

공간 음상정위를 위한 Transaural 필터 구현기법

정 완섭, 이 정훈*, 방 승범**, 김 순협**

*:한국표준과학연구원, 음향진동 그룹, **:광운대학교, 컴퓨터공학과

Implementation of Transaural filter method for sound localization

Wan-Sup Cheung*, Jeung-Hoon Lee*, Seungbeum Bhang**, Soonhyob Kim**

요약문

본 논문에서는 공간에 위치한 음원으로부터 양 귀에 들리는 음향을 좌우 대칭형 스피커를 이용하여 재현하는 기술에 대한 문제점, 즉 좌우 스피커와 양 귀의 음압전달 특성에 수반되는 Cross-talk 제거와 음향학적 모델 선정에 대한 문제점들을 우선 소개한다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 Transaural 필터의 모델 제시와 본 모델의 음향학적 특성을 고찰한다. 본 연구에서는 인간 청각 기관의 공간 인지량적 인자인 ILD(interaural Level Difference)와 ITD(Interaural Time Difference)의 개념을 이용한 새로운 Cross-talk 제거 방법과 그리고 청각기관의 "Masking" 특성을 이용한 Transaural 필터의 진폭 보상 방법을 새로이 제안한다. 끝으로 제안된 기법은 음색 왜곡과 음질 저하를 최소화할 수 있는 장점 뿐 아니라 현장 음향 기사들이 직접 음향제작에 적용할 수 있는 장점 또한 제공한다.

1. 서론

공간에 위치한 단일 음원으로부터 양 귀에 직접 도달될 때 느끼는 음향은 좌측과 우측의 음압 성분(P_L , P_R)로 정의된다. 물론 다수의 공간 음원에 의하여 양귀에 도달되는 음압 성분 ($P_{L,i}$, $P_{R,i}$; $i = 1, 2, \dots$)으로 구성된다. 그러나, 이러한 공간 음향을 두 개의 좌우 대칭형 스피커를 이용하여 구현할 경우, 좌/우측 스피커에서 발생된 음이 좌/우측 귀로 직접 전달되는 직접경로 (Direct path) 음압 성분 ($P_{LL,i}$, $P_{RR,i}$; $i = 1, 2, \dots$)과 그리고 좌/우측 스피커에서 발생된 음이 좌/우측 귀로 서로 교차 전달경로 (cross-talk path) 음압 성분 ($P_{LR,i}$, $P_{RL,i}$; $i = 1, 2, \dots$)으로 각각 구성된다. 따라서, 실제 청취 조건에서의 음원에 대한 좌/우측 음향 전달 경로가 스피커를 구동할 경우 2종의 직접 음압전달 경로와 2종의 좌우 교차 음압전달 경로가 수반된다. 특히, 좌우 교차 음압전달 성분을 "Cross-talk" 성분이라 호칭하며, 이를 제거하는 방법을 "Cross-talk" 제거 기법이라 한다.

1966년 미국 특허^[1]로 제시된 초기의 "Cross-talk" 제거 기법에서 최근 일반화된 방법들^[2]까지 제시되어 오고 있다. 본 논문에서는 두 개의 대칭형 스피커를 이용하여 양귀에 들리는 4종의 음압전달 경로를 마치 단일 음원을 청취할 경우 양1 귀에 들리는 좌우 2종의 직접 음압전달 경로로 변환 설계하는 방법을 소개한다. 금번 연구에서는 고전적 자유 음장모델을 이용한 Transaural 필터 구현 방안을 고찰한다. 공간 음향의 인지량적 인자, 즉 양귀 음압레벨과 시간지연 차이 (ILD, ITD)을 이용한 "Cross-talk"를 구현기법과 청각기관의 "Masking" 특성을 이용한 Transaural 필터 구현 기법을 새로이 제시한다.

2. 음향학적 모델 - 자유 음장 모델

금번연구에서는 기존의 측정 머리전달함수를 이용한 Cross-talk 제거^[3]의 문제점인 음색 왜곡과 음질 저하를 최소화하기 위하여 고전적 자유음장 모델을 선정하였다. 특히, 자유음장 모델을

이용할 경우 측정머리 전달함수에 내포된 수많은 측정 오차 (스피커 및 음압센서 장치들 포함), 공진 및 노치 성분들 (머리, 귀 바퀴, 어깨 등의 신체 부위의 음향특성)에 의한 Inverse Filter의 문제점 등^[3,4,5]은 피할 수 있기 때문이다. 그리고, 청취자는 항상 자신의 상체, 머리, 외의 등의 신체 구조에 따른 자신의 음향학적 음압전달 특성에 따라 들리는 음을 가장 자연스러운 음으로 인식한다는 점이다. 그리고, 자유 음장 모델은 양 귀 주위의 음장 재현에 초점을 맞추고 있을 뿐, 양 귀의 고막에서의 음압 재현은 아니라는 점이다.

자유 음장에서 단극 점 음원이 주파수 f 인 신호를 구동될 때, 거리 r 에서 음압은 다음과 같이 주어진다.

$$P(r;f) = \rho_0 \cdot j\omega \cdot q \cdot \frac{\exp(-jkr)}{4\pi r} \quad (1)$$

윗 식에서 ρ_0 = 공기의 밀도, $j\omega \cdot q$ = 음원의 체적 가속도 (volume acceleration), $k =$ 파수 (ω/c_0 ; $\omega =$ 각속도, $C_0 =$ 음속)이다. 음원의 특성치 $V = \rho_0 \cdot j\omega \cdot q/4\pi$ 라 하면, 공간위치에 대한 음원의 음압 전달함수는 다음과 같다.

$$C(r,f) = \frac{P}{V} = \frac{\exp(-jkr)}{r} \quad (2)$$

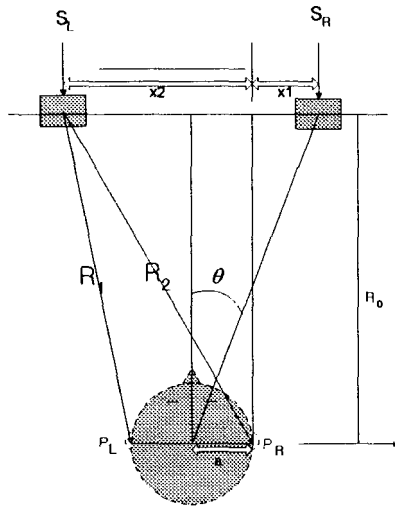


Fig. 1. Configuration layout for listener and loudspeakers.

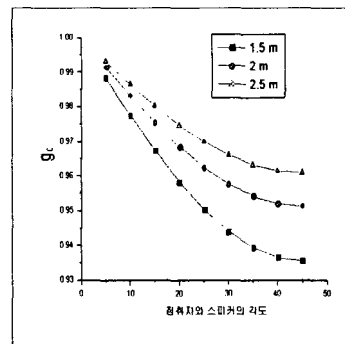
Fig. 1은 급변연구에서 사용하고 있는 스피커와 청취자의 기하학적 구성도를 보이고 있다. R_0 는 음원

$S_R(f) = |G(f)| \cdot [P_R(f) - P_L(f) \cdot g_c \cdot e^{-j\omega\tau_c}]$ 에서 머리 중심까지의 거리이고, R_1 와 R_2 는 음원에 근접한 귀까지의 경로 (direct pass)와 먼쪽 귀와의 경로 (cross-talk pass) 거리이며, θ 는 머리의 중심점과 스피커와의 각도, 그리고 a 는 청취자 머리의 반경이다. 근접 경로와 교차경로와의 음압비 g_c 와 두 경로차이에 의한 음압도달 시간 τ_c 는 다음과 같이 정의한다.

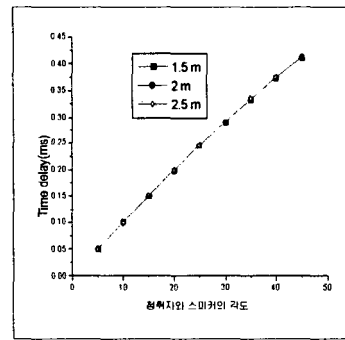
$$g_c = C(R_2;f)/C(R_1;f) = R_1 / R_2$$

$$\tau_c = (R_r - R_l) / C_0 \quad (3)$$

여기서 음압 비 g_c 는 항상 1 보다는 작은 값이다.



(a) Pressure Ratios



(b) Time delays

Fig.2. Trends of Pressure ratios and time delays.

Fig. 2는 청취자와 스피커의 설치조건에 따라 양귀 음압비 g_c 와 음압도달 시간 τ_c 변화를 보이고 있다. 자유 음장에서 음압은 거리의 역수에 비례하기 때문에 단순 거리의 비 식(3)과 같게된다. Fig. 2 (a)에서 음압비는 스피커의 설치 각도가 증가함에 따라 감소되며, 그리고 스피커와 청취자의 거리가

떨어짐에 따라 음압비는 또한 감소됨을 알 수 있다. 좌우측 귀의 음압 도달 시간차이 τ_c 는 스피커의 설치 각도가 증가함에 따라 증가되지만 거리의 영향은 매우 미미함을 Fig. 2 (b)에서 확인할 수 있다. Fig. 2에 보인 스피커에 대한 청음자의 좌우측 귀 부근 음압의 비와 도달시간 차이의 정보는 Transaural 필터의 구현과정에서 사용된다.

3. Transaural Filter의 음향학적 고찰

Fig. 1과 같이 구성된 좌우측 스피커의 구동 음원 신호 (S_L, S_R)를 할 때, 식 (2)의 음압 전달함수로부터 양 귀의 직접경로 음압은

$$P_{LL}(R_l; f) = S_L(f) \cdot e^{-jkR_1} / R_1 \quad (4)$$

$$P_{RR}(R_r; f) = S_R(f) \cdot e^{-jkR_1} / R_1$$

좌우 교차 성분인 크로스 토크 경로 음압은

$$P_{RL}(R_r; f) = S_L(f) \cdot e^{-jkR_2} / R_2 \quad (5)$$

$$P_{LR}(R_l; f) = S_R(f) \cdot e^{-jkR_2} / R_2$$

의 선형 모델로 각각 기술된다. 따라서, 좌우 귀 음압(P_L, P_R)은 식 (4)과 (5)의 음압 성분들의 합으로 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{bmatrix} P_L(f) \\ P_R(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} & \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} \\ \frac{e^{-jkR_2}}{R_2} & \frac{e^{-jkR_1}}{R_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_L(f) \\ S_R(f) \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)은 좌우측 음원을 두 스피커에 구동할 때 양 귀 주변의 음압에 대한 선형 모델이다.

위의 음향학적 모델로부터 좌우 음원 신호를 스피커로 구동할 때 양 귀에서 들리는 음압과 공간에 위치한 음원에서 직접 들리는 양 귀 음압이 서로 같은 경우, 두 개의 스피커를 이용하여 공간 음상 정위 (Spatial sound image localisation)를 구현할 수 있게 된다. 이와 같이 좌우 대칭형 두 스피커를 이용한 공간 음상 정위는 반드시 스피커의 구성에 따른 스피커의 구동 음원 신호 (S_L, S_R)의 설계를 수반함을 알 수 있다. 따라서, 식 (6)의 우변 음압을 공간 음원 구동 시 양귀에 들리는 기준 음압이라 하면, 이때 스피커 구동 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_L(f) &= |G(f)| \cdot [P_L(f) - P_R(f) \cdot g_c e^{-j\omega\tau_c}] \\ S_R(f) &= |G(f)| \cdot [P_R(f) - P_L(f) \cdot g_c e^{-j\omega\tau_c}] \end{aligned} \quad (7)$$

$G(f)$ 는 식 (5)의 우변 행렬의 Determinant 값이며, 다음과 같은 복소수 함수이다.

$$G(f; R_0, \theta) = \frac{g_c \cdot e^{+j\omega\tau_c}}{1 - g_c^2 \cdot e^{-j2\omega\tau_c}} \quad (8)$$

따라서, 식 (7)의 $|G(f)|$ 는 좌우 스피커에 동일하게 인가하는 이득을 (Gain) 값이다. 위의 두 식 (7)과 (8)에 대한 고찰부터 급변연구는 착수되었다.

식 (7)을 고찰할 경우, 좌우 측 스피커와 양 귀가 서로 교차하는 음향경로 (Cross-talk path)를 제거하는 구체적 방법을 이해할 수 있다. 예를 들어, 우측 귀의 음압 $P_R = 0$ 라 가정하면, 좌측 스피커는 P_L 에 비례하는 성분만을 구동하고 우측 스피커는 $(-g_c \cdot e^{-j\omega\tau}) \times P_L$ 에 비례하는 신호를 구동하게 된다. 이때, 우측 구동 신호 $(-g_c \cdot e^{-j\omega\tau}) \times P_L$ 는 좌측 구동 스피커 구동신호 P_L 에 좌우측 귀의 상대적 음압비 (Relative ILD) 만큼의 이득을 g_c ($g_c < 1$) 적용과 양귀 도달 시간차이 ITD 만큼 시간지연 τ_c 적용, 그리고 위상 180도 변환을 각각 적용하는 과정을 의미한다. 이러한 세 가지 과정(Relative ILD, ITD, 위상반전)을 거쳐 얻어진 우측 신호와 좌측 신호를 동시에 스피커에 인가할 때, 좌측 귀에는 좌측 스피커의 구동 신호 성분만 들리게 되며, 우측 귀에는 좌측 스피커의 교차 전달 경로에 의한 음압과 우측 스피커의 구동 음압이 서로 중첩되어 교차 전달음압 성분이 제거된다. 즉 "Cross-talk Removal"을 실현할 수 있게 된다.

동일한 방법으로 우측 구동 신호 또한 좌측 귀로 전달되는 교차 음압전달 성분을 제거하기 위하여 앞서 설명한 세 가지 과정(Relative ILD, ITD, 위상반전) 즉 180도 위상반전, 이득을 g_c ($g_c < 1$) 그리고 시간지연 τ_c 를 각각 적용하여 좌측 스피커에 공급된다. 이러한 연산 과정을 도식화하면 Fig. 3의 교차성분 제거 (Cross-talk removal)부와 같이 표시된다.

앞서 언급한 대칭 스피커 구동시 수반되는 교차 음압전달 성분의 제거 방안은 Transaural 필터의 첫 단계 처리과정일 뿐이다. 두 번째 단계는 Fig. 3의 스피커 전단에 표시된 바와 같이 좌우

스피커 구동신호에 동일하게 적용하는 이득함수 $|G(f)|$ 에 이득보상 (Gain equalisation)이며, 이는 식 (7)의 우변 이득함수 $|G(f)|$ 를 좌우 스피커 채널에 적용하는 것이다.

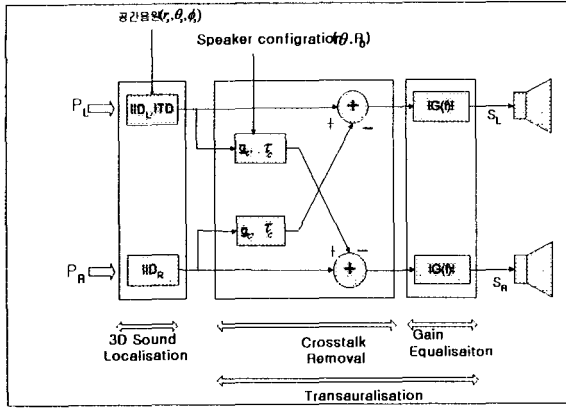


Fig.3 Schematics for transaural filtering

식 (8)에 포함된 위상 정보는 좌우 채널에 동일하게 인가하게 되기 때문에 청각 기간의 인지에는 영향을 미치지 않는다. 따라서, 식 (7)에서와 같이 $G(f)$ 대신에 $|G(f)|$ 를 급변연구에서는 사용한다. 그리고, Fig. 1에서 보인 바와 같이 청취자와 스피커의 거리 및 각도 (R_0, θ)에 따라 좌우 채널의 이득을 $|G(f)|$ 는 결정된다.

영국 ISVR에서 개발된 "Stereo Dipole"의 기법^[6,7]은 위의 복소수 이득을 함수인 $G(f)$ 를 직접 디지털 신호처리 기술로 실현하는 방법을 택하고 있다. 특히, 위상 항의 구현 문제점은 많은 연산과 복잡한 처리과정을 필요로 한다. 그러나, 인간의 청각구조는 양 귀 음압의 위상이 같을 경우, ITD (interaural Time Difference)가 영이 되어 공간 음상 정위에 전혀 영향을 미치지 않는다는 점을 "Stereo dipole" 기법은 활용하지 않고 있다.

4. Transaural Filtering 구현 방법

앞서 대칭적 두 스피커와 양 귀 사이에서 발생하는 교차 음압전달 성분제거를 수행하는 첫 단계와 좌우 동일한 이득을 보상을 두번째 단계로 구성된 Transaural 필터의 구성 개념을 소개하였다 (Fig. 3 참고). 이렇게 구성된 Transaural 필터는 좌우 대칭 스피커를 이용하여 청음자가 마치 자유 음상 조건의 공간에 정위된 음원에서 받

생되는 양 귀 주위의 음장을 직접 들을 수 있게 한다. 즉, 스피커 구동부가 없는 것처럼 즉 "transaural"한 음상 재현을 얻게 된다. 본 절에서는 위의 결과를 이용하여 실제 구현하는 방법을 고찰한다.

좌우측 스피커의 이득 (Gain) 함수인 $|G(f)|$ 를 구현하는 방법을 우선 고찰한다. Fig. 4은 음원과 거리 $R_0 = 2 \text{ m}$ 이고, 청취자와 스피커의 각도 $\theta = 5^\circ$ 와 30° 도에 대한 이득을 $|G(f)|$ 을 각 각 보이고 있다.

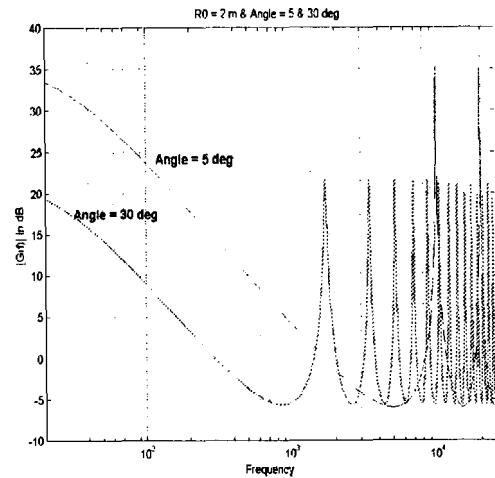


Fig. 4. Gain functions of transaural filter.

이득을함수의 최대값 $|G|_{\max} = g_c/(1-g_c^2)$ 이고 최소 값은 $|G|_{\min} = g_c/(1+g_c^2)$ 이다. Fig. 4에 보인 경우와 같이 거리 $R_0 = 2 \text{ m}$ 이고 스피커의 각도 $\theta = 5^\circ$ 와 30° 도인 경우 $g_c(5^\circ) = 0.9914$ 이고 $g_c(30^\circ) = 0.9577$ 이다. 청취자와 스피커의 각도가 5° 인 경우 $|G|_{\max} = 35.2 \text{ dB}$, $|G|_{\min} = -6 \text{ dB}$, 그리고 각도가 30° 인 경우 $|G|_{\max} = 21.3 \text{ dB}$, $|G|_{\min} = -6 \text{ dB}$ 로 각각 확인되었다. 이들 피크 값들의 크기와 형상은 청취자와 스피커의 구성에 따라 매우 현격한 차이를 보인다는 점을 Fig. 4에서 확인할 수 있다. 우선 저주파에서 많은 이득보상이 필요하며 스피커의 각도가 적을수록 이득보상의 크기와 대역폭이 증가함을 알 수 있다. 스피커의 각도가 증가할수록 이득보상의 크기와 대역폭은 감소되지만 피크치의 개수가 급격히 증가됨을 확인할 수 있다.

급변연구에서 Transaural 필터의 구현에서 직면하는 가장 기본적인 문제점은 Fig. 4에 보인

이득함수의 효과적 보상에 있음을 새로이 발견하였다. "Stereo Dipole"의 기법^[67]을 비롯한 기존 Transaural 필터 기법^[1-3]들은 위의 문제에 대한 효과적으로 해결방안 제시를 못하고 있는 실정이다. Fig. 4에서 보인바와 같이 일반적으로 가장 널리 이용되고 있는 청취자와 스피커의 각도가 30°인 경우, 20 kHz까지의 가청 범위에서 11개의 피크를 갖는 이득함수 $|G(f)|$ 의 주파수 특성은 FIR 혹은 IIR 디지털 필터로 구현할 때 음색 왜곡과 음질 저하를 야기할 수 있는 주된 인자임을 명확히 알 수 있다. 그리고, 11개의 피크를 갖는 이득함수 $|G(f)|$ 의 주파수 특성을 최대한 만족하는 FIR 혹은 IIR 디지털 필터로 구현할 수 있을까? 특히, 이들 디지털 필터 구현 시 최적의 필터 Tap 수 혹은 Pole 및 Zero의 수의 선정, 그리고 필터의 위상 특성에 따른 공간 음상 왜곡과 음질 저하에 대한 방지대책이 반드시 필요함을 알 수 있다.

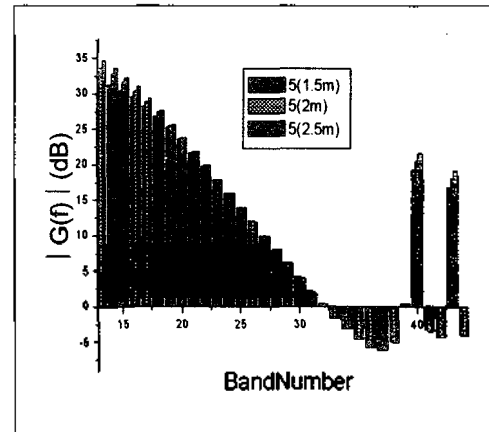
본 연구에서는 다수의 피크를 갖는 이득함수 $|G(f)|$ 의 주파수 특성을 만족하는 이득보상 기법을 해결하기 위하여, "Masking" 청각 특성^[8]을 이용한 유한 대역폭의 등가 이득율 (Equivalent bandwidth gain)을 계산하여 이득 보상을 수행하는 방법을 채택하였다. 관심 대역의 중심 주파수 f_c 에 대하여 저역 하한 주파수를 f_L 라 하고 고역 상한 f_H 라 하자. 이때 등가 대역 이득값은 다음과 같이 정의한다.

$$EQ(f_c) = \sqrt{\int_{f_L}^{f_H} |G(f)|^2 df} / (f_H - f_L) \quad (8)$$

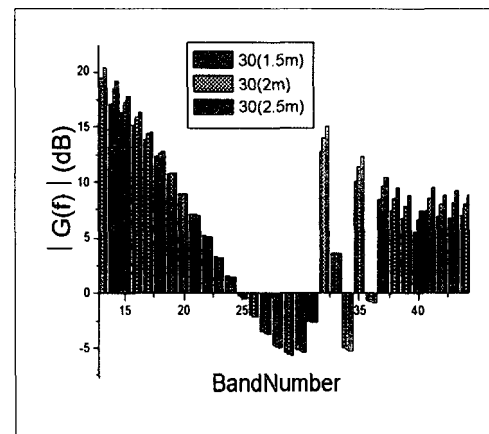
식 (8)의 중심 주파수, 상/하한 대역에 대한 선정은 옥타브, 1/3-옥타브, 임계대역 (Critical band), 혹은 최근의 Gammatone 등의 청각 구조 모델을 선정할 수 있다. 금번 연구에서는 음향 기사들이 가장 널리 이용하고 있는 1/3-옥타브 대역에 대한 결과를 Fig. 5는 보여주고 있다.

Fig. 4의 결과에서 확인된 비와 같이 등가 밴드폭을 이용한 Fig. 5의 이득 함수의 가장 큰 특성은 우선 저주파 대역에서 상대적으로 큰 Gain 보상이 필요함을 알 수 있다. 보상의 크기는 스피커의 각도가 증가함에 따라 감소하며, 저주파 보상 대역은 스피커의 각도가 감소할수록 대역폭은 증가된다. 거리에 따른 저주파 보상 값은 크지만 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 그러나, 스피커 설치 각도의 크기 변화에 따라 저주파 이득 보상

값은 상대적으로 민감함을 알 수 있다. 특히, 스피커 설치 각도가 5°인 경우보다 30°인 경우 고주파 영역의 보상 또한 증가됨을 알 수 있다.



(a) Speaker congiation angle = 5°



(b) Speaker congiation angle = 30°

Fig. 5. Equivalent gain for 1/3-octave bands.

특히, 30°인 경우 고주파 영역의 이득율은 Fig. 4에서 보인바와 같이 이득함수 $|G(f)|$ 가 많은 최대 피크들 때문에 이득 보상량의 증가를 보인다. 고주파 영역에서 이득함수 $|G(f)|$ 의 많은 최소 피크들은 최대 피크치에 의하여 묻히는 즉 "Masking" 효과 때문에 이들의 영향은 최소화된다. 사실 이들 고주파 영역의 많은 최대/최소 피크들은 이득함수 $|G(f)|$ 를 FIR 혹은 IIR 필터로 구현할 때 많은 문제점을 수반한다. 이러한 문제점을 갖는 디지털 필터 구현 기법은 최종적으로 음질의 저하와 음색의 왜곡을 수반하게 된다.

식 (8)에 의하여 얻어진 동가대역별 이득 값 (EQ(f_c); $20 \text{ Hz} \leq f_c \leq 20 \text{ kHz}$)에 따라 기존의 이퀄라이저의 대역별 이득치를 설정함으로써 필요한 이득율을 보상할 수 있다. 좌우측 이득을 보상 시 기존의 이퀄라이저들의 좌우 위상 특성이 정확히 일치되지 않을 경우 스피커 입력 신호의 위상에 영향을 피할 수 없게된다. 이러한 이퀄라이저의 위상 영향은 공간 음상 정위 시 좌/우측의 유한 시간지연 양으로 변환되기 때문에 공간 음상 정위 성능을 저해할 수 있다. 금번 연구에서는 zero-phase 보상 기법 즉 시간 축에 대하여 Forward 방향으로 이득율의 반을 적용한 뒤 다시 신호를 시간축의 역으로 뒤집어 나머지 반의 이득율을 적용하는 방법을 제안한다. 본 제안된 방법은 어떠한 디지털 이퀄라이저로도 위상의 영향을 완전히 제거할 수 있는 zero-phase 이득율 보상을 가능하게 할 수 있다.

끝으로 금번연구에서 제안된 Transaural 필터의 구현 방법은 기존의 디지털 이퀄라이저를 이용한 zero-phase 이득 보상, 그리고 직접음과 교차 음압의 비 g_c 를 설정하는 Gain 볼륨과 시간 지연기를 이용한 좌우 스피커의 Cross-talk 성분을 제거 과정으로 구성되어 있다. 이러한 구현 방법은 디지털 신호처리 기술이나 관련 DSP Hardware의 전문적 지식을 필요하지 않기 때문에 국내 음향 설계 및 녹음 기사들이 쉽게 구현할 수 있는 장점을 제공한다. 특히, 금번연구에서 제안한 이퀄라이저를 이용한 zero-phase 이득 보상기법은, 기존의 Transaural Filter의 이득함수 $G(f)$ 구현에 필요한 디지털 필터링 기법과 관련 DSP 사용 시 수반되는 근사화 및 위상 왜곡 때문에 발생하는 음질 저하 및 음색 왜곡의 문제점을 최소화할 수 있는 장점을 갖는다.

5. 결론

본 연구에서는 좌우 대칭 스피커를 이용하여 공간 음상 정위를 구현하는 과정에서 수반되는 Transaural 필터의 구현에 수반되는 문제점 고찰과 그리고 이를 효과적으로 수행할 수 있는 새로운 구현 기법을 제안하고 있다. 제안된 구현 방법은 직접음과 교차 음압의 비 g_c 를 설정하는 Gain 볼륨과 시간 지연기를 이용한 좌우 스피커의 Cross-talk 성분 제거과정과 그리고 기존의 디지털

이퀄라이저를 이용한 zero-phase 이득 보상 단계로 구성되어 있다. 이러한 구현 방법은 디지털 신호처리 기술이나 관련 DSP Hardware의 전문적 지식을 필요하지 않기 때문에 국내 음향 설계 및 녹음 기사들이 쉽게 구현할 수 있는 장점을 제공한다. 특히, 금번연구에서 제안한 이퀄라이저를 이용한 zero-phase 이득 보상기법은, 기존의 Transaural Filter의 이득함수 $G(f)$ 구현에 필요한 디지털 필터링 기법과 관련 DSP 사용 시 수반되는 근사화 및 위상 왜곡 때문에 발생하는 음질 저하 및 음색 왜곡의 문제점을 최소화할 수 있는 장점을 갖는다.

끝으로 본연구 결과는 과기부의 감성공학 과제 (98-G-17-01-A-03-02)의 지원으로 수행었으며, 본 논문의 주요 내용은 특허로 출원되어 있다.

참고문헌

- [1]B.S. Atal, M. Hill, and M.R. Schroeder, Apparant Sound Source Translator, *U.S. Patent Office*, No. 3,236,949, Feb., 1966.
- [2]D. H. Cooper, J. L. Bauck, "Generalized Transaural stereo and Applications," *J. Audio Eng. Soc.*, 44(9), 683-705, 1996
- [3]W. G. Gardner, *3-D Audio Using Loudspeakers*, Ph.D. Thesis, Media Arts and Sciences: MIT, 1997
- [4]정완섭 외 3인, "머리전달함수를 이용한 공간음상 정위의 문제점 고찰," *1999년 한국음향학회 학술발표대회*, 18(1s), 149-152, 1999.
- [5] 정완섭 외 3인, "머리전달함수의 인지량적 평가 방법과 이를 이용한 음상정위 기법의 연구," *1999년 한국음향학회 학술발표대회 (발표예정)*
- [6]O. Kirkeby, P.A. Nelson, H. Hamada "The "Stereo Dipole" - Binaural Sound Reproduction Using Two Closely Spaced loudspeakers," *AES Preprint 4463(16)*, 102nd AES Convention, Munich: Germany, 1997.
- [7]O. Kirkeby, P.A. Nelson, H. Hamada "Local Sound field reproduction using two closely spaced loudspeakers," *J. Acoust. Soc. Am.*, 104(4), 1973-1981, 1998
- [8]E. Zwicker, H. Fastl, *Psychoacoustics: Facts and Models*, Springer-Verlag, Berlin, 1990.