

다채널 스피커 환경에서 가상 음원을 생성하기 위한 레벨 패닝 알고리즘

Amplitude Panning Algorithm for Virtual Sound Source Rendering in the Multichannel Loudspeaker System

전 세 운*, 박 영 철**, 이 석 필***, 윤 대 희*
(Se-Woon Jeon*, Young-cheol Park**, Seok-pil Lee***, Dae Hee Youn*)

*연세대학교 전기전자공학과, **연세대학교 컴퓨터정보통신공학부,
***전자부품연구원(KETI) 디지털미디어 연구센터
(접수일자: 2011년 2월 28일; 수정일자: 2011년 4월 5일; 채택일자: 2011년 4월 22일)

본 논문에서는 다채널 스피커를 사용하는 음향 시스템에서의 가상 음원 생성 알고리즘을 제안하고 있다. 영상 신호의 표준은 보다 높은 해상도와 더 넓은 시야각을 제공하는 HD급이나 그 이상의 UHD급 등의 규격이 점차 상용화되고 있다. 그에 따라 음향 신호 또한 더 넓어진 음향 공간에서의 효과적인 음원 생성에 대한 필요성이 증가하고 있다. 기존의 스테레오 스피커 시스템으로는 원하는 사운드 효과를 재생하는데 한계를 가질 수밖에 없기 때문에, 여러 개의 스피커를 사용한 다양한 배치의 다채널 스피커 시스템이 제안되고 있다. 그러나 다수의 스피커를 사용한 시스템에서 기존의 사운드 패닝 알고리즘과 같은 가상 음원 생성 기술을 그대로 적용할 경우, 불연속적인 방향성 문제나 음색 열화 등의 또다른 문제가 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위하여 임의의 배치의 다채널 스피커 시스템에서 적용 가능한 벡터 기반의 가상 음원 생성 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 벡터 기반의 계인 조절 함수를 이용하여 음원의 방향감을 쉽고 효과적으로 생성할 수 있으며, 대칭 혹은 비대칭의 다채널 스피커 배치에 대해서 모두 적용 가능하다. 기존에 잘 알려진 VBAP와 MDAP의 레벨 패닝 방법과의 청취 비교 실험을 통하여 보다 정확한 패닝 성능을 유지할 수 있는 것으로 확인되었다.

핵심용어: 스테레오, 다채널 스피커 시스템, 벡터 기반의 레벨 패닝

투고분야: 음향 신호처리 분야 (1,2)

In this paper, we propose the virtual sound source panning algorithm in the multichannel system. Recently, High-definition (HD) and Ultrahigh-definition (UHD) video formats are accepted for the multimedia applications and they provide the high-quality resolution pixels and the wider view angle. The audio format also needs to generate the wider sound field and more immersive sound effects. However, the conventional stereo system cannot satisfy the desired sound quality in the latest multimedia system. Therefore, the various multichannel systems that can make more improved sound field generation are proposed. In the multichannel system, the conventional panning algorithms have acoustic problems about directivity and timbre of the virtual sound source. To solve these problems in the arbitrary positioned multichannel loudspeaker system, we proposed the virtual sound source panning algorithm using multiple vectors base nonnegative amplitude panning gains. The proposed algorithm can be easily controlled by the gain control function to generate an accurate localization of the virtual sound source and also it is available for the both symmetric and asymmetric loudspeakers format. Its performance of sound localization is evaluated by subjective tests comparing with conventional amplitude panning algorithms, e.g. VBAP and MDAP, in the symmetric and asymmetric formats.

Keywords: Stereo, Multichannel Loudspeaker System, Vector Base Amplitude Panning (VBAP)

ASK subject classification: Acoustic Signal Processing (1,2)

I. 서론

1925년 BBC에 의해 최초로 스테레오 (stereo) 라디오 방송이 송출된 이후, 스테레오 신호를 전파로 전송할 수 있는 토대가 마련되고, 1930년에는 Blumlein에 의해서 스테레오 녹음 기술이 개발되면서 다양한 음원을 두 채널 오디오 신호로 얻고 이를 변환 및 재생할 수 있게 되었다 [1-2]. 이후 스테레오 스피커를 이용한 사운드 재생 기술은 인간의 청각 기관의 특성에 관한 이론을 토대로 모노 신호보다 더 자연스럽게 정확한 방향감과 음장감을 재생할 수 있는 장점을 가지고 발전하였다. 특히, 최근에는 케이블 방송을 비롯하여 현재까지 상용화된 DVB (Digital Video Broadcasting)와 같은 대부분의 디지털 방송에서 오디오 신호의 채널 규격은 스테레오를 기본으로 하고 있다. 또한 대부분의 멀티미디어 콘텐츠의 오디오 채널이 스테레오이기 때문에 현재까지도 TV나 PC용 사운드 재생 기기에서 스테레오 포맷이 일반적으로 사용되고 있다.

하지만 1990년대부터 기존보다 화면의 해상도가 높아진 HD (High-definition)급 규격 (1366x768)에 대한 연구가 활발히 전개되었고, 넓어진 화면 시야각으로 인해 HD급 오디오 시스템이 표현해야 하는 음향 공간이 확장되었기 때문에 그에 따른 새로운 사운드 재생 알고리즘이 필요해졌다 [3]. 게다가 최근에는 영화와 같은 콘텐츠에 적합한 Full HD 규격 (1920x1080)의 상용화가 이루어졌으며, 이는 해당 스피커 시스템에 대해 좌우로 최대 60° 정도의 청취 각도를 표준으로 요구하고 있다. 스피커의 간격이 넓어지면 정면 부근에 사운드 음영 지역이 발생하여 스테레오로 재생하는 음원의 음색 열화가 발생하기 쉽다. 또한 음원의 방향성을 만드는 사운드 패닝 기술을 적용할 경우, 음원의 방향성의 정확도가 떨어지는 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서 현재까지 가장 많이 제안된 해결책은 좌우 스피커 사이에 추가적인 스피커를 배치하는 방법이다. ITU 3/2 스피커 배치에서도 좌우 30도 스피커 사이 중앙에 센터 스피커를 배치하여 전방에서의 가상 음원 생성 과정에서 발생할 수 있는 위와 같은 문제점들을 해결하고자 하였다 [4]. 그리고 HD급 오디오 시스템에서는 둘 이상의 추가 스피커를 전방 스테레오 스피커 사이에 배치하는 방법도 연구되었다 [5,8].

이와 같은 스피커 삽입 방법은 새로운 가상 음원 생성 알고리즘을 필요로 한다. 스피커 사이 임의의 방향으로 가상 음원을 만들고자 할 때에 가장 많이 사용된 방법은

스피커 쌍을 이용하는 레벨 패닝 (pair-wise amplitude panning) 방법이었다. 레벨 패닝 방법은 서로 다른 레벨을 가진 신호가 두 스피커로부터 사람의 귀에 도달하면서 summing localization의 특성에 의해 스피커 사이에서 음원이 방향성을 갖게 되는 심리음향적 특성을 이용한 방법이다 [1]. 가상 음원의 방향은 두 스피커의 레벨 차이에 의해서 조절되며, 이러한 레벨 차이를 ICLD (Interchannel level difference)라고 부른다. 사인 법칙이나 탄젠트 법칙은 이러한 레벨 패닝 방법의 가장 오래된 기술이며, 현재까지도 이들 법칙의 수식을 통해서 가상 음원 생성 기술이 연구되고 있다 [2,6]. 이후 1990년대 후반, Pulkki에 의해서 제안된 VBAP (Vector Base Amplitude Panning)은 스피커의 배치에 상관없이 다양한 각도의 스피커 쌍을 이용하여서 패닝 레벨값을 구할 수 있는 패닝 방법이 제안되었다 [7]. VBAP를 이용하여 벡터 기반의 간단한 계산만으로 임의의 스피커 환경에서의 패닝 계인을 구할 수 있게 되었고, 세 채널을 이용한 3차원 고도 방향으로의 패닝 계인을 구하는 triplet-wise 패닝도 가능해졌다.

하지만 다채널 스피커 환경에서 스피커 쌍을 이용한 레벨 패닝 방법은 가상 음원이 가까운 스피커 쪽으로 치우쳐 들리는, 즉 톱니바퀴 효과 (Detent effect)라고 불리는 문제점이 나타난다 [8]. 이러한 영향으로 움직이는 가상 음원의 경우, 음원의 방향성과 음색의 퍼짐 현상이 각도에 따라 불연속적으로 변화하는 문제점이 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위하여, Pulkki는 MDAP (Multiple-Direction Amplitude Panning)라는 여러 스피커를 동시에 사용하는 사운드 패닝 방법을 제안하였다 [9]. 동시에 두 개 이상의 가상 음원 벡터를 생성하여 하나의 가상 음원을 생성하는 MDAP 방법은 음상의 퍼짐 현상을 각도에 따라 균일하게 유지할 수 있었다. 하지만 VBAP를 비롯한 레벨 패닝 방법이 측면 방향에서 패닝 오차가 커지기 때문에 MDAP 또한 측면 방향에서 좋은 성능을 보장하기 어렵다 [10]. 이에 대해서는 본 논문에서 청취 테스트에 의한 비교 실험을 통하여 VBAP와 MDAP의 패닝 방향에 대한 성능을 분석하였다.

스피커 쌍을 이용하는 레벨 패닝 방법과 달리, Ambisonics와 같이 다수의 스피커를 동시에 사용하는 가상 음원 생성 알고리즘에서는 스피커 패닝 계인에 양의 값과 음의 값을 모두 사용하였다 [8,12]. 이러한 방법은 점으로 정해진 한 지점의 스위트스팟에 대해서는 매우 정확한 패닝 성능을 보여주는 것으로 알려져 있다. 하지만 귀에 먼저 도달하는 신호 방향으로 음원이 치우치는 precedence effect라 불리는 현상으로 인하여 청취자의 위치나 시선

에 의한 스윗스팟 문제에 민감하고 [13], 또한 음의 패닝 계인으로 인한 위상 (phase) 변화의 영향이 음질 열화로 나타날 수 있는 단점을 가지고 있다 [11].

따라서 본 논문에서는 현재까지 사용되는 가상 음원 생성 알고리즘의 장점을 유지할 수 있는 새로운 다채널 스피커 쌍을 이용한 패닝 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 VBAP와 같은 벡터 기반의 간단한 계산만으로 다채널 스피커 쌍을 이용한 패닝 계인을 얻을 수 있으며, 방향 정보에 따른 함수를 사용하여 음의 패닝 계인을 배제할 수 있는 방법을 적용하였다. 그리고 대칭인 스피커 배치에서 뿐만 아니라 비대칭인 임의의 각도의 스피커 환경에서도 적용 가능하며, 스피커 배치에 따라 간단한 변수값의 설정만으로 패닝 성능을 높일 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 논문의 구성은 2장에서 다채널 스피커 배치와 기존의 가상 음원 생성 알고리즘의 특징을 분석하고, 3장에서 다채널 벡터 기반의 가상 음원 생성 알고리즘을 소개한다. 4장에서는 제안된 알고리즘을 대칭 혹은 비대칭의 다채널 스피커 배치 환경에서 기존의 패닝 알고리즘과 비교 실험을 통하여 성능을 분석하였으며, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 다채널 스피커 배치와 가상 음원 생성 알고리즘

2.1. 다채널 스피커 배치

스피커 환경에서 레벨 패닝 알고리즘을 사용하는 경우, 스피커 사이의 공간에 대해 음상이 퍼짐으로 인해, 음원의 방향성이 부정확해지는 문제점이 생길 수 있다. 이러한 문제를 해결하고 음원의 방향성을 더 정확하게 만들기 위해서 시스템적으로는 추가적인 스피커를 두 스피커 사이에 배치하기도 한다. ITU 3/2 스피커 배치에서 전방에 기존의 스테레오 배치에 센터 채널을 추가한 것이 그러한 예이다 [4]. 스피커를 삽입하는 이유는 수평 시야각이 넓어진 HD급 콘텐츠의 전방에서 음원의 방향성을 향상시키기 위한 것으로 이를 통하여, 좌우 스피커로부터 각도상으로 먼 정면 부근에서의 방향성을 더 정확하게 생성할 수 있었다. 그림 1에서도 이와 같이 스테레오의 중앙에 추가적인 스피커가 더해진 다채널 스테레오 스피커 (multispeaker stereo) 환경을 나타낸 것으로, 이러한 다채널 스피커 환경에서는 기존과 다른 새로운 다채널 음원 패닝 알고리즘이 필요하다 [8].

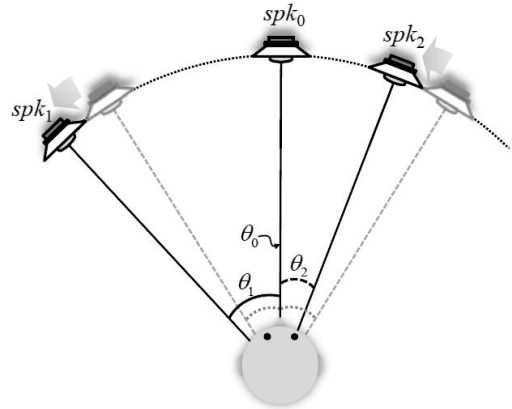


그림 1. 임의의 각도의 다채널 스피커 배치
Fig. 1. Arbitrary angle-positioned multichannel format.

다채널 음원 패닝 알고리즘의 목적은 다채널 환경에서 가장 정확한 음원의 방향성을 얻기 위한 최적의 채널 패닝 계인을 계산하기 위한 것이다. 다채널 스피커 환경에서의 패닝 알고리즘에 대한 연구는 Gerzon으로부터 현재까지 많은 연구가 계속해서 이루어지고 있으며, 좌우 스테레오 채널이 센터로부터 같은 크기의 각도로 대칭인 경우뿐만 아니라, 비대칭인 경우, 그리고 전방 채널 환경 뿐만 아니라 측후방 채널까지 청취자를 둘러싼 환경에 대한 연구로 확대되고 있다 [3-12]. 본 연구에서는 음원의 방향성 생성에 중요한 다채널 스피커 배치의 대칭 또는 임의의 각도의 비대칭 환경에 적합한 가상 음원 생성 알고리즘에 대해 제안한다.

2.2. 가상 음원 생성을 위한 벡터 기반의 패닝 알고리즘

스피커를 사용하여 임의의 방향에서 가상 음원을 생성하기 위한 패닝 알고리즘은 사인 법칙과 탄젠트 법칙을 기반으로 발전하였다. 사인 법칙은 대칭의 스테레오 배치에서 스피커 사이의 공간 상의 임의의 각도에 대한 두 스피커에 곱해지는 채널 계인을 계산하는 방법을 제공하고 있으며, 탄젠트 법칙은 청취자의 머리가 음원이 들리는 방향으로 약간씩 치우치는 상황에서 사인 법칙보다 정확한 가상 음원의 방향감을 제공하는 것으로 알려져 있다. 이후, Pulkki에 의해서 제안된 VBAP 방법은 탄젠트 법칙의 패닝 계인 계산 방법을 토대로 하고 있으며, 기존의 제한된 스피커 각도 환경에서 벗어나 다양한 스피커 각도 환경에 대해서 적용 가능한 벡터 기반의 패닝 알고리즘이라는데 의미를 가진다 [7]. 스피커의 배치 각도에 따른 벡터 기반의 수식을 통해 계산되는 VBAP 방법은 먼저 다음과 같은 수식을 통해 스피커와 가상 음원, 그리고 패닝 계인의 관계가 정의된다.

$$p^T = gL_{12}, \text{ where } g = [g_1 g_2], L_{12} = [l_1 l_2]^T \quad (1)$$

여기서 l_1 과 l_2 은 스피커쌍 (pair-wise)의 두 스피커의 x, y 수평면 상의 벡터를 나타내며, p 는 패닝 계인 g 에 의하여 스피커 사이 임의의 각도로 방향성을 가지는 가상 음원의 벡터를 나타낸다. 위의 스피커와 가상 음원 벡터의 관계식으로부터 각 스피커에 곱해지는 패닝 계인은 다음과 같이 간단히 계산할 수 있다.

$$g = p^T L_{12}^{-1} \quad (2)$$

위와 같은 스테레오 스피커쌍에 대한 VBAP 방법은 다 채널 써라운드 스피커 환경에 대한 패닝 계인 계산에도 적용 가능하다 [7]. 예를 들어, 그림 1과 같은 세 개의 스피커 사이에서 가상 음원을 만들 경우, 센터 채널을 기준으로 좌우의 스피커와 센터 스피커가 스피커쌍을 이룬 $\theta_1 \sim \theta_0$ 와 $\theta_0 \sim \theta_2$ 의 각각의 벡터를 사용하여 $\theta_1 \sim \theta_2$ 각도 사이 모든 방향의 가상 음원을 만들 수 있다. 이처럼 VBAP에서 제안한 다채널 환경에서의 패닝 계인에 대한 각도에 따른 값은 그림 2에 나타나 있다. 실선은 좌우 두 스테레오 스피커를 이용한 패닝 계인의 결과이고, 점선은 센터 스피커를 포함한 다채널 스피커를 이용한 패닝 계인의 결과이다.

스피커 시스템 환경에서 가상 음원을 생성하기 위한 패닝 알고리즘은 음원의 방향감이 모든 방향에서 한 개의 스피커를 이용하여 음원이 재생되는 것과 같이 점형 (point-like)에 가까운 경우, 가장 좋은 패닝 성능을 보인 것으로 평가할 수 있다. 하지만 일반적으로 스피커로부터 먼 방향을 패닝할수록 가상 음원의 음상이 퍼지는 블러링 (spatial blurring) 현상이 증가하기 때문에 음원의 방향감 즉, 패닝 알고리즘의 성능에 영향을 미치게 된다 [13]. 특히, 이러한 음상의 퍼짐이 스피커로부터의 거리에 따라 다르게 발생하는 현상은 VBAP를 비롯한 기존의 스피커쌍 패닝 알고리즘들에서 공통적으로 나타나는 문제점이다. 예를 들어, 그림 1에서 θ_1 으로부터 θ_2 까지 움직이는 음원이 세 채널 스피커에 대한 VBAP 패닝 방법으로 생성되는 경우, 음원은 좌우 스피커 부근과 센터 스피커 부근에서는 비교적 음상의 퍼짐 현상이 적은 반면, 스피커로부터 먼 $\theta_1 \sim \theta_0$ 와 $\theta_0 \sim \theta_2$ 의 중심 방향 부근에서는 음상의 퍼짐이 증가할 것이다. 이럴 경우, 움직이는 음원의 방향감 성능은 음상의 퍼짐 현상으로부터 패닝 각도에 따라 불규칙하게 영향을 받는 문제가 발생한다.

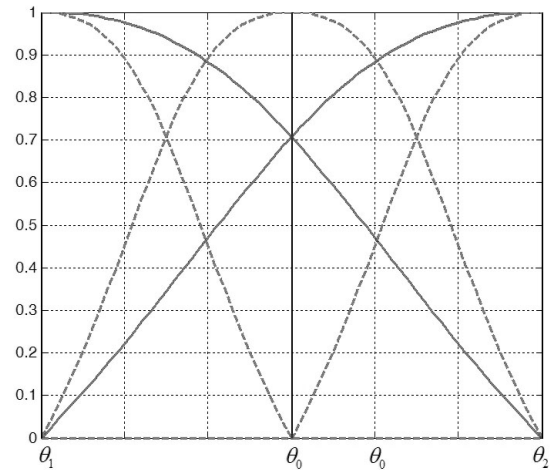


그림 2. 가상 음원의 방향 각도에 따른 VBAP 패닝 계인값 : 그림 1의 대칭인 스피커 환경 ($|\theta_1 - \theta_0| = |\theta_2 - \theta_0|$)에 대한, 좌우 두 채널 스피커에 대한 패닝 계인 (실선)과 세 채널 스피커에 대한 패닝 계인 (점선)
 Fig. 2. Panning gains calculated by VBAP : in the multichannel format as Fig. 1, (solid line) two-channel panning gains and (dashed line) three-channel panning gains.

톱니바퀴 효과라고도 불리는 이러한 스피커쌍 패닝 알고리즘의 문제점을 해결하기 위하여 Pulkki는 VBAP 이후에 MDAP라는 새로운 패닝 알고리즘을 제안하였다 [8-9].

MDAP는 하나의 음원을 여러개의 방향 벡터로 동시에 패닝하여 한 방향의 가상 음원을 생성하는 알고리즘으로, 기존의 VBAP를 포함한 스피커쌍 패닝이 가지는 위와 같은 불규칙한 음상 변화 문제를 줄일 수 있는 방법이다 [9]. MDAP에서 두 개의 음원 벡터는 각각 VBAP 패닝 방법으로 채널 계인이 계산되며, 이들 사이의 각도를 조절함으로써 음상의 퍼지는 정도를 조절할 수 있다. 하지만 MDAP 패닝 알고리즘이 가지는 문제점은 VBAP의 성능에 의해서 발생한다. 즉, 각각의 음원 벡터를 생성하는 VBAP가 측방 혹은 후방에서 그 성능이 떨어지기 때문에 MDAP의 패닝 성능 또한 측방과 후방에서 저하되는 문제점을 가지고 있다 [10]. VBAP의 장점은 임의의 스피커 각도에 대해서 모두 적용 가능하다는 것이지만, 측후방에 대해서는 인간의 두 귀의 청각적 특성에 의해 패닝 성능이 떨어질 수 있기 때문에, MDAP도 이러한 VBAP의 특성으로 인해 정면으로부터 먼 측면 각도를 패닝할수록 방향감의 오차가 커지게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여, 본 논문의 3장에서는 기존의 VBAP와 MDAP 패닝 알고리즘의 가상 음원 생성에 따른 문제점을 개선할 수 있는 새로운 다채널 벡터 기반의 패닝 알고리즘을 제안한다.

III. 다채널 벡터 기반의 가상 음원 생성 알고리즘의 제안

3.1. 다채널 벡터 기반의 패닝 계인

본 장에서는 그림 1의 대칭 혹은 비대칭의 임의의 다채널 스피커 배치에서 최적의 패닝 계인값을 구하기 위한 벡터 기반의 계산 방법을 제안한다. 제안된 패닝 계인 알고리즘은 기존의 스피커쌍을 이용한 패닝 방법이 가진 문제를 해결하기 위하여 MDAP와 같은 다채널 스피커쌍을 동시에 이용하는 방법을 사용하고 있다. 그럼에도 VBAP와 마찬가지로 다양한 각도의 다채널 스피커 배치에 적용 가능하고 간단한 연산을 통해 패닝 계인을 구할 수 있는 벡터 기반의 알고리즘이므로, 기존의 패닝 알고리즘들에 비해 더 정확한 패닝 음원을 쉽게 생성할 수 있는 장점을 가지고 있다.

그림 1과 같은 다채널 스피커 배치에 대해서, 다채널 스피커 벡터 L_{012} 와 이들 스피커 채널의 패닝 계인 벡터 g , 그리고 방향성을 가지는 가상 음원의 벡터 p 의 관계는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$p^T = gL_{012}, \text{ where } g = [g_0 g_1 g_2], L_{012} = [l_0 l_1 l_2]^T \quad (3)$$

VBAP에서는 세 채널 이상의 벡터 기반의 수식을 triplet-wise 패닝으로써 수직 방향이 포함된 3차원 공간의 방향감을 생성할 때 사용하였다 [7,9]. 제안된 알고리즘은 수평면에 위치한 다채널 스피커 환경에서 한 쌍의 스피커만을 사용하는 것이 아닌, 수평면 상의 다수의 스피커를 동시에 사용하여 보다 정확한 가상 음원의 방향감을 생성하기 위한 것으로 스피커 쌍을 이용한 패닝 방법과 차이를 가진다. 수식 (1)과 마찬가지로, 가상 음원의 벡터는 스피커 벡터에 채널에 따른 패닝 계인값이 곱해져 결정된다. 하지만 다채널 스피커쌍을 이용하는 경우, 수식 (2)와 같은 스피커 벡터 행렬의 역행렬값을 구하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 주어진 p 와 L_{012} 에 대한 패닝 계인 g 을 얻기 위하여, LS (Least-squares)의 최적화 해법에 의한 수도 역행렬 (*pseudoinverse*) 혹은 Moore-Penrose의 역행렬 계산 방법을 사용하여 다음과 같이 패닝 계인을 계산한다 [14].

$$g = p^T L_{012}^+ \quad (4)$$

위 식에서 L_{012} 과 같은 비대칭 행렬 X 에 대한 수도 역

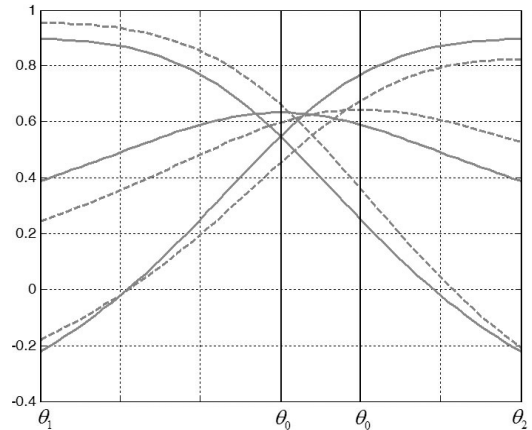


그림 3. 수도 역행렬을 이용하여 계산된 벡터 기반의 최적 패닝 계인값 : 그림 1의 대칭인 스피커 환경 ($|\theta_1 - \theta_0| = |\theta_2 - \theta_0|$)에 대한 패닝 계인 (실선)과 비대칭인 스피커 환경 ($|\theta_1 - \theta_0| \neq |\theta_2 - \theta_0|$)에 대한 패닝 계인 (점선)

Fig. 3. Optimal multichannel panning gains by *pseudoinverse* matrixing : (solid line) symmetric case ($|\theta_1 - \theta_0| = |\theta_2 - \theta_0|$) and (dashed line) asymmetric case ($|\theta_1 - \theta_0| \neq |\theta_2 - \theta_0|$).

행렬은 $X^+ = (X^T X)^{-1} X^T$ 를 통해 얻을 수 있다. 그리고 스피커로부터 동시에 재생되어 청취자에 도달하는 음원의 에너지값은 가상 음원의 거리감에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 방향에 상관없이 음원의 에너지를 일정하게 유지하기 위하여 다음과 같은 정규화 과정을 적용한다.

$$g = \frac{g}{\sqrt{g_0^2 + g_1^2 + g_2^2}} \quad (5)$$

이렇게 얻어진 세 채널 스피커 쌍의 패닝 계인이 그림 3에 나타나 있다. 그림 1과 같은 다채널 스피커 배치에서 센터 스피커를 중심으로 대칭인 경우에 대한 패닝 계인이 실선으로 나타나 있고, 비대칭인 경우에 대한 패닝 계인이 점선으로 나타나 있다. 이렇게 얻어진 다채널 스피커 쌍의 패닝 계인 최적값은 좌우 양극 스피커 부근에서 음(-)의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 기존의 패닝 알고리즘에 대한 연구에서도 청취자의 한 지점에서의 최적의 패닝 계인값을 구하기 위하여 음의 값을 함께 사용하는 경우가 있다 [8,12]. 하지만 이러한 음의 패닝 계인은 실제로는 청취자의 귀에 도달하는 음원의 위상에 영향을 주어, 특정 주파수에서는 역위상 (out-of-phase) 신호로 인해 음원이 상쇄되는 문제를 발생할 수 있고, 약 1.5 kHz 이하 대역에서는 음원의 방향감에 오차를 발생할 가능성이 있다 [11]. 따라서 본 논문에서는 제안된 다채널 스피커쌍을 이용한 패닝 방법에 대해서 음의 패닝 계인으로 인한 문제점을 막을 수 있는 방법을 3.2 장에서 제안한다.

3.2. 센터 채널 게인 조절 함수의 적용

다채널 스피커를 사용한 패닝 알고리즘은 일반적으로 한 지점으로 가정된 스위트스팟에서 가장 정확한 방향감을 만들기 위한 연구가 진행되어 왔다. 특히, 다채널 스피커 배치 환경에서 Gerzon은 센터 스피커를 기준으로 대칭인 스피커를 이용하여, 최적의 패닝 계인을 계산하였다 [8]. 마찬가지로 ITU 3/2 채널 환경에서 정면을 기준으로 대칭인 써라운드 스피커 배치에서 모든 방향에서 정확한 패닝값을 실험적으로 얻은 결과를 제시한 연구도 있었다 [12]. 이들 최적의 패닝 계인을 제안한 알고리즘은 대칭인 스피커 배치를 가정한 것과 양과 음의 계인을 모두 사용하고 있다는 공통점을 가지고 있다. 하지만 한 지점의 매우 한정된 청취 위치를 가정하고 있기 때문에 VBAP와 같은 스피커쌍을 이용한 패닝 방법에 비해 스위트스팟이 좁고, 특히 음의 패닝 계인 사용으로 인해 발생 가능한 문제점에 민감하다는 단점을 가지고 있다 [11,13]. 본 논문에서는 3.1장에서 비대칭의 스피커 배치에서도 다채널을 동시에 사용하는 패닝 알고리즘을 제안하였다. 하지만 그림 3에 나타난 것과 같이, 기존의 연구와 마찬가지로 측면 스피커에 가까운 방향에 대해서 음의 패닝 계인을 가지기 때문에 본 장에서는 이를 해결하기 위한 센터 채널 게인 조절 함수를 제안한다.

센터 채널 게인 조절 함수는 다음과 같은 요구 조건을 만족시켜야 한다. 첫째, 원하는 모든 방향의 패닝에 대해서 모든 스피커 채널에서 음의 계인이 얻어지지 않도록 해야 한다. 둘째, 스피커와 가상 음원의 벡터 기반의 다채널 패닝 계인의 계산 방법에 부가적인 후처리 방법을 사용하지 않아야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위하여 스피커 벡터, 즉 채널 벡터를 각도에 따라 조절하는 방법을 제안하였다. 이전 장에서 다채널 벡터에 대한 행렬을 기반으로 최적의 패닝 계인을 찾았으나, 측면 방향의 패닝에 대해서 그 반대쪽 스피커 채널이 음의 패닝 계인을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 이는 두 채널 스피커쌍 패닝의 경우에는 양의 값만 얻어지는 것과 비교하여, 세 채널 스피커쌍의 경우에 삽입된 센터 채널의 영향이 원인이 된 것을 알 수 있다. 이를 토대로 본 논문에서는 중간에 위치하는 스피커 벡터의 크기를 패닝 각도에 따라 조절해 줌으로써 음의 패닝 계인이 얻어지는 문제를 해결할 수 있었다.

$$L'_{012} = W(\theta)L_{012}, \text{ where } W(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \delta(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

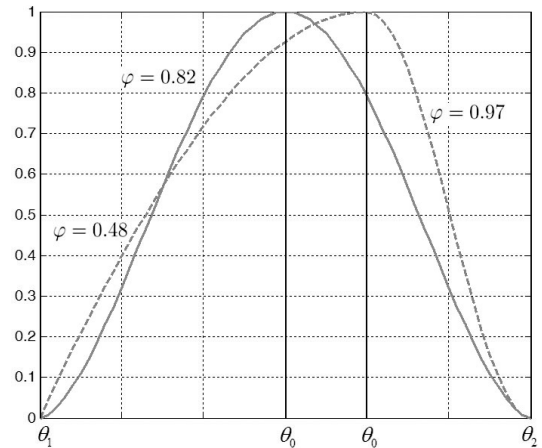


그림 4. 음의 패닝 계인을 막기 위한 각도에 따른 센터 채널 게인 조절값: 그림 1의 대칭인 스피커 환경 ($|\theta_1 - \theta_0| = |\theta_2 - \theta_0|$)에 대한 조절값 (실선)과 비대칭인 스피커 환경 ($|\theta_1 - \theta_0| \neq |\theta_2 - \theta_0|$)에 대한 조절값 (점선)

Fig. 4. Angle-dependent gain control function for nonnegative panning gain : (solid line) symmetric case ($|\theta_1 - \theta_0| = |\theta_2 - \theta_0|$) and (dashed line) asymmetric case ($|\theta_1 - \theta_0| \neq |\theta_2 - \theta_0|$).

다음과 같이 수식 (4)에서 사용된 스피커 벡터 행렬에 대해서 센터 채널 게인 조절 함수 $W(\theta)$ 를 적용하였다. 센터 채널 게인 조절 함수는 가장 바깥쪽 스피커를 제외한 중간 각도에 위치하는 스피커의 정규화된 벡터에 패닝 각도 θ 에 따라 변하는 조절값 $\delta(\theta)$ 을 곱해주는 역할을 한다. $\delta(\theta)$ 는 센터 채널 스피커 각도에서 1 값을 갖고, 측면 방향의 패닝 각도에 근접할 수록 점점 줄어들어 0 값을 갖도록 다음과 같은 수식에 의해 정의된다.

$$\delta(\theta) = \left\{ 0.5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi\theta}{N-1} \right) \right) \right\}^\varphi, \text{ where } N = 2|\theta_0 - \theta_p|, p = 1 \text{ or } 2 \quad (7)$$

패닝 각도에 따른 조절값 $\delta(\theta)$ 을 결정하는 변수 φ 는 센터 채널을 중심으로 인접한 두 스피커까지의 각도에 따라 다른 값을 갖도록 설정할 수 있다. 왜냐하면 그림 1과 같이 센터 채널을 중심으로 다채널 스피커 배치가 비대칭인 경우, 센터 채널의 영향이 좌우 각도에 따라 다르게 나타나기 때문이다. 즉, 센터 스피커로부터의 각도 $|\theta_0 - \theta_p|$ 의 크기가 작을수록 센터 스피커의 영향이 커지기 때문에, 변수 φ 를 상대적으로 큰 값을 사용하여 음의 패닝 계인이 얻어지는 것을 막을 수 있다.

이와 같이 센터 채널 게인 조절 함수의 사용은 앞서 음의 패닝 계인을 막기 위해 요구된 조건을 모두 만족시킬 수 있다. 또한 대칭의 다채널 스피커 배치에서 뿐만 아니라 비대칭의 스피커 배치 환경에서도 적용 가능하다.

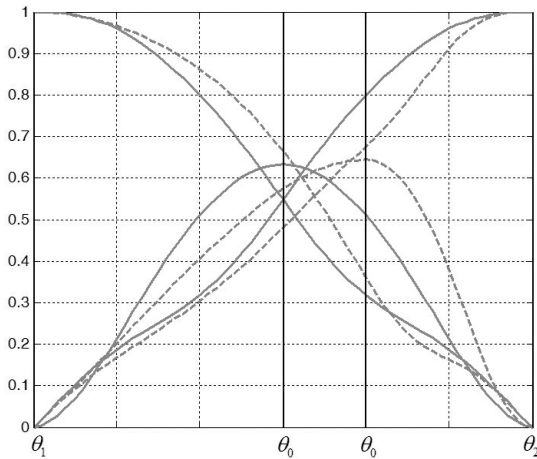


그림 5. 센터 채널 게인 조절 함수가 적용된 벡터 기반의 패닝 게인값 : 그림 1의 대칭인 스피커 환경 ($|\theta_1 - \theta_0| = |\theta_2 - \theta_0|$)에 대한 패닝 게인 (실선)과 비대칭인 스피커 환경 ($|\theta_1 - \theta_0| \neq |\theta_2 - \theta_0|$)에 대한 패닝 게인 (점선)

Fig. 5. Proposed multichannel panning gain with nonnegative gain control function : (solid line) symmetric case ($|\theta_1 - \theta_0| = |\theta_2 - \theta_0|$) and (dashed line) asymmetric case ($|\theta_1 - \theta_0| \neq |\theta_2 - \theta_0|$).

며, 변수값의 크기를 조절하는 것만으로도 패닝 성능을 높일 수 있는 장점을 가지고 있다. 그림 1의 다채널 스피커 배치에서의 위 수식 (7)의 예가 그림 4에 나타나 있다. 적용된 변수 φ 값은 대칭인 경우 ($30^\circ, 0^\circ, -30^\circ$)와 비대칭인 경우 ($40^\circ, 0^\circ, -20^\circ$)에 대해 실험적으로 얻어진 결과이다. 비대칭의 다채널 스피커 배치의 경우, 상대적으로 좁은 각도에 대해 더 큰 φ 값을 사용하여 음의 패닝값을 막고 더 좋은 패닝 성능을 얻을 수 있었다. 대칭의 스피커 배치의 경우에는 센터 채널을 기준으로 좌우로 같은 φ 값이 사용되었다. 모든 각도에 대해 더 좋은 패닝 성능을 얻기 위해서는 그림 4의 센터 채널 게인 조절값을 결정하는 수식 (7)에 대해 더 높은 차수의 삼각 함수를 사용함으로써 가능할 것이다. 그림 5에는 그림 3의 패닝 결과 결과에 대해 제안된 센터 채널 게인 조절 함수가 적용된 패닝 게인 결과가 나타나 있다. 본 논문에서 제안한 양의 부호값만을 갖으면서 기존의 패닝 알고리즘보다 정확한 패닝 성능을 갖는 다채널 스피커 환경에서의 가상 음원 생성 알고리즘을 MVB NAP (Multiple-wise Vector Base Nonnegative Amplitude Panning)이라고 부르겠다.

IV. 실험 및 고찰

다채널 스피커 환경에서 제안된 가상 음원 생성 알고리즘의 패닝 성능 평가를 위하여 주관적인 음질 평가가 이



그림 6. MOA 방법을 적용한 청취 실험에 사용된 PC 프로그램
Fig. 6. User interface of the test program using the method of adjustment (MOA).

루어졌다. 주관적인 음질 평가에서는 패닝 성능을 보다 정확하게 평가하기 위하여, 실험 참가자가 직접 레퍼런스 음원 방향으로 가상 음원을 생성하는 패닝 게인을 조절하는 MOA (method of adjustment) 방법을 적용하였다 [10,15]. 테스트 신호는 2 초 길이의 핑크 노이즈 (pink noise)가 사용되었으며, 레퍼런스는 원하는 패닝 각도에 놓인 모노 스피커에서 같은 테스트 신호를 재생하였다. 다채널 스피커는 그림 1과 같이 총 세 개의 스피커를 대칭 ($|\theta_1 - \theta_0| = |\theta_2 - \theta_0|$)과 비대칭 ($|\theta_1 - \theta_0| \neq |\theta_2 - \theta_0|$) 경우의 두 가지 경우에 대해서 테스트하였고, 각각의 스피커 각도는 청취자가 바라보는 0° 의 정면을 기준으로 ($30^\circ, 0^\circ, -30^\circ$)과 ($40^\circ, 0^\circ, -20^\circ$)으로 배치하였다.

실험에는 패닝 성능 평가와 음질 비교 실험의 경험을 가진 총 다섯 명의 오디오 엔지니어들이 참여하였으며, 이들은 본 실험에 앞서 그림 6과 같은 MOA 방법 및 PC 프로그램에 대해 적응할 수 있도록 충분한 연습이 이루어졌다. 음질 평가에 사용된 스피커는 일반적으로 쉽게 구할 수 있는 앰프가 내장된 중저가의 스피커가 사용되었으나, 레벨 패닝의 정확성을 높이기 위하여 실험에 들어가기 전에 청취자의 위치에서 사운드 레벨 미터를 사용하여 각각의 음압을 일정하게 맞추었다. 청취자로부터 스피커까지의 거리는 모두 1.5 m로 같게 맞추었으며, 패닝 각도는 좌우 스피커 사이의 방향에 대해 5° 간격으로 테스트 하였다.

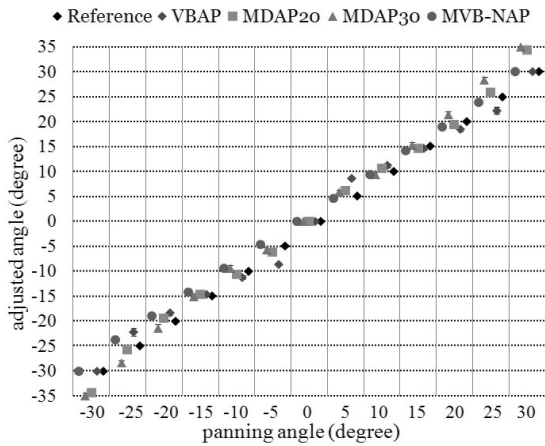


그림 7. 청취 실험 결과: 대칭인 스피커 환경 ($|\theta_1 - \theta_0| = |\theta_2 - \theta_0|$)에 대한 패닝 각도 MOA 결과
 Fig. 7. Subjective test results with MOA : panning angle of the symmetric case ($|\theta_1 - \theta_0| = |\theta_2 - \theta_0|$).

패닝 성능 평가에는 기존의 레벨 패닝 방법들이 함께 비교 실험되었다. 그림 2에 나온 세 채널 스피커에 대한 VBAP 방법 [7]과 이를 개선한 MDAP 방법 [9]을 함께 실험하였으며, MDAP의 경우 모든 실험 각도를 만들기 위해서는 좌우 스피커 바깥으로 추가적인 스피커가 필요하기 때문에 $\pm 90^\circ$ 에 추가 스피커를 배치하였다. 그리고 [9]에서 제안한 것과 같이 음상의 퍼짐을 조절하기 위한 두 패닝 벡터 사이의 각도 (spread angle)를 20° 와 30° 두 가지에 대해 모두 비교하였다. 이는 두 가지 MDAP 방법의 성능 비교를 통해서 측면 방향일수록 패닝 성능이 떨어지는 VBAP의 영향을 확인하기 위한 것이다. 제안된 패닝 방법에 대해서는 그림 4에 표시된 것과 같이 변수 φ 을 대칭인 경우 0.82로, 비대칭인 경우, 넓은 사이 각도 (40°)에 대해 0.48, 좁은 사이 각도 (20°)에 대해 0.97로 설정하였다.

먼저, 대칭인 스피커 환경에 대한 청취 실험 결과가 그림 7, 9에 나타나 있다. 그림 7은 5° 단위의 패닝 각도에서의 세 가지 패닝 방법들의 대칭인 다채널 스피커 배치에서의 MOA 실험 결과이고, 그림 9는 이들 결과에 대해 원하는 패닝 각도로부터의 패닝 오차를 확인한 것이다. 실험 결과에서 0° 인 정면에서는 모든 방법이 정확한 패닝 결과를 보였다. VBAP의 경우, 스피커가 위치한 30° , 0° , -30° 방향에서는 정확한 패닝 결과가 얻어졌지만, 스피커 부근의 방향에서는 톱니 바퀴 효과에 의해 스피커 쪽으로 치우친 패닝 결과가 얻어진 것을 확인할 수 있다. MDAP의 경우에는 그러한 스피커 부근 방향에서의 치우침이 적었지만 측면 방향으로 갈수록 패닝의 정확성이 떨어지는 것이 확인되었다. 이는 측면쪽의 벡터를 만드

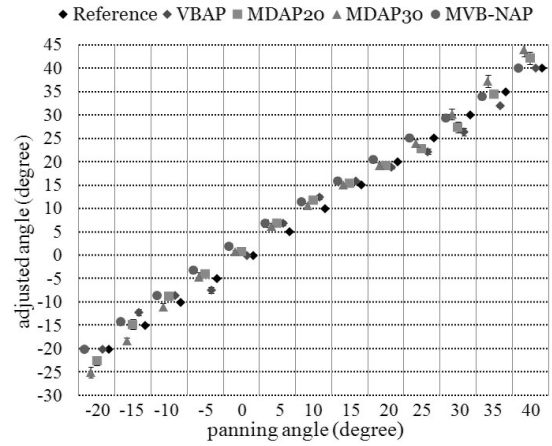


그림 8. 청취 실험 결과: 비대칭인 스피커 환경 ($|\theta_1 - \theta_0| \neq |\theta_2 - \theta_0|$)에 대한 패닝 각도 MOA 결과
 Fig. 8. Subjective test results with MOA : panning angle of the asymmetric case ($|\theta_1 - \theta_0| \neq |\theta_2 - \theta_0|$).

는 패닝 성능이 정면쪽 벡터에 비해 상대적으로 떨어지기 때문에 그 영향이 MDAP 최종 패닝 성능에도 반영된 것으로 분석할 수 있다. 이러한 특성은 spread angle이 30° 인 경우가 측면쪽 벡터가 더 벌어지기 때문에 spread angle이 20° 인 경우보다 패닝 오차가 더 큰 것을 통해 다시 확인할 수 있다. 이에 비해 제안된 MVB-NAP 패닝 방법은 좌우 $15^\circ \sim 20^\circ$ 부근을 제외한 모든 각도에서 MDAP 패닝 방법보다 정확한 패닝 결과를 보였다. 또한 평균 오차 각도가 2° 이내로 작았으며, 모든 방향에서 패닝 다른 방법에 비해 균일한 성능을 보여주었다.

다음으로, 비대칭인 스피커 환경에 대한 청취 실험 결과가 그림 8, 10에 나타나 있다. 그림 8은 5° 단위의 패닝 각도에서의 세 가지 패닝 방법들의 비대칭인 다채널 스피커 배치에서의 MOA 실험 결과이고, 그림 10은 이들 결과에 대해 원하는 패닝 각도로부터의 패닝 오차를 확인한 것이다. 대칭인 스피커 배치에서와 달리 정면인 0° 부근에서의 패닝 결과는 스피커를 하나만 이용하는 VBAP 방법을 제외하고 모든 방법에서 오차가 발생하였다. 하지만 VBAP 패닝 방법의 경우, 톱니 바퀴 효과에 의해 스피커 부근 방향에서 스피커 쪽으로 패닝 방향이 치우치는 결과를 다시 확인할 수 있었다. MDAP의 경우에도 VBAP의 결과와 비슷한 오차 경향을 보였으나, $-5^\circ \sim 20^\circ$ 부근에서는 전체적으로 2° 이내의 균일한 오차를 보이며 비교적 정확한 패닝 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 대칭인 경우에서처럼 측면 방향의 패닝에 대해 성능이 급격히 나빠지는 것을 확인할 수 있었는데, spread angle이 30° 인 경우에는 최대 평균 5° 에 가까운 오차를 보이기도 하였다. 제안된 MVB-NAP 패닝 방법은 정면 방향에서는 다

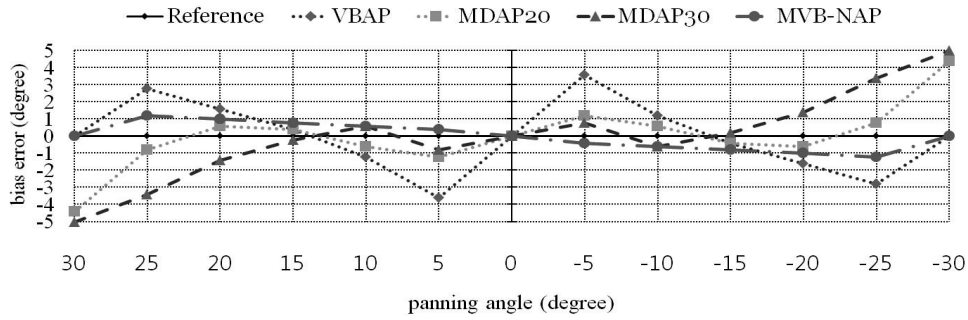


그림 9. 청취 실험 결과 : 대칭인 스피커 환경 ($|\theta_1 - \theta_0| = |\theta_2 - \theta_0|$)에 대한 패닝 오차 결과
 Fig. 9. Subjective test result : panning error of the symmetric case ($|\theta_1 - \theta_0| = |\theta_2 - \theta_0|$).

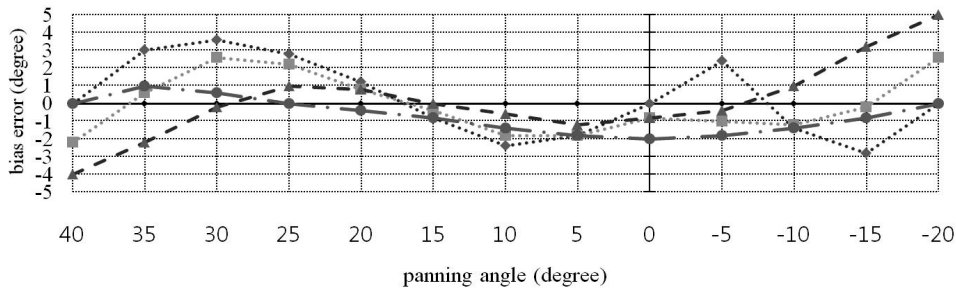


그림 10. 청취 실험 결과 : 비대칭인 스피커 환경 ($|\theta_1 - \theta_0| \neq |\theta_2 - \theta_0|$)에 대한 패닝 오차 결과
 Fig. 10. Subjective test result : panning error of the asymmetric case ($|\theta_1 - \theta_0| \neq |\theta_2 - \theta_0|$).

른 방법에 비해 오차가 가장 컸던 반면, $20^\circ \sim 30^\circ$ 부근에서는 가장 정확한 패닝 성능을 보였다. 그리고 대칭인 스피커 배치에서의 결과와 마찬가지로 모든 방향에서 평균 2° 이내의 오차를 보여 균일한 패닝 성능을 보인 것을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제안된 MVB-NAP 방법은 양의 패닝 계인을 사용하고 벡터 기반의 패닝 계인 계산 방법을 사용한 기존의 레벨 패닝 방법들과 비교하여 패닝 성능 측면에서 보다 정확한 성능을 가진 것을 확인할 수 있었다. 그리고 VBAP나 MDAP와 같이 비대칭의 임의의 스피커 배치에 대해서도 모두 적용 가능한 장점을 가지고 있으나, 패닝 각도에 따라 성능의 차이를 완전히 제거하지는 못하였다. 모든 패닝 각도에 대해서 패닝 오차를 줄이고 음원의 방향성을 정확하게 생성하기 위해서는 보다 정밀한 센터 채널 계인 조절 함수의 설계가 필요할 것이다. VBAP를 비롯한 두 채널 스피커 쌍을 이용하는 패닝 방법들의 문제점이 패닝 실험 결과에서 다시 확인되었다. 스피커가 놓인 방향에 대해서는 하나의 스피커를 사용하기 때문에 정확한 패닝이 이루어지는 반면, 스피커로부터 먼 방향일수록 패닝 오차가 커지는 문제점이 나타났다. 이를 개선한 MDAP의 경우, 전체적으로 고른 패닝 결과를 얻을 수 있었지만, 측면 방향에 대해서 정확성이 급격히 떨어지는 한계를 보였다.

V. 결론

다채널 스피커 시스템에서 가상 음원 생성 알고리즘은 원하는 패닝 각도로 정확하게 방향감을 생성하기 위해 연구되어 왔다. 또한 다채널 스피커를 이용한 가장 좋은 패닝 성능은 음상이 점형에 가깝게 만들어지는 것이기 때문에 이를 위한 다양한 패닝 알고리즘이 제안되었고, 이들 패닝 계인값은 보다 정확한 패닝 성능을 보장하기 위하여, 음의 값을 사용하기도 하였다. 하지만 이러한 패닝 알고리즘은 스피커 배치에 따라 성능에 영향을 받기 쉽고 또한 청취자의 위치도 스위트스팟 문제에 의해 자유롭지 못한 단점을 가지고 있다. 특히, 음의 패닝 계인은 매우 제한적인 청취 위치에 대해서만 패닝 성능을 보장한 것이며, 역위상의 문제로 음색의 변화도 일으킬 수 있다. 때문에 본 논문에서는 양의 부호를 갖는 패닝 계인만을 이용하여 다채널 스피커 시스템에서 간단한 계산 방법으로 정확한 패닝 계인을 얻기 위한 가상 음원 생성 알고리즘인 MVB-NAP를 제안하였다. 제안된 방법은 VBAP와 같이 벡터 기반의 계산 방법을 토대로 매우 간단한 연산량만으로 임의의 다채널 스피커 배치에서의 패닝 계인을 계산할 수 있다. 그리고 양의 값만을 사용하기 때문에 음의 패닝 계인에 의한 문제로부터 자유로울 수 있으며, 센

터 채널 게인 조절 함수의 변수값의 설정에 따라 쉽고 세밀하게 패닝 각도를 조정할 수도 있다. MOA를 사용한 청취 실험 결과 기존의 스피커 쌍을 이용한 레벨 패닝 방법과 다채널 스피커 쌍을 이용한 레벨 패닝 방법보다 대등하거나 더 좋은 패닝 성능을 보였으며, 특히 모든 각도에서 고른 성능을 보였다. 앞으로 다채널 스피커 배치 뿐만 아니라 써라운드 스피커 환경에서 적용 가능한 가상 음원 생성 알고리즘으로 확장할 것이며, 센터 채널 게인 조절 함수의 가장 최적의 값을 찾기 위한 연구를 이어갈 것이다.

참 고 문 헌

1. J. Blauert, *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*, Cambridge, MA: MIT Press, 1997.
2. F. Rumsey, *Spatial Audio*, Focal Press, Music Technology Series, 2001.
3. M. A. Gerzon, "Hierarchical system of surround sound transmission for HDTV," *AES 92nd Convention*, paper no. 3339, Vienna, Mar. 1992.
4. G. Theile, "The new sound format 3/2-stereo," *AES 94th Convention*, paper no. 3550a, Berlin, Mar. 1993.
5. G. Theile, "On the performance of two-channel and multi-channel stereophony," *AES 88th Convention*, paper no. 2887, Montreux, Mar. 1990.
6. B. Bernfeld, "Attempts for better understanding of the direction-alstereophonic listening mechanism," *AES 44th Convention*, paper no. C-4, Bucharest, Mar. 1973.
7. V. Pulkki, "Virtual sound source positioning using vector base amplitude panning," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 45, no. 6, pp. 456-466, 1997.
8. M. A. Gerzon, "Panpot laws for multispeaker stereo," *AES 92nd Convention*, paper no. 3309, Vienna, Mar. 1992.
9. V. Pulkki, "Uniform spreading of amplitude panned virtual sources," in *Proc. IEEE Workshop on Application of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA)*, New York, USA, 1999.
10. V. Pulkki and T. Hirvonen, "Localization of virtual sources in multichannel audio reproduction," *IEEE Trans. on Speech and Audio Processing*, vol. 13, no. 1, pp. 105-119, 2005.

11. G. Monro, "In-phase corrections for ambisonics," *Int. Computer Music Conf. (ICMC)*, pp. 292-295, Berlin, Germany, 2000.
12. P. G. Craven, "Continuous surround panning for 5-speaker reproduction," *AES 24th Int. Conf. on Multichannel Audio: The New Reality*, paper no. 9, Jun, 2003.
13. V. Pulkki, "Spatial sound generation and perception by amplitude panning technique," PhD thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 2001.
14. S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2002.
15. B. L. Cardozo, "Adjusting the method of adjustment: SD vs DL," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 37, no. 5, pp. 768-792, 1965.

저자 약력

● **전 세 운 (Se-Woon Jeon)**

2007년: 연세대학교 전기전자공학과 (학사)
 2007년 ~ 현재: 연세대학교 전기전자공학과 (석박통합과정)
 ※ 주관심 분야: 오디오 신호처리, 3D 오디오, 멀티채널 사운드 시스템

● **박 영 철 (Young-cheol Park)**

1986년: 연세대학교 전자공학과 (학사)
 1988년: 연세대학교 전자공학과 (석사)
 1993년: 연세대학교 전자공학과 (박사)
 현재: 연세대학교 컴퓨터정보통신공학부 교수
 ※ 주관심 분야: 디지털 신호처리, 오디오 신호처리, 음성 신호처리, 적응 신호처리

● **이 석 필 (Seok-Pil Lee)**

1990년: 연세대학교 전기공학과 (학사)
 1992년: 연세대학교 전기공학과 (석사)
 1997년: 연세대학교 전기공학과 (박사)
 현재: 전자부품연구원 (KETI) 디지털미디어 연구센터 센터장
 ※ 주관심 분야: 디지털방송통신융합시스템, 멀티미디어 신호처리

● **윤 대 희 (Dae Hee Youn)**

1977년: 연세대학교 전자공학과 (학사)
 1979년: Kansas State University (석사)
 1982년: Kansas State University (박사)
 현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
 ※ 주관심 분야: 디지털 신호처리, 적응 신호처리, 음성 신호처리, 오디오 신호처리