

## 유한요소 모델을 이용한 중이의 소리전달 특성 해석<sup>§</sup>

갈영민\* · 백무진\*\* · 이두호\*<sup>†</sup>

\*동의대학교 기계공학과, \*\*인제대학교 해운대 백병원 이비인후과

### Finite Element Analysis of Sound Transfer Characteristics for Middle Ear

Young Min Gal\*, Moo-Jin Baek\*\* and Dooho Lee\*<sup>†</sup>

\* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-eui Univ.,

\*\* Dept. of Otolaryngology Head and Neck Surgery, Inje University Haeundae Paik Hospital

(Received April 19, 2011; Revised May 16, 2011; Accepted May 17, 2011)

**Key Words:** Middle Ear(중이), Finite Element Model(유한요소모델), Sound Transfer Function(소리전달함수), Micro CT(마이크로 CT), Ossicles(이소골),

**초록:** 본 연구에서는 인간중이의 소리전달특성 계산을 위한 유한요소모델을 개발하였다. 이소골의 형상을 얻기 위하여 한국인 사체에서 추출한 측두골을 마이크로 CT 촬영하여 3 차원 입체모델로 변환하였다. 유한요소모델은 이소골, 고막, 인대와 근육 등을 포함하여 구성하였다. 유한요소모델을 이용하여 고막에서 등골족판까지의 응답함수를 계산한 후 측정값을 갖는 선행연구와 비교하였고 그 결과 10 kHz 주파수 대역까지 소리전달특성을 잘 표현하고 있음을 보였다. 또한 유한요소 모델을 구성하는 주요 물성인자의 변화에 대한 소리전달특성의 변화를 살펴보고 침등골관절의 강성값이 중이의 소리전달특성에 큰 영향을 미침을 보였다.

**Abstract:** In this study, we developed a finite element model of the human middle ear has been developed to calculate itsfor sound transfer characteristics calculation. We usedThe geometric data forof ossicles, obtained byfrom micro-CT scanning, was used in order to develop the middle- ear FE model. A right- side temporal bone of a Korean cadaver was used for the micro-CT scanning. The developed FE model includes three ossicles, the tympanic membrane, ligaments, and muscles. We calculated theA sound transfer function from the tympanic membrane to the stapes footplate was calculated. The sound transfer function calculated vias of the FE model shows good agreement with measured responses over the 10- kHz frequency band. To measureidentify the sensitivyies of the middle- ear function due to material property variation, we studied several parameters studies have been fulfilled using the middle ear FE model. TAs a result the stiffness property of the incudostapedial joint had the greatest influence onwas the most influential to the middle- ear sound transfer function. among the parameters.

### 1. 서론

인간의 청각시스템은 소리를 모으는 역할을 하는 외이(outer ear), 소리에너지를 기계적 에너지로 전환하는 중이(middle ear), 기계적 에너지를 전기·생체적 에너지로 전환하는 내이(inner ear)로 나눌 수 있다. 이 중 중이의 경우 고막(eardrum)과 세이소골(ossicles)로 구성되어 외이도를 통하여 전달

된 음파를 진동시키는 진동판 역할을 함과 동시에 내이로 진동을 전달하는 중요한 역할을 한다.

중이를 구성하는 여러 인자의 변화에 따라 소리 전달특성의 변화를 알기 위해서는 중이에 대한 소리전달함수 해석 모델이 필요하다.<sup>(1,2)</sup> 중이의 소리전달 특성을 해석하기 위한 모델로 네트워크 모델<sup>(3,4)</sup>이 있다. 그러나 네트워크 모델은 등가의 회로 소자 값을 사용하는 간접적인 방법이어서 최근의 컴퓨터 발달과 유한요소 해석 기법의 발달로 복잡한 중이의 기하학적 형상을 모델링 하는 방법이 시도되고 있다.<sup>(5)</sup> Wada 등<sup>(6)</sup>은 중이에 대한 간단한 유한요소 모델을 시도하였고 복잡한 모델<sup>(7)</sup>로 발전시켜 중이의 운동특성을 살펴보았다. Prendergast 등<sup>(8)</sup>도

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계학술대회(2011.5.25-27, BEXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, dooho@deu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

정확한 외이도 형상을 포함하는 중이 모델을 개발하고 중이 보철물의 영향을 파악하는 시도를 하였다. Gan 과 Sun 등<sup>(1,2,9,10)</sup>은 일련의 작업을 통해서 컴퓨터 기하 모델링 기법을 통하여 중이를 상세 모델링하고 유한요소모델을 개발하여 중이의 보철물 설계에 응용<sup>(11)</sup>하려는 시도가 행해지고 있다. 그러나 중이의 유한요소 모델을 개발하려는 노력은 중이를 구성하고 있는 이소골의 형상이 매우 작고 다양하며 그 물성값이 불확실하여 정확한 검증을 위해서는 많은 노력이 더 필요하다. 실험적인 방법으로 고막의 응답이나 달팽이관 입구에서의 임피던스를 측정하는 연구<sup>(12-16)</sup>도 많이 진행되어 측정데이터들이 축적되고 있는 상황이어서 여러 유한요소모델의 개발로 모델링 방법을 검증하고 개인별 특성에 맞는 수치모델의 개발로 나아가는 것이 필요한 시점이다.

본 연구에서는 머리형상과 외이에 중점을 두어던 선행연구<sup>(17)</sup>를 확장하여 중이관련 소리전달 함수를 계산할 수 있는 유한요소모델을 개발한다. 중이의 유한요소 해석 모델을 개발하기 위해서 실제 한국인의 측두골(temporal bone)을 마이크로 CT 촬영하여 이소골의 기하학적 형상을 얻고 이소골과 함께 고막, 인대(ligament), 관절(joint), 힘줄(tendon), 근육(muscle) 등 중이를 구성하는 구성요소의 기하학적 형상을 함께 모델링 하였다. 중이의 유한요소모델을 이용하여 고막의 단위 음압 입력에 대하여 고막의 운동 및 등골(stapes)까지의 전달함수를 고주파수까지 계산하였고 주요 물성값의 변화에 따른 소리전달 함수의 변화를 살펴보았다.

## 2. 중이의 기하형상 모델링

중이는 고막과 달팽이관(cochlea) 사이에 공간이 차 있는 공간으로 크게 외이와 중이의 경계에 위치한 고막과 고막의 뒤에 차례로 붙어있는 세 이소골 - 추골(malleus), 침골(incus), 등골로 구성된다. 세 개의 작은 뼈로 구성된 중이는 고막으로 전달된 공기의 진동을 내이의 유체진동으로 전달해주는 역할을 한다. 등골과 연결된 난원창(oval window)을 통해 전달된 중이 진동은 달팽이관의 유체유동을 일으켜 청신경에 전달된다. Fig. 1은 외이도 등을 포함하는 외이, 고막과 세 이소골 등을 포함하는 중이, 달팽이관 등을 포함하는 내이로 이루어진 귀의 기본적인 구성을 보여준다.

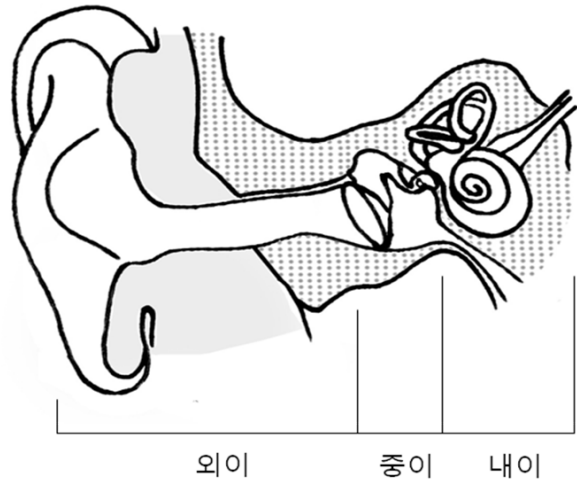


Fig. 1 Basic configuration of ear (outer, middle and inner ear)

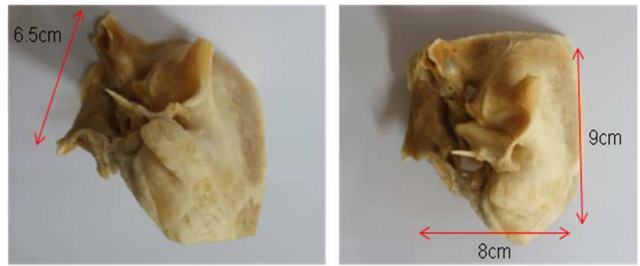
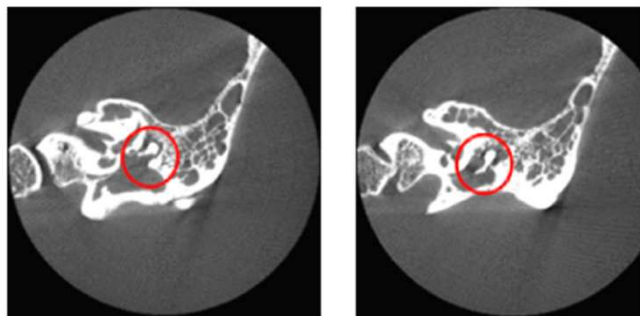
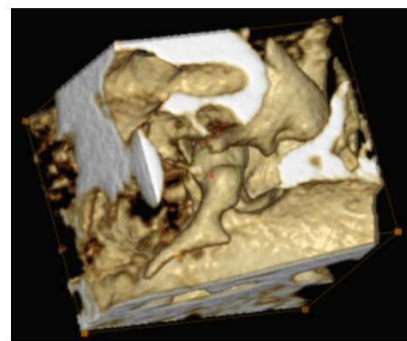


Fig. 2 Temporal bone of a Korean



(a) CT images



(b) Reconstructed temporal bone

Fig. 3 Scanning and image processing of temporal bone

이소골 형상모델은 측두골의 CT 촬영으로 얻어진 2 차원 단면영상들을 재구성하여 삼차원 형상

을 구현하고 이소골을 제외한 측두골을 제거하는 방법으로 얻었다. 구현된 이소골의 삼차원 와이어 프레임(wire frame)모델 데이터를 사용하여 면을 생성하였고, 마지막으로 이소골 각각의 면 모델을 사용하여 입체(solid)를 생성하고 위치를 재배치시켜 형상모델을 완성하였다.

2.1 이소골의 형상모델링

이소골의 기하형상 모델링을 위하여 사체에서 추출한 한국인의 측두골을 마이크로 CT 촬영하여 그 기하학적 형상을 획득하였다. 측두골은 모든 조직을 제거하고 뼈만 남아있는 상태였다. Fig. 2 에 보이는 측두골은 성인의 오른쪽의 것으로 가로길이는 약 8cm 이고 세로길이는 약 9cm 그리고 높이는 약 6.5cm 이다. CT 촬영은 성인의 오른쪽 측두골을 X-eye MCT 160CT 장비를 사용하여 촬영하였다. 이 때 복셀 매트릭스(Voxel matrix)의 크기는 512<sup>3</sup>이고 복셀 폭과 높이의 해상도는 약 0.12mm 이다. Fig. 3 에 마이크로 CT 데이터의 한 예와 삼차원으로 재구성한 그림을 보였다. Fig. 3 에서 분리된 상태의 이소골을 확인할 수 있으며 이를 통하여 얻어진 측두골 데이터를 후처리 프로그램인 3D-Doctor<sup>(18)</sup>를 이용하여 형상화하였다. 또한 형상화된 이소골 각각에 면과 입체를 생성시켜 Fig. 4 에 나타내었고 실제 사진과 그 형상을 비교 하였다.

2.2 고막 및 인대/근육 모델링

중이를 구성하는 중요한 구성요소인 고막 및 인대와 근육을 모델링 하였다. 외이와 중이의 경계인 고막은 선행된 연구에서 개발된 유한요소모델 자료를 토대로 개발되었고, 고막과 측두골을 연결하는 인대인 고막윤상인대(tympanic annular ligament)와 고막과 추골을 연결하는 복장뼈자루(manubrium)를 모델링 하였다. 그리고 앞망치인대(anterior malleal ligament)와 고막장근(tensor tympani muscle), 침추골관절(incudomalleolar joint), 침등골관절(incudostapedial joint) 및 등골근(stapedius muscle) 등을 해부학적 근거에 따라 모델링 하였다. Fig. 5 에서 개발된 고막과 인대, 관절, 힘줄, 근육을 포함한 중이의 전체적인 기하형상모델을 보였다.

3. 중이의 유한요소 모델

3.1 중이의 유한요소 모델링

앞 장에서 설명한 중이의 기하학적 모델을 바탕으로 중이의 유한요소 모델을 개발하였다. Fig. 6 에 개발된 중이의 요소분할 모습을 보였다. 이소

Table 1 Summary of the FE model for middle ear

Composition	Types of element	Number of elements
Tympanic membrane	quad, tri	1668
Malleus	tetra	4247
Incus	tetra	4519
Stapes	tetra	1613
Tympanic annular ligament	quad, tri	142
Incudomalleolar joint	tetra	243
Incudostapedial joint	tetra	133
Anterior malleal ligament	tetra	65
Posterior incudal ligament	tetra	488
Tensor tympani muscle	tetra	74
Manubrium	tetra	274
Stapedius muscle	tetra	368

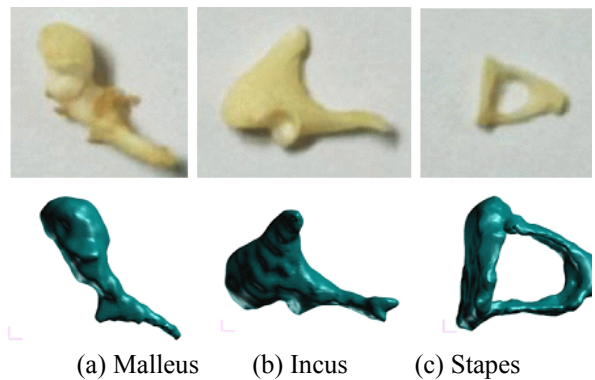


Fig. 4 3D CAD models of ossicles

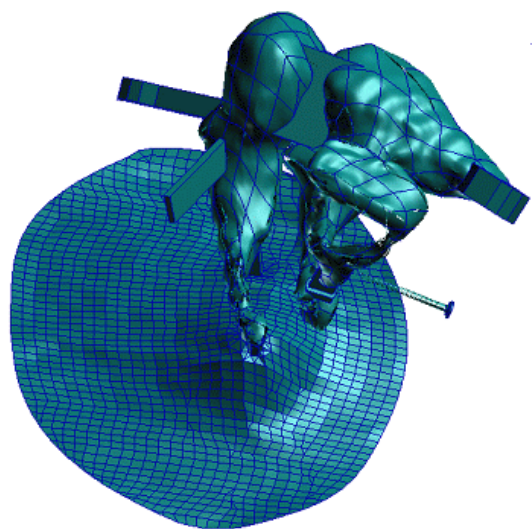


Fig. 5 Solid model of the middle ear

골의 경우 추골과 침골, 등골을 사면체 요소로 분할하였으며 고막과 고막윤상인대는 사각형과 삼



각형 판 요소를 사용하여 분할하였고, 침추골관절 등 관절과 인대, 근육은 이소골의 경우와 마찬가지로 입체 사면체 요소로 분할하였다. 고막과 고막윤상인대, 등골윤상인대(stapedial annular ligament)를 제외한 중이 전체가 하나의 입체로부터 요소 분할되어 연결되었으며 등골의 족판(stapes footplate)을 측두골까지 연결하는 인대와 내이의 달팽이관까지 연결하는 인대가 각각 스프링 요소로서 모델링되었다. Table 2에 중이의 구성요소 각각에 사용된 요소들의 형태와 개수를 정리하였다. 고막의 경우는 Koike와 Wada의 연구<sup>(7)</sup>에서 사용한 실제 고막과 매우 유사한 두께정보를 참고하여 고막을 긴장부(pars tensa)와 이완부(pars flaccida)로 나눈 후 그에 따라 고막의 두께를 결정하였다. Fig. 7에 사용된 고막의 두께 분포를 보였다. 대표적으로 고막 중앙의 돌기부분인 고막제(umbo)의 두께는 0.1mm로 하였다.

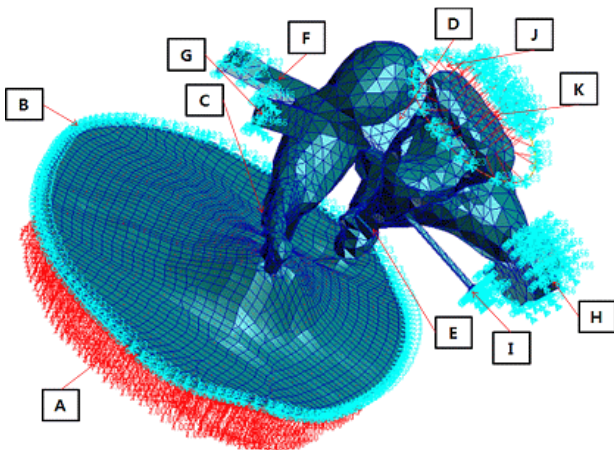


Fig. 6 Finite element model of the middle ear

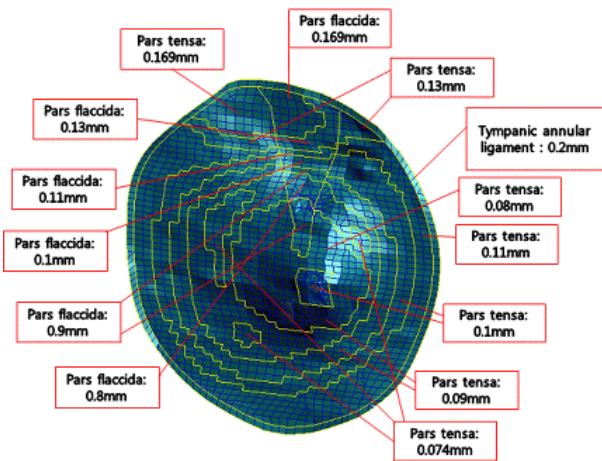


Fig. 7 Thickness of tympanic membrane used for the middle ear FE model

3.2 경계조건 및 물성값

중이 유한요소 모델의 물성값과 경계조건은 많은 불확실성을 내포하고 있다. 본 연구에서 사용한 경계조건과 물성값은 Table 2에 정리하였다. 경계조건에 관하여는 Fig. 6에 상세히 나타내었다. Fig. 6에서 (A)로 나타낸 고막의 외이 면에는 소리가 고막을 통해 중이로 전달되는 것의 표현을 위해 그림에서와 같이 면에 수직방향으로 단위 압력을 부여하였다. 그리고 (B)의 부분은 고막 주위에 고막윤상인대가 측두골에 고정된 것을 표현하기 위해 고막윤상인대의 바깥쪽 부분 세 방향 변위를 모두 고정한 것을 표현한 것이다. (C)는 고막과 추골을 연결하는 복장 뼈자루이며 삼차원 사면체 요소를 사용하여 요소분할 하고 고막과의 연결을 표현하기 위해 구속이 약한 가운데부분을 제외하고 강한 구속이 가해지는 양쪽 가장자리부분을 강체보를 이용하여 연결하였다. (D)는 추골의 머리 부분과 침골의 몸통부분을 아래, 위쪽 두 부분으로 이어주는 침추골관절이다. (E)는 침골과 등골을 연결하고 있는 침등골관절이며, (F)는 추골과 측두골을 연결해주는 앞망치인대이다. (G)는 추골에 연결되어있는 근육으로 고막장근이라고 한다. 고막장근과 측두골이 연결되는 부분은 세 방향 변위와 세 방향 회전을 모두 고정하는 경계조건을 부여하였다. (H)는 뒤모루인대(posterior incudal ligament)로서 침골과 측두골을 연결하는 역할을 하며 측두골에 부착되는 부분의 6 방향 자유도를 모두 구속시켰다. (I)는 등골과 측두골을 연결하는 등골근으로, 표시된 부분의 6 방향 자유도를 모두 구속시켰다. (J)는 등골 윤상인대이다. 등골윤상인대는 Gan 등의 연구<sup>(1)</sup>를 참고하여 25 개의 족판면에 평행 방향으로만 움직이는 스프링으로 모델링 하였으며, 측두골과 연결되는 부분의 세 방향 변위를 모두 구속시켰다. 마지막으로 (K)는 등골의 머리부분과 내이의 달팽이관을 연결부를 표시하며 달팽이관 림프액의 임피던스 효과를 표현하기 위하여 스프링요소로 모델링 하였다. 스프링 상수의 값은 Gan 등의 연구<sup>(1)</sup>를 참고하여 42 개의 스프링요소에 각각 70N/m의 스프링상수를 부여하였고 족판에 수직인 방향으로만 작용하도록 하였다.

이소골의 모델을 기하학적 특성을 확인하기 위하여 본 연구에서 개발된 세 이소골 유한요소모델의 질량과 선행연구에서의 값을 비교하여 Table 3에 정리하였다. 표에서 보듯이 추골과 침골의 경우 두 모델의 질량은 거의 차이가나지 않았으나 등골의 질량은 약간 차이가 나고 있는 것을 볼 수 있다. 이 차이가 개인별 차이에 의한 것인지는 불확실하다.

**Table 2** Material properties used in the middle ear FE model

Type of properties	composition	Values
Young's Modulus (Pa)	tympanic membrane(tensa)	$3.34 \times 10^7$
	tympanic membrane(flaccida)	$1.11 \times 10^7$
	malleus	$1.2 \times 10^{10}$
	incus	$1.2 \times 10^{10}$
	stapes	$1.2 \times 10^{10}$
	incudomalleolar joint	$1.2 \times 10^{10}$
	incudostapedial joint	$6.0 \times 10^5$
	anterior malleal ligament	$2.1 \times 10^7$
	posterior incudal ligament	$6.5 \times 10^5$
	tensor tympani muscle	$2.6 \times 10^5$
	manubrium	$4.7 \times 10^9$
	stapedius muscle	$5.2 \times 10^5$
	tympanic annular ligament	$6.0 \times 10^5$
Density (kg/m <sup>3</sup> )	tympanic membrane(tensa)	$1.2 \times 10^3$
	tympanic membrane(flaccida)	$1.2 \times 10^3$
	malleus(head)	$2.55 \times 10^3$
	malleus(neck)	$4.53 \times 10^3$
	malleus(handle)	$3.70 \times 10^3$
	incus(body)	$2.36 \times 10^3$
	incus(short process)	$2.26 \times 10^3$
	incus(long process)	$5.08 \times 10^3$
	stapes	$2.2 \times 10^3$
	incudomalleolar joint	$3.2 \times 10^3$
	incudostapedial joint	$1.2 \times 10^3$
	anterior malleal ligament	$2.5 \times 10^3$
	posterior incudal ligament	$2.5 \times 10^3$
tensor tympani muscle	$2.5 \times 10^3$	
manubrium	$1.0 \times 10^3$	
stapedius muscle	$2.5 \times 10^3$	
tympanic annular ligament	$2.5 \times 10^3$	
Spring constant (N/m)	stapedius annular ligament	9
	cochlear fluid	70(42)
Poisson's Ratio		0.3
Damping parameters (N s/m)	cochlear fluid	0.054

**Table 3** Comparison of ossicles masses

Type of properties	Composition	Present Study		Sun et al. <sup>(1,2)</sup>
		FE model	measured	
Mass(mg)	malleus	26.07	25.59	26.47
	incus	30.71	30.89	30.42
	stapes	3.056	3.22	1.93

**Table 4** Natural frequencies of the middle ear model

Mode number	Natural Frequency(Hz)	Mode number	Natural Frequency(Hz)
1	734	15	<b>1907</b>
2	<b>757</b>	16	1987
3	<b>847</b>	17	2118
4	952	18	<b>2169</b>
5	1006	19	2216
6	1016	20	<b>2287</b>
7	1052	21	<b>2343</b>
8	<b>1271</b>	22	2436
9	<b>1306</b>	23	<b>2484</b>
10	1593	24	2647
11	1697	25	2748
12	1719	26	<b>2913</b>
13	1796	27	2995
14	<b>1821</b>		

#### 4. 유한요소 해석결과

##### 4.1 고유진동수와 모드형상

앞장에서 설명한 중이의 유한요소모델을 이용하여 중이의 고유모드 해석을 수행하였다. 사용한 소프트웨어는 MSC/NASTRAN 이다. 해석으로부터 구한 중이의 고유진동수 중 3kHz 이내의 진동수를 Table 4 에 정리하였다. Table 4 에서 중이 전체가 진동하는 주요모드를 굵게 표시하였다. 그리고 Fig. 8 에는 중이 모델의 첫 번째 주요 모드 형상을 그렸다. 이 고유진동모드는 757Hz 에서 나타났으며 고막이 고막 면에 수직 방향으로 병진운동을 하는 동안 고막제와 추골의 영향으로 이소골전체가 y 방향을 축으로 회전병진운동을 하는 형상이다. 이는 고막으로부터 시작된 병진운동이 추골, 침골의 회전 운동을 통해 등골까지 전달되어 등골의 진동이 달팽이관까지 전달하는 과정을 잘 보여준다.

##### 4.2 주파수 응답 해석

소리는 외부로부터 외이를 거쳐 고막을 진동시키고 이소골과 인대들의 운동을 거쳐 내이로 전달된다. 이 때 음압의 영향으로 고막이 진동하여 중이 전체가 운동하게 되는데 중이가 운동할 때 고막의 운동에 의하여 달팽이관의 림프액을 움직이게 되므로 단위 음압 입력에 대하여 고막제와 등골 축판의 움직임에 대한 주파수 응답함수를 계산함으로써 중이 전체의 운동특성을 파악할 수 있다.

단위 음압 입력에 대하여 고막제의 주파수 응답함수는 변위전달함수를 고막제변위전달함수(umbo displacement transfer function, UDTF)라 정의하고 등골의 속도전달함수는 등골속도전달함수(stapes velocity transfer function, SVTF)라 정의한다. 이 두 함수는 중이의 운동특성을 나타내는데 중요한 역할을 한다. 전술한 중이의 유한요소모델을 이용하

여 두 전달함수를 계산하고 그 결과를 Fig. 10 과 Fig. 11 에 그렸다. 선행연구와의 비교를 위하여, Fig. 10 에는 고막내의 고막제에서 주파수별 변위의 전달함수 측정 결과를 같이 그렸다. 그림에서 Goode 등<sup>(19,20)</sup> 과 Nishihara 의 결과값<sup>(16)</sup>은 LDV(laser Doppler vibrometer)를 이용하여 전달함수를 측정한 실험값이고, Sun 등의 결과값<sup>(1)</sup>은 유한요소해석 모델에 의한 결과이다. 그림에서 측정값은 80dB SPL 일 때의 측정값이기 때문에 응답이 고막 입력 음압에 대하여 선형이라는 가정하에 단위음압응답 일 때의 값으로 환산하여 비교하였다. 그림에서 개발된 중이 모델은 선행연구 결과가 보여주는 범위 내에 있어 유효한 모델임을 알 수 있다. 그러나 선행연구결과와 비교하였을 때 약 1000Hz 이상의 고주파로 갈수록 개발된 중이의 움직임이 작아지는 것을 볼 수 있는데 이소골의 형상과 관련된 중이의 질량분포와 관련이 있을 것으로 판단된다. Fig. 10 에는 등골측관속도전달함수를 계산하여 선행연구결과와 비교하였다. Voss(2000) 등의 결과값<sup>(15)</sup>과 Aibara 등의 결과값<sup>(12)</sup>도 LDV 를 이용하여 측정된 실험값이다. 등골측관속도전달함수 역시 변위전달함수 결과그래프와 마찬가지로 측정된 선행연구결과 영역 내에서 변화를 보이고 있음을 볼 수 있다. 또한, 그림에서 보듯이 중이의 진동 전달 특성은 약 1000Hz 를 기준으로 그 전달특성이 가장 좋고 저주파와 고주파로 갈수록 중이의 움직임이 작아지는 것을 볼 수 있다.

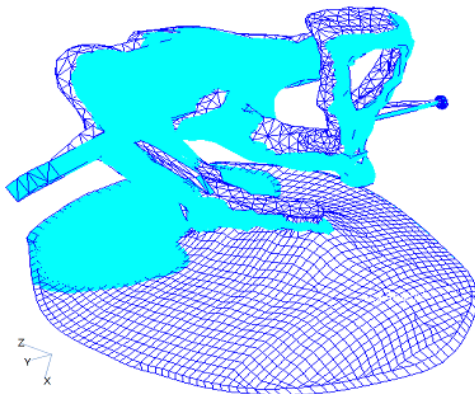


Fig. 8 The first mode shape from the middle ear model

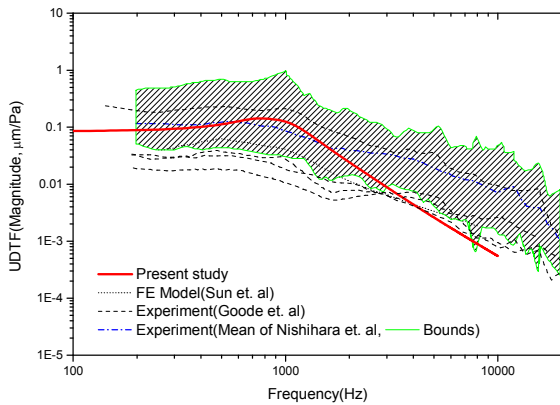


Fig. 9 The UDTF compared with those of previous studies

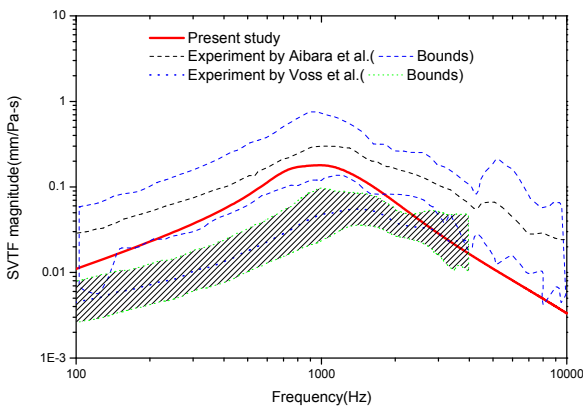


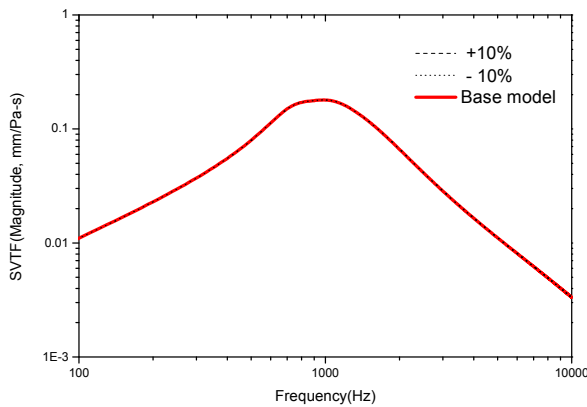
Fig. 10 The SVTF compared with those of previous studies

### 4.3 중이 유한요소모델 물성값의 영향

지금까지 개발된 중이의 유한요소 모델은 그 물성값이 불확실하며 중이를 구성하는 물성값의 정확한 물성의 파악은 아직도 많은 연구가 진행되어야 할 연구분야이다. 본 연구에서는 중이 유한요소 모델에 사용된 대표적인 물성값이 중이 모델의 응답에 미치는 영향 정도를 파악하기 위하여 Table 5 와 같이 중요 물성의 변화 전후에 대한 중이의 소리전달함수 특성 변화를 살폈다. 변화시킨 중이의 중요부위와 물성은 추골, 침골, 등골 등의 세 이소골과 침추골관절, 침등골관절, 고막윤상인대의 강성 값과 달팽이관 림프액의 스프링상수 값이다. 물성변화에 따른 등골측관속도전달함수 변화를 Figs. 11~14 에 보였다. 세 이소골과 침추골관절의 강성 변화에 따른 SVTF 변화는 미미해서 하나의 그림으로 표현했으며(Fig. 11) 침추골관절의 강성변화에 SVTF 의 변화가 가장 큰 것을 볼 수 있다. 고막윤상인대 및 달팽이관의 영향을 고려하는 스프링 상수도 중이의 소리전달특성에 영향이

**Table 5** Parameters and its change

Compositon	Property	Base value	Changed value	remark	
1	Malleus	$1.2 \times 10^{10}$	$1.32 \times 10^{10}$ $1.08 \times 10^{10}$	+10% -10%	
2	Incus	$1.2 \times 10^{10}$	$1.32 \times 10^{10}$ $1.08 \times 10^{10}$	+10% -10%	
3	Stapes	$1.2 \times 10^{10}$	$1.32 \times 10^{10}$ $1.08 \times 10^{10}$	+10% -10%	
4	Incudomalleolar joint	Stiffness (N/m <sup>2</sup> )	$1.2 \times 10^{10}$	+10%	
5	Incudostapedial joint		$1.08 \times 10^{10}$	-10%	
6	Tympanic annular ligament	6.0 x 10 <sup>5</sup>	$6.0 \times 10^6$	x 10	
			$6.0 \times 10^4$	x 1/10	
7	Cochlear fluid	Spring constant (N/m)	70	84 56	+20% -20%



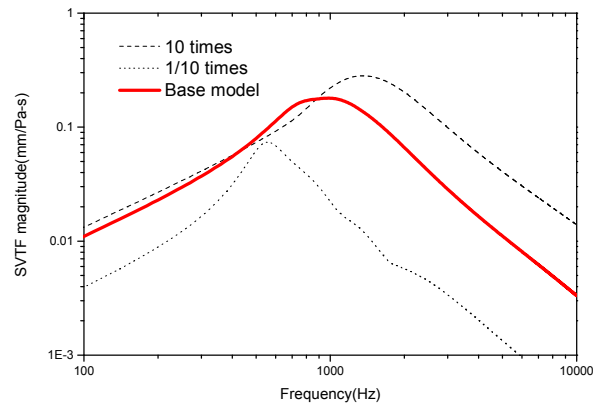
**Fig. 11** SVTF variations due to the ossicles and incudomalleolar joint stiffness change

크를 볼 수 있고 이러한 물성인자에 대하여 보다 정확한 추정방법의 개발이 필요하고 이에 대한 후속 연구를 진행할 계획이다.

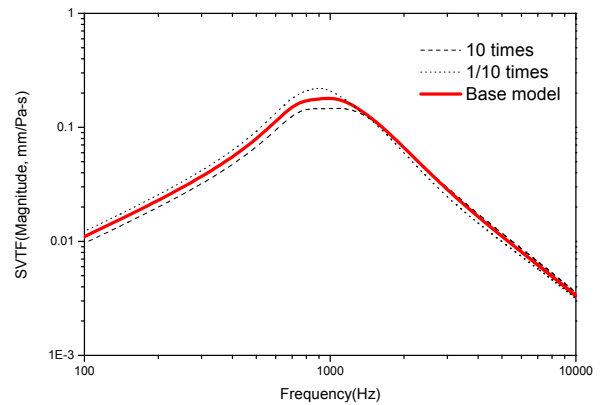
### 5. 결론

본 연구에서 한국인의 측두골을 마이크로 CT 촬영하여 얻은 데이터를 바탕으로 중이의 소리전달특성을 계산할 수 있는 유한요소 모델을 개발하고 선행 연구와 비교하여 개발된 중이 모델의 타당성을 검증하여 외부로부터 소리가 사람 귀를 통하여 전달될 때 나타나는 중이의 운동특성을 고주파수까지 해석할 수 있도록 하였다. 또한 개발된

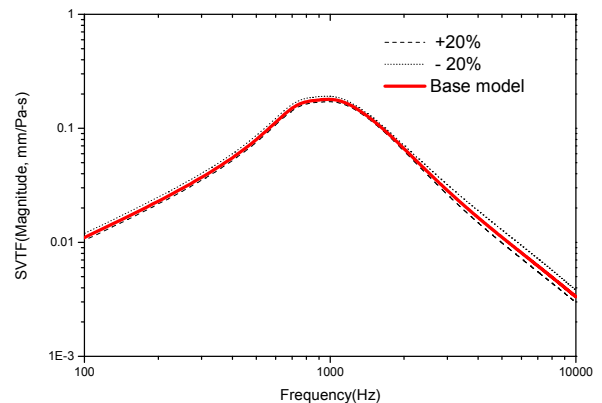
유한요소 모델의 주요 물성값에 대하여 인자해석을 수행하고 그 결과를 살폈다. 이러한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.



**Fig. 12** SVTF variations due to the incudostapedial joint stiffness change



**Fig. 13** SVTF variation due to the tympanic annular ligament stiffness change



**Fig. 14** SVTF variations due to the cochlear fluid spring constant change

(1) 인간 중이의 소리전달특성을 10 kHz 대역의 고주파수까지 해석 가능한 유한요소 모델을 실제 한국인의 이소골 기하형상으로부터 개발하였다.

(2) 개발된 유한요소 모델은 마이크로 CT 를 이용하여 이소골 형상 모델링을 하였으며 이를 통해



정밀도 높은 고주파 중이 모델의 개발이 가능하였다. 고막제와 등골족판에서의 변위, 속도 전달함수를 계산하여 선행 연구자들의 측정 또는 해석결과와 비교함으로써 개발된 중이 모델의 타당성을 검증하였다.

(3) 중이 유한요소 모델의 물성 변화에 따른 소리 전달함수의 변화 예측결과 이소골과 침추골관절의 강성 값 변화는 중이의 소리전달특성에 영향이 미미하며 침등골관절의 강성 값의 변화는 중이의 운동에 큰 영향을 준다.

본 연구에서 개발한 중이의 유한요소 모델을 통하여 중이 운동의 정확한 연구와 진단 및 보철물의 효과를 진단할 수 있을 것으로 판단되며 추후로 향상된 모델 개발을 위하여는 물성값의 정확한 추정이 가능한 방법이 더 연구되어야 할 것으로 생각된다.

## 후 기

이 논문은 2007 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2007-000-10986-0).

## 참고문헌

- (1) Sun, Q., Gan, R. Z., Chang, K. H. and Dormer, K. J., 2002, "Computer-Integrated Finite Element Modeling of Human Middle Ear," *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, Vol. 1, No. 2, pp.109~122.
- (2) 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 Distributions," *Medical Engineering & Physics*, Vol. 28, No. 5, pp.395~404.
- (3) Kringelbotn, M., 1988, "Network Model for the Human Middle Ear," *Scandinavian Audiology*, Vol. 17, No. 2, pp.75~85.
- (4) Goode, R. L., Killion, M., Nakamura, K. and Nishihara, S., 1994, "New Knowledge About the Function of the Human Middle Ear: Development of An Improved Analog Model," *Otology & Neurotology*, Vol. 15, No. 2, pp.145~154.
- (5) Zhao, F., Koike, T., Wang, J., Siens, H. and Meredith, R., 2009, "Finite Element Analysis of the Middle Ear Transfer Functions and Related Pathologies," *Medical Engineering and Physics*, Vol. 31, No. 8, pp.907~916.
- (6) Wada, H., Metoki, T., Kobayashi and T. G., 1992, "Analysis of Dynamic Behavior of Human Middle Ear Using a Finite-Element Method," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 92, No. 6,
- (7) Koike, T., Wada, H. and Kobayashi, T., 2002, "Modeling of the Human Middle Ear Using the Finite-Element Method," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 111, No. 3, pp.1306~1317.
- (8) Prendergast, P. J., Ferris, P., Rice, H. J. and Blayney, A. W., 1999, "Vibro-Acoustic Modelling of the Outer and Middle Ear Using the Finite-Element Method," *Audiology and Neurotology*, Vol. 4, No. 3-4, pp.185~191.
- (9) Gan, R. Z., Sun, Q., Dyer, R. K. J., Chang, K.-H. and Dormer, K. J., 2002, "Three-Dimensional Modeling of Middle Ear Biomechanics and Its Applications," *Otology & Neurotology*, Vol. 23, No. 3, pp.271~280.
- (10) Sun, Q., Chang, K.-H., Dormer, K. J., Dyer, R. K. and Gan, R. Z., 2002, "An Advanced Computer-Aided Geometric Modeling and Fabrication Method for Human Middle Ear," *Medical Engineering & Physics*, Vol. 24, No. 9, pp.595~606.
- (11) Gan, R. Z., Dai, C., Wang, X., Nakmali, D. and Wood, M. W., 2010, "A Totally Implantable Hearing System - Design and Function Characterization in 3D Computational Model and Temporal Bones," *Hearing Research*, Vol. 263, No. 1-2, pp.138~144.
- (12) Aibara, R., Welsh, J. T., Puria, S. and Goode, R. L., 2001, "Human Middle-Ear Sound Transfer Function and Cochlear Input Impedance," *Hearing Research*, Vol. 152, No. 1-2, pp.100~109.
- (13) Gan, R. Z., Wood, M. W. and Dormer, K. J., 2004, "Human Middle Ear Transfer Function Measured by Double Laser Interferometry System," *Otology & Neurotology*, Vol. 25, No. 4, pp.423~435.
- (14) Whittemore, K. R., Merchant, S. N., Poon, B. B. and Rosowski, J. J., 2004, "A Normative Study of Tympanic Membrane Motion in Humans Using a Laser Doppler Vibrometer (LDV)," *Hearing Research*, Vol. 187, No. 1-2, pp.85~104.
- (15) Voss, S. E., Rosowski, J. J., Merchant, S. N. and Peake, W. T., 2000, "Acoustic Responses of the Human Middle Ear," *Hearing Research*, Vol. 150, No. 1-2, pp.43~69.
- (16) Nishihara, S. and Goode, R. L., 1996, "Measurement of Tympanic Membrane Vibration in 99 Human Ears," *The Proceedings of Middle ear mechanics in research and otosurgery*(1996), pp. 91~93.
- (17) Lee, D., Ahn, T.-S. and Ki, D., 2010, "Boundary Element Analysis for Head-Related Transfer Function in the Case of Korean Adults," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 34, No. 8, pp.1035~1044.
- (18) Able Software Corp, 2011, *3D-Doctor*,



<http://www.ablesw.com/3d-doctor/index.html>,

Lexington, MA 02420, USA.

- (19) Goode, R. L., Ball, G. and Nishihara, S., 1993, "Measurement of Umbo Vibration in Human Subjects-Method and Possible Clinical Applications," *Otology*

& *Neurotology*, Vol. 14, No. 3, pp.247~251.

- (20) Goode, R. L., Ball, G, Nishihara, S, Nakamura and K, G., 1996, "Laser Doppler Vibrometer (LDV) : A New Clinical Tool for the Otologist," *The American Journal of Otology*, Vol. 17, No. 6, pp.813~822.