

# 중이유한요소모델의 동특성에 대한 물성치 교정

## Calibration of Material Properties to Dynamic Characteristic of Middle Ear Finite Element Model

안태수\* · 이두호†  
**Tae-Soo Ahn and Dooho Lee**

### 1. 서 론

중이는 외부의 소리자극 에너지를 기계적 에너지로 변환하여 내이로 전달하는 기관으로 그 전달특성은 매우 중요한 역할을 한다. 중이는 근육과 인대, 힘줄 등의 구속에 의해 운동특성이 결정되는데, 이 연구에서는 중이의 유한요소모델을 만들고 구속되어진 요소들의 물성치를 부여하였다. 하지만 이러한 구속은 실제 중이의 운동응답과 차이를 가지며 물성치 변동성에 따라 그 응답결과가 달라지는 현상을 보인다. 따라서 실제 중이의 응답결과를 기준으로 하여 유한요소모델에 대한 물성치 변화의 최적값을 찾는 연구를 실시하였다

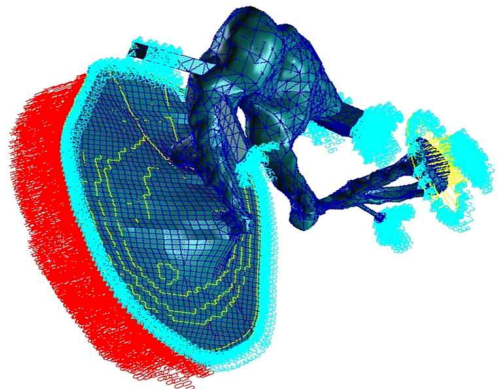
### 2. 중이의 유한요소모델 검증

연구를 위해 실제 사람의 측두골로부터 CT촬영을 통해 중이의 3차원 형상모델을 제작하였고, 인대와 근육, 힘줄 등의 구속조건을 부가하여 실제 중이 같은 구속을 주어 Figure 1과 같은 유한요소모델을 제작하였다. 유한요소모델의 응답계산을 위해 고막제(umbo) 부분의 x방향에 대한 변위를 측정하였다. 이때 유한요소모델은 많은 매개변수들을 가지는데 이는 불확실한 물성치 값과 많은 변동성을 가지기 때문에 계산한 응답 값에 대한 검증이 필요하다. 따라서 개발된 유한요소모델에서 운동에 큰 영향을 끼치는 9가지의 확률변수에 대해 Table 1과 같이 선정하여 나타내었다. 이때 각 변수인자들의 물성치 값은 참고문헌(1)로부터 인용하였으며, 변동성

평가를 위한 편차 값은 와우액(cochlear fluid)에 대해 20%, 그 외 다른 8가지 변수에 대해서는 10%의 변동성을 주었다. 변수들에 대한 확률 분석은 EDR 방법을 사용하여 확률밀도함수(PDF)를 계산하여 중이 유한요소모델의 최적화된 물성치를 찾고 이를 이용하여 중이 유한요소모델의 전달함수를 계산하고자 하였다. 하지만 계산된 중이의 전달함수는 Figure 2에서 보이는 것과 같이 저주파 대역에서는 잘 일치함을 보이지만 고주파 대역으로 갈수록 그 값의 차이가 큰 것을 확인 할 수 있는데 이를 보완하기 위해 식(1)을 이용하여 통계학적 교정을 실시하였다.

$$\Phi(X) = (G_{F_{10}}^{Cal} - G_{F_{10}}^{Exp})^2 + (G_{mean}^{Cal} - G_{mean}^{Exp})^2 + (G_{F_{90}}^{Cal} - G_{F_{90}}^{Exp})^2 \quad (1)$$

여기서  $\Phi$ 는 실제 중이의 응답과 유한요소모델을 이용하여 계산된 값의 차에 제곱 값으로 실제 중이의 모든 분포 값에 대한 계산을 할 수 없어 대표적으로 평균값과 90%, 10% 값에 대해 계산하였다.

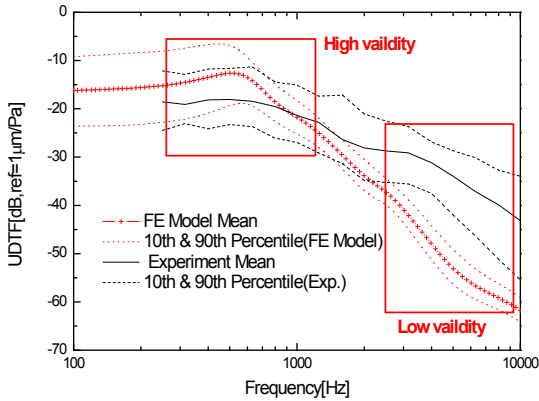


**Figure 1** Finite element model of middle ear with boundary condition

† 교신저자: 정희원, 동의대학교 기계공학과  
 E-mail : dooho@deu.ac.kr  
 Tel : (051)890-1932 , Fax : (051)890-2232  
 \* 동의대학교 대학원 기계공학과

**Table 1** Random variables selected for the validation

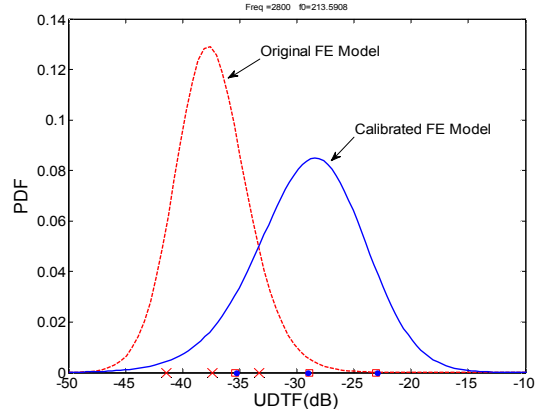
Random Variable	Mean	Standard deviation
Malleus	Log10(1.2E10)	10% COV
Incus	Log10(1.2E10)	10% COV
Stapes	Log10(1.2E10)	10% COV
Incudomalleolar joint	Log10(1.2E10)	10% COV
Incudostapedial joint	Log10(6.0E5)	10% COV
Tympanicannular ligament	Log10(6.0E5)	10% COV
Cochlear fluid	Log10(70)	20% COV
Tympanic membrane(tensa)	Log10(3.34E7)	10% COV
Tympanic membrane(flaccida)	Log10(1.11E7)	10% COV



**Figure 2** The umbo displacement transfer function compared with those of experiments

$$\begin{aligned} & \text{minimize } \Phi(\boldsymbol{\theta} | \mathbf{X}) \\ & \text{subject to } \boldsymbol{\theta}_L \leq \boldsymbol{\theta} \leq \boldsymbol{\theta}_U \end{aligned} \quad (2)$$

이때 통계학적 보정문제에 대해 식(2)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $\boldsymbol{\theta}$  는 보정매개변수이며  $\boldsymbol{\theta}_L$  과  $\boldsymbol{\theta}_U$  는 각각 상하경계를 나타낸다. 식(2)는 앞서 정의한 9개의 확률변수에 대해 유한차분법을 이용하여 MATLAB 소프트웨어의 “fmincon” 함수로 주파수 별 최적화된 유한요소모델의 물성치를 계산할 수 있다. 이때 식 (1)에 보인 실험과 계산을 통해 얻은 두 값의 차의 제곱 값이 최소화 되도록 하면 최적화된 값을 찾을 수 있다. Figure 3은 식(2)를 이용하여 계산한 결과로 보정 전의 분산분포와 보



**Figure 3** PDFs of the UDTF for middle ear FE model (2800Hz)

정 후의 분산분포에 대해 2800Hz 주파수에서의 실험결과를 비교한 그래프이다. 보정된 결과 값이 보정전의 결과 값보다 실제 측정을 통해 얻은 결과에 더욱 근사한 결과 값으로 분포되는 것을 확인할 수 있으며 이는 전 주파수대역에서 동일한 결과를 보인다.

### 3. 결 론

이 연구는 일정구간에 대해 정확한 실험데이터의 값이 주어졌을 때 중이 유한요소모델에 대한 통계학적 보정절차에 대한 방법을 이용하였다. 실험값과 계산된 값의 차의 거리 제곱 값의 합이 최소화 될 때 보다 최적화된 물성치 값을 얻을 수 있다. 이 방법을 이용하여 최적화된 물성치를 찾고 중이유한요소모델에 적용하여 보다 향상된 중이전달함수 응답을 확인할 수 있었다. 계속해서 각 매개변수들의 영향이 전달함수에 미치는 기여도 정도를 알아보는 연구가 필요하다.

### 후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(과제번호 2010-0023464)

### 참 고 문 헌

- (1) S. Nishihara and R. L. Goode, 1996, Measurement of tympanic membrane vibration in 99 human ear, Middle ear mechanics in research and otosurgery, pp. 91~93.