

# 순음의 위상차를 이용한 스테레오 시스템에서의 음상 정위 특성 연구

## Research for Characteristic of Directional Sound Image Localization at Stereo System Using Different Phase Pure Tone

한찬호

경운대학교 소프트웨어공학과 교수

이법기

기술신용보증기금

정원식

한국전자통신연구원

고일석

충북과학대학 전자상거래 전임강사

최영수

한국원자력연구소

Chan-Ho Han

Professor, Kyungwon University

Bub-Ki Lee

Korea Technology Credit Guarantee Fund

Won-Sik Jung

Electronic and Telecommunication Research Institute

Il-Seik Ko

Professor, Chungbuk Provincial College of Science & Technology

Young-Soo Choi

Korea Atomic Energy Research Institute

중심어 : 순음 스테레오 음상

### 요 약

AV시스템에서 현실적인 사운드 효과를 만들기 위한 연구가 계속 진행되고 있다. 스테레오 AV시스템의 스피커의 간격은 좁고, 공간감 있는 효과를 내기 위한 넓은 음상이 필요하다. 음상의 방향은 두 채널 사이의 음압 레벨 차와 위상 지연에 상관성이 있다. 그러므로 본 논문에서는 음원의 주파수와 관계 있는 음상의 방향과 위상 지연의 관계를 해석한다. 또한 순음이 정위자의 전방에 대칭적으로 배치된 두 개의 스피커를 통해 재생될 때, 한쪽 채널의 신호의 음상과 위상을 기준으로 하여 다른 채널 신호의 음압과 위상을 변화시켜 스피커의 위치보다 넓은 방향에 음상을 정위시키는 모델을 제안하고 모의 실험을 하였다.

### Abstract

In the AV system, stereophonic system has been studied to produce a realistic sound effect. The width of stereo AV system speakers is narrow, to have the spatial impression of sound effect, widening the sound image is necessary. The direction of sound image depends on the phase delay and the sound pressure level difference between two channels. In this paper, we analyze the relationship between the phase delay and the direction of the sound image relating to the frequency of sound source. Also we experimented to directionally localize the sound image of the pure tone with shifting phases and controlling sound pressure level between two channels when the sound is reproduced by two speakers to make a spatial impression of sound effect.

## 1. 서론

AV(audio and video)시스템에서 공간감 (spatial impression) 있는 음향 효과를 내기 위한 스테레오 시스템 (stereo system)의 중요성이 근래에 강조되고 있다. 스테레오 시스템에서 공간감 있는 음향 효과를 내기 위해서는 두 개의 스피커에서 재

생되는 음의 음상 (sound image)을 원하는 방향에 정위 (directional localization)시키는 것이 중요하다. 음상 정위에는 두 채널 신호간의 위상차를 이용하는 방법, 음압 레벨차를 이용하는 방법 및 시스템의 주파수 특성을 이용하는 방법 등이 있는데, 주로 위상 처리를 이용한 방법이 연구되어 왔다[1],[2]. 스테레오 시스템에서 순음 (pure tone)인 음원을 음상 정위

시킬 경우, 일반적으로 저주파 영역의 음은 양쪽 채널 신호간의 위상차가 음상 이동의 주도적 역할을 하고 고주파 영역의 음은 음압 레벨차가 음상 이동의 주도적 역할을 한다고 알려져 있다[3]-[6]. 그러나 위상차를 이용해 음상을 정위시키는 대부분의 방식에서는 모든 주파수 대역 신호의 위상을 처리하는데, 모든 주파수 대역 신호의 위상을 처리하는 방식이 효과를 내는지 그 이유가 명확하게 밝혀져 있지 않다. 따라서 청취자의 양쪽 귀에 전달되는 음에 위상차가 있을 경우 귀의 음원 주파수에 따른 방향 판별의 능력과 감도를 구체적으로 조사할 필요가 있다.

본 논문에서는 동진폭의 단일 순음을 헤드폰으로 청취할 때 한 쪽 채널의 신호의 위상을 기준으로 하여 다른 쪽 채널 신호의 위상을 지연시켰을 때 주파수에 따른 음상의 이동 정도를 측정하였다.

또한, 고조파 (harmonics)를 포함하는 복합음 (complex tone)의 음상을 원하는 방향에 정위시키기 위해 조정해야 할 위상과 음압 레벨을 헤드폰과 스피커를 사용 청취 실험으로 구하였다.

상기 실험 결과를 근거로, 순음이 청취자의 전방에 대칭적으로 배치된 두 개의 스피커를 통해 재생될 때, 한 쪽 채널의 신호의 음압과 위상을 기준으로 하여 다른 채널 신호의 음압과 위상을 변화시켜 스피커의 위치보다 넓은 방향에 음상을 정위시키는 모델을 제안하고 모의 실험을 하였다. 아울러 복합음을 여러 대역으로 분리하여 각각의 주파수 성분에 적당한 위상차와 음압 레벨차를 준 다음 다시 합하여 재생시키면 복합음도 원하는 방향에 정위시키는 것이 가능함을 구체적으로 밝혔다. 본 연구의 결과는 스테레오 음의 음상을 스피커의 위치보다 바깥까지 확대시켜 공간감 있는 음으로 재생시키는 데 효과적으로 이용될 수 있다.

## II. 음의 방향감

인간의 귀가 양쪽에 있기 때문에 한 쪽 귀로 듣는 경우와 양쪽 귀로 듣는 경우 서로 다른 효과를 발생시킨다. 이것을 양이 효과 (binaural effect)라 한다[4],[5]. 청취자의 정면과 측면 사이의 방향에서 음이 그림 1에서와 같이 들릴 때 음원에서 먼 쪽 귀에 전달되는 음은 음원에서 가까운 귀에 전달되는 음보다 음압은 감소하고 거리차  $\Delta x$ 에 의해 도착 시간은 늦어진다. 여기서 머리에 의한 음의 회절은 무시한다고 가정한다.

이와 같이 귀에 도달한 음의 음압 레벨차와 시간차는 음상의 좌우 방향 판정의 근거가 된다. 1991년 市野는 단일 음원을 청취자의 머리 중앙의 정면 전방인  $0^\circ$ 로부터 반시계 방향으로  $180^\circ$  회전시키면서 여러 주파수의 순음을 발생시켰을 때, 청취자의 양쪽 귀에 전달된 음의 음압 레벨차와 시간차를 측정하였다. 그 결과는 그림 1(b)에서와 같다[2]. 양쪽 귀간 음압 레벨차는 저주파에서는 작고 1 kHz 이상의 고주파에서 크므로 고역에서 방향감의 단서가 된다. 음이 고주파일수록 직진성이 강하므로 저주파 음이 고주파 음보다 양쪽 귀에 전달될 때 음압차보다 시간차가 더 큼을 알 수 있다[2],[5],[6].

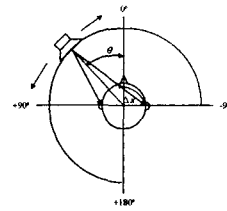


그림 1. 양이 청취 모델

Fig 1. Listening model in binaural system.

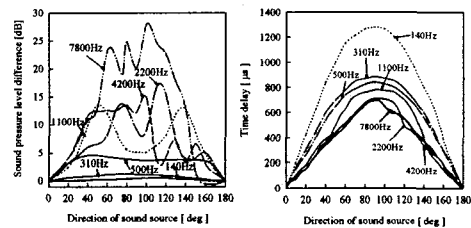


그림 2. 양쪽 귀간 (a) 음압 레벨차, (b) 시간차  
Fig 2. (a) Sound pressure level difference, (b) time delay between two ears.

## III. 위상차에 의한 음상이동 특성

단일 순음의 음상을 원하는 방향에 정위시키려 할 때 청취자의 양쪽 귀에 전달되는 음에 위상차가 있을 경우, 인간의 귀가 음원의 주파수에 따라 어느 정도의 방향 판별의 능력을 가지는지를 알아보기 위해서 위상차에 의한 음상의 이동 정도와 감도를 헤드폰 청취 실험으로 측정하였다. 우선 양쪽 채널 신호의 음압 레벨은 같고 우측 채널 신호를  $\varphi$ 만큼 위상 지연시킨 지속 시간 1초의 테스트 신호들을 그림 3(a)과 같이

만들었다.

청취자에게 그림 3(b)에서와 같이 위상차가 0° 인 신호를 먼저 들려주어 음상의 방향의 기준을 잡게 한 후 위상차를 점차 증가시킨 신호를 들려주면서 음상의 위치를 측정하였다. 우측 채널 신호의 음압 레벨이 0° 일 때 음상이 +90° 에 위치하므로 이 때의 방향과 위상차에 의해 이동한 음상의 방향을 비교하여 측정하였다.

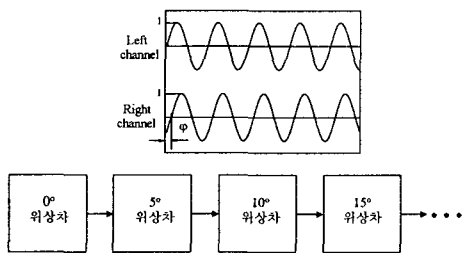


그림 3. (a)테스트 신호와 (b)음상 이동 측정 방법  
Fig 3. Test Signal and Method of measuring movement of sound image.

순음의 우측 채널 신호를 위상 지연시키면서 측정한 음상의 방향은 그림 4에서와 같다. 그림에서 양 채널 신호간의 위상차를 증가시키면 음상은 위상이 앞서는 채널 쪽으로 이동하다가 어떤 위상차 값 이상이 되면 위상차를 증가시키더라도 음상의 방향은 변하지 않고 포화된다. 또한 음원의 주파수가 낮을수록 음상의 방향을 포화시키는 위상차는 작아지고 포화되는 음상의 방향은 더 넓은 위치까지 이동함을 알 수 있다. 한편, 위상차 180° 부근에서는 소리가 헤드폰의 양쪽 채널에서 나게 되어 청취자는 음상의 방향을 판단할 수 없다. 위상차가 180° 보다 커지면 음상은 반대쪽 채널로 이동하고 위상차가 360° 가 되면 음상은 다시 후두부 중앙에 존재한다.

상기 실험 결과에서 두 채널 신호 사이에 위상차만을 주면 +90° 방향까지 음상을 정위시킬 수 없음을 알 수 있다. 따라서 +90° 의 방향까지 음상을 정위시키려면 한 쪽 채널 신호의 위상 이외에 음압 레벨도 조정해야 한다.

한편, 우측 채널 신호의 위상을 좌측 채널 신호의 위상보다 25°, 50°, 및 75° 지연시켰을 때 주파수에 따른 음상의 방향을 측정할 결과는 그림 5와 같다. 동일한 위상 지연일 때는 음원의 주파수가 낮을 때가 주파수가 높을 때보다 음상 이동이 크를 알 수 있다. 그리고 1.4kHz 이상이 되면 위상차만에 의한 음상 방향의 변화는 거의 느낄 수 없음을 알 수 있다.

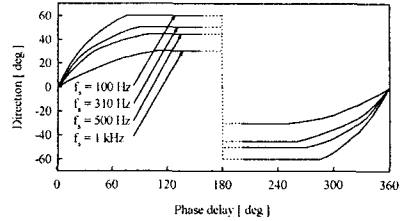


그림 4. 순음의 위상 지연과 음상 방향의 관계  
Fig 4. Relationship between the phase delays and the directions of the sound images of the pure tones.

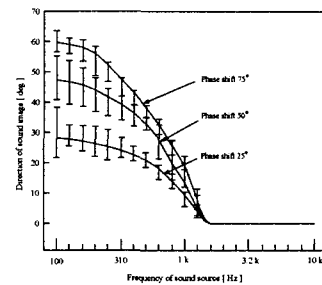


그림 5. 위상 지연이 25, 50, 및 75일 때의 음상의 방향  
Fig 5. Directions of the sound images when the phase delays are 25, 50, and 75, respectively.

#### IV. 헤드폰 청취시 복합음의 음상 정의

고조파를 포함하는 복합음을 헤드폰으로 청취할 때 음상을 원하는 방향에 정위시키는 실험을 하였다. 음압 레벨이 기본 주파수의 음압 레벨의 1/2, 1/3에 해당하는 제 2, 제 3 고조파만을 가지는 그림 6과 같은 복합음에 대해 실험하였다. 그림 6에서  $f_1$ 은 기본 주파수,  $f_2$ 는 제 2 고조파,  $f_3$ 는 제 3 고조파를 의미한다. 실험 과정은 그림 8에서와 같이 복합음을 헤드폰의 좌측 채널에는 그대로 보내고,  $f_1$ 은 LPF,  $f_2$ 는 BPF,  $f_3$ 는 HPF로 통과시켜 각각 주파수 성분들을 원하는 방향에 정위시킬 수 있도록 위상과 음압 레벨을 조정된 후, 조정된 주파수 성분들을 모두 합하여 헤드폰의 우측 채널로 보낸다. 위상 조정시에는 헤드폰 청취 실험으로 얻은 위상차에 의한 음상 이동의 결과 데이터를 적용하였고, 음압 레벨은 여러 값들을 임의로 넣어 음상을 원하는 방향에 정위시키는 값을 구하였다.

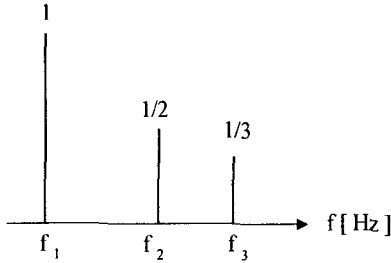


그림 6. 제 2, 제 3 고조파를 포함하는 복합음의 주파수 스펙트럼

Fig 6. Frequency spectrum of the complex tone which contains 2nd, 3rd harmonics.

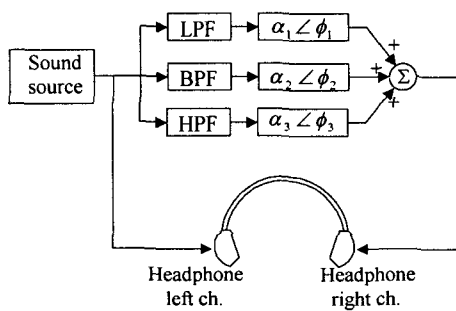


그림 7. 헤드폰 재생시 복합음의 음상정위

Fig 7. Directional sound image localization of complex tone when the sound is reproduced by headphone.

$f_1=100\text{Hz}$ ,  $f_2=200\text{Hz}$ , 및  $f_3=300\text{Hz}$ 인 복합음의 음상을 원하는 방향에 정위시키기 위한 위상차와 음압 레벨은 표 1과 같다. 이 경우 복합음 성분의 주파수가 낮으므로 위상 처리만으로 복합음의 음상을  $60^\circ$  까지는 정위시킬 수 있음을 알 수 있다.

$f_1=400\text{ Hz}$ ,  $f_2=800\text{Hz}$ , 및  $f_3=1.2\text{kHz}$ 인 복합음의 음상을 원하는 방향에 정위시키기 위한 위상차와 음압 레벨은 표 II와 같다. 복합음 성분의 주파수가 높으므로 위상 처리만으로는 원하는 방향까지 음상을 정위시킬 수 없으므로 위상차로써 최대한 음상을 이동시키고 음압 레벨도 조정해야 한다.

$f_1=700\text{Hz}$ ,  $f_2=1.4\text{kHz}$ , 및  $f_3=2.1\text{kHz}$ 인 복합음의 음상을 원하는 방향에 정위시키기 위한 위상차와 음압 레벨은 표 III와 같다. 복합음의 성분 중  $f_2$ 와  $f_3$ 가 위상차에 의해 음상이 이동되는 범위를 넘으므로 위상차보다 음압 레벨 처리가 음상 정위에 주도적 역할을 한다.

$f_1=1.2\text{kHz}$ ,  $f_2=2.4\text{kHz}$ , 및  $f_3=3.6\text{kHz}$ 인 복합음의 음상을 원하는 방향에 정위시키기 위한 위상차와 음압 레벨은 표 IV와 같다.  $f_1$ 은 위상차에 의해 음상이 조금 이동하지만  $f_2$ 와  $f_3$ 는 음압 레벨만을 조정하여 복합음의 음상이 정위되도록 한다.

표 1.  $f_1=100\text{Hz}$ 인 복합음의 음상을 원하는 방향에 정위시키기 위한 위상과 음압 레벨

Table 1. Phase shift and sound pressure level to directionally localize the sound image of complex tone whose fundamental frequency is 100 Hz.

Direction of sound image[deg]	30			60		
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
$f_n$						
$\phi_n$ [deg]	-25	-30	-35	-75	-85	-90
$\alpha_n$	1	1	1	1	0.85	0.8

표 2.  $f_1=400\text{Hz}$ 인 복합음의 음상을 원하는 방향에 정위시키기 위한 위상과 음압 레벨

Table 2. Phase shift and sound pressure level to directionally localize the sound image of complex tone whose fundamental frequency is 400 Hz.

Direction of sound image[deg]	30			60		
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
$f_n$						
$\phi_n$ [deg]	-45	-80	-170	-170	-170	-170
$\alpha_n$	1	1	1	0.8	0.65	0.55

표 3.  $f_1=700\text{ Hz}$ 인 복합음의 음상을 원하는 방향에 정위시키기 위한 위상과 음압 레벨

Table 3. Phase shift and sound pressure level to directionally localize the sound image of complex tone whose fundamental frequency is 700 Hz.

Direction of sound image[deg]	30			60		
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
$f_n$						
$\phi_n$ [deg]	-70	-170	0	-170	-170	0
$\alpha_n$	1	0.7	0.63	0.7	0.4	0.32

표 4.  $f_1=1.2$  kHz인 복합음의 음상을 원하는 방향에 정위시키기 위한 위상과 음압 레벨

Table 4. Phase shift and sound pressure level to directionally localize the sound image of complex tone whose fundamental frequency is 1.2 kHz.

Direction of sound image(deg)	30			60		
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
$f_n$	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_1$	$f_2$	$f_3$
$\phi_n$ [deg]	-170	0	0	-170	0	0
$\alpha_n$	0.62	0.59	0.55	0.35	0.31	0.3

V. 스피커 재생음의 음상 정위

동진폭 동위상의 순음을 2개의 스피커를 통해 재생하기 전에 한 쪽 채널 신호의 음압 레벨과 위상을 변화시켜 음상을 스피커의 위치보다 넓은 방향에 정위시키는 모의 실험을 하였다. 두 개의 스피커는 머리의 정중앙의 전방인 0를 중심으로 그림 8과 같이 일정한  $\theta$ 로 대칭적으로 배치되어 있다. 좌우 스피커에서 음압 레벨과 위상이 각각 1.0,  $\alpha e^{j\phi}$ 인 순음 신호가 재생될 때 좌우의 외이 입구에 전달되는 신호  $P_L, P_R$ 은

$$P_L = (1 + \alpha e^{j\phi} \cdot \gamma e^{-j\phi}) P_0 \tag{1}$$

$$P_R = (\alpha e^{j\phi} + \gamma e^{-j\phi}) P_0 \tag{2}$$

와 같이 주어진다. 여기서  $\alpha$ 는 좌측 스피커 신호에 대한 우측 스피커의 음압 레벨비,  $\phi$ 는 음원 우측 채널의 위상 지연,  $\gamma$ 는 양쪽 귀간 음압 레벨차,  $\varphi$ 는 시간차에 의한 양쪽 귀간 위상 지연이다.

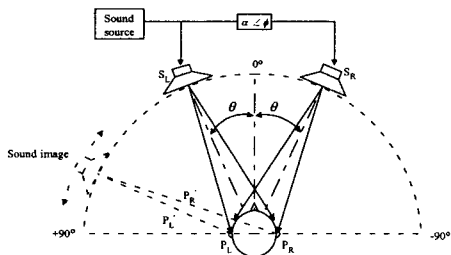


그림 8. 두 개의 스피커에서 나오는 음의 음상  
Fig 8. Sound image of the sound from two speakers.

$P_L$  과  $P_R$  이 다음 조건

$$P_L = P_L' \tag{3}$$

$$P_R = P_R' \tag{4}$$

을 만족시키면, 청취자는 두 개의 스피커를 통해 재생되는 음의 음상이 단일 음원의 방향에 존재하는 것처럼 느낀다. 여기서  $P_L', P_R'$ 는 단일 음원이 한 방향에서 순음을 발생시킬 때 좌우의 외이 입구에 전달되는 신호이다. 이를 위해 다음 두 식

$$|P_L|/|P_R| \equiv 1/\gamma_{LOC} \tag{5}$$

$$\angle P_L - \angle P_R \equiv \varphi_{LOC} \tag{6}$$

을 만족시키는  $\alpha$ 와  $\phi$ 를 모의 실험으로 구하였다. 여기서  $\gamma_{LOC}$ 와  $\varphi_{LOC}$ 는 단일 음원이 한 방향에서 순음을 발생시킬 때 좌우의 외이에 전달되는 신호의 음압 레벨차와 위상차이다.

스피커의 각도  $\theta=15^\circ$  일 때, 스테레오 재생음의 음상을 스피커의 위치보다 넓은 방향에 정위시키는  $\alpha$ 와  $\phi$ 를 구한 결과는 그림 9와 같다. 그림 9에서, 음상을  $45^\circ$ 에 정위시키기 위한 음압 레벨차  $\alpha_{45}$ 는 0.6 정도, 위상차  $\phi_{45}$ 는  $165^\circ$  정도로 조정해야 함을 알 수 있다. 이 모의 실험은 1 kHz 이하 주파수 음에 대해서만 적용됨을 보여 준다.

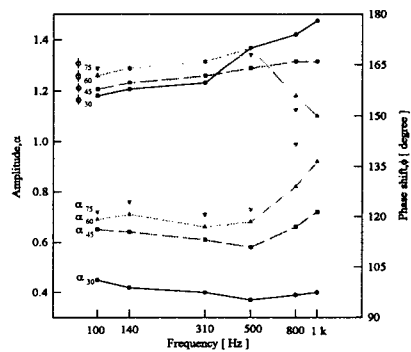


그림 9.  $\theta=15^\circ$  일 때 음상을  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ , 및  $75^\circ$ 에 정위시키기 위한  $\alpha, \phi$

Fig 9.  $\alpha, \phi$  to directionally localize sound image at  $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ , and  $75^\circ$  when  $\theta=15^\circ$

스피커의 각도  $\theta=30^\circ$  일 때, 스테레오 재생음의 음상을 스피커의 위치보다 넓은 방향에 정위시키는  $\alpha$ 와  $\phi$ 를 구한 결과는 그림 10과 같다. 그림 10에서, 음상을  $45^\circ$ 에 정위시키기 위한 음압 레벨차  $\alpha_{45}$ 는 0.4 정도, 위상차  $\phi_{45}$ 는  $145^\circ$  정도로 조정해야 함을 알 수 있다.

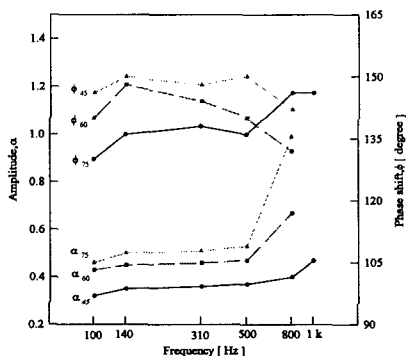


그림 10.  $\theta=30^\circ$  일 때 음상을  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ , 및  $75^\circ$ 에 정위시키기 위한  $\alpha$ ,  $\phi$

Fig 10.  $\alpha$ ,  $\phi$  to directionally localize sound image at  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ , and  $75^\circ$  when  $\theta=30^\circ$

스피커의 각도  $\theta=45^\circ$  일 때, 스테레오 재생음의 음상을 스피커의 위치보다 넓은 방향에 정위시키는  $\alpha$ 와  $\phi$ 를 구한 결과는 그림 11과 같다. 그림 11에서, 음상을  $75^\circ$ 에 정위시키기 위한 음압 레벨차  $\alpha_{75}$ 는 0.3 정도, 위상차  $\phi_{75}$ 는  $130^\circ$  정도로 조정해야 함을 알 수 있다.

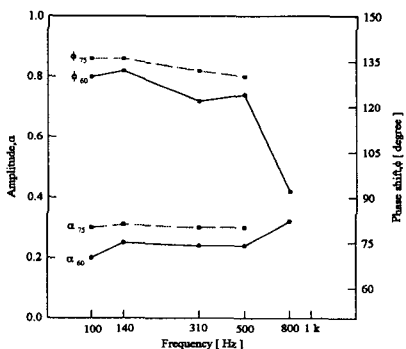


그림 11.  $\theta=45^\circ$  일 때 음상을  $60^\circ$ , 및  $75^\circ$ 에 정위시키기 위한  $\alpha$ ,  $\phi$

Fig 11.  $\alpha$ ,  $\phi$  to directionally localize sound image at  $60^\circ$ , and  $75^\circ$  when  $\theta=45^\circ$

## VI. 결론

본 논문에서는 동진폭의 단일 순음을 헤드폰을 통해 청취할 때, 한 쪽 채널의 신호의 위상을 기준으로 하여 다른 쪽 채널 신호의 위상을 지연시킬 경우 음상의 이동 정도를 측정하였다. 1.4kHz 이상의 음은 위상차에 의한 방향 정위의 변화는 거의 느낄 수 없으므로 고주파 대역의 음에 대해서는 위상 처리가 아닌 다른 방안을 찾아야 할 것이다.

또한 고주파를 포함하는 복합음의 음상을 원하는 방향에 정위시키기 위해 조정해야 할 한 쪽 채널 신호의 위상과 음압 레벨을 헤드폰 청취 실험으로 구하였다.

단일 순음이 청취자의 머리 전방에서 대칭적으로 배치된 두 개의 스피커를 통해 재생될 때, 한 쪽 채널의 신호의 음압과 위상을 기준으로 하여 다른 채널 신호의 음압과 위상을 변화시켜 원하는 방향에 음상을 정위시키는 모의 실험을 하였다. 고주파가 1kHz 이하에 존재하는 복합음을 대역으로 분리하여 각각의 주파수 성분에 적당한 위상차와 음압 레벨차를 주어 재생 가산하면 복합음도 원하는 방향에 정위시킬 수 있다. 이 모의 실험의 결과는 스테레오 음의 음상을 스피커의 위치 외부에까지 확대시켜 공간감있는 음향 효과를 내는 데 효과적으로 이용될 수 있다.

음을 위상 처리 했을 때 그 음의 위상 처리 전과 후의 음색 변화 연구가 향후에 필요하다.

## 참고 문헌

- [1] 中林克己, テレビ音響多重放送用ステレオ音場擴大器, テレビ誌, 33, 3, 1979.
- [2] 市野, 良典, 二階堂誠也, 오디오機器, コロナ社, 1991.
- [3] 山本武夫 編著, 스피카시스템(上), 라지오技術社, 1977.
- [4] Michael Talbot-Smith, Broadcast Sound Technology, Focal Press, 1990.
- [5] 차일환, 음향 공학 개론, 한신문화사, 1980. 9.
- [6] 青木茂明, 宮田裕之, 音像定位, 電子情報通信學會誌, Vol. 72, No. 8, Dec. 1989.

