

선착효과 및 반사음을 이용한 스테레오 음상확대

Stereo Sound Image Extension Using Precedence Effect and Reflected Sounds

한찬호

경운대학교 소프트웨어공학과

이법기

기술신용보증기금

정원식

한국전자통신연구원

고일석

충북과학기술대학 전자상거래과 전임강사

최영수

한국원자력연구소

Chan-Ho Han

Professor, Kyungwoon University

Bub-Ki Lee

Korea Technology Credit Guarantee Fund

Won-Sik Jung

Electronics and Telecommunications Research Institute

Il-Seok Ko

Professor, Dept. of Electronic Commerce

Young-Soo Choi

Korea Atomic Energy Research Institute

중심어 : 선착효과, 반사음, 음상

요약

AV시스템에서, 스테레오 스피커간의 거리가 좁기 때문에 실감나는 사운드효과를 내기가 매우 어렵다. 지금까지 공간적으로 음상을 확장시키는 신호처리방법이 많이 연구되었다. 음상을 확장하는 전형적인 방법은 대부분 위상이동과 관련된다. 그러나 이 방법은 반사성이 높은 콘크리트 벽 구조에서는 효과적이지 못하다.

본 논문에서는 선착효과와 반사음을 이용하여 스테레오 음상을 효과적으로 확장하는 방법을 제안하였다. 실험을 통하여 기존 AV시스템이 스테레오 음상을 확장하는 방법이 실내가 넓을수록 유용함을 확인하였다.

Abstract

In the AV system, to produce a realistic sound effect is very difficult because the distance between stereo speakers is very narrow. Many signal processing method of widening the sound image for spatial impression have been studied. Most of the typical methods of widening the sound image are related to the phase shifting, but this method was not effective in the concrete wall structure with high reflectivity.

In this paper, we proposed an effective method of extending stereo sound image using Precedence Effect and reflected sound. In experiments we confirmed the usefulness of the method for extending stereo sound image of a conventional AV system in wider listening area of a room.

I. 서론

AV (audio and video)시스템에서는ダイ나믹한 영상과 함께 공간감 있는 음향이 요구되고 있다. 일반 가정에서 텔레비전을 시청할 경우 스피커의 간격이 좁아서 별도의 스피커를 배치하지 않고서는 텔레비전 스피커사이의 좁은 공간에만 음상(sound image)이 존재하므로 공간감 있는 음향을 청취할 수 없다. 따라서 텔레비전 스피커 바깥쪽으로 음상을 확장할 필요성이 있다. 이를 위한 기존의 음상 확장 방식은 음압차 및 위상차를 이용한 방식이다.[1]-[3] 그러나 위상차를 이용한 기존의 음상 확장 방식은 반사파가 없는 실내에서 저역 주파수에서만 효과가 있다.[2]-[4] 즉 우리나라의 일반 가정에서와

같이 반사파가 많은 콘크리트 벽 구조에서는 효과가 반감될 뿐만 아니라 특정 위치의 청취자만이 그 효과를 느낄 수 있다. 그러므로 반사파가 많은 벽 구조에서는 오히려 반사파를 이용한 음상 확장 시스템이 요구된다.

본 논문에서는 텔레비전을 시청할 때 음상이 확장된 스테레오 효과를 얻기 위해 서로 다른 방향에서 동일한 두 음원이 적당한 시간차를 두고 발생할 때 귀에 먼저 도달하는 음원의 방향으로 음상이 정위(directional localization)된다는 선착효과(precedence effect)[4]-[7]를 이용하여, 전면 스피커에서 나오는 직접음(direct sound)보다 벽면에 반사되어서 나오는 측면 스피커에 의한 반사음(reflected sound)이 청취자의

귀에 먼저 도달할 수 있도록 전면 스피커에 의한 직접음을 시간적으로 충분히 지연시켜 반사음쪽으로 음상을 확장하는 방식을 제안하였다.

본 논문의 제안 방식을 오디오에 관심이 많은 비전문가 20명을 대상으로 ITU-R (International tele-communication union Recommendation)에서 권고하는 4단계 일대일 비교 척도[8]를 통하여 청취 실험을 한 결과 제안한 방식이 효과가 있음을 확인하였다.

II. 이론

1. 선착효과

선착효과 (precedence effect)란 서로 다른 방향에서 똑같은 두 음원이 적당한 시간차를 두고 발생할 때 귀에 먼저 도달하는 음원의 방향으로 음상이 정위되는 현상이다.[3]-[6]

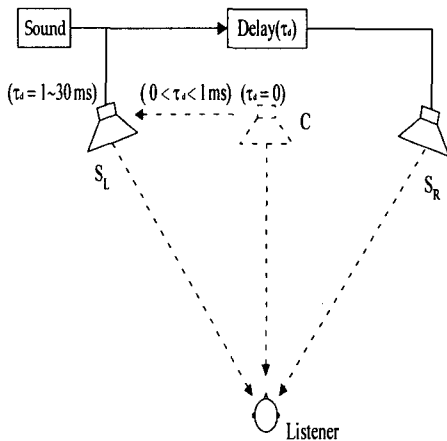


그림 1. 두 개의 음원에서 선착음 효과

그림 1에서와 같이 두 개의 스피커 S_L 및 S_R 을 양쪽에 배치하고 그 전면 중앙 위치에 청취자를 위치시킨 후 좌측 스피커 S_L 에는 음향 신호를 직접 입력시키고 우측 스피커 S_R 에는 시간적으로 τ_d 만큼 지연시킨 후 입력시킨다. $\tau_d = 0ms$ 일 때 즉 좌우측 신호가 청취자의 귀에 동시에 도달할 때는 음상이 스피커 S_L 및 S_R 의 중앙 위치 즉 C에 위치한다. 한편 지연 시간차 τ_d 가 점점 더 길어짐에 따라 즉 좌측 신호가 우측 신호보다 청취자의 귀에 먼저 도달하면 음상은 점점 더 좌측으로 이동한다. 이 음상의 이동 정도는 음원의 종류나 청

취자의 위치에 따라서 조금씩 변화하지만 일반적으로 1ms의 시간차까지는 음상이 중앙으로부터 스피커 S_L 쪽으로 시간차 τ_d 에 비례하여 이동하고, 1~30ms의 시간차 범위에서는 마치 음원이 스피커 S_L 하나밖에 없는 것처럼 들리고, 시간차가 30ms 이상이 되면 음원은 분리되어 에코 (echo)로 지각된다.[3] 따라서 선착 효과가 유효한 시간 지연 범위 τ_p 는 1~30ms 사이이다.

한편 지연시간과 음압 레벨과의 관계는 그림 1에서의 음상을 중앙에 위치시키기 위한 우측 스피커에 입력되는 신호의 지연 시간에 따른 좌측 스피커에 대한 우측 스피커의 상대적인 음압 크기를 데시벨로 나타내면 그림 2와 같다.[6] 이 그림에서 보면 완전한 선착효과가 일어나는 지연시간은 10~30ms 사이의 범위이다.

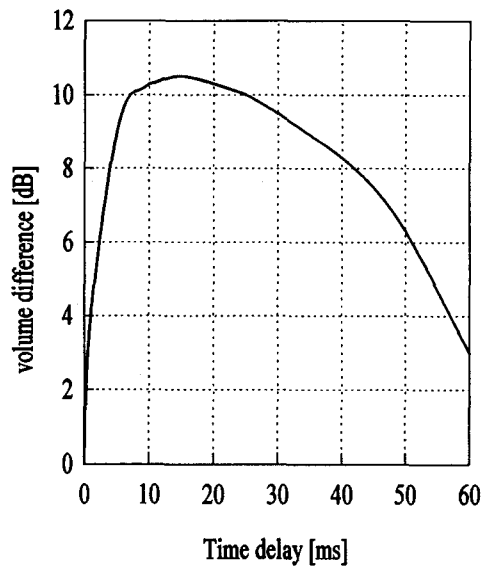


그림 2. 음상을 일정한 위치에 고정시키기 위한 음압 레벨과 선착효과에 의한 지연시간과의 관계

2. 흡음 재료의 반사율

각종 흡음 재료에 대해서 주파수에 따른 반사율 (reflectivity)을 조사하면 표 1에서와 같았다.[9] 여기서 콘크리트 (concrete)의 반사율은 97~99%로서 거의 전반사에 가깝고, 다다미 (tatami)의 반사율은 비교적 낮음을 알 수 있다. 그리고 석고보드 (gypsum)는 저주파보다는 고주파에서 반사율이 높으나 다른 재료들은 일반적으로 고주파보다는 저주파에서 반사율이 더 높음을 알 수 있다.

표 1. 주파수에 따른 각종 흡음 재료의 반사율 [%]

Materials	Frequency [Hz]					
	125	250	500	1k	2k	4k
Concrete	99	99	98	98	98	97
Carpe (9mm)	91	92	79	74	73	63
Tatami (40mm)	69	59	42	50	57	66
Curtain (600g/m)	95	-	65	-	62	-
Veneer (3mm, air gap 50mm)	80	72	74	91	88	89
Gypsum(7mm, air gap 90mm)	70	89	92	95	94	94

3. 음의 감쇄

공간의 한 점에 위치한 음원이 전파되어 거리 r 떨어진 곳에서의 에너지 분포는 어떠한 장애물도 없다고 가정하면 음원을 중심으로 반지름이 r인 구 표면에 균일하게 분포하고, 음압은 거리가 멀어짐에 따라서 감쇄한다. 즉 음압 레벨 P는

$$P \propto \frac{1}{r^2} \quad (1)$$

로 주어진다. 따라서 음압 레벨은 음원으로부터의 거리 r의 제곱에 반비례한다.

한편 실내 공간에 음원이 존재할 경우 청취자가 듣게되는 음은 음원으로부터 직접 들려오는 직접음과 벽면이나 천정으로부터 반사되어 나오는 반사음 두 가지로 구분된다. 일반적으로 음원으로부터의 거리가 가까우면 직접음이 우세하여 그 음압은 거리 r의 제곱에 반비례하고, 거리가 멀어지면 직접음의 음압 레벨은 급격히 감쇄하나 반사음은 거의 일정한 음압 레벨에 이르게 된다. 그림 3에서는 실내에서의 직접음과 반사음의 음압 레벨의 감쇄정도를 거리에 대하여 데시벨로 나타내었다.[2]

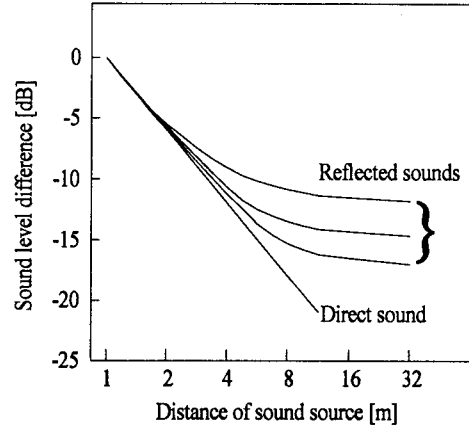


그림 3. 실내에서의 거리에 따른 음의 감쇄

III. 제안 방식

우리 나라의 일반 가정에서는 보통 반사율이 높은 콘크리트 벽이 대부분이므로 이 반사음을 무시할 수 없다. 이 벽면의 반사를 이용해서 반사음이 직접음보다 청취자의 귀에 먼저 도달하게 하면 선착효과에 의해 벽면의 반사음쪽으로 음상을 확장시켜 공간감을 느끼게 할 수 있다.

본 논문에서는 텔레비전을 시청할 때 텔레비전 스피커 바깥 쪽으로 음상을 확장시켜 공간감 있는 스테레오 효과를 얻기 위해 전면 스피커에 입력되는 신호를 충분히 시간적으로 지연시켜 재생함으로써 측면 스피커에 의해 재생된 음의 반사음이 청취자의 귀에 먼저 도달하게 함으로써 선착효과에 의하여 반사음쪽으로 음상을 확장시키는 방식을 제안하였다.

제안 방식은 좌우측 각각 전면 스피커 및 측면 스피커로 구성된 대칭 구조를 가지며 전면 스피커에 입력되는 신호를 지연시킬 수 있는 지연 소자와 각각의 스피커 출력의 이득을 조절할 수 있는 감쇄기와 증폭기로 구성된다. 이를 그림 4에 나타내었다.

제안 방식의 음상 확장의 원리를 그림 5에서와 같이 스피커는 좌우측이 대칭이므로 좌측만 해석한다. 전면 스피커 S_{L1} 에 들어오는 신호를 시간적으로 지연시키면 그 음상은 멀어져서 S'_{L1} 위치에 존재하게 되고 측면 스피커 S_{L2} 에 의해 재생된 반사음의 음상은 S'_{L2} 위치에 존재하게 된다. 따라서 전면 스피커에 입력되는 신호를 실제로 $R_1 + R_2 < H + H'$ 이 되도록 충분히 지연시키면 선착효과에 의해서 반사음쪽으로 음상을 확장시킬 수 있다.

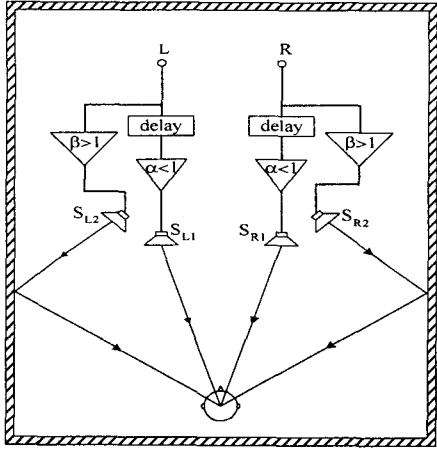


그림 4. 제안한 스테레오 음상 확대 방식의 구조

제안 방식의 음상 확장 효과를 충분히 얻기 위해서는 측면 스피커에 의한 반사음이 전면 스피커에 의한 직접음의 도달 시간보다. 선착효과와 실험에서 밝혀진 τ_p (1~30ms)만큼 청취자의 귀에 먼저 도달하게 하기 위한 실제 전면 스피커에 입력되는 신호의 지연 시간 τ_d 는

$$\tau_d = \Delta\tau + \tau_p \quad (2)$$

로 주어진다. 여기서 $\Delta\tau$ 는 직접음과 반사음의 도달 시간차를 말하며 이는 실내의 너비 및 스피커와 청취자 사이의 거리에 따라서 달라진다. 도달 시간차 $\Delta\tau$ 를 간단히 계산하기 위해서 다음 4가지 항을 가정하면 그림 6과같이 나타난다.

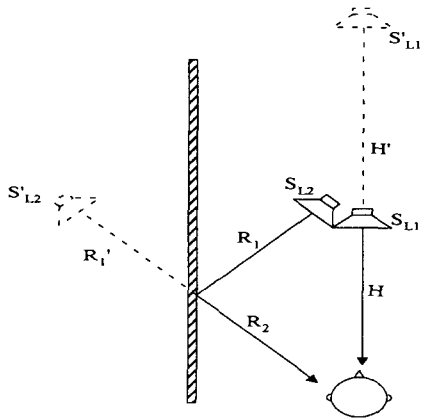


그림 5. 제안방식에 의한 음상 확장의 원리

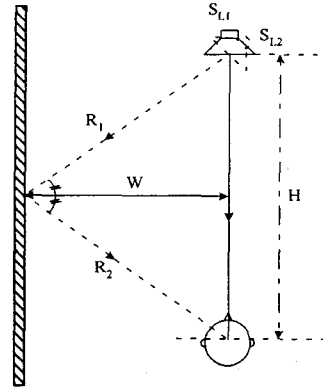


그림 6. 직접음과 반사음의 진행 경로

- i) 입사각 = 반사각
 - ii) 1차 반사파만 고려
 - iii) 전면과 측면 스피커 위치 동일
 - iv) 청취자의 정면에 스피커 위치
- 상기와 같은 가정하에서 직접음의 경로는 H이고 반사음의 경로 R은

$$R = R_1 + R_2 = 2\sqrt{W^2 + (0.5H)^2} \quad (3)$$

이다. 따라서 도달 시간차 $\Delta\tau$ 는 직접음과 반사음의 경로차를 음파의 속도로 나눈

$$\begin{aligned} \Delta\tau &= (R - H) / v_s \\ &= (2\sqrt{W^2 + (0.5H)^2} - H) / v_s \end{aligned} \quad (4)$$

로 주어진다. 여기서 v_s 는 음파의 속도 340m/s이다.

이때 스피커와 벽면사이의 거리 W와 스피커와 청취자사이의 거리 H를 각각 1m에서 10m까지 1m간격으로 변화시켰을 때 도달 시간차 $\Delta\tau$ 를 구하여 그림 7에 나타내었다.

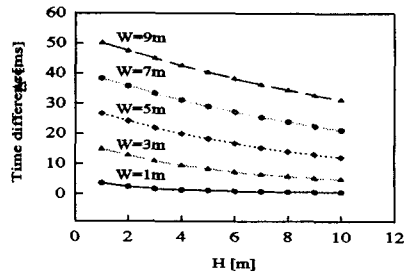


그림 7. 스피커와 벽면 사이의 거리 W와 스피커와 청취자 사이의 거리 H의 변화에 따른 도달 시간차

그림 7에서 알 수 있듯이 스피커와 벽면 사이의 거리 W가 커질수록 도달 시간차 $\Delta\tau$ 는 증가하는데 반해 스피커와 청취자 사이의 거리 H는 커질수록 도달 시간차는 줄어들어 갈 수 있다.

청취자의 귀에 들리는 직접음과 반사음의 음압 레벨은 각각의 경로차에 의해 달라진다. 직접음의 음압 레벨 P_D 는

$$P_D \propto \frac{1}{H^2} \quad (5)$$

와 같이 직접음의 경로 H의 제곱에 반비례한다. 또한 반사음의 음압 P_R 은

$$P_R \propto \frac{1}{R_1^2 R_2^2} \quad (6)$$

과 같이 반사 R_1 과 반사 후의 경로 전의 경로 R_2 , 각각의 제곱에 반비례한다. 따라서 직접음과 반사음의 음압 레벨차 ΔP 는

$$\Delta P = 10 \log \frac{P_D}{P_R} [\text{dB}] \quad (7)$$

와 같다. 콘크리트 벽면의 반사율을 100%로 가정하면 경로차에 따른 음압차 ΔP 는 식 (7)에 의해

$$\begin{aligned} \Delta P &= 10 \log \frac{R_1^2 R_2^2}{H^2} \\ &= 10 \log \frac{(W^2 + (0.5H)^2)^2}{H^2} [\text{dB}] \end{aligned} \quad (8)$$

로 주어진다. 그리고 실제로 벽면의 넓이에 따라서 반사음의 음압 저하가 있으므로 제안한 선착효과를 이용한 음상 확장 효과를 얻기 위해서는 그림 4의 스피커 출력 이득 조절 변수 α 및 β 를 조정하여 직접음과 반사음의 음압 레벨차가 거의 없도록 한다.

IV. 실험 결과 및 고찰

제안한 방식의 타당성을 조사하기 위하여 그림 8과 같이 4×7평방미터의 실내 공간에서 제안한 방식의 구조로 스피커를 설치하였다. 청취자는 스피커와 청취자사이의 거리 H=3m와 벽면과 스피커사이의 거리 W=2m 떨어진 곳에 위치하여 음상 확장 효과를 실험하였다.

이 경우 도달 시간차 $\Delta\tau$ 는 식 (3)에 의해 6ms가 되고 지연시켜야 할 직접음의 지연 시간 τ_d 는 식 (2)에 의해 7~36ms가 된다. 본 논문의 실험에서는 지연 시간 τ_d 를 20ms로 두고 실험 신호를 구성하였다. 또한 직접음과 반사음의 경로차에 의한 청취자의 귀에 들리는 음압 레벨차 ΔP 는 식 (8)에 의해 약 6dB정도가 된다. 따라서 증폭기 이득 α 및 β 를 조정하여 측면 스피커의 이득을 3dB 높이고, 전면 스피커의 이득을 3dB 낮추어서 전면 스피커와 측면 스피커의 음압 레벨을 동일하게 유지한 후 실험하였다.

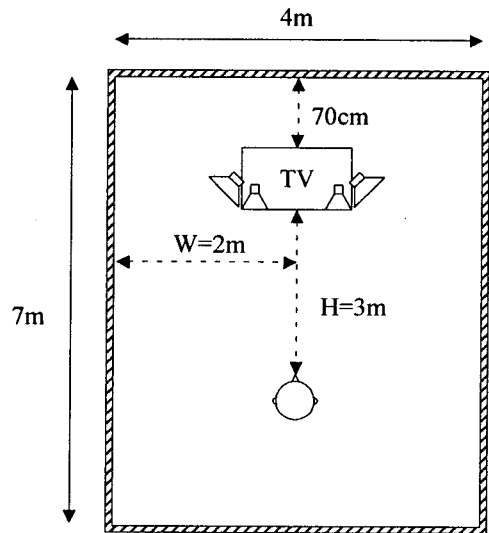
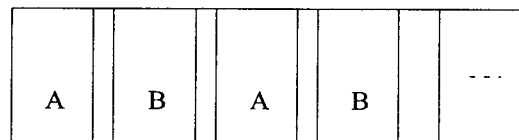


그림 8. 스테레오 음상 확장을 위한 청취실에서의 스피커 배치와 방향

실험의 평가방법은 음향 시스템을 평가할 때 ITU-R 권고 BS.562-3 (음의 품질 평가법)에 의거하여 4단계 일대일 비교 척도를 통하여 실험하며, 음향 신호의 구성은 그림 9에서와 같다.



2(초 이하)pause pause pause 판정
(0.5~1sec)(1.5sec)(0.5~1sec)(5~10sec)

그림 9. 음향 신호의 제시 방법

여기서 A신호는 전면 스피커만에 의해 재생된 신호이고 B 신호는 제한한 방식에 의해 처리된 신호로서 두 신호의 음압 레벨을 동일하게 유지한 상태에서 실험을 하였다. 또한 평가는 오디오에 관심이 많은 비전문가 20명을 대상으로 표 11에 제시된 4단계 비교 척도를 사용하였다.[8]

표 11. 4단계 일대일 비교 척도

Score	Standard
3	significantly extended
2	extended
1	least extended
0	unextended

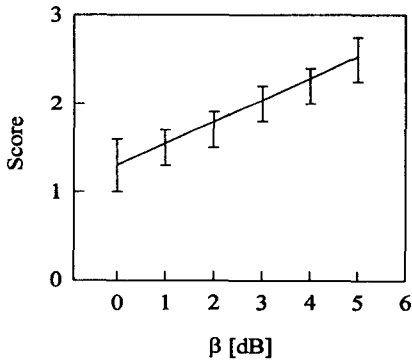


그림 10. 측면 스피커의 이득 β 에 따른 음상 이동 정도

이렇게 실험 신호를 구성한 후 4단계 일대일 비교 척도를 이용해 실험한 결과 음상이 확장되는 것은 확인할 수 있었으나 선착 효과에 의해서 완전히 반사음쪽으로 음상이 정위되지는 않았다. 이것은 스피커의 방사 패턴이 넓어서 측면 스피커에 의해서 재생된 모든 음이 벽면에 반사되어서 귀에 들어오는 것이 아니라 일부의 음이 직접 귀에 들어오기 때문이다. 이를 보상하기 위해 측면 스피커는 방사 패턴이 좁고 음파의 직진성이 강한 고주파 음을 효과적으로 재생시키는 스피커를 사용하고 전면 스피커는 고충실도 (high fidelity)의 음을 효과적으로 재생시키는 스피커를 사용하여 그림 10과 같이 측면 스피커의 이득을 0~5dB로 음압레벨을 높여가면서 실험한 결과 음상이 점점 더 확장됨을 확인할 수 있었다.

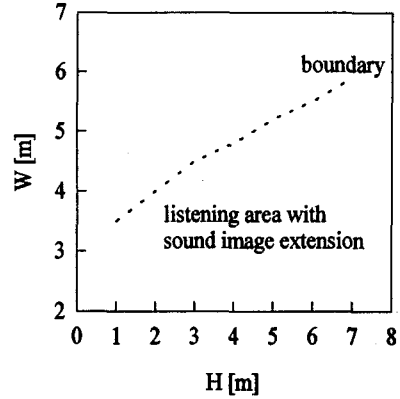


그림 11. 음상 확장을 위한 W와 H와의 관계

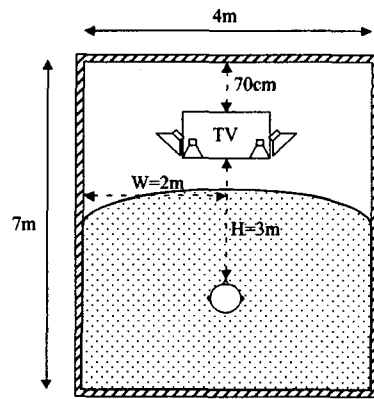


그림 12. 확장된 스테레오 음상의 청취 가능한 영역

그리고 직접음의 지연시간 $\tau_d=20ms$ 로 정함으로써 음상 확장 효과를 느낄 수 있는 청취자의 위치 범위를 나타내면 그림 11에서와 같이 점선 아래 부분이 된다.

그림 11의 영역을 실험실에서의 범위로 나타내면 그림 12와 같이 나타난다. 이 그림에서 보면 텔레비전 정면의 거의 대부분의 영역에서 음상 확장 효과가 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

일반 가정에서 텔레비전을 시청할 경우 스피커의 간격이 좁아서 별도의 스피커를 배치하지 않고서는 텔레비전 스피커 사이의 좁은 공간에만 음상이 존재하므로 공간감있는 음향을

청취할 수 없었다. 따라서 텔레비전 바깥쪽으로 음상을 확장 시키기위해 위상치를 이용한 음상 확장 방식이 제기되었으나 이 방식은 우리나라와 같은 반사파가 많은 콘크리트 벽구조에서는 효과가 반감될 뿐만 아니라 특정 위치의 청취자만 그 효과를 느낄 수 있었다.

본 논문에서는 선착효과를 이용하여 벽면에 반사되어서 나오는 측면 스피커의 반사음이 귀에 먼저 도달할 수 있도록 전면 스피커에서 나오는 직접음을 시간적으로 지연시키면 음상을 반사음쪽으로 확장시킬 수 있다는 것을 이론적으로 제시하고 ITU-R에서 일대일 비교 실험을 하는 음향을 평가할 경우에 권고하는 4단계 일대일 비교 척도를 통하여 청취 실험을 한 결과 제안한 방식이 음상 확장 효과가 있음을 확인할 수 있었고, 청취자의 위치가 변화하더라도 음상 확장 효과가 기존의 위상처리 방식보다 우수함을 확인할 수 있었다.

차후의 과제로는 본 논문의 제안 방식을 실시간 처리 하드웨어 (real time processing hardware)로 구현하는 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 中林克己, *テレビ音聲多重放送用ステレオ音場擴大器*, *テレビ誌*, 33, 3, pp.719-725, 1979.
- [2] 市野 良典, 二堂誠也, *オーディオ機器*, コロナ社, 1991.
- [3] 山本武失, *スピーカ・システム(上)*, 라디오技術社, 1952.
- [4] 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, pp.860-864, Dec. 1989.
- [5] Jarmo Kontro and Ari Koski, *Digital Car Audio System*, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol.39, No.3, August 1993.
- [6] Glyn Alkin, *Sound Recording and Reproduction*, Second edition, Focal Press, 1991.
- [7] Keith Dana Martin, *A computational model of spatial hearing*, B.S. Thesis, Cornell Uni.
- [8] 강성훈, *차세대 고품질 방송을 위한 방송 음향 기술*, *방송과 기술*, 통권51호, pp.68-84, 1996.11.

[9] 山本武失, *スピーカ・システム(下)*, 라디오技術社, 1952.

한찬호(Chan-Ho Han) 정회원
 1990년 2월 경북대학교 전자공학(공학사)
 1992년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 2002년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료
 1990년 1월 ~ 1997년 7월 현대전자(주) 미디어연구소
 2000년 3월 ~ 현재 경운대학교 소프트웨어공학과
 전임강사

<관심분야> : 영상신호처리 및 압축, 멀티미디어

이법기(Bub-Ki Lee) 종신회원
 1992년 2월 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1994년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1999년 8월 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
 2000년 4월 ~ 현재 기술신용보증기금 대전기술평가센터
 <관심분야> : 영상신호처리 및 압축, 멀티미디어

정원식(Won-Sik Jung) 정회원
 1992년 2월 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1994년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 2000년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
 2000년 5월 ~ 현재 한국전자통신연구원
 방송미디어연구부
 <관심분야> : 영상신호처리 및 압축, 멀티미디어

고일석(Il-Seok Ko) 종신회원
 1989년 2월 경북대학교 전자계산과(공학사)
 1996년 경북대학교 대학원 컴퓨터공학과(공학석사)
 2000년 ~ 현재 연세대학교 컴퓨터산업시스템공학과
 박사과정
 1998년 ~ 2001년 대덕대학 컴퓨터정보통신계열 전임강사
 2001년 ~ 현재 충북과학대학 전자상거래과 전임강사
 <관심분야> : 전자상거래 시스템, 에이전트 기반 시스템, CRM, CBD.

