

BEM에 의한 보청기를 착용한 귀의 지향성 모델

권유정, 이제형, 장순석
 조선대학교 정보제어계측공학과

Directivity modeling of the ears with hearing aids by BEM

You Jung Kwon, Je Hyung Lee, Soon Suck Jarng
 Chosun University avaskorea@yahoo.co.kr

요약

각각 2개의 마이크로폰을 내장한 컷속형 보청기를 양쪽 귀에 착용한 상태에서 소리의 지향성을 시뮬레이션하고 전기음향실험으로 비교하였다. 지향성 보청기의 신호 대 잡음 비율 향상을 고려했다. 시뮬레이션을 위해 경계요소기법을 사용하였으며 본 논문에 의해 밝혀진 주파수 대역에서의 시간 지연을 DSP칩을 내장한 디지털 보청기의 지향성 조절 파라미터로 사용하고 자 한다. 마이크로폰 사이의 간격을 10mm로 하였다. 가장 최적한 지향성이 출력 되기 위한 위상을 계산하였다.

헬름홀츠 방정식을 풀기 위해 방정식의 해법은 구조적 표면 경계 조건, $\partial\phi/\partial n = \rho f w^2 a_n$ 뿐만 아니라, 주어진 공간에서의 무한 방사조건, $\lim_{r \rightarrow \infty} (\partial\psi/\partial r + jk\psi)^2 dS = 0$ 도 만족 시켜야 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.

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

여기서, $G_x(p, q) = e^{-jkr} / 4\pi r$, $r = |p - q|$

p 는 표면 내외부의 임의의 점이고, q 는 표면 적분점이다.

1. 서론

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

헬름홀츠 표면 적분 방정식의 이산 BEM 공식은 다음과 같다.

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

여기서 ρ 는 공기의 밀도, ψ_{inc} 는 입사 음압이다. $[A]$ 와 $[B]$ 는 음장 임피던스 행렬이다 [2].

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

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

ψ 를 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.

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

2. 경계 요소 기법

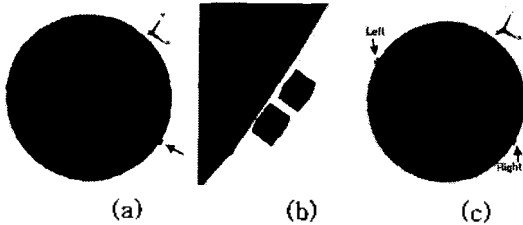
음장의 경계요소 해법은 헬름홀츠 편미분 방정식[1]에 기초하고 있다. 정현파의 주파수 응답 문제를 위해서는 헬름홀츠 방정식인, $\nabla^2 \psi + k^2 \psi = 0$ 으로 유체 역학을 설명 할 수 있다. ψ 는 시간, $e^{j\omega t}$ 에 대한 음장 압력(acoustic pressure)이다. 주어진 공기 매질 내에서 헬

여기서 nl 는 경계 요소들의 전체 개수이다.

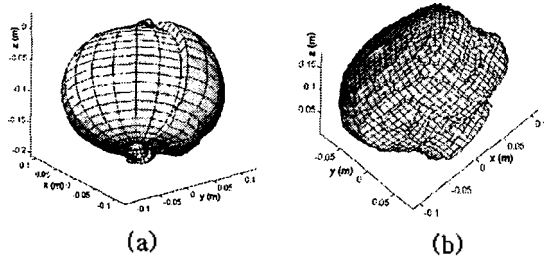
3. 경계요소 메쉬 형성

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 y축이 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 랩 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]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 θ_f 로, 후방 마이크로폰의 진폭과 위상은 A_r 과 θ_r 로 표시한다.

$$\{A_f \cos(2\pi f \cdot (t - \theta) + \theta_f) + A_r \cos(2\pi f \cdot (t - \Delta t) + \theta_r)\} \quad (5)$$

전방 마이크로폰은 위상을 앞서가기 때문에 지연 되게 된다.



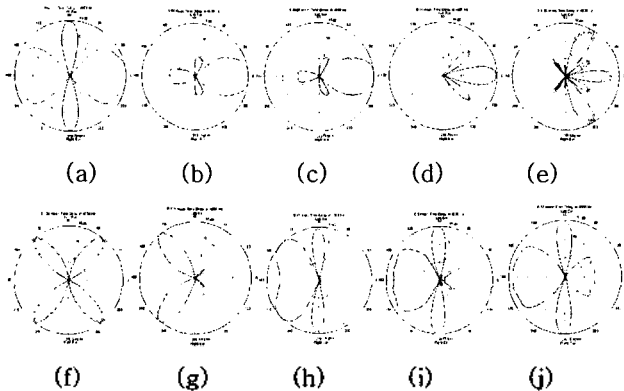
[그림3] 구형 모델이 없이 해석한 지향성 패턴. 마이크로폰간의 거리=10mm, 입력 주파수=4kHz, 시간지연 [msec]=(a)0, (b)0.1, (c)0.1125, (d)0.1375, (e)0.15, (f)0.175. 기준 마이크로폰 (시간지연0) = 후방 마이크로폰.

[그림4]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.

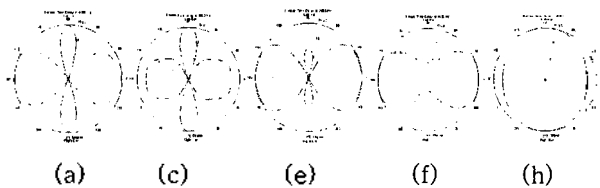
$$\{A_f' \cos(2\pi f \cdot (t - \theta) + \theta_f') + A_r' \cos(2\pi f \cdot (t - \Delta t) + \theta_r')\} \times \{A_f'' \cos(2\pi f \cdot (t - \theta) + \theta_f'') + A_r'' \cos(2\pi f \cdot (t - \Delta t) + \theta_r'')\}$$

(6)

$A'f$ 과 $\theta'f$ 는 오른쪽 귀 마이크로폰의 진폭과 위상 ,
 $A'r$ 과 $\theta'r$ 는 왼쪽 귀 마이크로폰의 진폭과 위상이다.



[그림4] 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.

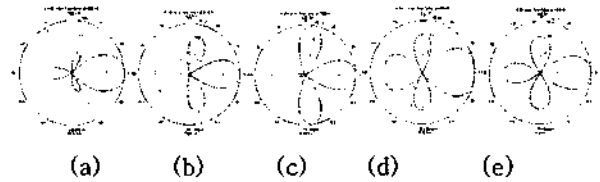


[그림5] 구형 모델로 해석한 지향성 패턴. 마이크로폰간의 거리=10mm, 입력 주파수=(a) 4000 Hz , (b) 3500 Hz , (c) 3000 Hz , (d) 2500 Hz , (e) 2000 Hz , (f) 1500 Hz , (g) 1000 Hz , (h) 500 Hz.

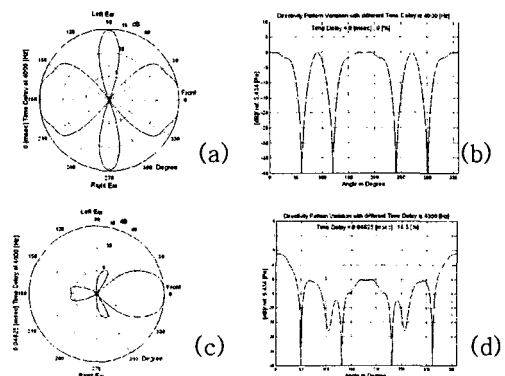
[그림5]는 전. 후방 마이크로폰 사이의 시간 지연은 0으로 고정시키고, 입력주파수를 4kHz부터 0.5kHz까지 낮추면서 구형 모델로 해석한 지향성 패턴을 보여주고 있다. 입력주파수 크기가 감소함에 따라 파장이 길어지기 때문에 전지향성으로 패턴이 변화됨을 볼 수 있다.

[그림6]은 각각의 입력주파수에 따라 특정한 시간지연을 주어 가장 민감한 지향성 패턴이 되도록 조절한 구형 모델로 해석한 지향성 패턴을 보여주고 있다. [그림6]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.

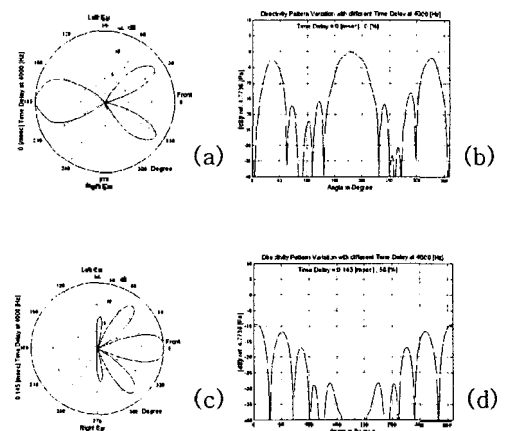


[그림6] 구형 모델로 해석한 지향성 패턴. 마이크로폰간의 거리=10mm, 시간지연[msec]& 입력 주파수[Hz]=(a)0.0463 & 4000, (b)0.115 & 3000, (c)0.134 & 2500, (d) 0.1467 & 1500, (e)0.34 & 1000.



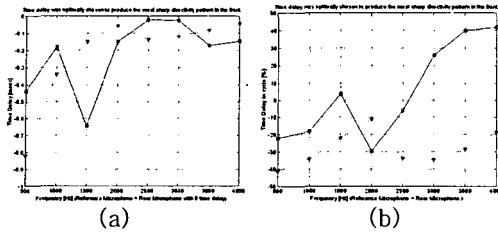
[그림7] 원주좌표와 직각좌표로 표현 된 구형 모델의 지향성 패턴. 입력 주파수=4kHz, 시간지연 (a)와 (b)=0 , (c)와 (d) =0.04625[msec]

[그림7]은 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 등가이다.

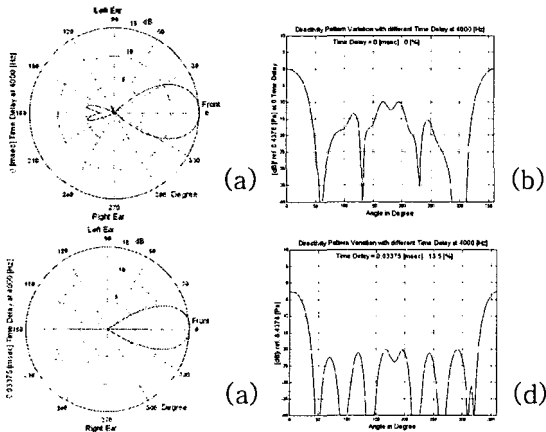


[그림8] 원주좌표와 직각좌표로 표현 된 머리와 귀 모델 I 의 지향성 패턴. 입력 주파수=4kHz, 시간지연

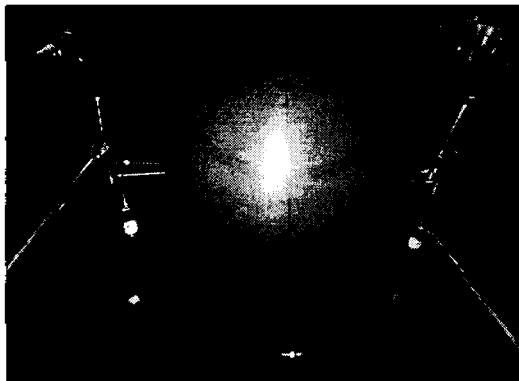
(a)와 (b)=0, (c)와 (d) =0.145[msec]



[그림9] 가장 민감한 지향성 패턴이 되도록 최적하게 선택된 시간지연. 구형 모델(▽)과 머리와 귀 모델 □ (a) 시간 [msec], (b) 주기 [%].



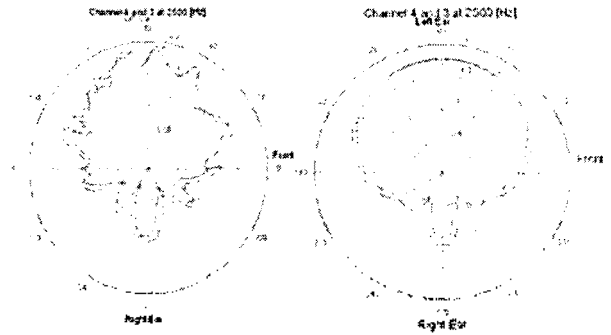
[그림10] 머리모델 II의 원주좌표와 직각좌표로 나타냈을 때의 지향성 패턴. (a)와 (b)는 시간 지연 0, (c)와 (d)는 시간 지연 0.03375 [msec], 입력주파수 = 4 kHz.



[그림 11] 머리모델과 같은 크기의 구 강체와 4 개의 프로브 마이크로폰에 의한 음향실험.

머리모델과 같은 크기의 구 강체와 4 개의 프로브 마이크로폰에 의한 음향실험을 시도하였다 (그림 11). 좌우 양이에 위치한 4 개의 마이크로폰 중에서 그림 12 는 오른쪽 귀에 위치한 2 개의 마이크로폰에서 수집된 음압을 보여준다. 그림 12에서 0도에서 360도까지의 각각의 방향에서 입사되는 일정한 입사파에 대해 마이크

로폰에서 측정된 음압의 크기를 보여준다.



[그림 12] 실험에 의한 구 근처(오른쪽 귀) 2개의 마이크로폰에서 측정된 지향성 패턴(왼쪽 그림). BEM 시뮬레이션에 의한 지향성 패턴 (오른쪽 그림)

5. 결론

[그림6]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 포락선은 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.

감사의 글

본 연구는 2004년도 산업자원부 표준화기술개발사업 (디지털 보청기에 대한 표준화 연구: 과제번호 10016821) 사업의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 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.
2. A. May, "Multi-Microphone Instruments, DSP and Hearing- in-Noise", Hearing Review, 5 (7), PP: 42-45, 1998.