

# BEM에 의한 보청기 마이크로폰을 가진 귀의 지향성 시뮬레이션

권유정, 장순석  
조선대학교 정보제어계측공학과

## Directivity pattern simulation of the ear with hearing aid microphones by BEM

You Jung Kwon, Soon Suck Jarng  
Dept. of Info, Control & Instrumentation, Chosun University  
ssjarng@chosun.ac.kr

### 요약

보청기에서 마이크로폰을 여러 개 배치하여 소음 감소 효과를 가져 올 수 있다. 본 논문에서는 양측 귀에 각각 두개씩의 보청기용 마이크로폰을 배치했을 때의 효과를 경계 요소 기법에 의해 해석하였다. 두개의 마이크로폰을 배열하여 마이크로폰 두개 사이의 시간 지연에 의한 특별한 지향성 패턴을 만들게 되고, 이러한 지향성 패턴은 기하학적으로 소음 대 잡음의 비율 증가시킬 수 있다. 두 개의 마이크로폰 배열에 의한 3차원 지향성 패턴 해석에 경계요소기법이 응용되었으며, 이러한 수치 해석은 보청기 DSP칩의 시간 지연 파라미터 계산에 이용될 수 있다. 두 개 마이크로폰사이의 간격은 10mm로 고정시키고, 머리의 전 방향에 폭이 좁은 지향 패턴이 생기도록 두 개 마이크로폰의 사이 시간 지연을 바꾸어 주었다. 시간 지연의 변화를 입력 주파수에 따라 관찰하였다..

### 1. 서론

디지털 보청기의 주요 기능은 전기적 신호의 증폭이지만, 다른 많은 특성들도 가지고 있는데, 보청기의 어떤 특별한 기능의 향상을 위해 디지털 보청기 칩의 파라미터 값을 변화시키는 것이다. 그 중에서 특히 본 논문에서 관심을 갖는 분야는 두 개의 입력 채널 사이의 시간 지연이다.

본 연구에서는 양측 귀에 각각 두 개씩의 마이크로폰

을 사용하였을 경우의 지향성 패턴을 분석하였다.

디지털 보청기에서 지향성 패턴은 4개의 마이크로폰이 어떻게 위치하느냐에 의해 달라질 수 있다. 보통 양귀에 착용하는 보청기는 같은 형의 디지털 보청기를 사용하는데, 각각 한쪽 귀에 삽입되는 두개의 마이크로폰 사이 간격은 작은 공간만을 띄울 수밖에 없으나 상대적으로 양쪽 귀에 2개씩 배열된 마이크로폰은 두 귀 사이의 머리로 인해 긴 간격을 갖게 된다.

여기서 우리는 2가지의 의문을 갖게 된다. 하나는 우리가 머리의 크기를 알 때 최상의 방향적 민감성을 갖기 위해서는 두 개의 마이크로폰 사이가 얼마나 짧은 또는 긴 간격을 가져야만 하는지? 다른 하나는 만약에 2개의 마이크로폰 배열 거리가 고정되어 있다면 양쪽 귀의 마이크로폰 사이 시간 지연은 얼마나 해야 하는지? 하는 문제이다. 본 논문에서는 이러한 문제들의 해결을 위해 경계요소 기법을 활용했다.

### 2. 경계 요소 기법 (Boundary Element Method (BEM))

음압은 입사되는 음압이 머리와 같은 물체에 부딪혔을 때 산란하게 된다. 그래서 머리 주위의 음장은 입사파와 산란파가 함께 섞이게 된다. 여기서 수치 해석 방법의 목적은 머리 주위의 음압을 계산하기 위한 것이다. 입력 주파수뿐만 아니라 머리와 귀의 모양과 크기가 음장의 기하학적 변화에 영향을 주는 것으로 보인다.

음장의 경계요소 해법은 헬름홀츠 편미분 방정식[3]에

기초하고 있다. 정현파의 주파수 응답 문제를 위해서는 헬름홀츠 방정식인,  $\nabla^2 \psi + k^2 \psi = 0$  으로 유체 역학을 설명 할 수 있다.  $\psi$ 은 시간,  $e^{j\omega t}$  에 대한 음향 압력 (acoustic pressure) 이다. 주어진 공기 매질 내에서 헬름홀츠 방정식을 풀기 위해 방정식의 해법은 구조적 표면 경계 조건,  $\partial\psi/\partial n = \rho f \omega^2 a_n$  뿐만 아니라, 주어진 공간에서의 무한 방사조건,  $\lim_{r \rightarrow \infty} (\partial\psi/\partial r + jk\psi)^2 dS = 0$  도 만족시켜야 한다.  $\partial/\partial n$  는 표면 경계에서 외부 법선 방향으로의 미분을 의미하며,  $a_n$  는 정규화 된 변위이다. 헬름홀츠 적분 방정식은 Green의 2차 가설에서 유도되며, 위의 방사 음파에 대한 해를 구해 준다.

$$\oint \left( \psi(q) \frac{\partial G_k(p, q)}{\partial n_q} - G_k(p, q) \frac{\partial \psi(q)}{\partial n_q} \right) dS_q = \beta(p) \psi(p) \quad (1)$$

여기서,  $G_k(p, q) = e^{-jkr} / 4\pi r$ ,  $r = |p - q|$   
 $p$ 는 표면 내외부의 임의의 점이고,  $q$ 는 표면 적분점이다.  
 $\beta(p)$ 는  $p$ 에서의 외향 솔리드 각도이며,  $k$ 는 파수이다.  
 헬름홀츠 표면 적분 방정식의 이산 BEM 공식은 다음과 같다.

$$\{\psi\} = + \rho_f \omega^2 [A]^{-1} [B] \{a\} - [A]^{-1} \{\psi_{inc}\} \quad (2)$$

여기서  $\rho_f$ 는 공기의 밀도,  $\psi_{inc}$ 는 입사 음압이다.  $[A]$ 와  $[B]$ 는 음장 임피던스 행렬이다 [4].

각각의 3차원 표면 경계요소는 8 노드로 구성되며, 각 노드에는 노드 표면 음압( $\psi$ )이 변위로 할당된다. 강체 표면 경계 조건을 식 (2)에 적용 할 경우,

$$\{\psi\} = -[A]^{-1} \{\psi_{inc}\} \quad (3)$$

$\psi$ 을 알게 되면, 근거리나 원거리 음장 압력은 식 (3)에서 계산된 표면 노드 압력의 값과 0 표면 노드 변위를 가진 강체를 위한 공식 (1)의  $\beta(p) = 1$ 에 의해 결정된다.

$$\psi(p_i) = \sum_{m=1}^{n_t} \sum_{j=1}^8 A_{m,j}^i \cdot \psi_{m,j} \quad (4)$$

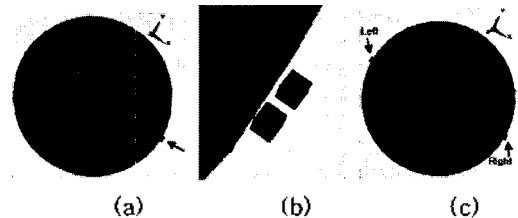
여기서  $n_t$ 는 경계 요소들의 전체 개수이다.

### 3. 경계요소 메쉬 형성

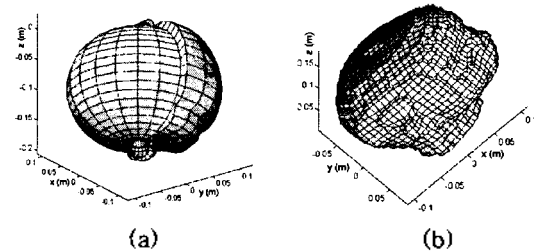
CAD 프로그램으로 메쉬를 형성한 완전한 구형과 사람 머리모양의 두상I, 그리고 3차원 레이저 스캐닝 된 점 데이터로부터 만든 자유형상 모델인 두상II의 3가지 모델을 해석에 사용하였다.

그림1은 지름 18cm 구형의 표면 메쉬를 보여 주고

있다. (b)는 (a)의 화살표 부분을 확대하여 두 개의 마이크로폰의 위치를 보여 주고 있으며, (c)는 오른쪽과 왼쪽 양측에 위치한 두 개씩의 마이크로폰들을 보여 주고 있다. (c)에서  $y$ 축이 사람이 대화할 때의 정면이 되며, 그 반대쪽이 뒷머리 부분이 된다. 지향성 패턴의 각도는 앞에서부터 반 시계 방향으로 돌아가며 측정하였다.



[그림1] (a) 지름 18cm 구형의 표면 메쉬, (b) (a)의 화살표 부분을 확대한 두 개 마이크로폰의 위치, (c) 오른쪽과 왼쪽 양측에 위치한 두 개씩의 마이크로폰들



[그림2] CAD 프로그램으로 메쉬를 형성한 사람 머리모양의 두상 I과 3차원 레이저 스캐닝 된 점 데이터로부터 만든 자유형상 모델인 두상 II

그림2(a)는 컷바퀴와 외이도가 있고 크기는 구와 같이 앞에서 뒤까지 18cm이다. 그림2(b)는 본 실험실에서 개발한 SVS 자동 메쉬 형성 프로그램에 의해 자동으로 메쉬를 형성한 모델이다. BEM 프로그램은 포트란으로 짜여졌고, 2G 램 PC에서 실행되었다. 공기 밀도는  $1.34 [Kg/m^3]$ , 공기 중 속도는  $344 [m/sec]$ , 입력 주파수는 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 Hz에서 해석하였다.

### 4. 해석 결과

[그림3]은 1 kHz 에서 구형 모델의 근거리 음장을 보여준다. 2차원에서 보면 위쪽이 전 방향이고, 아래쪽은 후 방향이며, 입사파는 전방으로부터 오고 있다.



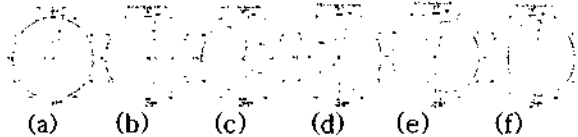
Fig. 3 The near field of the sound pressure for the sphere model at 1 kHz in two dimensional view.

[그림3] 1 kHz에서의 구형 모델 2차원 근거리 음장

[그림4]는 구형 머리 모델 없이 방향성 보청기 하나에서 만의 전방과 후방 2개 마이크로폰에 의한 지향성 패턴을 보여 준다. 2개 마이크로폰 사이의 거리는 10mm, 입력 주파수는 4kHz이다. 후방 마이크로폰을 기준으로 할 때를 시간 지연 0으로 하고, 전방과 후방 2개 마이크로폰 사이의 시간지연이 (a)0, (b)0.1, (c)0.1125, (d)0.1375, (e)0.15, (f)0.175ms 가 되도록 조절하며 지향성 패턴을 관찰하였다. 전방 마이크로폰의 진폭과 위상은  $A_f$  과  $\theta_f$  로, 후방 마이크로폰의 진폭과 위상은  $A_r$  과  $\theta_r$  로 표시한다.

$$|A_f \cos(2\pi f \cdot (t-0) + \theta_f) + A_r \cos(2\pi f \cdot (t-\Delta t) + \theta_r)| \quad (5)$$

전방 마이크로폰은 위상을 앞서가기 때문에 지연 되게 된다. [그림 4]에서 지향성 패턴은 시간지연 0에서는 전 지향성 패턴과 비슷하나 시간지연이 증가됨에 따라 지향성 패턴이 달라지다가 주기적으로 원래의 모양으로 돌아감을 보여 주고 있다.

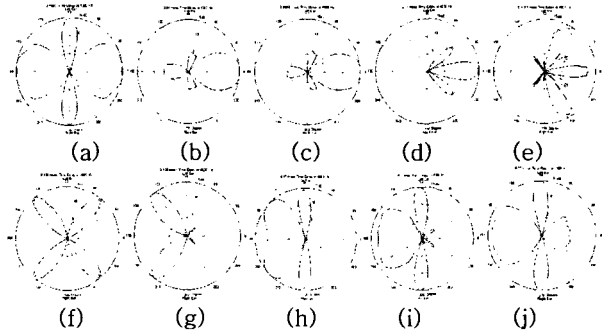


[그림4] 구형 모델이 없이 해석한 지향성 패턴. 마이크로폰간의 거리=10mm, 입력 주파수=4kHz, 시간지연 [msec]=(a)0,(b)0.1,(c)0.1125,(d)0.1375,(e)0.15,(f)0.175. 기준마이크로폰(시간지연0)=후방마이크로폰.

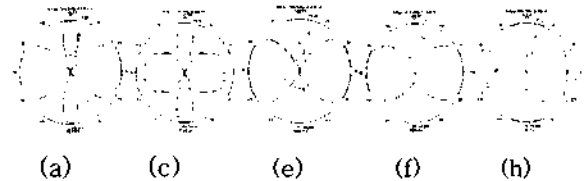
[그림5]는 구형 머리 모델이 있는 상태로 해석한 양이 각각에 두 개씩 설치된 마이크로폰에 의한 지향성 패턴을 보여 주고 있다. 2개 마이크로폰 사이의 거리는 10mm, 입력 주파수는 4kHz이다. 후방 마이크로폰을 기준으로 할 때를 시간 지연 0으로 하고, 전방과 후방 2개 마이크로폰 사이의 시간지연을 (a)0, (b) 0.04, (c)0.0463, (d)0.11, (e)0.1163, (f)0.125, (g)0.135, (h)0.17, (i)0.2, (j)0.22ms가 되도록 조절하며 지향성 패턴을 관찰하였다. 구형 머리모델의 기하학적 특성 때문에 구형 모델 없이 해석한 결과와 다른 양상을 보이는데, 두 개의 마이크로폰으로부터 합산된 음압의 강도는 다음과 같이 계산된다.

$$|A_f' \cos(2\pi f \cdot (t-0) + \theta_f') + A_r' \cos(2\pi f \cdot (t-\Delta t) + \theta_r')| \times |A_f \cos(2\pi f \cdot (t-0) + \theta_f) + A_r \cos(2\pi f \cdot (t-\Delta t) + \theta_r)| \quad (6)$$

$A_f'$  과  $\theta_f'$  는 오른쪽 귀 마이크로폰의 진폭과 위상,  $A_r'$  과  $\theta_r'$  는 왼쪽 귀 마이크로폰의 진폭과 위상이다.



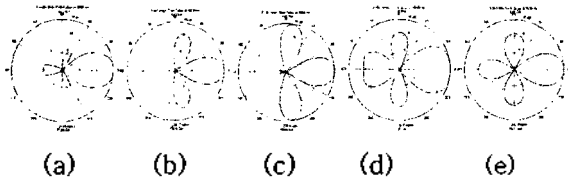
[그림5] 구형 모델로 해석한 지향성 패턴. 마이크로폰간의 거리=10mm, 입력 주파수=4kHz, 시간지연 [msec]= (a)0, (b) 0.04, (c)0.0463, (d)0.11, (e)0.1163, (f)0.125, (g)0.135, (h)0.17, (i)0.2, (j)0.22 기준 마이크로폰 (시간지연 0) = 후방 마이크로폰.



[그림6] 구형 모델로 해석한 지향성 패턴. 마이크로폰간의 거리=10mm, 입력 주파수=(a) 4000 Hz , (b) 3500 Hz , (c) 3000 Hz , (d) 2500 Hz , (e) 2000 Hz , (f) 1500 Hz , (g) 1000 Hz , (h) 500 Hz.

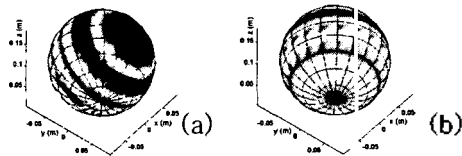
[그림6]은 전. 후방 마이크로폰 사이의 시간 지연은 0으로 고정시키고, 입력주파수를 4kHz부터 0.5kHz까지 낮추면서 구형 모델로 해석한 지향성 패턴을 보여주고 있다. 입력주파수 크기가 감소함에 따라 파장이 길어지기 때문에 전지향성으로 패턴이 변화됨을 볼 수 있다.

[그림7]은 각각의 입력주파수에 따라 특정한 시간지연을 주어 가장 민감한 지향성 패턴이 되도록 조절한 구형 모델로 해석한 지향성 패턴을 보여주고 있다. [그림 7]에서 사용자가 전 대역에서 민감한 지향성을 원한다면, 디지털 보청기에서의 시간지연은 주파수에 따라 다양하게 적용되어야 함을 볼 수 있다. 이러한 결과는 더 향상된 지향성 실현을 위해서는 디지털 보청기에 정밀한 시간지연 조절 회로가 내장되어야 함을 제안 할 수 있다.

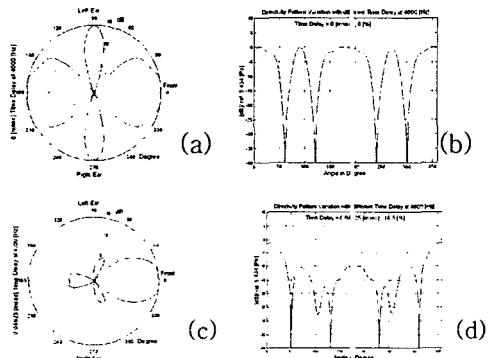


[그림7] 구형 모델로 해석한 지향성 패턴. 마이크로폰 간의 거리=10mm, 시간지연[msec] $\Delta t$  입력 주파수 [Hz]=(a)0.0463 & 4000, (b)0.115 & 3000, (c)0.134 & 2500, (d) 0.1467 & 1500, (e)0.34 & 1000.

[그림8]은 접근하는 입사파에 따른 구형 모델의 표면 음장 분포로 (a)는  $0^\circ$  의 입사파, (b)는  $90^\circ$  의 입사파 일 때를 보여주고 있다.

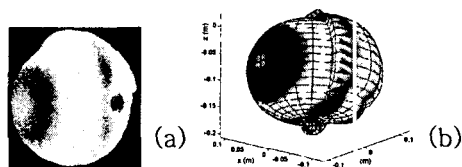


[그림8] 접근하는 입사파에 따른 구형 모델의 표면 음장 분포. (a)  $0^\circ$ , (b)  $90^\circ$  의 입사파

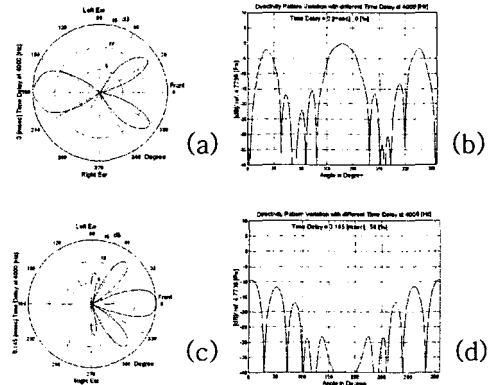


[그림9] 원주좌표와 직각좌표로 표현 된 구형 모델의 지향성 패턴. 입력 주파수=4kHz, 시간지연 (a)와 (b)=0, (c)와 (d) =0.04625[msec]

[그림9]는 입력 주파수=4kHz, 시간지연 (a)와 (b)=0, (c)와 (d) =0.04625[msec] 일 때 원주좌표와 직각좌표로 표현 된 구형 모델의 지향성 패턴이다. 0.04625 [msec]의 시간지연 는 4kHz 주기적 위상에서 18.5%와 동가이다.



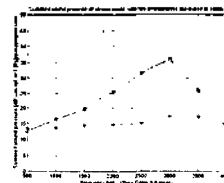
[그림10]  $0^\circ$  에서 접근하는 입사파에 따른 머리와 귀 모델 I의 표면 음장 분포.



[그림9] 원주좌표와 직각좌표로 표현 된 머리와 귀 모델 I 의 지향성 패턴. 입력 주파수=4kHz, 시간지연 (a)와 (b)=0, (c)와 (d) =0.145[msec]

[그림10]은  $0^\circ$  방향에서 오는 입사파에 의한 머리와 귀 모델 I 의표면 음장 분포를 보여준다. [그림11]은 원주좌표와 직각좌표로 표현 된 머리와 귀 모델 I 의 입력 주파수=4kHz, 시간지연 (a)와 (b)=0, (c)와 (d) =0.145[msec]에서의 지향성 패턴이다. 0.145 [msec]의 시간지연 는 4kHz 주기적 위상에서 58%와 동가이다. 가장 민감한 지향성 패턴이 되도록 특정한 시간지연을 주는데, [그림9]의 (c)와 [그림11]의 (c)에서처럼 지향성 패턴이 달리 나타나는 것은 머리와 귀의 형태와 크기가 시간지연 정도에 영향을 줌을 보여 주고 있는 것이다.

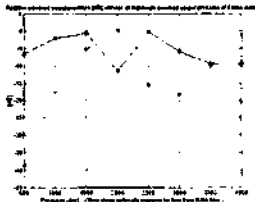
[그림12]는 구형 모델( $\nabla$ )과 머리와 귀 모델 I ( $\square$ )의 주파수별 합산 음압을 보여 준다. 시간지연은 0[msec]으로 고정시킨 것인데, 머리와 귀 모델 I은 3 kHz 에서 위이도의 공명 효과(The resonance effect of the ear carnal)을 가짐을 알 수 있다.



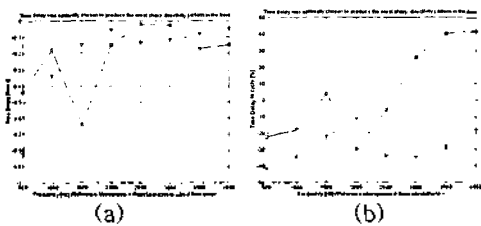
[그림12] 구형 모델( $\nabla$ )과 머리와 귀 모델 I ( $\square$ )의 주파수별 합산 음압. 시간지연= 0[msec].

[그림13]은 구형 모델( $\nabla$ )과 머리와 귀 모델 I ( $\square$ )에

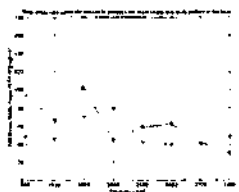
서의 주파수 별 상대적 합산 음압을 나타낸다. 각기 다른 주파수 별로 가장 민감한 지향성 패턴이 나오도록 최적의 시간지연이 선택되어 진다. [그림14] 0 dB 는 시간 지연 0에서의 합산된 음압이다. 상대적으로 합산된 음압은 위상 상쇄 때문에 0 dB 이하가 된다. 만약 적절한 시간지연과 함께 합산된 음압의 감쇠가 0 dB 이하가 되지 않는다면, 지향성 패턴의 민감도는 감소하게 된다. 그러나 방향성 보청기의 주요 목적은 전방 방향에서의 기하학적인 민감도에 있으므로, 감쇠는 필수적으로 나타날 수밖에 없다. 머리와 귀 모델 I 은 저주파에서의 감쇠가 줄어드는 것을 분명하게 보여 주고 있는데, 이것은 외이(outer ear)의 기하학적 효과 때문이다. [그림15]는 최적하게 선택된 시간지연에서 나타나는 -3dB 주엽 지향성 모양을 보여 주며, 주엽이 주파수가 증가함에 따라 작아지는 것을 볼 수 있다.



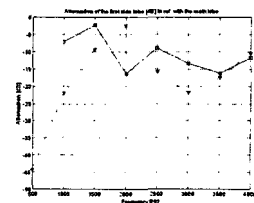
[그림13] 구형 모델(▽)과 머리와 귀 모델 I (□)에서의 주파수 별 상대적 합산 음압. 가장 민감한 지향성 패턴이 되도록 최적한 시간지연을 선택. 시간지연 0에서 0 dB 가 합산 된 음압.



[그림14] 가장 민감한 지향성 패턴이 되도록 최적하게 선택된 시간지연. 구형 모델(▽)과 머리와 귀 모델 I (□) (a) 시간 [msec], (b) 주기 [%].

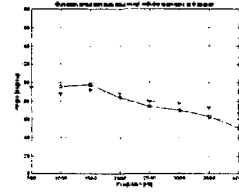


[그림15] 최적 시간지연에서 나타나는 구형 모델(▽)과 머리와 귀 모델 I (□)의 -3 dB 주엽 폭 .

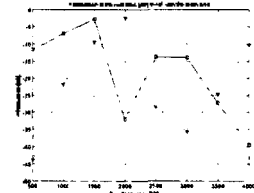


[그림16] 최적 시간 지연에 따른 첫 번째 간엽의 최대 감쇠. 구형 모델(▽)과 머리와 귀 모델 I (□)

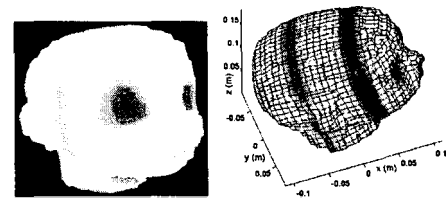
[그림16] 최적 시간 지연에 따른 첫 번째 간엽의 최대 감쇠를 보여준다. [그림17]은 최적 시간지연에서 에서 주엽에 따른 기준에서 첫 번째 간엽의 지향성 각도를 보여준다. 간엽에서 상대적으로 합산 된 음압은 위상 제거 때문에 또한 주엽으로서 0 dB이하가 된다. 첫 번째 간엽의 지향성 각도는 최적 시간지연에서 주파수가 증가함에 따라 주엽 방향에 가까워진다. [그림18]은 최적 시간 지연에서 후엽의 최대 감쇠를 보여 준다. 주파수가 증가함에 따라 간엽보다 후엽의 최대 감쇠가 더 큰 것을 알 수 있다.



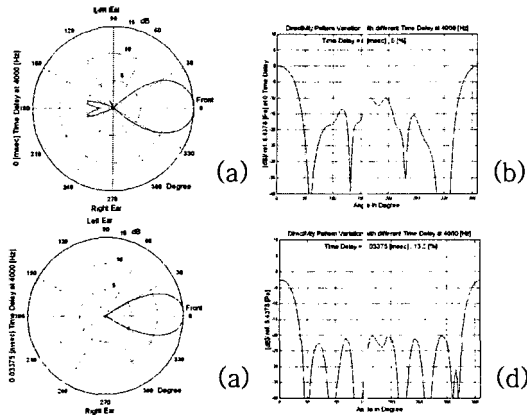
[그림17] 최적 시간지연에서 0° 에서 주엽을 기준으로 한 첫 번째 간엽의 지향성 각도. 구형 모델(▽)과 머리와 귀 모델 I (□)



[그림18] 최적 시간 지연에 따른 후엽의 최대 감쇠. 구형 모델(▽)과 머리와 귀 모델 I (□)



[그림19] 방향에서 오는 입사파에 의한 머리모델 II 의 표면 음장 분포.



[그림20] 머리모델 II의 원주좌표와 직각좌표로 나타냈을 때의 지향성 패턴. (a)와 (b)는 시간 지연 0, (c)와 (d)는 시간 지연 0.03375 [msec], 입력주파수 = 4 kHz.

[그림19]는 방향에서 오는 입사파에 의한 머리모델 II의 표면 음장 분포를 보여 준다. [그림20]은 입력주파수 = 4 kHz에서 (a)와 (b)는 시간 지연 0, (c)와 (d)는 시간 지연 0.03375 [msec]일때 머리모델 II의 원주좌표와 직각좌표로 나타낸 지향성 패턴이다. 0.03375 [msec]의 시간 지연은 4kHz 주기적 위상의 13.5%와 증가이다. 특별한 시간 지연이 앞서 보여 준 가장 민감한 지향성 패턴을 생성하기 위해 선택된다.

### 5. 결론

[그림7]에서 보듯이 디지털 보청기의 시간지연은 주파수에 따라 다양하게 적용되어야 함을 알 수 있다. 저자는 더 향상된 지향성 실현을 위해서는 디지털 보청기에 정밀한 시간지연 조절 회로가 내장되어야 함을 제안한다. 이것은 보청기 증폭의 진폭 특성은 머리와 귀의 기하학적 효과를 포함 할 필요가 있음을 의미한다. 이것은 물리적으로 두 개의 마이크로폰의 위치는 조절하기 어렵지만, 디지털 보청기의 시간 지연은 주파수에 따라서 뿐 아니라 머리와 귀의 모양과 크기의 기하학적 파라미터는 변경시킬 수 있으므로 BEM은 디지털 보청기에서의 정밀한 시간지연 조절을 위한 파라미터 추출 도구로서 앞으로 더욱 활용 될 수 있다. BEM은 머리나 귀와 같은 어떤 임의 형상을 위한 음장 계산에 적용되어 질 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 2003년도 과학기술부 공업용 해석 소프트웨어 개발 사업의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

### 참고 문헌

1. Helmholtz partial differential equation
2. B. Csermak, "Primer on a Dual Microphone Directional System", The Hearing Review, Vol. 7, No. 1, PP:56, 58 - 60, 2000.
3. S. Thompson, "Dual Microphones or directional-plusomni: Which is best?" In S Kochkin & KE Strom's High Performance Hearing Solutions (V3), Suppl to Hearing Review, 6 (1), PP: 31-35,1999.
4. A. May, "Multi-Microphone Instruments, DSP and Hearing- in-Noise", Hearing Review, 5 (7), PP: 42-45, 1998.
5. D. Preves, "Directional microphone use in ITE hearing instruments", Hearing Review, 4 (7), PP: 21-27, 1997.
6. Knowles Electronics Application Note, "Application of Multiple Microphones in Hearing Aids, S-911-0897.
7. S. Thompson, "Directional Patterns Obtained from Dual Microphones", Knowles Electronics Engineering Report, 1997.
8. V. Bray, Ph.D., M. Valente, Ph.D., "Can Omni-Directional Hearing Aids Improve Speech Understanding In Noise?", Sonic Innovations Inc., 2001.
9. N. S. Hillman, MBA, Harcourt Brace Jovanovich, Inc., "Directional hearing aid capabilities", Hearing Instruments, 1981.
10. M Valente, DA Fabry & LG Potts, "Recognition of speech in noise with hearing aids using dual microphones", J Am Acad Audiol, 6: 440-449,1995.