

수치해석을 이용한 머리전달함수의 계산 및 음장해석

Numerical Simulation of Head Related Transfer Functions and Sound Fields

최 성 훈*, Y. Kahana**, P. A. Nelson**, M. Petyt**
(Sunghoon Choi*, Y. Kahana**, P. A. Nelson**, M. Petyt**)

* 한국과학기술원 기계공학과, ** Southampton University
(접수일자: 2001년 3월 9일; 채택일자: 2001년 4월 30일)

수치해석 방법을 이용하여 실험으로 구한 머리전달함수 (Head Related Transfer Function: HRTF)를 컴퓨터 시뮬레이션으로 대체하고, 청취자의 머리 주변에서의 음장을 가시화하는 방법에 대해 다룬다. 본 논문에서는 경계요소법 (Boundary Element Method)과 무한요소법 (Infinite-Finite Element Method)의 두 가지 방법을 이용한다. 지금까지는 더미헤드 (Dummy-Head) 등을 이용한 실험으로 머리전달함수를 구하였는데 이 실험에는 상당한 시간과 장비가 필요하다. 3차원 레이저스캐너를 이용하여 KEMAR 더미헤드의 형상을 측정하고 이것을 여러 다른 요소 수를 가지는 경계요소모델 및 무한요소모델로 변환하여 머리전달 함수를 계산하고 모델의 요소 크기와 적용 가능한 주파수 대역과의 관계에 대해 분석한다. 측정을 통해 구한 머리전달함수와 비교하여 모델을 검증하고 음향학의 상반원리를 적용하여 머리전달함수의 데이터베이스를 구한다. 또한 몇 가지 가상음향 시스템에 대한 음장해석을 통해 주파수 및 시간영역에서의 음장을 가시화한다.

핵심용어: 3차원 음향, 머리전달함수, 경계요소해석, 무한요소해석, 입체음향, 더미헤드

투고분야: 건축음향 분야 (7.7), 물리음향 및 음향심리 분야 (9.1)

The goal of using numerical methods in this study is two-fold: to replicate a set of measured, individualized HRTFs by a computer simulation, and also to visualise the resultant sound field around the head. Two methods can be used: the Boundary Element Method (BEM) and the Infinite-Finite Element Method (IFEM). This paper presents the results of a preliminary study carried out on a KEMAR dummy-head, the geometry of which was captured with a high accuracy 3-D laser scanner and digitiser. The scanned computer model was converted to a few valid BEM and IFEM meshes with different polygon resolutions, enabling us to optimise the simulation for different frequency ranges. The results show a good agreement between simulations and measurements of the sound pressure at the blocked ear-canal of the dummy-head. The principle of reciprocity provides an effect method to simulate HRTF database. The BEM was also used to investigate the total sound field around the head, providing a tool to visualise the sound field for different arrangements of virtual acoustic imaging systems.

Keywords: 3D sound, HRTF, BEM, IFEM, Virtual source, Dummy-head

ASK subject classification: Architectural acoustics (7.7), Physical acoustics and photo-acoustics (9.1)

I. 개요

최근의 음향시스템 관련 연구 중에는 과거의 단순한 스테레오 시스템을 이용한 청취에서 발전하여 가상현실, 3차원 게임, 화상회의 등에서 가상 공간에 실제 상황과 같은 음장을 재현하는 3차원 입체음향에 대한 연구가 활발해지고 있다[1]. 가상의 입체 음향을 구현하는 가장 기본적인 원리는 청취자의 양 쪽 귀에 재현하고자 하는 소리와 동일한 음압과 위상을 가지는 소리가 발생하도록 하는 것이다. 재현하고자 하는 음향환경에서 실제의 청취자나 더미헤드 (dummy-head)의 양쪽 귀의 입구에 마이크로폰을 설치하여 음향 신호를 측정한다. 다음 이상적인 주파수 특성을 가지는 헤드폰을 이용하여 재생시키는 바이노럴방법 (binaural technology)을 한가지 예로 들 수 있다[2]. 스피커를 이용하여 재생하는 경우에는 음이 전달되면서 청취자의 신체에서 반사, 산란, 흡수 등이 되면서 특성이 변하게 되므로 이를 고려하여 입력 신호를 조절하여야 원하는 음향 신호를 양 귀 위치에서 얻을 수 있다. 이때 필요한 정보는 결국 음원에서 발생한 소리가 청취자의 양 귀에 어떤 형태로 도달하는지인데 이를 머리전달함수 (Head Related Transfer Function: HRTF)라고 부른다. 이 머리전달함수는 일반적으로 청취자로부터 일정한 거리에 위치한 여러 방향의 점 음원 (point source)에 대한 양쪽 귀 위치에서의 응답으로 저장된다. Gardner 등[3]은 더미헤드를 회전판 위에 고정시키고 원하는 고도에 위치한 스피커에 대한 충격응답을 측정하는 방법으로 모두 710개의 방향에 대한 머리전달함수를 구하여 인터넷상에 공개하였고, 이 데이터베이스는 3차원 음향에 관련된 많은 연구에 응용되고 있다.

머리전달함수는 음향신호가 청취자의 머리, 몸통 그리고 귓바퀴에서 반사, 회절, 흡수 되는 현상을 포함하기 때문에 개개인에 따라 주파수 특성이 다르게 나타나는데 특히 고주파 영역에서 차이가 심하게 나타난다. 3차원 음향 재생에 다른 사람의 머리전달함수를 적용하는 경우 주파수특성의 차이로 인하여 방향을 정확히 인지하지 못하거나 음원의 위치가 반전 (reversal)되는 현상이 발생하게 된다. 다시 말하면 입체음향 구현시 가장 이상적인 방법은 청취자 개인의 머리전달함수를 이용하는 것이라고 할 수 있다. Takeuchi 등[4]은 모노포닉 음향을 자기 자신의 머리전달함수를 이용하여 합성한 후 스피커를 이용해 재생했을 때 앞뒤 반전 현상이 줄어든다는 것을 보여 주었다. 하지만 머리전달함수의 측정에는 많은 비용

과 시간이 들기 때문에 개개인의 머리전달함수를 측정한다는 것은 현실적으로 불가능하다.

최근 수년 사이에 수치해석을 이용하여 머리전달함수 및 음장을 모사하려는 연구가 시도되고 있다. Weinrich [5]는 212개의 요소로 이루어진 머리의 수치해석 모델을 이용하였는데 모델의 정확도 때문에 저주파 영역에서만 유효한 결과를 얻을 수 있었다. 이후 Katz[6]가 처음으로 레이저 스캐너를 이용하여 수치해석 모델을 구하여 5kHz 범위까지 해석을 시도하였다. 최근에는 하드웨어의 발달과 상용소프트웨어의 개발로 계산 능력이 크게 향상되어 해석할 수 있는 주파수 영역이 넓어지게 되어 수치해석으로 머리전달함수 데이터베이스를 계산하는 연구가 보다 현실성 있게 되었다. 본 연구의 목적은 개인의 머리전달함수를 수치해석 방법으로 구하고 이것을 실제 측정치와 비교하여 타당성을 검증하는 것이다. 더미헤드로부터 몇 가지 경계요소모델을 만들어 실험 결과와 비교하여 각 모델 별로 적용 가능한 주파수 범위를 결정할 수 있다. 또 다른 수치해석 방법인 무한요소법 (Infinite-Finite Element Method: IFEM)[7]의 적용 가능성에 대하여도 연구한다. 머리전달함수와 함께 음장을 계산함으로써 청취자 머리와 귓바퀴 주위에서 반사 및 산란되는 현상, 그리고 가상 음장 구현시 주파수 영역 및 시간 영역에서의 음장을 가시화할 수 있다.

II. 경계요소해석

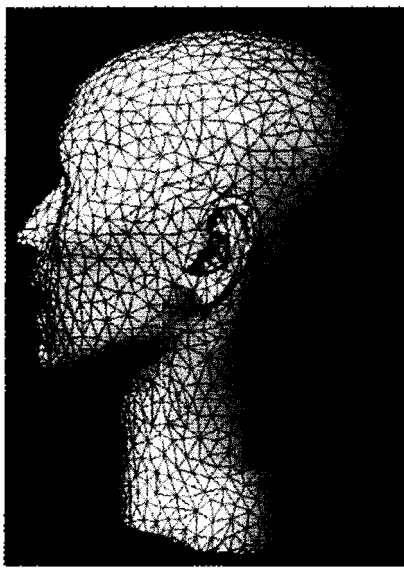
경계요소해석 (Boundary Element Method: BEM)은 유한요소해석 (Finite Element Method: FEM)과 함께 파동방정식의 시간영역 또는 주파수영역의 해를 구하는 수치해석 방법중의 하나이다. 유한요소해석과는 달리 경계요소해석은 헬름홀츠 (Helmholtz)의 적분방정식 형태에서 유도되므로 문제가 정의되는 영역의 경계만을 요소로 나누면 되기 때문에 훨씬 간단한 모델을 사용하게 되며 무한한 외부음장에 대한 문제를 다룰 수 있다는 이점이 있다. 본 연구에서는 상용 소프트웨어인 SYSNOISE[8]를 이용하여 경계요소해석을 수행하였다. 여기서는 더미헤드로부터 형상데이터와 경계요소모델을 구하는 절차를 정리하였다.

본 연구에서 사용한 더미헤드는 DB060/061 귀 모델을 장착한 KEMAR 더미헤드이다. 형상 데이터는 레이저스캐너 (Cyberware사의 3030 digitizer와 PS motion platform

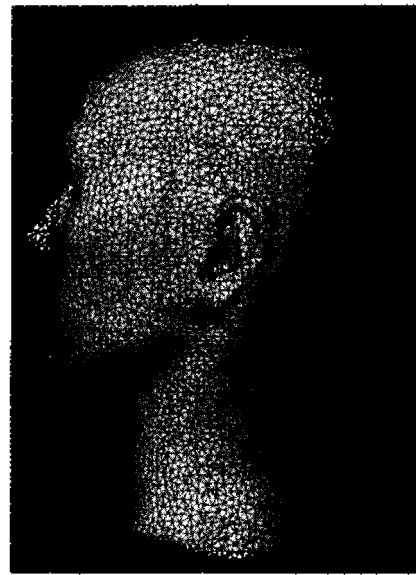
사용)를 이용하여 구하였다. 카메라를 65cm 반경에서 회전해 가면서 더미헤드를 주사하여 약 400,000개의 삼각형 요소로 이루어진 모델 데이터를 얻는다. 이 스캐너의 정밀도는 회전 및 깊이 방향으로 4mm이고 높이 방향으로 7mm이다. 여기서 얻은 데이터는 삼각형의 각 꼭지점의 3차원 좌표와 각각의 삼각형을 구성하는 3개의 점들의 리스트이다. 이 방법의 문제점은 카메라가 귀의 뒷부분과 내부를 정확히 주사할 수 없다는 것이다. 하지만 그간의 연구 결과에 의하면 귓구멍 (ear-canal)을 통한 소리

전파는 음원의 방향과 무관하기 때문에 귓구멍의 입구를 막은 상태에서 측정을 해도 원하는 결과를 얻을 수가 있다[9]. 따라서 귓구멍 내부에 대한 정보 없이도 막힌 귓구멍 모델을 이용하면 머리전달함수에 대한 충분한 정보를 제공하는 경계요소모델을 만들 수 있다. 또한 본 연구에서는 계산 시간을 최소화하기 위하여 모델에 가슴부분은 포함하지 않았다. 가슴과 어깨 등에서의 반사는 머리전달함수의 저주파 특성에 영향을 미친다[2,10,11].

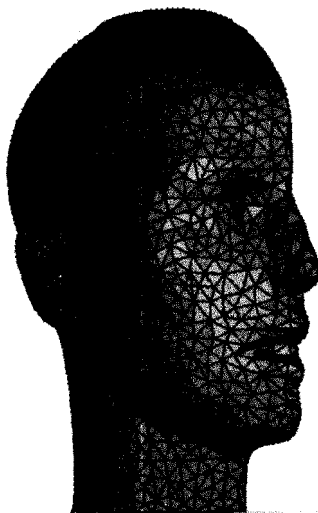
경계요소해석에서는 유효한 주파수 범위가 요소의 변



(a) 5,000 요소 모델
(a) 5,000 elements full model



(b) 20,000 요소 모델
(b) 20,000 elements full model



(c) 2,500 요소 1/2 모델
(c) 2,500 elements half model



(d) 15,000 요소 1/2 모델
(d) 15,000 elements half model

그림 1. KEMAR 더미헤드의 경계요소모델
Fig. 1. Boundary element models of the KEMAR dummy-head.

의 길이의 최대값에 따라 결정되므로 요소가 모델 전체에 균일하게 분포하도록 만드는 것이 효과적이다. 형상을 최대한 유지하면서 모델을 간략하게 하기 위한 여러 가지 알고리즘 중 Johnson 등 [12]의 방법을 이용하였다. 또한 경계요소해석에서는 행렬식을 푸는데 걸리는 시간이 요소수 (또는 절점 수)의 제곱에 비례하기 때문에 요소의 크기를 유지하면서 요소의 수를 줄이는 것이 문제 해결 시간을 줄이는 가장 중요한 요인이 된다. 사람의 머리가 좌우 대칭이고 귓바퀴가 동일하다고 가정하면 전체 머리 모델의 절반만으로 문제를 해결할 수 있다. 대칭성을 이용한 1/2 모델을 이용하면 전체적인 계산 시간을 대폭 단축할 수 있다. 공간상에서 음원이 대칭을 이루지 않을 때는 대칭 위치에 그 음원과 크기가 같으며 동일 위상을 가지는 가상의 음원과 180° 위상차가 나는 음원이 있다고 가정할 후 이 두 가지 경우에 대하여 각각 해석을 수행하여 두 결과를 중첩 (superposition) 함으로써 원하는 결과를 얻을 수 있다.

그림 1(a) 및 1(b)는 각각 약 5,000개 및 20,000개의 요소를 가지는 머리모델이며 그림 1(c) 및 1(d)는 약 2,500개 및 15,000개의 요소를 가지는 1/2 모델이다. 모델의 목 부분 및 대칭면은 2차원 Delaunay 삼각형[12]으로 막은 다음 요소 사이에 틈이 없으며 유한한 체적을 가지는 지 점검한다. 모델의 요소수가 줄어들수록 계산시간은 크게 줄어들지만 유효한 주파수 범위가 낮아지며 모델의 형상, 특히 귀 부위의 형상이 실제모양에서 벗어나게 된다. 머리전달함수를 구하기 위해서는 막힌 귓구멍에 근접한 위치에서 측정을 해야 하므로 귀의 형상이 결과에 많은 영향을 미친다. 실제 수치해석시는 귀 부분은 보다 정밀한 요소로 나누어 형상을 실제에 가깝도록 하였다. 그림 2는 (1m,1m,1m) 위치, 즉 머리의 정면으로부터 위도와 경도가 각각 45°인 음원에 대한 반대쪽 귀에서의 응답

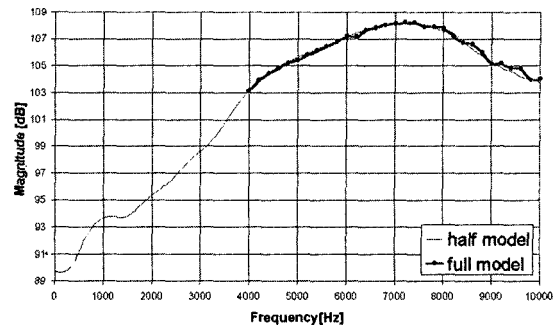


그림 2. (1m,1m,1m)위치의 음원에 대한 반대쪽 귀 위치에서의 주파수 응답. 30,000개의 요소를 가지는 KEMAR 모델과 15,000개의 요소를 가지는 1/2 모델에 대한 결과를 비교
 Fig. 2. Comparison of the frequency response due to a source at (1m, 1m, 1m) or (45° azimuth, 45° elevation) obtained with the full model of KEMAR (30,000 elements) and superposition of symmetric and anti-symmetric options with the half model (15,000 elements).

을 30,000개의 요소를 가지는 전체모델과 15,000개의 요소를 가지는 1/2 모델을 이용하여 계산한 결과를 비교한다. 경계요소법을 사용하여 이 정도 크기의 모델을 해석할 때는 대부분의 시간이 행렬식을 푸는데 소요되기 때문에, 요소의 수가 반으로 줄어들 때 계산 시간은 대략 1/8 정도로 줄어든다. 즉 1/2모델을 이용하면 앞에서 설명했듯이 해석을 두 번 수행해야 하므로 대략 1/4의 계산 시간으로도 비슷한 계산 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 경계요소법에서 해석의 정확도는 요소의 크기에 따라 결정되는데 여러 다른 모델에 대한 비교결과 주파수에 해당하는 음파의 한 파장 당 대략 음영지역에서는 대략 6개 그 이외의 영역에서는 대략 4개 정도의 요소가 필요하다 [10]. 표 1은 몇 가지 모델에 대하여 적용 가능한 주파수 범위와 계산시 필요한 메모리의 크기 및 계산 시간을 보여준다. 여기서는 SYSNOISE의 경계요소법 중 직접경계요소법 (Direct Boundary Element Method)을 이용하였다.

표 1. 경계요소모델의 크기와 해석 가능한 최고 주파수, 필요한 메모리 용량 및 계산시간과의 관계 (DBEM 사용)
 Table 1. The relation between the size of the BEM models and the maximum frequency, memory and CPU time (using DBEM).

Number of elements	Number of nodes	Max. frequency [kHz]		Memory (Mb)	CPU time [minutes]	
		Ipsilateral ear	Contralateral ear		PC P-JI-400	HP Exemplar
≈ 200,000-	≈ 100,000	18.3	27.4	160,000	-	-
16,508	8,543	10.3	15.4	1,197	1,070	568
11,963	6,223	8.6	12.9	692	425	256
5,886	3,109	5.3	7.9	155	51	38
3,359	1,804	3.9	5.9	69	15	12
2,323	1,211	2.4	3.5	30	5	5

III. 머리전달함수의 계산 및 측정

경계요소법으로 구한 머리전달함수를 검증하기 위해서는 측정치와의 비교가 필요하다. 시뮬레이션에서는 가슴을 제외한 KEMAR의 머리 모델만을 이용했기 때문에 KEMAR를 이용한 다른 머리전달함수 [3] 등과 직접 비교하는 데는 무리가 있다. 따라서 머리의 밑부분을 막은 모델을 회전판에 장착하여 무향실에서 전달함수를 측정하였다. 귓구멍의 입구를 막고 Knowles EA-1954 Electret 마이크로폰을 장착하고 마이크로폰의 출력 신호는 B&K의 증폭기로 증폭하였다. 더미헤드에서 1.4m 거리에 Yamaha P-2160 증폭기를 연결한 Celestion 1 스피커를 장착하고 충격응답을 48 kHz의 샘플링 주파수로 MISSA 소프트웨어[13]를 이용하여 측정하였다. 측정은 더미헤드의 정면 방향을 0°로 기준 삼고 각각 0°, 45°, 90°, 180° 간격으로 회전하여 반복하였다. 마이크로폰과 스피커의 자유음장 응답은 따로 측정하여 디컨볼루션하였다[14].

그림 3은 이상에서 기술한 방법으로 측정한 결과와 계산 결과를 비교하고 있다. 여기서 보여주는 계산 결과는 약 3,000개의 요소를 가지는 1/2모델을 이용하여 100 Hz의 간격으로 계산한 결과이다. 표 1을 보면 이 모델은 음원의 위치에 따라 대략 5~7 kHz 범위에서 해석의 신뢰도

가 있음을 예측할 수 있다. 그림에서 두 결과를 비교하면 계산 결과가 측정 결과에서 2~3dB 이내의 오차가 있음을 알 수 있다. 이 오차는 다음과 같은 원인에 기인한다고 예상된다.

- 1) 무향실에서 위치 및 방향 등의 설정 문제.
- 2) 측정 모델과 계산 모델, 특히 귀 부분의 모델링 차이.
- 3) 마이크로폰과 스피커의 주파수 응답을 완전히 제거하지 못함.
- 4) 머리 모델의 경계조건을 강건 (rigid)하다고 가정. 위에서 열거한 이유로 약간의 차이는 있지만 6 kHz 이하에서 머리전달함수의 대체적인 특성을 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다.

측정으로 머리전달함수 데이터베이스를 구하기 위해서는 보통 1.4~2.0m 정도의 반경을 가지는 구 위에 위치하는 여러 다른 라우드스피커를 이용한다. 수치해석을 할 때도 마찬가지로 각각의 음원의 위치에 대한 해석을 해야 하므로 많은 시간이 필요하게 된다. 이 때 음향학의 상반 (reciprocity) 원리를 이용하여 라우드스피커의 위치와 마이크로폰의 바꾸어 해석함으로써 한번의 계산으로 모든 방향에 대한 머리전달함수를 구할 수 있다. 즉, 머리 전달함수를 구하고자 하는 귓구멍 앞의 위치에 음원이 있다고 가정하고 원하는 반경을 가지는 구 위의 임의의

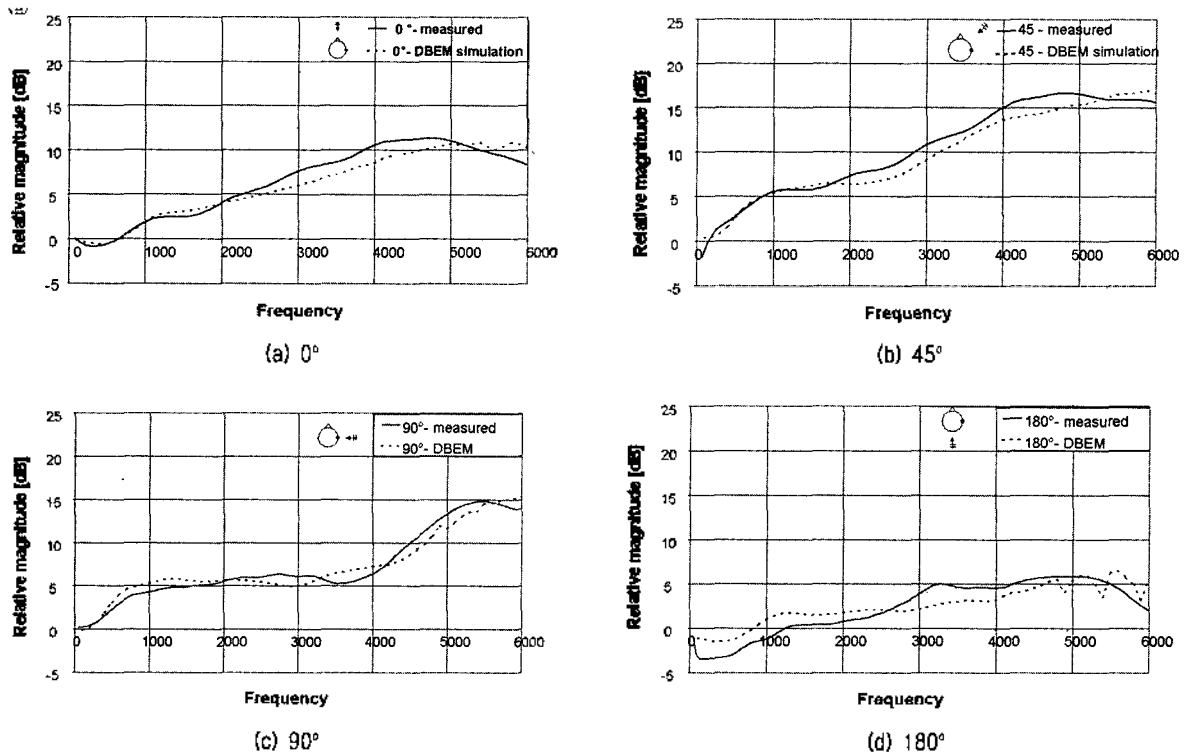


그림 3. 계산 및 실험으로 구한 KEMAR 더미헤드의 머리전달함수의 비교 (실선: 측정치, 점선: BEM)
 Fig. 3. Comparison between the simulated and measured HRTF of KEMAR (solid line: measured, dashed line: BEM).

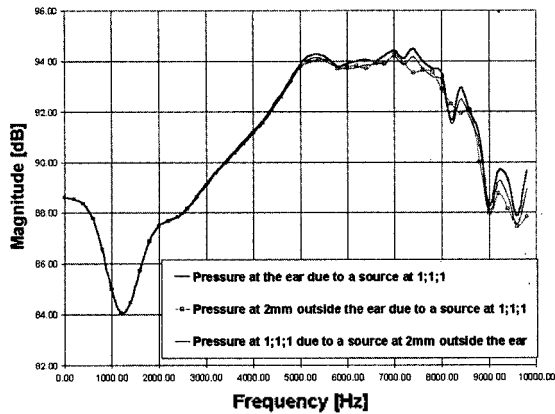


그림 4. 음향학적 상반원리를 적용한 머리전달함수의 계산 (15,000 요소의1/2모델 이용)

Fig. 4. Validation of the principle of reciprocity using a half model of KEMAR (15,000 elements).

위치에서의 음압을 계산하면 그 값이 그 음원에 대한 귓구멍 위치에서의 응답이 되는 것이다. 따라서 각 주파수 당 한번의 계산으로 원하는 모든 위치의 음원에 대한 전달함수를 구할 수 있다. 경계요소법을 이용하여 주변 음장을 계산하는 후처리 과정은 시스템 행렬을 계산하고 역을 구하는 시간에 비해 아주 짧은 시간에 처리할 수 있으므로 머리전달함수의 값을 공간상에서 거의 연속적으로 얻을 수 있다. 실험에 의해 구한 머리전달함수를 이용할 때는 데이터베이스가 연속적이지 못하므로 각각의 데이터의 중간 위치에 해당하는 가상 음원의 경우에는 내삽으로 근사값을 구해야 하는 단점이 있다.

그림 4에서는 상반원리 검증을 위해 음원과 청취점을 공간상의 한 점 (1m,1m,1m)과 음영지역에 있는 막힌 귓구멍의 2mm앞의 위치에 서로 바꾸어 놓고 주파수 응답을

계산하여 비교하였다. 10 kHz까지의 범위에서 0.5dB이 내의 오차가 있음을 알 수 있다. 저주파에 비해서 고주파에서 결과의 차이가 있는 것으로 보아 음영 지역에 대하여 보다 신뢰성있는 결과를 위해서는 요소의 수를 늘려야 할 것으로 보인다. 이 그림에서는 또한 막힌 귓구멍 위의 절점에서의 음압도 비교하였는데 2mm앞의 위치에서의 음압과 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 즉 계산으로 머리전달함수를 구할 때 측정 점의 위치는 귀구멍에 근접한 경우 결과에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그림 5(a), (b)는 1 kHz와 4 kHz에서의 한쪽 반구의 모든 위치에 대한 머리전달함수를 보여준다. 저주파에서는 귓바퀴의 영향이 상대적으로 적으므로 앞과 뒤 방향의 머리전달함수 (또는 음압)의 형태가 거의 대칭임을 알 수 있으며 이것이 앞서 언급한 앞-뒤 반전의 주요인이 된다. 고주파로 갈수록 파장이 짧아져서 반사, 회절 등의 영향으로 대칭 상태가 깨지며 머리 정면에서의 응답이 커지는 것을 알 수 있다. 그림 1(d)의 1/2모델에서 요소의 최대 변의 길이는 대략 2mm 정도이고 파장 당 4개의 요소로 모델링이 가능하다고 가정하면 최대 주파수는 15 kHz까지 확장 가능하다. 그림 6은 이 모델에 대한 양쪽 귀를 포함하는 평면에서의 머리전달함수 계산 결과이다. 첫번째 공진이 대체적으로 예상보다 (< 6 kHz) 높은 주파수에서 발생한다는 것을 알 수 있는데 이는 귓바퀴의 모델링이 실제보다 얇게 되었기 때문으로 추정된다. 음영지역에서 파장 당 4개의 요소로는 정확한 결과를 예측할 수 없으므로 180°~360° 방향의 머리전달함수를 보면 고주파 영역에서 급격한 변화가 있는 것을 알 수 있다.

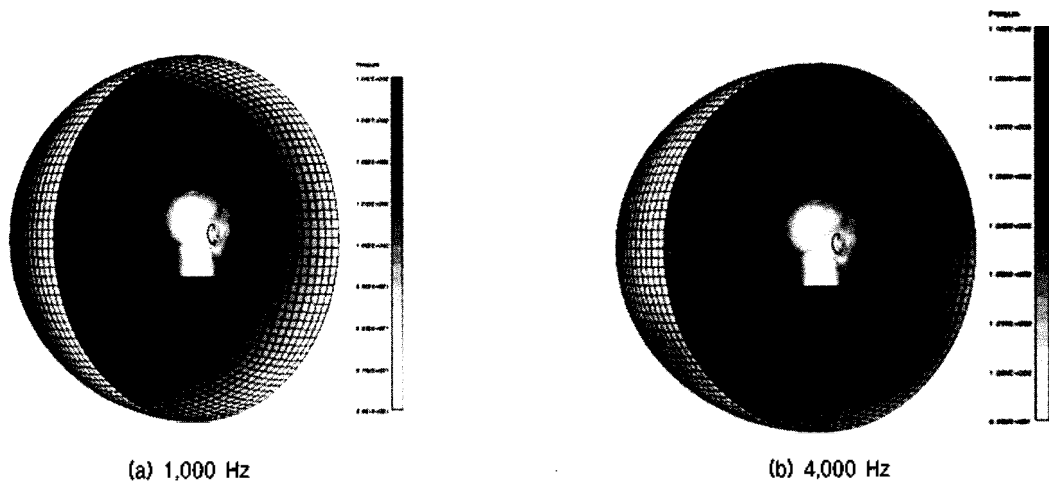


그림 5. 각 주파수별 머리전달함수 지도 (map) 반구의 각각의 위치에 있는 음원에 대한 왼쪽 귀에서의 음압을 그레이스케일로 나타냈다
Fig. 5. Maps of HRTFs at single frequencies. The grey scale represents the magnitude of the pressure at the left ear due to a source at that position.

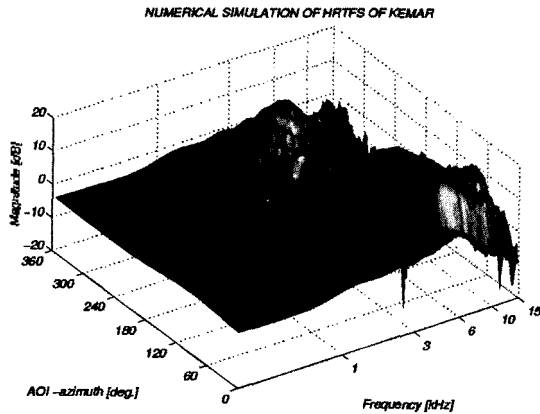


그림 6. KEMAR의 양 귀를 포함한 수평면에서의 HRTF 계산결과와 더미헤드의 정면울 0° 기준
 Fig. 6. A map of the absolute magnitude of the simulated HRTFs with KEMAR in the horizontal plane. 0° is defined to be in front of the dummy-head.

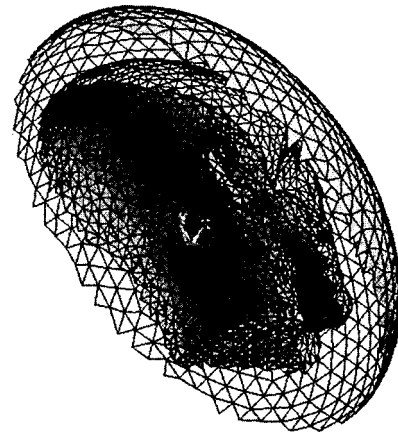
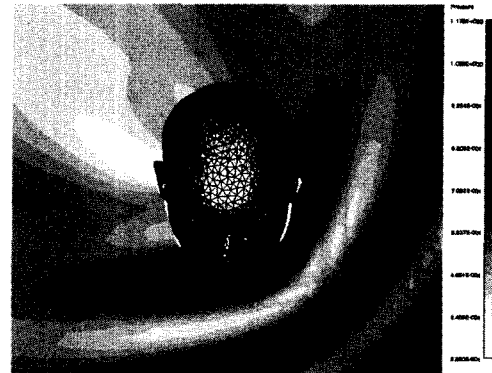


그림 7. KEMAR의 무한요소(IFEM)모델
 Fig. 7. IFEM mesh of KEMAR.

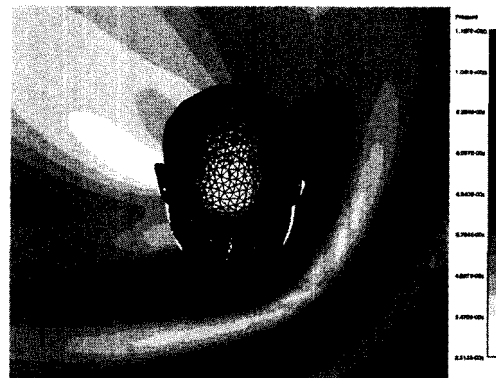
IV. 무한요소법을 이용한 음장해석

경계요소해석은 유한요소법에 비해 한 차원 낮은 모델을 이용하기 때문에 모델을 만드는데 용이한 장점이 있으나 적분 방정식에서부터 선형 방정식이 유도되기 때문에 일반적인 유한요소해석과는 달리 시스템 행렬이 대칭성을 가지지 않고 요소가 짝 찬 형태가 된다. 따라서 모델을 구하는데 절약하는 시간 이상의 시간을 계산하는데 사용하게 되는 경우가 발생한다. 그러므로 유한요소해석의 장점을 이용하면서 외부음장을 해석할 때 문제가 되었던 방사조건 (radiation condition)을 고려하는 무한요소해석 (Infinite-Finite Element Method: IFEM)[7,8]을 이용하여 머리전달함수를 계산하는 방법을 생각할 수 있다. 적절한 모델이 준비되는 경우에는 일반적인 개인용 컴퓨터를 사용하여도 쉽게 머리전달함수 데이터베이스를 구할 수 있게 된다. 외부음장 문제에 무한요소해석 방법을 적용할 때는 기존의 유한요소 모델 이외에 근접 음장에서 원거리 음장까지를 포함하는 무한요소와 이 두 요소간을 연결하는 요소가 필요하다. 이 중 무한요소에 방사조건을 포함할 수 있도록 형상함수를 적용하는 것이다. 무한요소해석에 대한 자세한 내용은 생략한다.

그림 7에 무한요소모델의 예가 있는데 이 모델은 41,100개의 사면체 요소를 이용하여 머리 형상을 표현하고 2,400개의 무한 요소 그리고 10,800개의 원래의 경계요소를 이용하여 연결한 모델이다. 이 그림에서는 편의상 내부의 유한요소는 표시하지 않았다. 그림 8에 무한요소해석 결과를 이전의 경계요소해석 결과와 비교하였다.



(a) BEM



(b) IFEM

그림 8. (1m,1m,1m) 에 위치한 2kHz 음원에 의한 KEMAR 주위에서의 음장
 Fig. 8. The amplitude of the total sound pressure around KEMAR at 2 kHz due to a source at (1m, 1m, 1m).

음원이 (1m,1m,1m) 위치에 있는 경우에 경계요소해석과 무한요소해석과의 평균 오차는 1.3% 정도였다. 여기서 사용한 무한요소방법은 경계요소법과 마찬가지로 상용 소프트웨어인 SYSNOISE [8]를 사용하였는데 아직은 무한요소법의 적용이 초기 단계라 실제 계산시간은 경계요

소해석에 비해 오래 걸리는 것을 알 수 있었다. 그러나 향후 적용 알고리즘의 개발과 무한요소모델의 최적화를 통해 계산시간을 단축할 수 있을 것으로 생각한다.

V. 입체음향의 음장 가시화

지금까지의 입체음향 시스템에 의한 음장 시뮬레이션은 구에 의해 산란된 음장을 이론해로 표현하여 계산한 것이었다[15,16]. 이들 논문에서는 단일 음원에 의해 구 주위에 형성되는 음장과 특정 신호를 얻기 위해 필터가

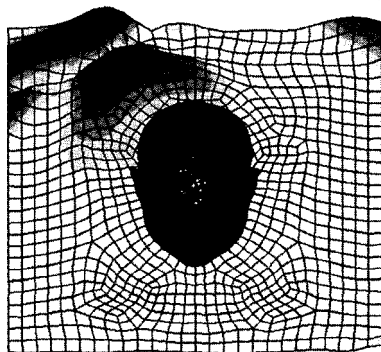
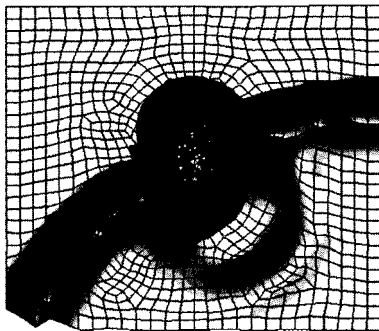
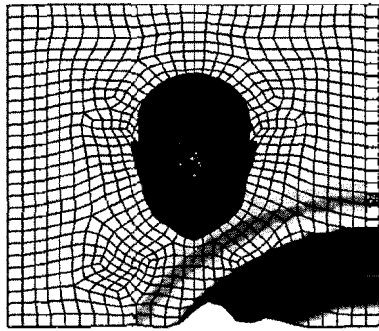


그림 9. 단극 음원에 의한 각 시간별 KEMAR 주위의 음장분포
Fig. 9. Three snapshots of time domain simulation of the propagating wave around KEMAR.

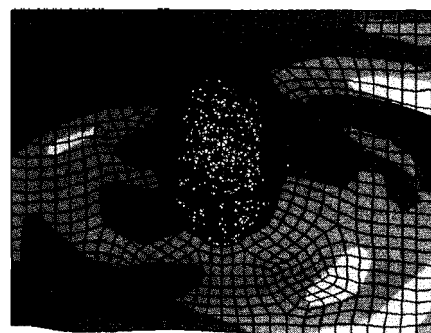
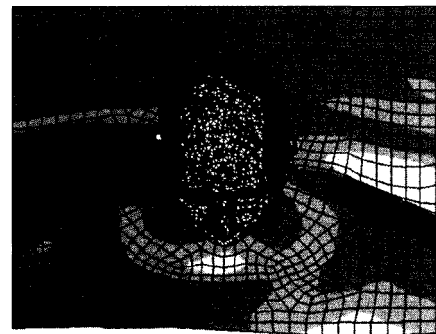
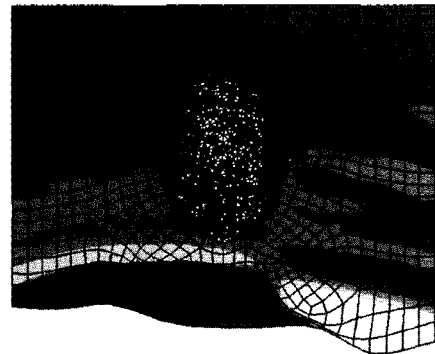


그림 10. 스테레오 다이폴에 의한 각 시간별 KEMAR 주위의 음장분포

Fig. 10. Three snapshots of time domain animation of the propagating waves around KEMAR dummy-head with two closely spaced loudspeakers (Streo-Dipole).

적용된 다수의 음원에 의한 음장을 주파수 및 시간 영역에서 보여주었다. 본 논문에서의 가상 음원에 의한 음장 계산도 비슷한 방법을 적용하여 다음과 같은 절차에 의하여 수행된다.

- 1) 머리전달함수를 이용하여 스피커와 청취점 (귀)의 상대 위치에 따라 결정되는 “전기-음향” 행렬을 구한다[15].
- 2) 원하는 음향신호를 결정한다. 예를 들어 한쪽 귀에만 소리가 들리도록 원한다면 2×2 시스템에서는 목적 신호를 $d=[1 \ 0]^T$ 라고 표현할 수 있다.
- 3) 실제 음원과 동일한 위치에 있는 음원에 의한 머리 주변의 임의의 위치에서의 음장을 계산한다.
- 4) 1), 2)에서 구한 역필터를 3)의 음원에 적용하여 결과를 중첩한다.

위의 방법으로 머리 주위의 임의의 위치에서의 음장을 위에 각 주파수별로 구하고 시간영역에서의 결과는 주파수 응답에 FFT를 적용하면 구할 수 있다. 그림 9, 10에 이런 방법을 이용하여 머리 주위의 음장을 가시화한 예가 있다. 이 결과들은 6.4 kHz까지의 주파수 응답 결과에 Hanning pulse를 적용한 FFT를 이용하여 충격응답을 구한 것이다. 그림 9는 KEMAR의 왼쪽 방향의 30° 위치에 있는 단극 음원 (monopole source)에 의한 음장을 보여준다. 첫 번째 그림에서는 구형파 (spherical wave)가 음원에서부터 전파되어 가는 것을 보여준다. 두 번째 그림에서는 머리에서 반사된 파가 반대 방향으로 전파되어 가고 있으며 마지막 그림에서는 입사파가 머리를 지난 후 음영 지역으로 파동이 전달되는 것을 보여준다. 그림 10은 “스테레오 다이폴 (Stereo Dipole[15])”을 이용하여 가상 음장을 구현한 예를 보여준다. 두 스피커의 입력 신호에 적절한 필터를 적용하여 왼쪽과 오른쪽 귀에 각각 ‘0’과 ‘1’의 신호가 도달하도록 한 것이다. 두 스피커가 가까운 곳에 위치하기 때문에 진행파 사이의 간섭이 최소가 되고 원하는 신호가 도달하는 영역이 최대화할 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 수치해석 방법을 이용하여 머리전달함수 및 KEMAR 더미헤드 주위에서의 음장을 해석하는 방법을 다루었다. 3차원 레이저스캐너를 이용하여 의사머리 또는 실제 머리의 형상정보를 구한 후 수치해석 모델

로 변환하였고 모델의 정확도에 따라 측정치와 유사한 계산 결과를 얻을 수 있음을 보여주었다. 음향학적 상반원리 (reciprocity)를 적용하여 공간상의 임의의 위치에 대한 주파수 응답을 구할 수 있었다. 수치해석모델, 특히 무한요소모델의 경우에는 계산방법에 대한 개선 여지가 많기 때문에 하드웨어의 발전을 예상하면 개인용 컴퓨터 상에서도 짧은 시간에 머리전달함수 데이터베이스를 구할 수 있으리라 생각한다. 이러한 개인화된 머리전달함수를 입체음향시스템에 적용함으로써 일반적인 머리전달함수를 이용하는 것보다 음의 앞-뒤 반전 등의 오차를 줄일 수 있을 것이다. 수치해석을 이용하여 머리전달함수의 계산뿐 아니라 머리 주위의 음장을 계산할 수 있으므로 여러 가지 다른 가상음장 시스템에 대하여 음장을 가시화하여 이해를 돕는데 활용할 수 있다.

감사의 글

본 논문의 첫번째 저자는 현재 교육부의 두뇌한국 21(BK21) 사업에 의해 지원받고 있습니다.

참고 문헌

1. D. R. Begault, *3-D sound for virtual reality and multimedia*, AP Professional, Cambridge MA, 1994.
2. J. Blauert, *Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization*, MIT Press, Cambridge, MA, 1983.
3. B. Gardner, K. Martin, *KEMAR HRTF measurements*, MIT's Media Lab through <http://sound.media.mit.edu/KEMAR.html>.
4. T. Takeuchi, P.A. Nelson, O. Kirkeby, and H. Hamada, "Influence of individual head-related transfer function on the performance of virtual acoustic imaging," *AES 104th Convention*, pre-print 4700, 1998.
5. S. Weinrich, "Sound field calculations around the human head," Technical report, 37, The acoustics laboratory, Technical university of Denmark, 1984.
6. B.F. Katz, *Measurement and calculation of individual head-related transfer functions using a boundary element model*, Ph.D. thesis, Penn-state University, 1998.
7. L. Cremers, K.R. Fyde, J.P. Coyette, "A variable order infinite acoustic wave envelope element, *Journal of Sound and Vibration*", 171 (4), pp. 483-508, 1994.
8. *SYSNOISE 5.4 Users Manual*, LMS International, Leuven, Belgium.
9. D. Hammershøj and H. Møller, "Sound transmission to and within the human ear-canal," *J. Acoust. Soc. Amer.*, 100 (1), pp. 408-427, 1996.
10. Y. Kahana, P. A. Nelson, M. Petyt, and S. Choi, "Boundary element simulation of HRTFs and sound fields produced by virtual acoustic imaging system," *105th AES Convention*, Pre-print 4817, 1998.
11. Y. Kahana, P. A. Nelson, M. Petyt, and S. Choi, "Numerical

Modelling of the transfer functions of a dummy-head and of the external ear," *AES 16th International Conference on Spatial Sound Reproduction*.

12. A.E. Johnson and M. Hebert, "Control of Polygonal Mesh Resolution for 3-D Computer Vision," Carnegie Mellon University, School of Computer Science Tech. Report, CMU-RI-TR-96-20, 1997.
13. D. Rife, J. Vanderkooy, "Transfer-function measurement with maximum-length sequences," *J. Audio Eng. Soc.*, 37 (6), pp. 419-444, 1989.
14. O. Kirkeby, P.A. Nelson, H. Hamada, "Digital filter design for virtual source imaging systems," *AES 104th Convention*, pre-print 4688, 1998.
15. O. Kirkeby, P.A. Nelson, H. Hamada, "The *Stereo Dipole*: Binaural sound reproduction using two closely spaced loudspeakers," *AES 102nd Convention*, pre-print 4463, 1997.
16. Y. Kahana, P.A. Nelson, O. Kirkeby, H. Hamada, "Multi-channel sound reproduction using a four-ear dummy-head," *Audio Engineering Society 102nd Convention*, pre-print 4465, 1997.

저자 약력

● 최 성 훈 (Sunghoon Choi)



1990년 2월: 한국과학기술원 기계공학 (공학사)
 1992년 6월: Northwestern University, Evanston, IL, USA, 응용역학 (공학석사)
 1995년 6월: Northwestern University, Evanston, IL, USA, 응용역학 (공학박사)
 1995년 ~ 2000년: 삼성중합기술원 전문연구원
 2000년 ~ 현재: 한국과학기술원 기계공학과 연구교수
 ※ 주관심분야: 구조음향, 파동전달, 입체음향

● Yuvi Kahana

1974년: University of Southampton, PhD in Mechanical Engineering

● Philip A. Nelson

1974년: University of Southampton, BS in Mechanical Engineering
 1978년: University of Southampton, PhD in Mechanical Engineering
 1982년 ~ 현재: University of Southampton, Professor

● Maurice Petyt

1956년: University of Hull, BS in Mathematics
 1958년: University of Hull, MS in Applied Mathematics
 1958년 ~ 1963년: British Aerospace, Dynamics Engineer
 1967년: University of Southampton, PhD in Mechanical Engineering
 1967년 ~ 현재: University of Southampton, Professor