⁵⁻¹³⁾ Katz^(5,6)는 경계요소법을 이용하여 개인 두형의 소리전달함수를 계산하는 모델을 개발하고 6 kHz 영역까지 해석한 후 경계조건의 영향 등을 살폈으며, 최성훈 등⁽⁷⁾은 KEMAR 모델에 대한 두형더미 모델을 개발하고 음향상반원리를 이용하여 HRTF를 효율적으로 계산하였다. Walsh 등⁽⁸⁾은 인간의 외이를 모델링 할 때 효율적인 적응 경계요소 분할법을 제시하였고, Otani 등⁽⁹⁾은 HRTF 계산시 빠른 경계요소 계산을 위한 방법을 제시하였다. 김선만 등⁽¹⁰⁾은 이도와 컷바퀴를 증가적으로 모델링 하는 방법을 제시하였고, Stinson 등⁽¹¹⁾은 이도 내의 음압계산을 위한 경계요소 모델과 혼 방정식을 비교하였다. Gan 등⁽¹²⁾은 이도와 중이를 포함하는 유한요소-경계요소 연성모델을 개발하고 이도 내의 음압 분포를 상세히 계산하였으며 Gumerov 등⁽¹³⁾은 HRTF 계산을 빠르게 수행하기 위하여 캐속다중극방법(fast multi-pole method)을 도입하여 경계요소 해석을 수행하였다. 이러한 연구들은 컴퓨터 계산능력의 증대와 경계요소법 정식화의 발전으로 점점 더 높은 주파수 대역의 음향응답에 대해서 다루고 있지만 KEMAR로 대표되는 인체 두형 더미를 다루거나 이도 등 제한된 영역을 다루는 것이 대부분이었다.

본 연구에서는 HRTF에서 한국인의 머리 두형에 따른 특성을 반영하기 위해서 한국인의 평균두형 데이터를 반영한 HRTF 계산모델을 개발하고 CT 측정으로 획득한 특정 한국인의 두형 및 이도 형상을 반영한 HRTF 및 이도 응답해석을 통해서 한국인의 소리전달특성을 알아본다.

2. 한국인 두형 데이터의 획득

2.1 한국인 평균 두형

많은 경우 머리관련 전달함수를 측정할 때 이용되는 것이 KEMAR 더미⁽¹⁴⁾이다. 이 더미는 G.R.A.S.사에서 개발된 인체 측정용 더미로 주로 서구인의 특성이 많이 반영되어 있는 것을 피할 수 없다. 한국인의 평균 두형 데이터로는 2005년 한국기술정보원(KISTI)에서 사체 50구의 데이터를 이용하여 형상화한 한국인 평균두형 모델⁽¹⁵⁾이 있으며 이 두형은 인체측정학적으로 KEMAR 더미와 상이함을 찾을 수 있다.⁽¹⁶⁾ 이두호 등⁽¹⁶⁾은 이

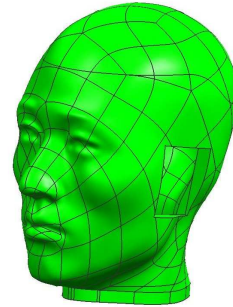


Fig. 1 A CAD model for the averaged Korean head shape of male

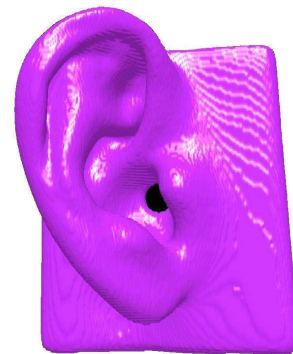
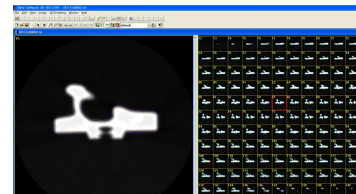
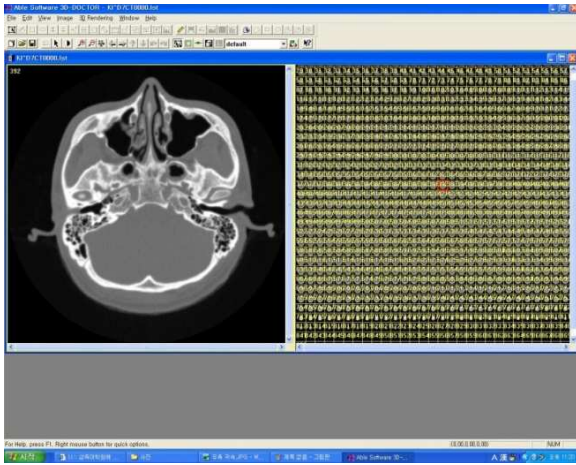


Fig. 2 A CAD model for the small ear (KB0060)

두형 데이터를 이용하여 실험용 더미를 제작하고 HRTF 측정을 통하여 KEMAR 더미와 HRTF에서 상이한 부분이 있음을 보인 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 수치해석적인 방법으로 한국인 두형에 대한 소리전달특성을 파악하기 위하여 참고문헌⁽¹⁶⁾의 두형 데이터를 이용하였으며 CAD 모델로 표현된 한국인 남성 평균 두형의 형상을 Fig. 1에 보였다. Fig. 1의 한국인 평균 두형은 조상 형태의 두형을 접촉식 삼차원 측정기를 통하여 형상을 획득한 후, CAD 소프트웨어를 이용하여 곡면데이터를 생성하였다. 귀 부분은 제외 하였으며 GRAS사의 시험용 귀(KB0060)의 형상을 Fig. 2와 같이 CT 촬영을 통하여 곡면 데이터를 얻었다. CT 촬영 데이터의 곡면 데이터 변환은 3D Doctor⁽¹⁷⁾ 소프트웨어를 이용하였다. CT 촬영의 해상도는 0.168 mm×0.168 mm×0.5 mm였다.



(a) CT scanning data for a Korean male

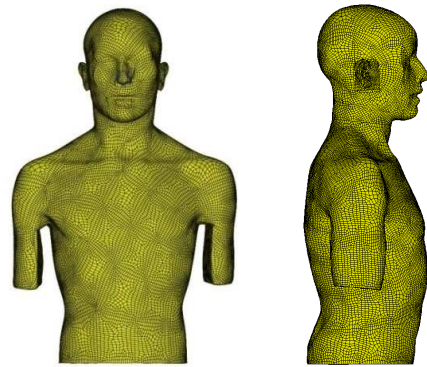


(b) Constructed head shape from the CT data

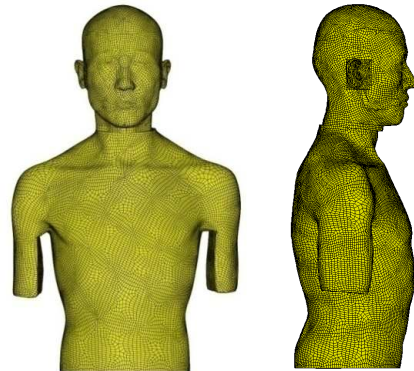
Fig. 3 Head geometry of a Korean male from CT scanning

2.2 특정 한국인 두형의 획득

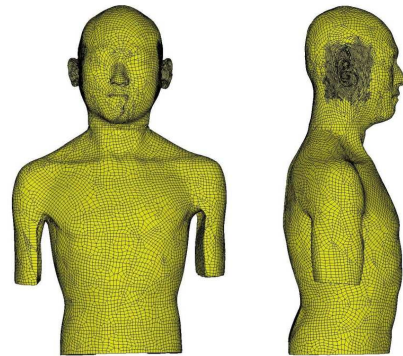
전 절의 한국인 평균 두형은 한국인의 두형을 반영하기는 하지만 평균적인 의미로서의 반영이다. 한국인 각 개인의 소리전달 특성을 해석하기 위해서는 각 개인의 두형, 귓바퀴, 이도 등의 형상을 획득해야 한다. 두형 등의 형상을 얻는 작업은 귓바퀴의 형상이 매우 복잡하기 때문에 일반적인 레이저 스캐너로는 정확한 형상을 얻기가 힘들다. 본 연구에서는 두형, 귓바퀴 및 이도의 정확한 형상을 획득하기 위하여 건강한 남자 지원자를 대상으로 정밀 CT 촬영을 통하여 형상 데이터를 획득하였다. Fig. 3 은 CT 촬영 데이터 및 3D Doctor 소프트웨어에 의해 삼차원으로 만들어진 두형의 모습을 보여준다. 지원자는 20 대의 건강한 남자이고



(a) KEMAR model



(b) The averaged Korean model



(c) A Korean male model

Fig. 4 Boundary element models for HRTF

청각에 이상이 없는 건강한 상태였으며 CT 촬영의 해상도는 0.444mm×0.444 mm×0.3 mm 였다. 곡면 CAD 데이터로 변환된 두형, 귓바퀴 및 이도의 형상은 요소분할을 위하여 유한요소 전처리 프로그램에 전달되었다.

3. HRTF 경계요소해석

3.1 HRTF 해석 경계요소 모델

한국인의 머리관련 전달함수를 해석하기 위한

Table 1 BE model summary for HRTF

Model	No. of Nodes	No of Elements	
		QUAD4	TRIA3
KEMAR	28,777	28,464	610
Averaged Korean	30,727	30,441	568
	9,353	9,142	418
A Korean male	24,895	24,271	1,244

경계요소(boundary element, BE) 해석모델을 개발하였다. 해석 모델은 비교를 위하여 서구인 중심 모델인 KEMAR 에 대한 모델과 한국인의 평균두형 데이터를 이용한 모델, 그리고 특정 개인에 대한 모델을 개발하였다. Fig. 4 은 각각에 대한 경계요소 해석 모델을 보여준다. Table 1 에는 각 모델의 데이터를 정리하였다.

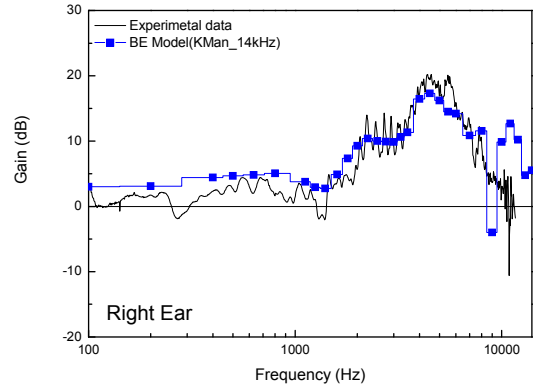
KEMAR 에 대한 경계요소 모델은 KEMAR 더미를 레이저 스캔장치로 삼차원 좌표를 획득하여 경계요소 모델을 작성하였다. Table 1 에서 보듯이 경계요소 모델은 사각형 요소를 기본으로 작성하였으며 삼각형 요소는 최소한으로 하였다. 각 경계요소 해석 모델의 몸통부는 KEMAR 인체더미의 형상 데이터를 공통으로 사용하였다. 각 인체 모델의 요소 분할시 요소의 크기는 귓바퀴 부분의 경우 2.5 mm, 몸통의 경우 4 mm 를 기준으로 요소분할을 수행하였으며 목표주파수를 14 kHz 로 정하였다. 한국인 평균 두형 모델의 경우 14kHz 모델외에 해석의 편의성을 위하여 7 kHz 를 목표로 하는 경계요소 모델을 별도로 작성하였으며 이는 Table 1 에 나타나 있다. 모든 경계요소 해석 모델은 이도 입구에서 이도를 막고 막은 표면에서의 음압을 HRTF 계산에 사용하였다.

경계요소 해석 모델의 경계조건은 경계요소 면에 임피던스 값을 부여하였으며 임피던스 값은 고정 단면에 가까운 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$ 값을 부여하였다. 임피던스 값의 주파수에 따른 변동은 고려하지 않았다.

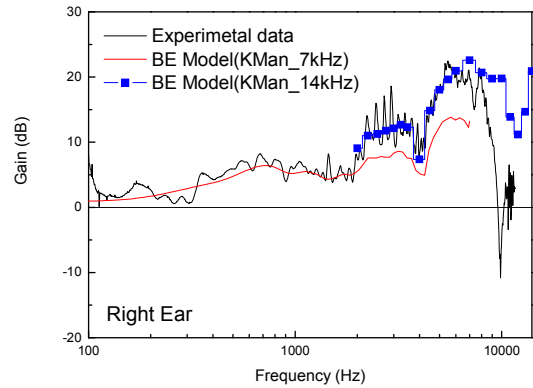
머리관련 전달함수의 해석을 위하여 두형 중심으로부터 1.5 m 떨어진 위치에 점음원을 위치시키고 음원의 방위각 및 고도를 변화시켜 가면서 다음 식과 같은 이득 값 G 를 계산 하였다.

$$G(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{P_e}{P_r} \right) \quad (1)$$

위 식에서 P_e 는 경계요소 해석으로부터 구한 이도 입구 절점에서의 음압크기를 평균한 값이며 P_r 은 두형 더미가 없을 때 두형 중앙 위치에서 동일



(a) Azimuth 0°, elevation 0°



(b) Azimuth 90°, elevation 0°

Fig. 5 Comparison of calculated HRTFs of the averaged-Korean-head-shape BE model with those of experimental HRTFs

음원에 대한 음압의 크기이다. 방위각은 두형의 정면에 음원이 위치하는 경우를 0 도로 하고 오른쪽 귀 방향으로 돌아가는 경우를 양의 방향으로 정하였고 고도는 머리 중심에서 위쪽 방향을 양의 방향으로 정하였다.

HRTF 관련 소리전달 이득의 수치계산은 상용소프트웨어인 LMS SYSNOISE 5.6⁽¹⁸⁾을 이용하여 직접경계요소 수식화에 의한 주파수해석을 수행 하였다.

3.2 HRTF 경계요소 해석 결과

경계요소 해석 모델의 정확도를 검증하기 위하여 우선 한국인 평균 두형을 갖는 경계요소 모델에 관하여 해석결과와 실험결과를 비교하여 Fig. 5 에 나타내었다. 실험결과는 참고문헌⁽¹⁶⁾의 결과를 참조하였다. 결과를 보면 경계요소 해석 모델은 실험 결과를 잘 표현하고 있음을 볼 수 있고 이는 개발된 경계요소 모델의 유효함을 잘 보여주고 있다. 또한 저주파모델(7 kHz)의 경우 2 kHz 가 넘어가면 오차가 커짐을 볼 수 있다. 이는 음향해석 시 한 과장 내에

Table 2 CPU time statistics of the HRTF BE models

Model	CPU Times/Frequency* (hr.min.sec)		
	Matrix	Solving	Total
KEMAR	0.8.36	1.22.42	1.31.28
Averaged Korean	0.9.15	2.0.58	2.10.13
	0.0.35	0.0.27	0.01.02
A Korean male	0.6.41	0.49.34	0.56.15

*HP Z600 PC with 2 Intel Xeon 2.93 MHz QC CPU and 24GB RAM with 64-bit XP Windows OS

Table 3 Anthropometric measures of the head shapes

Dimensions (mm)	Subject A	Averaged Korean
Head Breadth	175	156
Head Length	190	208
Head Height	(143, 138)**	133
Tragion to Wall	87	96.2
Menton-Vertex Length	229	232

** (left, right)

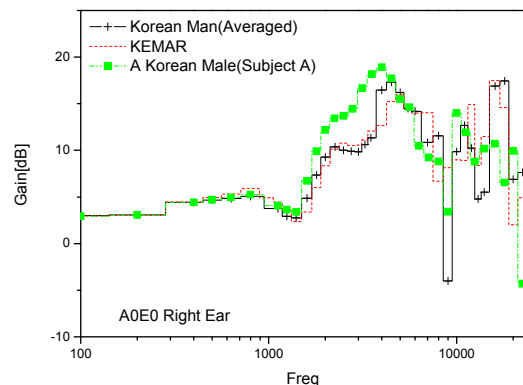
Table 4 Anthropometric measures of the pinnae

Dimensions (mm)	Subject A	Small Ear (KB0060)
Ear Length	(63,59)	(57, 58)
Ear Length above Tragion	(27,24)	(29, 29)
Concha Length	(26,27)	(27, 26)
Concha Length below Tragion	(15,17)	(19, 20)
Concha Breadth	(19,19)	(17, 16)
Ear Breadth	(29,28)	(29, 28)

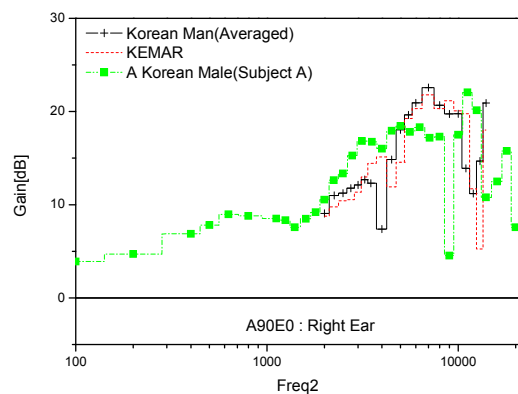
보통 6 개의 요소가 배치될 수 있도록 요소분할을 수행하는데 주파수가 높아질수록 이 조건을 충족시키기 어렵기 때문이다.

주파수 영역의 경계요소 해석은 자유도가 많아질수록 시스템 행렬을 구성하는 시간보다 해를 구하는데 많은 시간이 소요된다. HRTF 계산에 필요한 CPU 계산시간을 Table 2 에 정리하였다. 해석 주파수의 수는 해석시간에 제약이 있어 1/3 옥타브 밴드 주파수를 기준으로 각 밴드의 시작, 끝 및 중앙 주파수에 대하여 해석을 수행하였다.

개발된 경계요소 모델을 이용하여 한국인의 평균 두형이 갖는 HRTF 와 각 개별 HRTF 를 비교하고 그 결과를 Fig. 6 에 정리하였다. 그림을 보면 한국인 평균두형의 HRTF 는 4-5kHz 영역에서 KEMAR 의 HRTF 보다 5dB 정도 높게 형성되는 것을 관찰할 수 있고 이는 참고문헌⁽¹⁶⁾의 실험연구와도 상응하는



(a) Azimuth 0°, elevation 0°



(b) Azimuth 90°, elevation 0°

Fig. 6 Comparison of calculated HRTFs of a Korean male, the averaged-Korean-head-shape and KEMAR

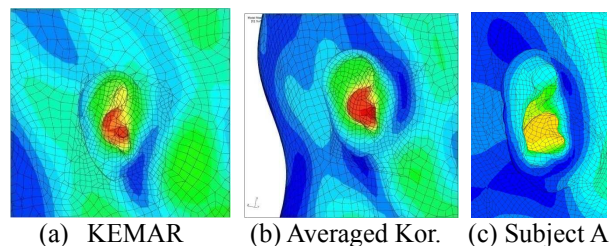


Fig. 7 Sound pressure distribution near pinna at 4500 Hz (azimuth 0°, elevation 0°)

결과이다. 특정 개인(subject A)과 한국인 평균두형의 HRTF 를 비교해보면 2-5 kHz 영역에서 5dB 이상의 차이를 보이며 KEMAR 와 한국인 평균두형 사이의 차이보다 크게 나타나고 있는데 이는 두형의 차이뿐만 아니라 귓바퀴 형상의 차이가 반영된 결과라고 판단된다. 실제로 KEMAR 와 한국인 평균두형의 모델은 실험용 작은 귀(KB0060)를 부착하고 있지만 실제 개인의 귀와 다소 차이가 있었다. 두형 모양과 귓바퀴의 형상차이를 Table 3 과 4 에 정리하였다. Fig. 7 에는 4500 Hz 에서 귓바퀴

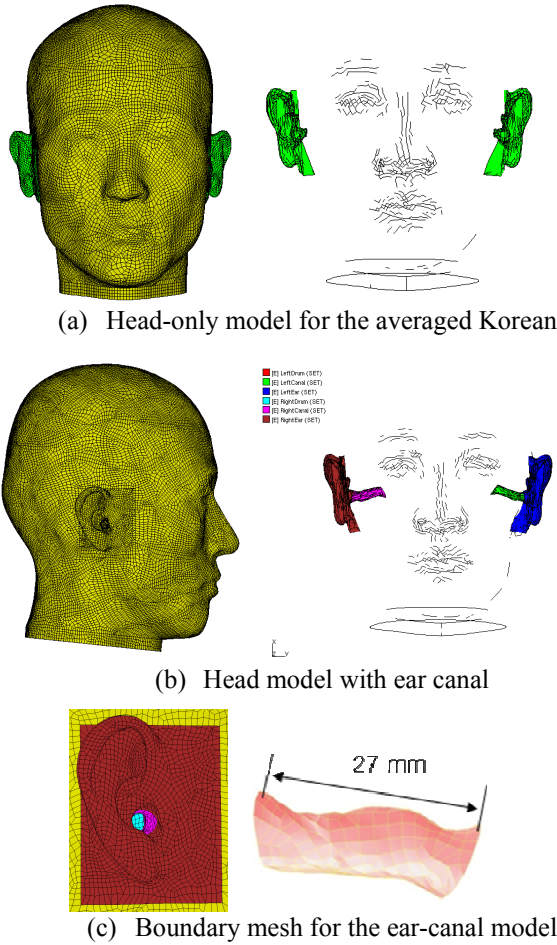
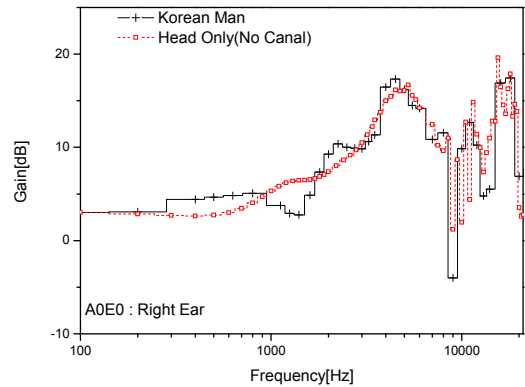


Fig. 8 Boundary element models for the averaged Korean head shape

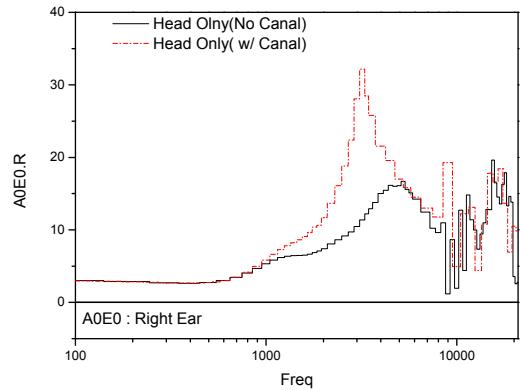
주변에서 음압의 분포를 비교하여 그렸다. 결과적으로 두형 및 귓바퀴의 형상 차이 때문에 이도 입구에서의 음압 분포가 다르게 되고 이 차이가 HRTF의 차이로 나타나게 된다.

3.3 몸통 및 이도의 영향 분석

몸통 및 이도의 영향을 알아보기 위하여 한국인평균 두형 데이터를 이용하여 두형만으로 구성된 모델과 두형에 이도 및 고막 부분을 추가한 모델을 작성하였다. 이도 및 고막의 형상은 실험자의 CT 촬영 데이터로부터 획득하여 실험용 작은 귀의 이도 입구부분을 부드럽게 부분 수정하여 모델링 하였다. Fig. 8에 두 모델의 메쉬 분할과 이도 부분을 확대하여 보였다. 이도의 길이는 27mm였으며 경계요소 모델의 최대 주파수는 21 kHz를 목표로 하여 두 모델의 노드 수는 각각 18848, 27692 개였다. 경계조건은 앞 절의 임피던스 경계조건과 동일한 값을 부여하였다.



(a) Body effect for the averaged Korean head shape



(b) Ear canal effect

Fig. 9 HRTF variation due to body and ear canal in the averaged Korean head shape BE model (azimuth 0°, elevation 0°)

우선 몸통의 효과를 보기 위해서 몸통이 있을 때와 없을 때의 HRTF를 비교하여 Fig. 9에 그렸다. 그림을 보면 몸통은 4 kHz까지의 넓은 영역에서 HRTF에 부분적인 이득의 가감 효과를 주고 있는 것을 알 수 있다. 이도의 영향은 Fig. 9(b)에 대표적인 그림을 그렸는데 이 경우 이도가 있는 모델의 경우는 고막 위치에서의 음압을 이용하여 이득을 계산한 것이다. 그림을 보면 이도의 공명에 의한 피크가 3 kHz 근방에서 매우 크게 형성되는 것을 볼 수 있다. 이도가 없는 경우의 피크는 4-5 kHz 부근에서 형성되고 이는 귓바퀴의 중앙 오목부분(concha)의 공명에 의한 것이며 방위각과 위상에 따라 크게 변하지만 이도 공명에 의한 피크는 방위각과 고도에 무관하게 일정하게 나타남을 볼 수 있는데 지면 관계상 모든 그림을 실지는 않는다.

4. 실이의 주파수 응답 해석

4.1 실이 응답 해석 모델

성인 한국인 모델(subject A)에 대한 고막에서의

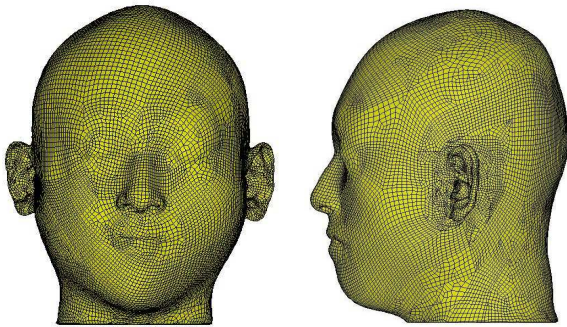


Fig. 10 Head-only boundary element model for subject A

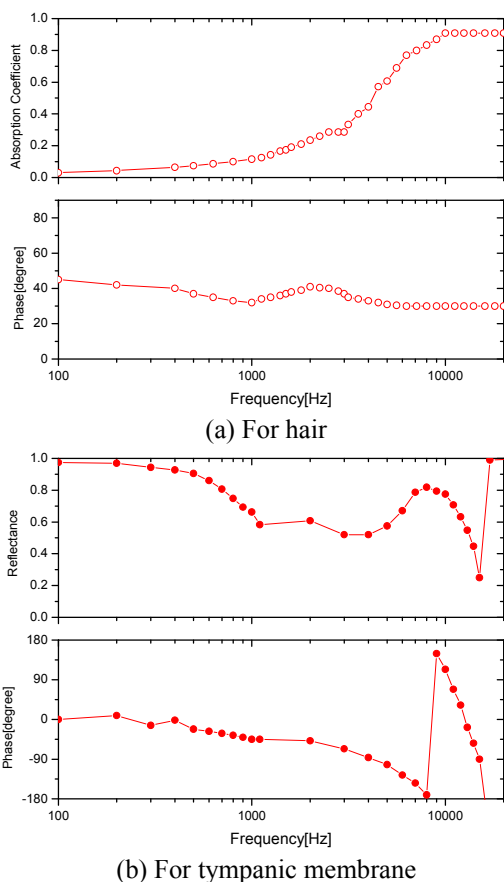


Fig. 11 Impedance boundary conditions for the BE model of subject A

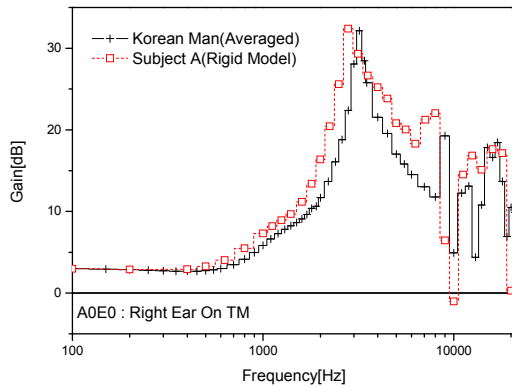
음향응답을 계산 모델을 개발하기 위하여 Fig. 10 과 같은 머리만으로 구성된 경계요소모델을 작성하였다. 이 모델은 두형, 귓바퀴, 이도 및 고막 형상을 CT 촬영 데이터에서 추출한 것으로 개별 음향응답을 알아보기 위한 것으로 모델의 노드 수는 21067 이고 최대 주파수는 21 kHz 를 목표로 하였다.

대상자 A 에 대한 경계요소모델의 경계조건은 두 가지 경우로 나누어 적용하였다. 첫 번째 경우는 3 장에서와 같이 고정단 경계조건을 적용하는

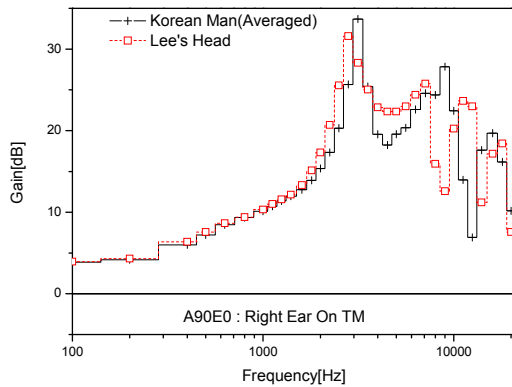
것이다. 두 번째는 피부 및 머리카락, 고막 등의 임피던스를 실제와 유사하게 적용하는 경우이다. Katz⁽¹⁹⁾의 연구에 따르면 음향문제에 있어서 인간의 피부는 거의 강체로 취급할 수 있으며 전가청주파수 대역에서 반사계수 R 이 0.97 의 값을 갖는다. 머리카락이 갖는 흡음 특성은 머리카락의 밀도에 따라 크게 좌우되며 밀도가 일정할 경우에 대하여 Katz⁽¹⁹⁾와 Treeby 등⁽²⁰⁾이 흡음률 계수를 측정하였고 후자의 경우 측정된 흡음률 데이터를 두피표면으로 환산하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 머리카락의 밀도가 40 kg/m³ 인 경우에 대하여 Katz 와 Treeby 등의 연구를 조합하여 전가청 주파수 영역의 흡음계수를 Fig. 11(a)와 같이 재구성하여 경계요소모델에 적용하였다. 고막 (tympanic membrane)의 경우는 참고 문헌^(21, 22)과 같이 많은 연구가 있었다. Voss 등⁽²¹⁾은 10 명의 대상자를 대상으로 고막의 임피던스를 측정하고 각 피실험자의 임피던스와 평균값을 발표하였으며 각 개인간의 고막 임피던스 특성변화가 상당히 크다는 것을 밝혔다. 본 연구에서는 크기는 평균값을 취하고 위상값은 가장 대표적이라고 판단되는 특정 피실험자(subject 7)의 실험값을 취하여 Fig. 11(b)와 같은 경계조건을 양쪽 귀의 고막 부위에 적용하였다. 머리카락 부위와 고막 이외의 부분에 대한 경계조건은 모두 동일한 조건을 갖는 피부 흡음계수 값(R=0.97)을 임피던스로 환산하여 적용하였다.

4.2 실이 응답 해석 결과

4.1 절의 특정 개인 두형 모델을 이용하여 두형 및 이도의 형상차이에 의한 고막 응답을 비교하기 위하여 3.3 절의 한국인 이도를 갖는 평균모델과의 고막응답을 비교하여 Fig. 12 에 그렸다. 두 경우는 모두 고정단 경계조건을 갖는 경우이다. 그림을 살펴보면 이도의 공명에 의한 피크의 위치가 약간 차이가 나고 4-8 kHz 영역에서 응답에 차이가 있는 것을 볼 수 있다. 첫 번째 공명의 위치변화는 한국인 평균두형 모델에 사용된 이도의 형태 및 길이가 피실험자 A 와 달랐기 때문이며 고주파 영역의 변화는 귓바퀴와 이도의 형상 영향이 혼재되어 있는 것으로 판단된다. 그러므로 2-3 kHz 영역의 고막응답은 이도의 길이방향 공명에 의한 것으로 이도의 길이가 크게 영향을 미치고 귓바퀴의 형상에 의한 영향은 상대적으로 미미하며 4-8 kHz 의 영역에서 귓바퀴의 영향과 이도의 형태가 영향을 크게 미친다는 것을 알 수 있다. Fig. 13 에는 피실험자 A 의 모델에서 고정단 경계조건과 피부,



(a) Azimuth 0°, elevation 0°



(b) Azimuth 90°, elevation 0°

Fig. 12 Comparison of the acoustic responses of Subject A's head model on TM with those of the averaged Korean head shape model

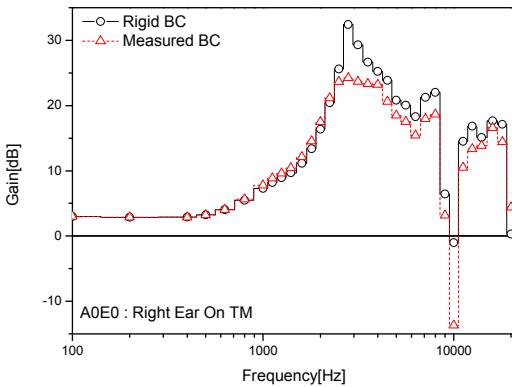


Fig. 13 Effects of boundary conditions for the subject A's model (Azimuth 0°, elevation 0°)

피부, 머리카락 및 고막 부위에 실측한 임피던스 경계조건을 부여했을 때 고막에서의 음향응답의 차이를 그렸다. 그림에서 보듯이 고막에서의 응답은 고막의 임피던스에 따라서 이도의 공명 주파수에서 10dB 이상 차이가 나며 고주파수 영역에서도 3-5dB 정도의 차이가 발생한다.

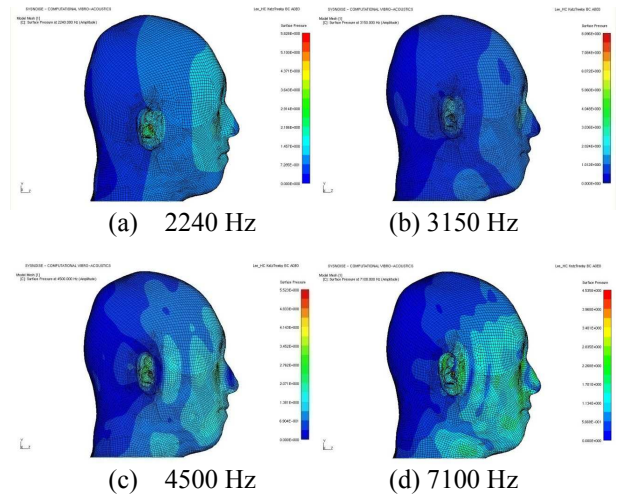
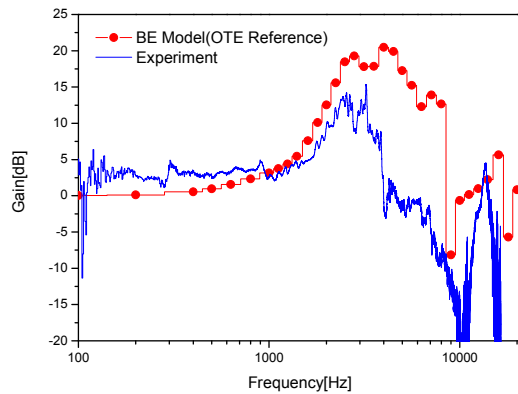


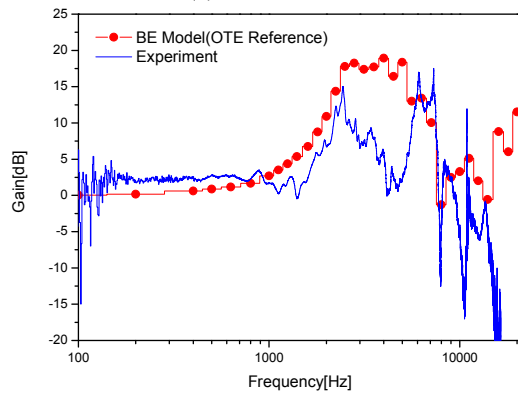
Fig. 14 Sound pressure distribution calculated from subject A's head model with the measured boundary conditions (Azimuth 0°, elevation 0°)

Fig. 14 에는 측정된 임피던스 경계조건을 부여한 경우에 경계요소해석에 의한 음장분포를 대표적인 주파수에 대하여 그렸다. 피실험자 A 의 계산결과와 실이 응답을 비교하기 위하여 이도 내에서의 응답을 측정하였다. 측정은 외경 1.6 mm 두께의 프로브 마이크로폰을 사용해서 고막에서 5 mm 떨어진 지점을 대상으로 음향응답을 측정하였다. 음향응답에 대한 이득 기준점은 오른쪽 귀 위(over the ear, OTE) 점을 사용하였다. 측정된 이도 내의 응답과 계산 결과를 Fig. 15 에 도시하였다. 그림을 보면 경계요소 해석 모델은 실험값과 유사한 경향을 보이고 있으나 3-5 kHz 영역에서 낮은 이득 경향을 재현하지 못하고 있는 것으로 보인다. 이는 몸통의 유무, 실험 측정의 정확한 위치, 의류의 탈착 여부 등과 같은 실험과 해석 조건의 불일치에서 기인하는 바도 있겠지만 근본적으로는 고막의 임피던스 경계조건이 피실험자 A 와 상이해서 발생하는 현상으로 이해될 수 있다. 이에 대한 대책으로 각 개인별 경계요소해석 모델의 생성시 고막의 임피던스를 측정하여 적용하는 방법이 있을 수 있고, 역문제와 같은 접근법으로 경계조건을 추정하는 접근법이 있을 수 있는데 본 논문의 범위를 넘어서며 향후의 연구과제로 다루어야 할 주제이다.

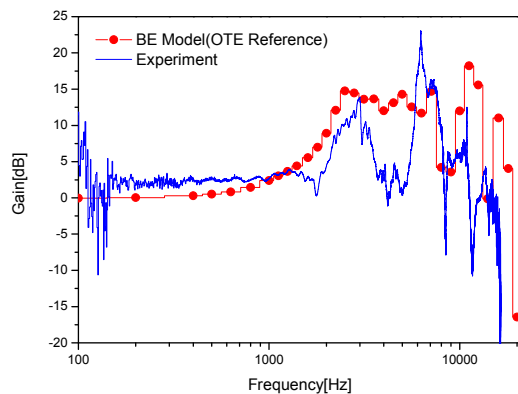
머리카락의 유무효과를 확인하기 위하여 머리부분을 피부 임피던스 경계조건을 부여한 경우와 Fig. 11 의 머리카락 임피던스를 적용한 경우에 양쪽 귀 음압크기 차이(interaural level difference, ILD)를 계산한 결과를 Fig. 16 에 그렸다. 그림을 보면 머리카락의 영향에 따라 ILD 값이 3 kHz 영역 이상에서 5 dB



(a) Azimuth 0°



(b) Azimuth 45°



(b) Azimuth 90°

Fig. 15 Comparison of acoustic responses in the ear canal point 5mm from TM (elevation 0°)

이상 발생할 수 있음을 보이고 있는데 이는 Treeby 등⁽²⁰⁾의 실험적인 연구에 상응하는 결과이다.

본 연구에서 사용된 경계요소 해석 모델을 이용하여 주파수 해석 수행 시 소요된 CPU 시간을 행렬의 작성 및 푸는 시간으로 나누어 Fig. 17에 정리하였다. 그림에서 25000 자유도 아래로 시간이 대폭 줄어든 것은 메모리 내(in-core) 해법이 가능해지는 자유도의 크기가 사이에 존재하기 때문이다.

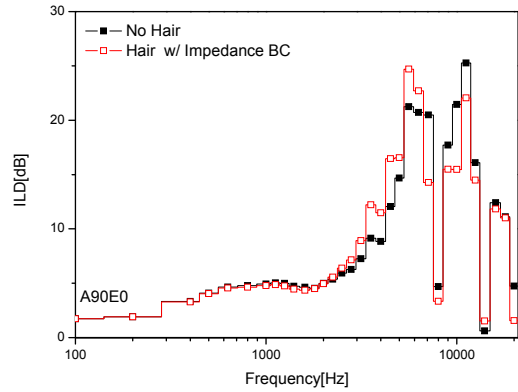


Fig. 16 Calculated ILD with and without hair impedance condition (elevation 0°)

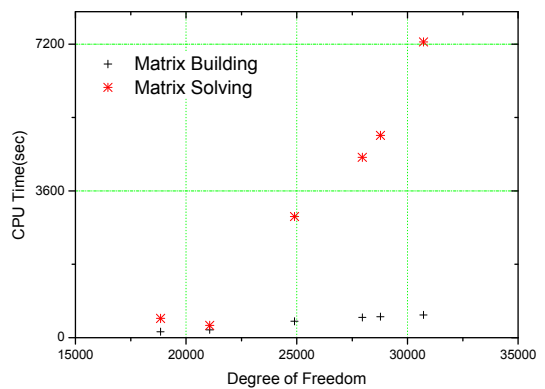


Fig. 17 CPU times for single frequency analysis of the BE models on HP Z-600 PC workstation with 2 Intel Xeon 2.93 MHz QC CPUs, 24 GB RAM, and 64-bit Windows XP operating system

5. 결론

본 연구에서는 한국인의 두형 특성을 나타낼 수 있는 한국인 평균 두형에 대해서 HRTF를 계산할 수 있는 경계요소 해석 모델을 만들고 실험결과와 비교하여 모델을 검증하였다. 경계요소 해석을 이용하여 기존의 두형 더미와 한국인 평균두형 사이의 음향응답 차이를 살펴보았다. 또한, 몸통 및 이도, 귓바퀴 등이 HRTF 미치는 영향을 수치적으로 분석하였다. 두형과 이도, 귓바퀴 등의 형상의 개별적인 다양성이 이도 내의 음향응답에 미치는 영향을 해석하기 위하여 CT 촬영을 통해서 두형, 귓바퀴, 이도의 형상 데이터를 확보함으로써 개별 경계요소 해석 모델을 만들고 실험과 비교를 통하여 해석 모델의 유효성과 한계를 검토하였다. 이도 내의 정확한 음장 해석을 위해서는 개개인의 고막 임피던스 데이터

측정이나 중이를 포함하는 연성해석 모델 개발이 필요할 것으로 판단되며 이는 향후의 과제로 계속 진행할 것이다.

후 기

이 논문은 2007 년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2007-000-10986-0). 본 연구에 큰 도움을 주신 인제대학교 의과대학 이비인후과교실 백무진교수님께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Middlebrooks, J.C. and Green, D.M., 1991, "Sound Localization by Human Listeners," *Annu. Rev. Psychol.*, Vol. 42, pp. 135~159.
- (2) Shin, K. H., Park, Y. and Park, Y., 2005, "Modeling HRTFs for Customization," *Proceedings of KSNVE 2005 Fall Conference*, pp. 641~644.
- (3) Bai, M.R. and Ou, K.-Y., 2005, "Head-Related Transfer Function Synthesis Based on a Three-Dimensional Array Model and Singular Value Decomposition," *J Sound and Vib.*, Vol. 281, pp. 1093~1115.
- (4) Zotkin, D.N., Hwang, J., Duraiswami, R. and Davis L.S., 2003, "HRTF Personalization Using Anthropometric Measurements," *Trans. of 2003 IEEE Workshop on Application of Signal Processing to Audio and Acoustics*, pp. 157~160.
- (5) Katz, Brian F.G., 2001, "Boundary Element Method Calculation of Individual Head-Related Transfer Function. I. Rigid Model Calculation," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 110, No. 5, pp. 2440~2448.
- (6) Katz, Brian F.G., 2001, "Boundary Element Method Calculation of Individual Head-Related Transfer Function. II. Impedance Effects and Comparisons to Real Measurement," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 110, No. (5), pp. 2449~2455.
- (7) Choi, S., Hahana, Y., Nelson, P.A. and Petyt, M., 2001, "Numerical Simulation of Head Related Transfer Functions and Sound Fields," *J. Acoust. Soc. Kr.*, Vol. 20, No. 6, pp. 94~103.
- (8) Walsh, T. and Demkowicz, L., 2003, "hp Boundary Element Modeling of the External Human Auditory System-Goal Oriented Adaptivity with Multiple Load Vectors," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 192, pp. 125~146.
- (9) Otani, M. and Ise, S., 2003, "A Fast Calculation Method of the Head-Related Transfer Functions for Multiple Source Points Based on the Boundary Element Method," *Acoust. Sci. & Tech.*, Vol. 24, No. 5, pp. 259~266.
- (10) Kim, S. and Wang, S., 2004, "Acoustic Modeling and Analysis of Human Ear," *Proc. 11th Int. Congress on Sound and Vib.*, pp. 3013~3022.
- (11) Stinson, M.R. and Daigle, G.A., 2005, "Comparison of an Analytic Horn Equation Approach and a Boundary Element Method for the Calculation of Sound Fields in the Human Ear Canal," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 118, No. 4, pp. 2405~2411.
- (12) Gan, R.Z., Sun, Q., Feng, B. and Wood, M.W., 2006, "Acoustic-Structural Coupled Finite Element Analysis for Sound Transmission in Human Ear-Pressure Distribution," *Medical Engineering & Physics*, Vol. 28, pp. 395~404.
- (13) Gumerov, N.A., Duraiswami, R. and Zotkin, D. N., 2007, "Fast Multipole Accelerated Boundary Elements for Numerical Computation of the Head Related Transfer Function," *IEEE Proc. ICASSP*, pp. 1165~1168.
- (14) Buckhard, M.D.(eds), 1978, *Manikin Measurements*
- (15) Digital Korean Homepage. <http://digitalman.kisti.re.kr>
- (16) Lee, D. and Ahn, T.-S., 2008, "Development of Experimental Dummy and Measurements of Head-Related Transfer Function (HRTF) for Averaged Korean Head Shape," *Trans. of KSNVE*, Vol. 18, No. 8, pp. 841~848.
- (17) Able Software Corp., 2008, *3D Doctor User's Manual*.
- (18) LMS International, Inc, 2003, *SYSNOISE Rev. 5.6 Users Manual*.
- (19) Katz, Brian F.G., 2000, "Acoustic Absorption Measurement of Human Hair and Skin Within the Audible Frequency Range," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 108, No. 5, pp. 2238~2242.
- (20) Treeby, B.E, Pan, J. and Paurobally, R.M., 2007, "An Experimental Study of the Acoustic Impedance Characteristics of Human Hair," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 122, No. 4, pp. 2107~2117.
- (21) Allen, J.B. and Voss, S.E., 1994, "Measurement of Acoustic Impedance and Reflectance in the Human Ear canal," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 95, No. 1, pp. 372~384.
- (22) Farmer-Fedor, B.L. and Rabbitt, R.D., 2002, "Acoustic Intensity, Impedance and Reflection Coefficient in the Human Ear Canal," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 112, No. 2, pp. 600~620.