

청취자 및 스피커의 위치에 따른 Transaural 필터 구현

황 신*, 방 승범*, 김 순협* · 정 완섭**

*:광운대학교 컴퓨터공학과, **: 한국표준과학연구원 음향진동그룹

Implementation of Transaural filter method for the location of listeners and loudspeakers

*Hwang shin, *Seungbeum Bhang, *Soonhyob Kim **Wan-Sup Cheung
hs9067@shinbiro.com, kimsh@daisy.kwangwoon.ac.kr, wansup@kriss.re.kr

Abstract

본 논문에서는 공간에 위치한 음원으로부터 양 귀에 들리는 음향을 스피커를 이용하여 재현하는 기술에 대한 문제점과 이를 효과적으로 구현할 수 있는 방법에 대해 소개한다. 좌우 대칭 위치의 스피커를 이용하여, 음상 정위를 실현할 때 직면한 문제점인 Cross-talk 제거와 스피커와 청취자 양 귀사이의 음향전달 모델 선정에 대한 문제점들을 본 논문에서 고찰한다. 이러한 고찰을 통하여 Transaural 필터의 모델 제시와 본 모델의 음향학적 특성을 소개한다.

인간 청각기관의 공간 감응 인자인 IID(Interaural Intensity Difference)와 ITD(Interaural Time Difference)의 개념을 이용한 Transaural 필터의 구현 방법을 제시한다. 제시한 구현방법과 영국 ISVR의 "Stereo Dipole"과의 비교와, 끝으로, 주파수에 따른 적합한 스피커 간의 배치 문제에 관한 것도 언급한다.

1. 서론

본 논문은 공간에 위치한 음원에서 3D 사운드를 양질로 재생하기 위해서는 청취자의 귀의 위

치에서 음향신호를 정밀하게 조작하는 것에 대한 것이다. 이것의 간단한 방법으로는 양 귀 신호를 헤드폰을 통하여 전달하는 것이다. 만일 스피커를 통하여 바이노럴 신호를 전달하고자 한다면, 서로 맞은편 스피커간의 크로스토크를 제거해야 한다. 1980년 중반 이후부터 수행된 음원의 공간적 위치로부터 양 귀까지의 음압 전달특성의 많은 실험적 연구 결과는 공간 음상 정위 기술의 가능성을 제시하였으며, 이를 실현하기 위한 시도는 국내외적으로도 활발히 진행되었다[5][6]. 음원의 공간적 위치에 대한 방향인자는 양 귀의 음압 세기차이(Interaural Intensity Difference, IID)와 시간차이(Interaural Time Difference, ITD)로 구성되어 있다[1][2][7]. 청취자에게 실제 존재하지 않은 가상음원 위치를 판단하게 하기 위한 한가지 방법은 청취자의 귀에 실제위치의 IID, ITD를 제공함으로써 구현할 수 있다. 많은 연구들이 헤드폰을 사용하여 입체음향을 연구하였으나, 헤드폰을 사용한 입체음향 구현 방법의 문제점은 청취자가 헤드폰의 사용 시 장시간 사용할 경우 불편을 느끼며, 헤드폰의 자체의 주파수 특성 내에 피크와 노치, 컷마귀 영향에 의한 정확한 음의 재생이 어렵다는 것이다[3][5]. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 스피커를 통한 입체음향을 재생이 시도되어 왔다. 스피커를 통한 입체음향 재생의 문제점은 청취자의 양 귀에 크로스토크가 생긴다는 것이다. Transaural 필터 시스템을 완성하기

위해서는 어떤 한 쌍의 신호를 청취자의 귀에 재
생하는 것에 의해 구현된다. 두 개의 스피커를 사
용한 크로스토크 제거에 대한 기본원리는 오래
전부터 연구되어졌으며, Atal와 Schroeder는 한
명의 청취자의 정면에 대칭인 두 개의 스피커를
사용하여 크로스토크에 대한 기본적인 물리적인
원리를 설명하였다.

자유음장 조건에서 입사파에 대한 청취자의 머
리와 외이, 어깨 등에 대한 영향은 고려하지 않았
다[5]. 영국의 ISVR 에서는 "Stereo Dipole"이라
는 근접한 두 개의 스피커를 통한(±5°) 크로스
토크에 관심을 가졌으며, 근접한 두 개의 스피커
를 사용함으로써 넓은 공간에서의 가상음원을 만
들어 내었다[7]. 본 연구에서는 양 스피커 사이
의 간격과 청취와 스피커의 거리에 따른 자유음
장 모델을 이용한 Transaural 필터 기법에 대해
살펴본다.

2. 점 음원(THE POINT MONO POLE SOURCE)

반경이 $r=a$ 인 구의 표면에서, 압력은 다음과
같이 쓸 수 있다.

$$P(a) = A \frac{e^{-jka}}{a} = \rho_0 c_0 \left[\frac{jka}{1+jka} \right] \cdot U_a(a) \quad (\text{식.1})$$

여기서, $U_a(a)$ 는 음파의 속도를 나타낸다.
(식.1)에서 A 를 구하면 다음과 같다.

$$A = \rho_0 c_0 \left[\frac{jka}{1+jka} \right] \cdot U_a(a) [a \cdot e^{jka}] \quad (\text{식.2})$$

이때, (식.2)를 (식.1)에 대입하여 정리하면, 다
음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$P(r) = \rho_0 c_0 U_a(a) \cdot \left[\frac{jka}{1+jka} \right] \cdot \frac{a}{r} e^{-jk(r-a)} \quad (\text{식.3})$$

음원강도 $q = U_a \pi a^2$ 이고, 점 음원에서
 $a=0$ 임으로, 음압 $P(r)$ 은 다음과 같이 쓸 수
있다.

$$P(r) = j \rho_0 \omega \frac{q}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (\text{식.4})$$

3. 자유 음장

자유음장 에서 음압 P 는 식(4)에서 다음과 같
이 주어진다

$$P = j \omega \rho_0 q \frac{e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (\text{식.5})$$

여기서, ω = 각 주파수, ρ_0 = 매질의 밀도,
 q = Source Strength, k = Wave Number = $\frac{\omega}{c_0}$,
 c_0 는 음속(온도:20℃)이며, r 은 음원의 거리이다.
만약 V 를 다음과 같이 정의한다면,

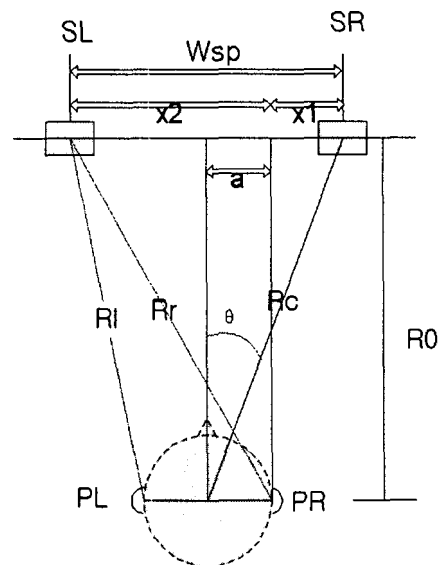
$$V = \frac{j \omega \rho_0 q}{4\pi r} \quad (\text{식.6})$$

이때, 전달함수 C 는 다음과 같이 주어진다.

$$C = \frac{P}{V} = \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (\text{식.7})$$

따라서, 전달함수 C 는 거리 r 에 반비례하며,
거리 및 파수에 따라 위상이 변하는 특성을 갖는
다.

4. 자유음장에서 크로스토크 제거



[그림.1] 크로스토크 제거

$$R_r = \sqrt{R_0^2 + x_1^2}$$

$$R_l = \sqrt{R_0^2 + x_2^2}$$

$$x_1 = r_0 \tan \theta - a$$

$$x_2 = x_1 + 2a$$

θ = Azimuth Angle of Loudspeaker

a = radius of spherical head model

R_0 = Distance from head to loudspeaker

R_l = Distance from near ear to loudspeaker

R_r = Distance from far ear to loudspeaker

[그림.1]에서 보는 것 같이 스피커 사이의 간격은 W_{SP} 이며, 청취자는 스피커에서 R_0 만큼의 거리에 위치시켰다고 가정하였으며, 머리의 반경을 a , 청취자로부터 스피커사이의 간격의 각도를 θ 라고 하였다. 또한 스피커로부터 청취자의 양귀간의 거리를 R_r (direct path)과 R_l (Cross-talk Path)이라고 하였다. 여기서 g_c 와 τ_c 는 다음과 같이 정의한다.

$$g_c = \frac{R_l}{R_r} \quad (식.8)$$

$$\tau_c = \frac{R_r - R_l}{c} \quad (식.9)$$

여기서 g_c 는 항상 1보다 작다.

5. 전달함수

[그림.1]에서와 같이 오른쪽과 왼쪽으로의 신호를 S_R 과 S_L 이라고 표시하고, 청취자의 좌측과 우측으로 입사되는 신호를 P_L 과 P_R 이라고 표시하면, 청취자의 양귀의 전달함수를 (식.7)에 의해서 구한다. 이때 청취자의 양귀에 들어오는 P_L 과 P_R 은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_L \\ P_R \end{bmatrix} = [C] \times \begin{bmatrix} S_L \\ S_R \end{bmatrix} \quad (식.10)$$

여기서, C 는 (식.5)에 의해서 다음과 같다.

$$C = \begin{bmatrix} \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} & \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \\ \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} & \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \end{bmatrix} \quad (식.11)$$

이때, 전달함수에 역행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$C^{-1} = \frac{r_1 \cdot e^{jkr_1}}{[1 - g_c^2 e^{-2jw\tau_c}]} \begin{bmatrix} 1 & -g_c e^{-jw\tau_c} \\ -g_c e^{-jw\tau_c} & 1 \end{bmatrix} \quad (식.12)$$

$r_1 \cdot e^{jkr_1}$: 일정한 거리에서 설정된 값, 실제 재생 시 재생하는 소리보다 빠른 소리의 의미가 없다.

$\frac{1}{1 - g_c^2 e^{-2jw\tau_c}}$: 전체신호에 가해주는 Gain값을 의미한다. $|G_2(f)|$ 라고 표시

$-g_c e^{-jw\tau_c}$: P_R 신호에 g_c 을 곱하고, Delay를 더한 후, 이 값을 P_L 신호에서 빼줘야 한다는 것을 의미, $|G_1(f)|$ 로 표시.

▣ 정해진 위치에서의 크로스토크 제거

Cross-talk Cancellation 시스템의 목적은 원하는 신호를 정해진 위치에 청취자의 귀에 정확하게 재생하는 것이다. 크로스 토크를 제거하였을 때의 문제점은 Sweet Spot에서는 크로스토크를 제거할 수 있지만, 머리의 이동에 영향을 받는다는 것이다. 한쪽귀의 신호 P_L 을 0이 되게 하기 위해서는 입력신호 S_L 과 S_R 신호를 구할 수 있다.

이때, (식.12)에서 전달함수에 역행렬을 사용하여, S_L 과 S_R 을 구할 수 있다. (식.10)과 (식.11)을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} S_L \\ S_R \end{bmatrix} = [C^{-1}] \times \begin{bmatrix} P_L \\ P_R \end{bmatrix} \quad (\text{식.13})$$

만약, 왼쪽 귀에 크로스토크 제거가 되었다면, $P_L=0$ 이 될 것이다. $P_L=0$ 이라고 가정하면, (식.13)은 다음과 같다.

여기서, S_L 과 S_R 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$S_L = \frac{r_1 \cdot e^{jkr_1}}{1 - g_c^2 e^{-2j\omega r_c}} \cdot -g_c e^{-j\omega r_c} \cdot P_R (\text{식.14})$$

$$S_R = \frac{r_1 \cdot e^{jkr_1}}{1 - g_c^2 e^{-2j\omega r_c}} \cdot P_R (\text{식.15})$$

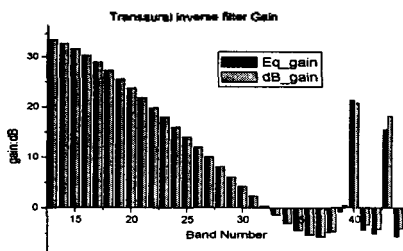
S_L 과 S_R 을 나누면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{S_L}{S_R} = -g_c e^{-j\omega r_c} (\text{식.16})$$

$$S_L = -g_c e^{-j\omega r_c} \cdot S_R (\text{식.17})$$

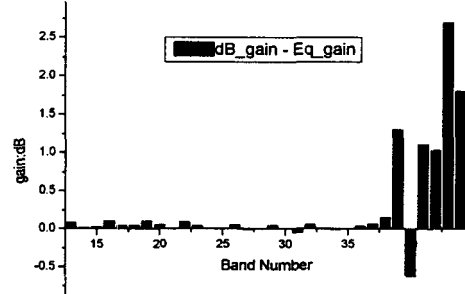
만약, $P_R=0$ 이라고 가정하면 S_R 은 다음과 같다.

$$S_R = -g_c e^{-j\omega r_c} \cdot S_L (\text{식.18})$$



[그림.2] dB_gain과 Eq_gain

6. Transaural 필터의 구현



[그림.3] dB_gain과 Eq_gain의 차

[그림.3]에서 보는 것과 같이 dB_gain과 Eq_gain의 값은 $|G_2(f)|$ 의 값을 나타낸다. 입력된 신호 P_L 과 P_R 에 $|G_1(f)|$ 을 곱하고, Delay을 가한 후, 이 신호를 P_R 과 P_L 신호에 빼준 후, 주파수에 따른 전체 Gain $|G_2(f)|$ 을 더한 후 신호를 스피커로 출력한다

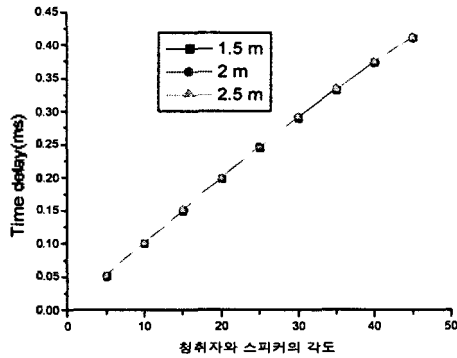
7. 저주파 보상

dB_gain 값은 1/3 옥타브밴드로 분석 시 f_c (중심주파수) 값에 대한 Gain값을 나타내고 있으며, Eq_gain값은 중심 주파수에 대한 상한, 하한 주파수 사이에 기하학적 평균값을 나타내고 있다.

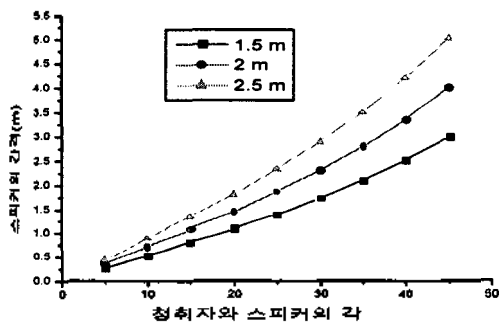
크로스토크 제거를 위해서는 저주파수에서 약 30dB이상을 부스터 해줘야 하며, 10kHz 에서도 마찬가지로 약 30dB의 저주파를 보상해야 하는 것을 보여준다. 이때 1.6kHz에서는 약 5dB을 줄여 주어야 한다는 것을 알 수 있다.

[그림.3]은 dB_gain과 Eq_gain의 차를 보여준다. 저주파수에서는 차이가 나지 않았지만 고주파수에서는 약 2dB정도의 차이를 가지는 것을 볼 수 있다.

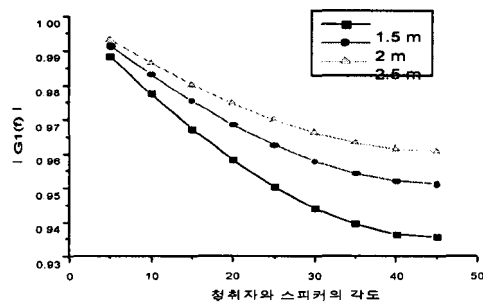
8. Gain, 시간차, 스피커의 간격간의 상관 관계



(a) 청취자와 스피커간의 거리



(b) $|G_1(f)|$ 의 값



(c) 시간차

[그림.4] $|G_1(f)|$, 시간차, 스피커의 간격

[그림.4]는 Transaural 필터의 구현하기 위한 $|G_1(f)|$, 시간차, 스피커의 간격을 나타낸다.

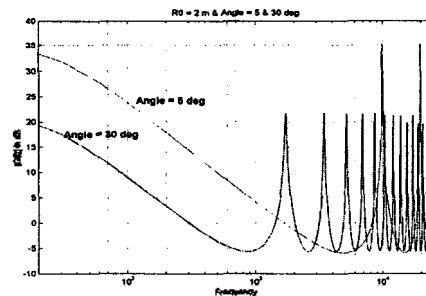
[그림.4(a)]는 청취자와 스피커의 사이의 각도에 따른 양 스피커 사이의 거리를 나타낸다.

[그림.4(b)]의 $|G_1(f)|$ 의 값은 청취자와 스피커의 거리와 두 개의 스피커의 간격에 따라 값이 변하며, 그 값은 1을 넘지 않는다.

[그림.4(c)]는 거리와 스피커의 간격에 따른 시간차는 0.05ms부터 0.45ms의 시간차이를 갖는 것을 볼 수 있다. 또한, 청취자와 스피커의 거리와 스피커의 사이의 거리에 대한 시간차이가 매우 작음을 알 수 있다.

9. 결론 및 고찰

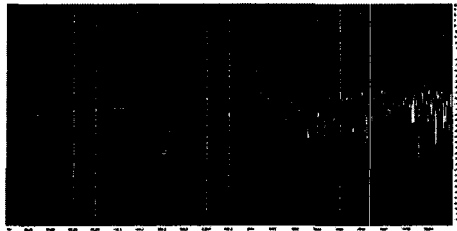
본 연구에서는 두 개의 스피커의 간격과 청취자와 스피커의 거리에 따라, 인간청각기관의 공간감응인자인 IID, ITD의 개념을 이용하여 Transaural 필터 구현방법을 새로이 제시하였으며, 또한 필터의 실용성을 확인하였다.



[그림.5] Gain Functions of Transaural Filter.



[그림.6] 스피커 5° 일 때, 우측귀로 본 Binaural 신호



[그림.7] 스피커 40° 일 때,
우측귀로 본 Binaural 신호

Transaural 필터의 문제점은 한 명의 청취자에게 제한되어져 있으며, 아직 머리에 움직임에 영향에 따라 강건하지 못하다는 것을 확인할 수 있다.

[그림.5]에서 보듯이 스피커의 위치에 따라 가청 범위 내에서 여러 개의 피크를 갖는 특성을 갖게 되어 음색 왜곡과 음질 저하를 일으키게 되는 것을 확인하였다. 차후 앞으로의 연구방향은 다수의 청취자에게 사용할 수 있는 필터의 제작과 청취자의 움직임에 좀 더 강건한 공간 음상 정위를 수행할 것이다.

10. 참고 문헌

- [1] 정완섭, '머리전달 함수를 이용한 공간음상 정위의 문제점 고찰'-99.한국음향학회 논문집
- [2] John Wiley & sons, "FUNDAMENTALS OF ACOUSTICS"- P112-P115
- [3] C. P. brown and R. O. Duda, 'A Structural Model for Binaural Sound Synthesis', IEEE Transactions on Speech and Audio processing vol. 6,1988
- [4] D. H. Cooper, J. L. Bauck, Generalized Transaural stereo and Applications
- [5] W.G. Gardner, "Transaural 3-D audio", M. I.T Media Laboratory, Perceptual Computing Section, Technical Report No,342,1995.
- [6] P. A. NELSON, "The "stereo Dipole"-A virtual Source imaging System Using Two closely Spaced loudspeakers-J. Audio Eng soc, vol46, No.5 1998
- [7] P.A. NELSON ,D. ENGLER, 'Experiments o