

WFS의 원리와 활용에 관하여

On the Principles and Applications of Wave Field Synthesis

유재현*, 심환**, 정현주**, 성공모**, 강경옥*

(Jae-hyoun Yoo*, Shim, Hwan**, Hyunjoo Chung**, Koeng-Mo Sung**, Kyeongok Kang*)

*한국전자통신연구원 방통융합미디어연구부, **서울대학교 전기컴퓨터공학부

(접수일자: 2009년 10월 30일; 채택일자: 2009년 11월 15일)

기존의 디스크리트 멀티채널 오디오 재생 방식에 비해 보다 나은 현장감과 공간감을 제공할 수 있는 Wave Field Synthesis (WFS)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 다수의 라우드스피커를 청취자를 둘러싸는 형태로 설치해야 하는 구조적 제약 및 별도로 가공된 객체 오디오 소스가 있어야 한다는 조건 등으로 인해 대형 청취 공간을 제외하고는 많이 활용되지 못하고 있다. 본 논문에서는 이러한 분세점에 기초하여 가정과 같은 협소한 공간에서도 WFS의 장점을 활용할 수 있는 방안에 대해서 소개한다.

핵심용어: Wave Field Synthesis, WFS, 현장감, 공간감

투고분야: 음향 신호처리 분야 (1.1)

There are many studies on Wave Field Synthesis(WFS) which provides better presence and spaciousness than conventional discrete multichannel audio reproduction methods. However, it has several problems such as the listener-enclosing loudspeaker array and pre-authorized object-based source signal, so it is not widely used except in large-scale listening rooms. This paper presents a method which utilizes the merit of WFS in small listening rooms such as a living room.

Keywords: Wave Field Synthesis, WFS, Presence, Spaciousness

ASK subject classification: Acoustic Signal Processing (1.1)

I. 서론

공간 음향 재생의 역사는 Bell 연구소의 acoustic curtain 개념을 사용하는 입체 음향 재생 방식으로 거슬러 올라간다. acoustic curtain은 다수의 마이크로폰과 라우드스피커가 1:1로 연결되는 형태로, 많은 실험과 시간의 경과로 최종적으로 2채널 스테레오를 사용하게 되었다. 이러한 2채널 입체음향에서 quadraphony, 그리고 최근의 5.1채널시스템까지 많은 멀티채널 오디오 재생 방식이 제안되었으나, 초기 연구 당시부터 이어져오는, 부정확한 가상 음상 위치와 좁은 sweet spot으로 최고의 공간감을 얻을 수 있는 청취 영역이 제한되는 등의 문제점은 해결되지 못하였다. 2001년 초, EU에서는 여러 연구 기관과 대학이 함께 모인 CARROUSO 프로젝트를 통해, 고품질, 고효율의 음장 녹음, 인코딩, 전송, 디코딩,

렌더링이 가능한 오디오 기술을 개발하였다. 이 기술에 있어 중요한 요소가 바로 Wave Field Synthesis (WFS)로서, 음향을 재생하는 새로운 방식으로 제안되었다. WFS는 TU Delft에서 처음 소개되었으며 학술적인 환경에서 성공적인 데모를 보여주었다. 그러나 큰 공간에 많은 라우드스피커를 설치해야 하며, 렌더링을 위해서 객체 별로 구분된 음원을 가지고 있어야 하는 등의 제약 사항으로 인해 현재까지 폭넓은 애플리케이션을 확보하지는 못하고 있다. 본 논문에서는 이러한 WFS 기술의 원리와 제한점, 가정과 같은 협소한 공간에서의 활용 방안과 주요 연구 동향 등에 대해서 논한다.

II. WFS의 원리

WFS는 웨이브 프론트 (wave front) 상의 모든 점은 구형 2차 웨이브 프론트의 점 소스 (point source)로서 작용한다는 호이겐스 이론 (Huygens's principle)에 기반을

두고 있다. 이는 작고 가깝게 배치된 다수의 라우드스피커로 구현할 수 있고 키르히호프-헬름홀츠 적분 (Kirchhoff-Helmholtz integral)과 레일레이 정리 (The Rayleigh's representation theorem) 에 기반한 산술식에 의해 이레이 상의 각각의 라우드스피커에 해당 구동 신호를 제공할 수 있다. 각 라우드스피커로부터 만들어지는 음장의 superposition은 웨이브 필드 (wave field) 를 만들어낸다. 이 기술은 원래의 파형을 정확하게 재생할 수 있게 해주며 가상 음원을 라우드스피커 어레이 뒤나 청취 공간 내부 등 공간상의 어느 곳이나 위치시킬 수 있다는 장점을 갖는다. 또한 진행 방향에 따라서 음압 레벨이 거의 감소하지 않는 특성을 가지는 평면파를 재생할 수 있는 장점도 가지고 있다.

2.1. 키르히호프 - 헬름홀츠 적분 (Kirchhoff - Helmholtz integral)

호이겐스 원리는 wave front 상의 모든 점을 하나의 secondary source로 볼 수 있다는 것으로 그림 1에서 보는 바와 같이 임의의 파면 상의 모든 점은 그 다음 파면을 만들어내는 음원이 되므로, 파면을 추정해가다 보면 최초의 음원 즉 1차 음원을 찾을 수 있게 된다. 음원과 무관하게 부피 V를 가지며 표면적 S로 둘러싸인, 하나 혹은 여러 개의 음원으로 구성된 압장 (pressure field)은 표면에 분포한 단극 (monopole) 혹은 쌍극 (dipole)의 2차 웨이브렛 (secondary wavelet) 들로서 계산이 가능하다 [1, 2].

즉, 이들 wavelet 들의 envelop는 1차 음원 (primary sound sources)을 재생할 수 있으며, 이 때 청취자의 위치에서의 음압의 푸리에변환은 Kirchhoff-Helmholtz integral에 의해 아래 식과 같이 표현된다 [3].

$$p(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{4\pi i} \int_S \left[P(\mathbf{r}_s, \omega) \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} \right) + \frac{\partial P(\mathbf{r}_s, \omega)}{\partial t} \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_s|} \right] dS \tag{1}$$

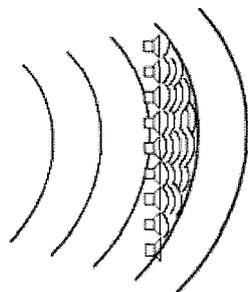


그림 1. 라우드스피커 어레이로 본 호이겐스 원리
Fig. 1. Huygens's principle in loudspeaker array.

Kirchhoff-Helmholtz integral은 닫혀있는 부피V 안에 존재하는 어떤 청취자의 위치에서도 음압과 그레디언트 (gradient)가 알려져 있다면, 1차 음원의 음압 $p(\mathbf{r}, \omega)$ 는 계산해 낼 수 있다는 의미를 가진다. 이는 표면의 적당한 표면압분포 $P(\mathbf{r}_s, \omega)$ 를 통해 음장을 재생할 수 있다는 의미이기도 하다. 위 식에서 앞부분은 쌍극 음원에 관한 식이며, 뒷부분은 단극 음원에 관한 식인데, 쌍극 음원들이나 단극 음원들은 같이 사용해도 되고 한 종류만을 사용해도 위의 수식은 타당하다[4].

2.2. 레일레이 정리 (The Rayleigh's representation theorem)

실제 시스템을 구현하기 위해서는 1차 음원의 영역과 청취 영역을 나누어야 하는데 $z=z_0$ 축을 이용하여 나누면 그림 2와 같이 된다 [1].

이 때 단극 음원은 Rayleigh I integral, 쌍극 음원은 Rayleigh II integral로 바꾸어 쓸 수 있는데 [5], 연속적인 표면의 분포는 실제 라우드스피커로 배치로는 불가능하기 때문에 연속 (continuous) 분포가 아닌 이산 (discrete)된 분포를 갖도록 표현을 하면 아래와 같다.

Rayleigh I:

$$P(\mathbf{r}, \omega) = \frac{j\omega\rho_0}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} V_n(\bar{\mathbf{r}}_s, \omega) \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\bar{\mathbf{r}}_s|}}{|\mathbf{r}-\bar{\mathbf{r}}_s|} \Delta x \Delta y \tag{2}$$

Rayleigh II:

$$P(\bar{\mathbf{r}}, \omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} P_n(\bar{\mathbf{r}}_s, \omega) \frac{1 + jk|\mathbf{r}-\bar{\mathbf{r}}_s|}{jk|\mathbf{r}-\bar{\mathbf{r}}_s|} \cos\phi_s \frac{e^{-jk|\mathbf{r}-\bar{\mathbf{r}}_s|}}{|\mathbf{r}-\bar{\mathbf{r}}_s|} \Delta x \Delta y \tag{3}$$

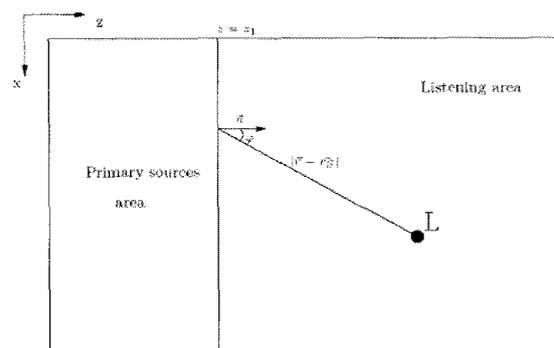


그림 2. Rayleigh 정리
Fig. 2. The Rayleigh's representation theorem.

ρ_0 는 공기 밀도이며, c 는 공기중의 음속이다. k 는 웨이브 넘버이며 V_0 은 \vec{n} 방향으로의 입자속도이다.

여기에 청취자의 양 귀가 수평적으로 위치해 있으므로, 수직적인 파형을 현실적으로 고려하지 않아 평면 배열을 선배열로 간소화하고, 라우드스피커가 구형파를 발생시킨다는 점 등을 고려하여 수식을 전개, 가상 음원에 의해 생성되는 합성 음장으로부터 각 라우드스피커의 구동 함수를 구하면 수식 (4)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$Q(\vec{r}_n, \omega) = S(\omega) \frac{\cos(\theta_n)}{G_n(\theta_n, \omega)} \sqrt{\frac{jk}{2\pi}} \sqrt{\frac{|z-z_1|}{|z-z_0|}} \frac{e^{-jk|r_n-r_0|}}{\sqrt{|\vec{r}_n-\vec{r}_0|}} \quad (4)$$

$e^{-jk|r_n-r_0|}$ 은 가상 음원과 n번째 라우드스피커 사이의 거리에 의해 발생하는 전달 시간을 의미하며, 크기 팩터 $\frac{1}{\sqrt{|\vec{r}_n-\vec{r}_0|}}$ 은 하나의 원통파 (cylindrical wave)의 확산을 의미한다. (재생을 선배열로 하기 때문에 가상 음원은 선 음원으로 가정한다.) $\sqrt{\frac{|z-z_1|}{|z-z_0|}}$ 은 크기에 대한 가중치이며 가상 음원과 라우드스피커 어레이, 청취자의 위치 사이의 거리에 따른 인자이다. 청취공간에서는 거의 변하지 않는다.

III. WFS의 제한점

WFS는, 그 시스템을 구현하는데 있어서 무한한 연속적인 (continuous) 파면을 유한한 불연속적인 (discrete) 라우드스피커 배열을 통하여 재생하여야 하기 때문에, 이로부터 발생하는 spatial alias 및 truncation effect 등과 같은 문제점이 발생한다 [4, 8]. 이는 이론적인 WFS를 실제화시킬 때에 필연적으로 발생하게 되는 문제점이다. 그리고 무엇보다도 시스템 구현에 있어서 많은 수의 라우드스피커를 필요로 함으로 인해 발생하는 공간상의 제약이 큰 문제점으로 남아 있으며 WFS 렌더링을 위해서 객체 별로 구분된 음원을 확보해야 하는 어려움 또한 해결해야 할 과제이다. Spatial alias 와 truncation effect의 발생 이유와 알려진 해결 방안에 대해서 조금 더 살펴보면 아래와 같다.

3.1. Spatial Alias

Spatial alias의 경우 이웃하는 두 개의 스피커 신호가 청취자의 위치에서 서로 간섭하는 시간적인 차이로 결정되는 것으로 이는 라우드스피커 배치 간격에 좌우된다 [4]. 가령 라우드스피커 간격이 좁아서 이론적인 연속 (continuous) 파형을 보사할 수 있을 경우 넓은 주파수 범위를 재생할 수 있지만, 실제 라우드스피커의 물리적인 크기가 제한점으로 작용하며, 간격을 줄이기 위해 작은 스피커 유닛을 사용한다면 중간 주파수 및 저주파수 영역의 재생 특성이 좋지 않다는 문제점이 발생하게 된다. 결과적으로 입의 크기의 라우드스피커를 사용하여 배열을 구성하였을 경우 재생할 수 있는 주파수의 범위가 제한된다 [6, 7].

특히, spatial alias 문제는 청취 공간 내에서 이동하는 청자의 경우 고주파수에서의 빠른 변화로 modulation effect를 경험하게 되어 음색 면에서의 문제점 또한 야기하게 된다. 따라서 이러한 spatial alias를 해결하기 위해서 라우드스피커 배열에 위한 각 유닛에 트위터를 추가하는 방법이 있을 수 있다. 이 방법을 이용하면 aliasing이 발생하는 주파수를 상승시켜 재생 가능 주파수 범위를 넓혀줄 수 있지만, 시스템을 구현하는 단가가 상승하는 문제점을 안고 있다. 해외 연구 기관 중 IRT에서는 OPSI (Optimized Phantom Source Imaging)을 제안하였는데 [4], 이는 aliasing이 발생하는 주파수 이상에서는 전통적인 stereophony 방식을 적용하여 WFS와 함께 재생하는 것이다. 이 방법을 이용하면 aliasing으로 인한 킷털 터딩 효과는 줄일 수 있지만 청취 공간 전체에 대해서 작용을 하지는 못하며 따라서 sweet spot이 좁아진다는 단점을 내포하고 있다.

3.2. Truncation effect

이론상으로 WFS는 파면 상의 무한한 점음원으로부터 발생하는 음원들을 재현해내는 것이다. 그러나 실제적으로는 유한한 개수의 라우드스피커 배열로 파형을 재생하게 되는데, 이 때, 무한한 개수의 라우드스피커 배열을 사용하는 경우에 비해 유한한 개수의 라우드스피커를 사용하는 경우에 재생되는 파형은 왜곡을 유발하게 된다 [6, 7]. 이러한 유한한 개수의 라우드스피커 배열을 이용함으로써 음이 전파되는 공간과 전파되지 않는 공간이 생기게 되고 이로 인해 라우드스피커 배열의 양끝에서 회절파가 생성된다. 이러한 오류는 after-echo와 pre-echo를 만들어낸다. 그리고 이를 통해서 일종의

coloration이 생기게 된다.

이러한 truncation effect를 줄이기 위해서 tapering을 이용할 수 있다. 이는 배열의 양쪽 끝으로 갈수록 작은 gain을 갖고 재생하도록 하면 유한 개수의 라우드스피커 배열을 사용함으로써 인해 발생하는 재생 파장 왜곡을 보상할 수가 있다 [4]. 단, 이 경우에는, 라우드스피커의 gain을 인위적으로 조정함으로써 인해 sweet spot이 줄어들 수 있다는 단점을 가지고 있다.

IV. WFS의 활용에 대해서

앞 절에서 언급한 WFS 구현의 제한점은 현재 많은 연구가 진행 중에 있으나, 보다 근본적인 문제인 청취자 중심으로 둘러싸는 형태로 다수의 스피커를 구성해야 한다는 점과 WFS 렌더링을 위해 객체 별로 음원을 확보해야 한다는 점에 대해서는 상대적으로 많은 관심을 받지 못하고 있다. 이는 결국 현재의 연구 방향이 WFS 시스템을 대형 청취 공간에서 활용하는 시스템으로만 제한하고 있다는 의미이며 시스템 가공에서 재생까지 모든 것을 처음부터 일괄적으로 처리하겠다는 의미이다. 다시 말해, 가정과 같은 상대적으로 협소한 환경에서의 재생을 고려하는 것과 기존의 음원을 WFS로 활용하는 등의 방안에 대해서는 많은 연구가 없었다는 것을 의미한다. 본 절에서는 이와 같은 상황에 착안하여, 가정에서도 활용할 수 있는 기존의 콘텐츠를 활용할 수 있는 WFS 재생 시스템에 대해서 논하도록 하겠다.

4.1. 호형 어레이

WFS이론을 충실히 구현하기 위해서는 청취자 주위 360도를 원형 혹은 사각 형태 등의 라우드스피커 어레이로 감싸야 한다는 제한점을 가지게 된다. 극장이나 콘서트 홀 등과 같은 넓은 청취 공간의 경우에는 이 부분이 큰 문제가 되지 않지만, 일반 가정의 거실과 같은 상대적으로 협소한 청취 공간이라면 이것은 큰 문제가 된다. 현재까지의 대부분의 연구가 TV나 홈씨어터에 적용할 수 있는 WFS 재생 시스템에 대해서는 큰 관심을 두지 않았으며, 더 넓은 청취 공간에서 더 많은 수의 라우드스피커를 사용하여 음장을 재생하는 방안에 대해서 주요 연구가 되어왔다. 따라서 기존의 일직선 어레이 혹은 원형 어레이에 기반한 WFS 신호처리 방식은, 협소한 공간에서의 WFS 재생시스템, 즉 전방 라우드스피커 어레이 기반

WFS 시스템에는 그대로 적용하기 힘들다는 한계점을 가지게 된다.

가정에서 가장 간단하게 WFS 어레이를 구성하는 것은 시청자 전방에 위치한 TV 등의 디스플레이 방향에 하나의 어레이를 설치하는 것이다. 시각 정보가 몰려 있는 선방에 WFS를 적용하면 적은 수의 라우드스피커를 사용하면서도 뛰어난 음장 효과를 청취자에게 제공할 수 있다. 하지만 유한한 어레이 길이를 사용하게 됨으로 인해 truncation effect가 발생하게 되고, 이를 보완하기 위해 tapering window 와 같은 후처리를 거치게 되면 sweet spot은 상당히 좁아지게 될 것이다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위한 가장 기본적인 방안은 그림 3과 같이 라우드스피커 어레이를 호형으로 구성하는 것이다. 각 스피커 유닛은 화살표방향을 향하고 있어, 스피커의 지향성을 일정하게 퍼뜨려줌으로써 넓은 청취공간을 얻을 수 있으며 등간격 어레이 구성을 통해 discrete한 음원으로서 가치를 갖는다. 그러나 물리적인 호형 어레이를 쓰는 것은 공간적인 낭비가 있을 수 있다. 왜냐하면 TV의 바로 아랫단이나 윗단에 위치한 스피커 어레이가 동그렇게 튀어나와있다는 것은 공간을 비효율적으로 사용하는 것으로 일반적인 좁은 청취공간에서는 단점으로 작용하게 된다. 또 다른 방안으로는 그림 4와 같이 호형 어레이의 원리를 이용한, 호형 어레이 기반 직선 어레이이다. 이는 호의 중심을 향하여 각 라우드스피커를 z1 plane에 정시영 시킨 것으로 time delay만 보상한다면 호형 어레이와 동일한 효과를 얻을 수 있다. 이는 호형 어레이의 장점을 모두 가지면서 공간의 배치를 효율적으로 할 수 있다는 장점 또한 가지게 된다. 하지만, 좌우 양 끝단으로 갈수록 라우드스피커 유닛 사이의 각격이

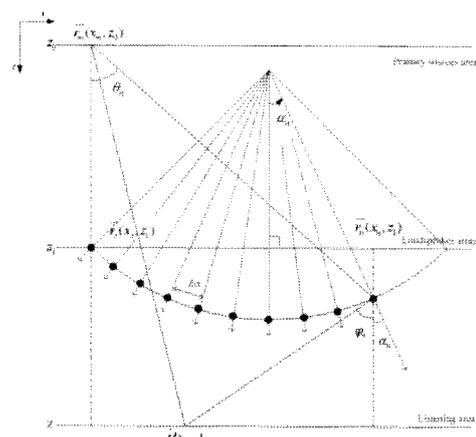


그림 3. 호형 구조 라우드스피커 어레이-1
Fig. 3. arc-shape loudspeaker array -1.

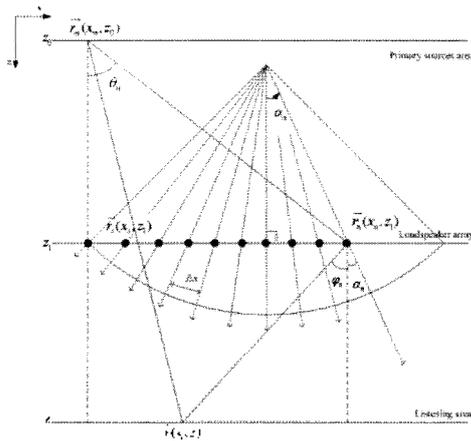


그림 4. 호형 구조 라우드스피커 어레이-2
Fig. 4. arc-shape loudspeaker array -2.

넓어지게 되는데, 이는 aliasing 측면에서 단점을 갖는다고 하겠다.

따라서 기존 WFS 이론에서 각 라우드스피커의 재생 지향성을 조정할 수 있도록 수식을 변형하여 스피커의 배치 방향성을 고려한 등간격 어레이를 구성, 그림 4.3과 같은 방식 패턴을 가지도록 한다.

그림 5는 등간격 일직선 어레이의 방향을, 호형 어레이에서는 호의 법선 방향으로 정함으로써, 호형 어레이 구조의 장점을 가져오면서 등간격의 일직선 어레이를 사용할 수 있는 방안을 나타낸다. 이 방안은 등간격의 어레이를 사용하여 효과적인 공간 활용을 할 수 있으며 stationary phase approximation을 이용한 기존 WFS 이론의 수식 전개를 그대로 활용할 수 있어 스피커 방향성만 변형하여 주면 된다는 장점을 가지게 된다. 스피커의 지향성에 의해 stationary 지점이 바뀌지 않는다는 조건 하에서 stationary phase approximation을 취하여 기존의 수식 (4)를 전개해 보면 최종적으로, 식 (5)와 같이, 라우드스피커의 지향성을 나타내는 $G_n(\theta_n, \omega)$ 항이 $G_n(\theta_n - \alpha_n, \omega)$ 으로 바뀌어, 이전의 모든 식을 그대로 사용하면서 지향각 α_n 에 의한 directivity pattern만 다르게 적용해주면 된다는 것을 알 수 있다.

$$Q(\vec{r}, \omega) = S(\omega) \sqrt{\frac{jk}{2\pi}} \frac{\cos(\theta_n)}{G(\theta_n - \alpha_n, \omega)} \sqrt{\frac{|z - z_1|}{|z - z_0|}} \frac{e^{-jk|\vec{r} - \vec{r}_s|}}{\sqrt{|\vec{r} - \vec{r}_l|}} \quad (5)$$

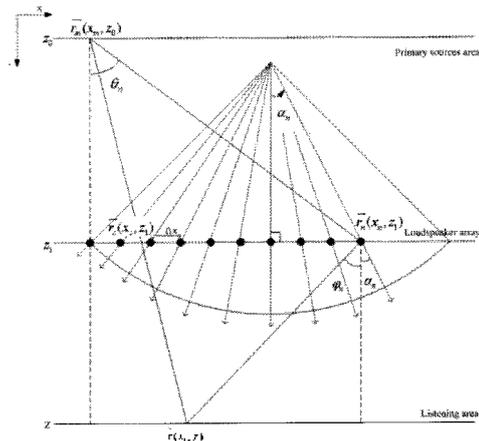


그림 5. 호형 라우드스피커 어레이
Fig. 5. arc-shape loudspeaker array.

4.2. 빔포밍을 통한 측/후면 음장 재생

앞 절에서 WFS를 가정에서도 쉽게 활용하기 위해 청취자 전방의 디스플레이 기기 방향으로 라우드스피커 어레이를 구성하는 방안을 제시하였는데, DVD나 DVD 등과 같이 5.1채널 오디오 콘텐츠 및 재생 시스템의 많은 보급으로 측/후면 음향에 익숙해진 청취자 입장에서 보면, 이는 기존의 디스크리트 멀티채널 재생 방식에 비해 측/후면 사운드가 제시되지 못해 현장감이 부족해지는 문제점이 발생하게 된다.

따라서 이에 대한 해결책으로 빔포밍 재생 방식을 사용할 수 있다. 빔포밍 재생 방식을 사용하면 전방 어레이 이외에 별도로 라우드스피커를 추가하지 않고서도 측/후면 음장을 제공해 줄 수 있게 된다.

전방 라우드스피커 어레이를 구성하고 전방과 측/후면 음장을 WFS 재생하기 위해서는, 주어진 오디오 데이터 중, 전면부에 위치하는 음상과 측후면부에 위치하는 음상을 구분할 필요가 있다. 즉, 그림 6과 같이 입력 음원을 분석하여 전방은 WFS로 측/후면은 빔포밍으로 렌더링할 수 있도록 시스템을 구성한다. 따라서 전면부 음상은 수식 (4)와 (5) 혹은 그와 동등한 형태의 WFS 렌더링을 통하여 재생되며 측후면 부는 빔포밍 기법을 통하여 재생된다.

측후면 부 음상을 제공하기 위하여 벽면 반사를 활용한 빔포밍 기법을 사용하는데, 반사되어 들어오는 소리의 각도는 이미지 소스 기법 (image source method)이나 그와 동등한 기법을 이용하여 구할 수 있고, 사용자가 원하는 각도로 빔포밍 주엽의 방향을 조절하기 위해서는 각 라우드스피커의 신호 재생에 시간 차이를 부여하면 된

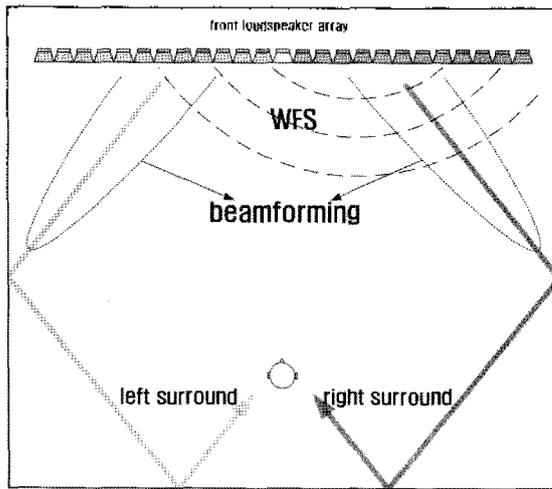


그림 6. 빔포밍을 함께 사용하는 전방 리우드스피커 어레이 기반 WFS 재생 시스템

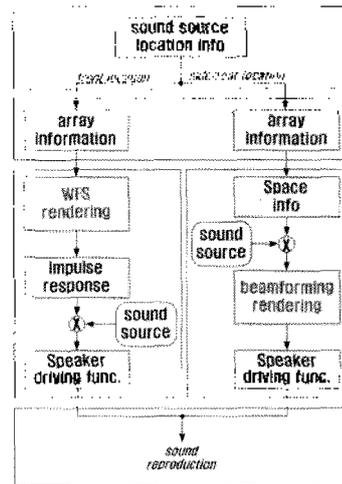


Fig. 6. Front loudspeaker array based WFS reproduction system with beam-forming.

다. 가령, i 번째 라우드스피커에 it 만큼의 시간 지연을 부가하면 음압은 다음과 같아진다.

$$p_i(r, \theta, t) = \frac{A}{r_i} e^{j[\omega(t+ir) - kr_i]} \quad (6)$$

이로부터, 빔의 방사 방향 θ 에 따른 주엽과 부엽을 구분할 수 있는 방향성 (directivity factor) $H(\theta)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(\theta) = \frac{1 \sin[(N/2)kd(\sin \theta - \sin \theta_0)]}{N \sin[(1/2)kd(\sin \theta - \sin \theta_0)]} \quad (7)$$

여기에서 $\theta_0 = \sin^{-1}(cr/d)$ 이며, 주엽의 방향이 얼마나 변화하는 지를 나타낸다. 즉, 적절한 시간 지연을 선형 배열에 부가하면 주엽의 방향을 축으로부터 벗어나 도폭 볼 수가 있으며 이는 재생되는 오디오 주파수에 영향을 주는 등의 왜곡을 초래하지 않는다.

이렇게 빔포밍 방법으로 서라운드 음향을 집중하여 벽을 반사시켜 청자의 뒤로 돌아가게 하였을 때, 청자가 그 음향을 청각적인 왜곡 없이 듣게 하기 위해서는 두 가지 조건을 만족시켜야 한다. 첫째는, 빔포밍의 주엽 방향으로 방사되어 벽을 거쳐 청자에게 도달하는 소리가 빔포밍의 측엽 방향으로 방사되어 벽을 거치지 않고 청자에게 직접 도달하는 소리보다 충분히 커야 한다. 둘째는, 직접 전달되는 소리와 반사되어 들어가는 소리 사이의 시간차가 충분히 작아야 한다. 즉 반사되어 들어가는 소리가 직접 전달되어 들어가는 소리에 비하여 너무 늦게

청자에게 도달해서는 안 된다. 따라서 이와 같은 환경을 만들어주기 위해서 WFS 렌더링 음원과 빔포밍 음원 간의 시간 지연 보정 및 빔포밍 음원 재생 상의 주엽과 부엽의 레벨 차이를 확인, 보정해주면 된다.

4.3. 기존 음원의 활용

WFS 는, 재생하고자 하는 모든 음원을 객체 별로 가지고 있어야 하며 이 음원들을 정위시키기 위한 음상 정위 정보 역시 가지고 있어야만 한다. 따라서 스테레오나 5.1 채널과 같이 객체 정보를 포함하고 있지 않은 기존의 오디오 포맷은 WFS에서 그대로 사용하는 것은 불가능하다. 즉 현재로서는 WFS를 활용하기 위해서는 콘텐츠 최초 저작 단계부터 최종 재생 단계까지 모든 부분을 고려해야만 한다. 따라서 이와 같은 상황에서 기존의 음원에 대해 음원 분리 기술과 파워 패닝 기법을 활용하여 개별 음원 객체와 그 음상 정위 정보를 얻어내어 WFS 렌더링에 활용하면 콘텐츠를 새로 제작해야 하는 부담없이 WFS 시스템에 활용할 수 있게 된다.

음원 객체를 획득하기 위해서 채널 기반 신호를 객체 기반 신호로 변환해주어야 하는데, 이 때 블라인드 음원 분리 기술 (Blind Source Separation, BSS)을 적용할 수가 있다. 블라인드 음원 분리 기술은 원 음원과 녹음 환경에 대한 정보 즉, 채널 전달 특성과 같은 사전 정보 없이 혼합 신호 상태에서부터 상호 독립적인 원 음원 객체를 추정하는 기술이다 [9]. 그리고 여기에, 음상 정위 정보를 얻기 위해서 파워 패닝 기법을 적용한다. 파워 패닝 기법은 두 스피커 사이 임의의 각도로 음상을 정위시키기 위하여 간섭적인 (coherent) 두 신호 간에 인텐시티 (intensity) 차이를 적용하는 기술로 [10], 이를 역으로

이용하면 두 개의 채널 신호로부터 음원 객체의 음상 정위 각도 정보를 얻어낼 수 있다.

그림 7에서와 같이 WFS 재생 시스템에서, 입력 오디오 포맷의 정보를 확인하고 블라인드 음원 분리과정을 통해 채널 기반 신호를 객체 기반 신호로 변환시켜준 후 [11], 두 채널씩 짝을 이루어 파워 패닝 기법을 적용하면, WFS 렌더링의 입력 신호로 인가해줄 수 있다. 현재 대중적으로 가장 많이 사용되고 있는 오디오 포맷은 스테레오와 5.1채널이다. 이들 포맷은 채널 기반 오디오 신호로 스테레오는 L채널과 R 채널의 2개 신호, 5.1채널은 L, R, LS, RS, C/LFE 채널의 6개 채널 신호를 가지게 된다 (단, LFE 신호는 논외).

물론, 채널 기반 신호도, 초기 콘텐츠 저작 과정에서는 객체 기반 신호를 믹싱하지만 그 믹싱 정보마저도 보존되지 않기 때문에, 원 음장을 그대로 유지하려면 WFS 렌더링 시스템에서 블라인드 음원 분리 기술과 파워 패닝 기법을 적용해야 한다.

그림 8에서와 같이 오디오 포맷이 스테레오인 경우에는, 가령 이 스테레오 신호에 세 개의 오디오 객체 A, B, C가 믹싱되어 있다고 한다면, 이 중 A는 L, R 채널에 일정한 에너지 비율로 레코딩 되어 있는데, 블라인드 음원 분리를 통해 L 채널에 특정 비율로 레코딩된 A만을

추출해낸 신호를 A_L 이라 하고, R 채널에 일정 비율로 레코딩된 A만을 추출해낸 신호를 A_R 이라 하자. 이 때, 전방 $\pm 30^\circ$ L, R 채널 파워 패닝 기법에 의해 아래 수식 (8), (9)와 같이 L, R 라우드스피커 사이 오디오 객체 A의 음상 정위 각도를 얻어낼 수가 있다.

$$\theta_m = \frac{\theta_{pan} - 330^\circ}{390^\circ - 330^\circ} \times 90^\circ, \quad \frac{A_L^2}{A_L^2 + A_R^2} + \frac{A_R^2}{A_L^2 + A_R^2} = 1 \tag{8}$$

$$\theta_m = \cos^{-1}\left(\sqrt{\frac{A_L^2}{A_L^2 + A_R^2}}\right), \quad \theta_{pan} = 330^\circ + \frac{60^\circ}{90^\circ} \times \cos^{-1}\left(\sqrt{\frac{A_L^2}{A_L^2 + A_R^2}}\right) \tag{9}$$

이러한 방식으로 A 이외 B, C 오디오 객체와 그 각도 정보를 얻어낼 수 있고 A, B, C의 에너지 비율에 역재곱 법칙을 적용하여 청취자 위치로부터의 거리도 산출해낼 수 있어 각 오디오 객체의 평면상 위치 정보를 획득할 수 있게 된다. 이를 WFS 렌더링 과정에 입력으로 인가하고, 이로부터 각 라우드스피커의 구동신호를 얻을 수 있다. 이와 같은 방식으로, 5.1채널 포맷에 대해서도, L-C, C-R, R-RS, RS-LS, LS-L 채널pair로부터 오디오 객체와 음상 정위 정보를 얻어내어 원래의 오디오 객체를

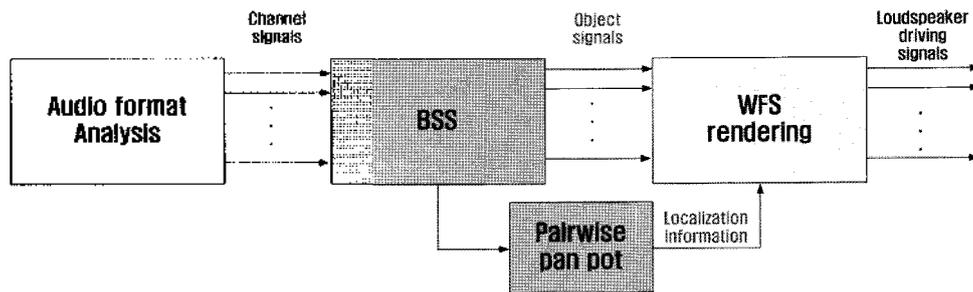


그림 7. 시스템 블록 다이어그램
Fig. 7. system block diagram.

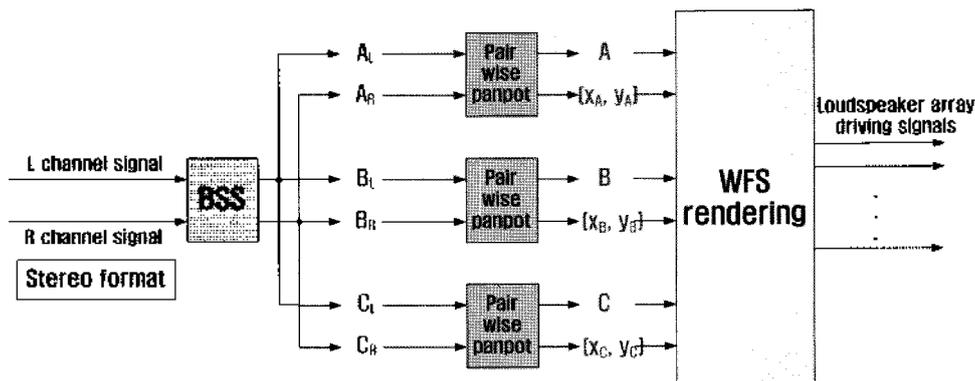


그림 8. 스테레오 포맷 입력 시 신호 처리 과정
Fig. 8. signal processing : stereo format input.

통해 믹싱할 때의 오디오 장면을 복원, 재생할 수 있게 된다 [12].

V. 결 론

WFS는 기존 멀티채널 오디오 재생 방식의 단점을 극복할 수 있는 차세대 오디오 재생 방식으로 주목 받고 있다. 그러나, spatial alias와 truncation effect 와 같은 한계점 또한 가지고 있는데, 이 한계점은 이론적인 WFS를 실제화하는 데에 발생할 수 밖에 없는 문제점으로 많은 보완책들이 연구되고 있다. 또한 WFS는 많은 라우드스피커가 필요해 가정과 같은 협소한 공간에서 활용하기 어렵고, 기존 음원들을 그대로 사용하기 어려워 콘텐츠를 처음부터 새로 제작해야만 단점도 가지고 있다. 이러한 부분을 해결하기 위해서 본 논문에서는 전방 라우드스피커 어레이를 사용하여 간단하게 WFS 시스템을 구성하는 방안, 빔포밍을 적용하여 전방 라우드스피커 어레이만을 사용한 재생 환경에서도 측/후면 음장을 제공할 수 있도록 하는 방안, 음원 분리와 패닝 기법을 활용하여 스테레오나 5.1채널 등의 기존 음원을 WFS에서도 활용할 수 있도록 하는 방안에 대해서 살펴보았다. 현재 대형 청취 공간을 위주로 연구되고 있는 WFS를, 가정에서도 활용할 수 있도록 하는 더 많은 국내외 연구 결과가 나오는 계기가 되기를 기대한다.

감 사 의 글

본 연구는 방송통신위원회, 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 IT 원천기술개발사업의 일환으로 수행한 연구로부터 도출된 것이다 [과제관리번호: 2008-F-011, 과제명: 차세대 DTV 핵심기술 개발].

참 고 문 헌

1. A. J. Berkhout, et al., "Acoustic control by wave field synthesis", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol.93, no.5, pp. 2764-2778, 1993.
2. Verheijen, E., "Sound Reproduction by Wave Field Synthesis," PhD Thesis, TU Delft, 1998

3. Gunther Theile, "Wave Field Synthesis - A Promising Spatial Audio Rendering Concept," *Proc. Of the 7th Int. Conference on Digital Audio Effects(DAFX'04)*, pp. 125-132, Oct, 2004.
4. Helmut Wittek, "Perception of Spatially Synthesized Sound Fields," <http://www.hauptmikrolon.de/wittek.htm>, 2003.
5. Karlheinz Brandenburg, Sandra Brix and Thomas Sporer, "Wave Field Synthesis: From Research to Applications," *XII, European Signal Processing Conference EUSIPCO 2004*, pp. 1369-1376, Sep, 2004.
6. Antti Kelloniemi and Kari Mettala, "A Plane Wave Transducer: Technology and Applications," *AES 27th Convention*, paper no. 6945, Oct, 2006
7. Basilio Pueo, et al, "Analysis of Spatial Resolution of Multiactuator Panels," *AES 120th Convention*, paper no. 6733, May, 2006.
8. Diemer de Vries, Peter Vogel, "Experience with a sound enhancement system based on wave front synthesis," *AES 95th Convention*, paper no. 3748, October, 1993.
9. Jang Inseon, et al., "Blind source separation using relative optimization," *WESPAC IX*, paper no. 138, June, 2006.
10. Ville Pulkki, "Spatial Sound Generation and Perception by Amplitude Panning Techniques," degree of Doctor of Science in Technology thesis, Helsinki University of Technology, 2001.
11. Maximo Cobos, et al., "On the application of Sound Source Separation to Wave-field Synthesis," *AES 122nd Convention*, paper no. 7016, May, 2007.
12. 유재현, 장위선, 서정일, 강경욱, "기존 오디오 포맷의 오디오 장면 정보를 유지하는 Wave Field Synthesis 재생 방법," *한국음향학회 2007년도 추계학술발표대회 논문집*, 26권, 2(s)호, 63-64 쪽, 2007.

저자 약력

- 유재현 (Jae-hyoun Yoo)
 - 2003년: 숭실대학교 전자전기공학부 (학사)
 - 2005년: 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 (석사)
 - 2005년~현재: 한국전자통신연구원 방통융합미디어연구부 연구원
 - * 주관심 분야: 오디오 신호처리, 가상 음상 청취 기술, 객체기반 3차원 오디오 기술 등
- 심환 (Shim, Hwan)
 - 2003년: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (학사)
 - 2008년: 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 (박사)
 - 2008년~현재: 미국 Stanford 대학원 연구원
 - * 주관심 분야: 3차원 오디오 신호처리, 음장, 녹음 및 재생 기법, 음원 분리 등
- 정현주 (Hyunjoon Chung)
 - 2005년: 서울대학교 기계항공공학부 (학사)
 - 2005년~현재: 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 (석박사 통합 과정)
 - * 주관심 분야: 3차원 오디오 신호처리, 음장, 녹음 및 재생 기법, 등

•성 썩 모 (Koeng-Mo Sung)

1965~71년: 서울대학교 전자공학과
1971~73년: 독일 아헨공대 Vordiplom
1973~77년: 독일 아헨공대 전자통신공학 Dipl.-ing.
1977~82년: 독일 아헨공대 음향공학 Dr.-ing. (공학박사)
1977~83년: 독일 아헨공대 음향공학연구소 연구원
1983~현재: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수

•강 경 옥 (Kyeongok Kang)

1985년: 부산대학교 물리학과 (학사)
1988년: 부산대학교 물리학과 (석사)
2004년: 한국항공대학교 전자공학과 (박사)
2006년: 영국 University of Southampton (방문 연구원)
1991년~현재: 한국전자통신연구원 (책임연구원, 미디어응용연구팀장)
※ 주관심 분야: 오디오 신호처리, 객체 기반 오디오, 3D 오디오, 음성 및 오디오 코덱