

# 직선 배열형 마이크로폰 어레이를 이용한 빔포밍 음향홀로그래픽법에 관한 연구

## A Study for Beamforming Acoustic Holographic Method Using Linear Arrayed Microphones

김 천 덕\*, 심 동 연\*\*, 장 비\*\*\*, 차 경 환\*\*\*\*, 이 채 봉\*\*\*\*  
(Chun-Duck Kim\*, Dong-Youn Sim\*\*, Bee Jang\*\*\*, Kyung-Hwan Cha\*\*\*\*,  
Chai-Bong Lee\*\*\*\*)

\* 본 연구는 한국과학재단 '96핵심전문연구 「과제번호(961-0921-114-2)」 지원을 받아 수행한 것입니다.

### 요 약

본 논문에서는 등간격으로 직선배열된 마이크로폰 어레이군으로 각 측정지점마다 빔패턴을 형성하고 이를 기준신호로 이용하여 각 마이크로폰들간의 신호와 크로스스펙트럼 알고리즘에 의하여 음원의 절대위치를 추정할 수 있는 빔포밍 음향홀로그래픽 시스템을 제안한다. 실음장 측정을 통하여 기준 마이크로폰을 사용하는 음향홀로그래픽법과 본 연구에서 제안한 방법을 동일 알고리즘으로 비교·검토한 결과, 약 20% 이상의 분해능 향상을 가져왔으며 제작한 시스템의 음장측정에 대한 유용성을 확인하였다. 핵심용어: 빔포밍, 음향홀로그래픽법, 선배열 어레이 마이크로폰, 크로스스펙트럼

### ABSTRACT

This paper proposes acoustic holographic measuring system to estimate an absolute position of sound source. Using the measured signals, the estimation of the position is calculated by the Cross-spectrum algorithm of the beamformed signal and a linear arrayed microphone's signals. As the results of comparing the reference microphone method with beamforming method through the measurement of sound field, the beamforming acoustic holographic method is progressed above 20 percent than that of a reference microphone method in the resolution, and the utility of the proposed system could be confirmed.

Key words: Beamforming, Acoustic Holographic Method, Linear Arrayed Microphones, Cross-spectrum

투고분야: 음향 신호처리

### 1. 서 론

환경소음이 인간의 정신적 생활환경에 많은 영향을 미치고 있다는 것은 여러 연구보고들에 의해 밝혀지고 있다. 이러한 환경소음들을 줄이기 위해서는 자동차나 항공기 혹은 생활환경에 가장 밀접한 가전제품등의 복잡한 기계 구조물에서 발생하는 소음이나 이상을 등을 진단하고 개선할 목적으로 각 기계요소마다 방사되는 음들의 정확한 위치 파악이 필요하다. 현재 디지털 신호처리 기술의 발달에 의해 음원의 도래방향각 추정이나 3차원 음향인센티벵 등, 다차원 음향신호처리 기술들의 연구결과들로 공간상의 음원위치 추정이나 음의 영상화에 관한 연구가

활발히 진행되고 있다[1-3]. 그러나 상술한 종래의 방법들은 복잡한 측정시스템의 구성뿐만 아니라 처리시간에 현실성이 부족하다는 문제점들을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 종래의 방법들의 문제점들을 개선하기 위하여 측정시간의 단축과 신호대 잡음비를 향상시키므로써 측정시스템의 신뢰성 및 안정성 그리고 시스템 구성의 경제성을 고려한 빔포밍 음향홀로그래픽 측정시스템을 개발하였다. 이를 이용한 실음장 측정을 통하여 기존의 음향홀로그래픽법과 비교한 결과, 처리시간 및 성능 향상을 가져왔으며, 음원의 종류 및 다중음원의 위치추정 등의 실험을 통하여 시스템의 우수성 및 추정정도의 정확성등을 재생된 홀로그램과 등압선 음압분포로써 확인하였다

음향홀로그래피의 처리알고리즘은 기준신호와 측정신호간의 크로스 스펙트럼에 의해 처리되며 신호대 잡음비를 높이기 위하여 평균횡수를 증가시킴으로써 처리시간이 늦어지는 점과 기준신호에 측정사의 자체잡음이나 주변

\* 부경대학교 전기·제어계측공학부

\*\* 일본 동북대학교 벤처 Business 연구소

\*\*\* 부경대학교 대학원 음향진동공학과

\*\*\*\* 동서대학교 정보통신공학부

접수일자: 1999년 10월 12일

노이즈가 혼입된 경우 그 자체를 음원으로 인지하는 문제점 및 다중음원 측정시 다수의 기준신호 설정등의 문제점등을 갖고 있다[4-6]. 그러므로 본 연구에서는 측정시 기준신호를 설정치 않고 측정신호들만으로 빔패턴을 형성한 후, 각각 수음된 신호들과 크로스 스펙트럼 알고리즘에 의해 처리한다. 측정시스템은 8X8의 공간 매트릭스의 형성과 시스템 구축의 간소화를 목적으로, 종축방향으로 8개의 마이크로폰들이 등간격으로 직선배열되어 있으며 제어신호에 따라 횡축으로 등간격 이동이 가능하도록 구성되어 있다.

## II. 빔포밍 음향홀로그래피법의 원리

본 연구에서 제안하는 빔포밍 음향홀로그래피법의 원리를 그림 1에 나타내었다. 그림 1은 측정면에 설치된 종축 방향의 마이크로폰들만으로 빔패턴을 형성하여, 이것을 기준신호로 이용한다. 이와 같이 형성된 기준신호와 측정면의 마이크로폰 출력신호들을 각각 크로스 스펙트럼 알고리즘을 이용하여 음원의 위치를 추정하며, 이를 본 논문에서는 빔포밍 음향홀로그래피법이라 한다. 그림 1에서 측정면의 구성은  $i$ 개의 측정용 마이크로폰들을 등간격으로 직선배열하여 부분 어레이군을 형성하고 동일 간격만큼  $j$ 열 방향으로 스캐닝한다. 따라서 측정면은  $i \times j$ 개의 마이크로폰들로 구성된다. 부분 어레이군이  $j$ 열에 있을 때,  $n$ 번째 음원이 발생하는 주기성 파형을  $a_m(t)$ 라 하고, 그 푸리에 변환을  $A_m(w)$ 라 한다. 시간장의 길이가 충분히 길다는 가정하에 식 (1)과 식 (2)는 아래와 같다.

$$a_m(t) \approx a_n(t - \tau_{jm}) \quad (1)$$

$$A_{jm}(w) \approx A_n(w) \exp(-kwr_{jm}) \quad (2)$$

식 (1)에서  $\tau_{jm}$ 는 각 수음용 마이크로폰들과 음원간의 측정거리에 따른 도달지연 성분과 각 마이크로폰들의 초기 측정위치에서 횡축방향으로  $j$ 열 이동시의 측정지연등을 포함한 지연시간을 나타낸다. 식 (2)에서  $k$ 는 허수를 의미하며, 시간영역에서 음원신호의 시간지연은 주파수영역에서 위상천이를 초래함으로써 전파지연과 측정거리를 고려하면,  $j$ 열  $i$ 번째의 마이크로폰 출력신호는 식 (3)과 같다.

$$S_{ij}(w) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{r_{ijn}} A_{jn}(w) \exp(-kwr_{ijn}/c) \quad (3)$$

여기서  $r_{ijn}$ 는  $n$ 번째 음원과  $j$ 열  $i$ 번째의 마이크로폰간의 거리이고,  $A_{jn}(w)$ 는  $j$ 열에서  $n$ 번째 음원의 주파수 스펙트럼이다.  $N$ 는 음원의 수이고  $c$ 는 음속을 나타낸다.

본 연구에서 제안하는 빔포밍 음향홀로그래피법은 음원에 대한 기준신호의 측정을 행하지 않고, 횡축방향 이동시 각 열의 부분 어레이군으로 동시 측정된 신호로 빔패턴을 형성하여 이를 기준신호로 이용한다. 빔포밍에 관한 수학적 알고리즘은 식 (4)와 같다[9].

$$\begin{aligned} Q_{jm}(w) &= \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I S_{ij}(w) \cdot r_{im} \cdot \exp(kwr_{im}/c) \\ &= \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \frac{r_{im}}{r_{ijn}} A_{jn}(w) \cdot \exp(-kwr_{ijn}/c) \cdot \exp(kwr_{im}/c) \\ &= A_{jm}(w) + \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \sum_{n=\{1(n^*m)\}}^N \frac{r_{im}}{r_{ijn}} A_{jn}(w) \exp(kw(r_{im} - r_{ijn})/c) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $Q_{jm}(w)$ 는  $j$ 열에서  $m$ 번째 음원에 대해 형성된 빔포밍 신호를 나타내고,  $I$ 는 총 마이크로폰수를 나타내며,  $r_{im}$ 는  $m$ 번째 음원과  $j$ 열  $i$ 번째 마이크로폰간의 측정거리를 의미한다.

그리고 식 (4)에서 구한 빔포밍 신호와 측정면의 각 마이크로폰들과 크로스 스펙트럼 알고리즘에 따라 계산을 행하고 측정면상에 홀로그램을 재생하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_{jm}(w) \cdot S_{ij}^*(w) &= \left\{ A_{jm}(w) + \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \sum_{n=\{1(n^*m)\}}^N \frac{r_{im}}{r_{ijn}} A_{jn}(w) \right. \\ &\quad \cdot \exp(kw(r_{im} - r_{ijn})/c) \left. \right\} \\ &\quad \cdot \left\{ \frac{1}{r_{ijn}} A_{jn}^*(w) \exp(kwr_{ijn}/c) + \right. \\ &\quad \left. \sum_{n=\{1(n^*m)\}}^N \frac{1}{r_{ijn}} A_{jn}^*(w) \exp(kwr_{ijn}/c) \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $A_{jm}(w)$ 는  $j$ 열에서  $m$ 번째 음원의 주파수 스펙트럼이고,  $*$ 는 공액 복소수를 나타낸다.

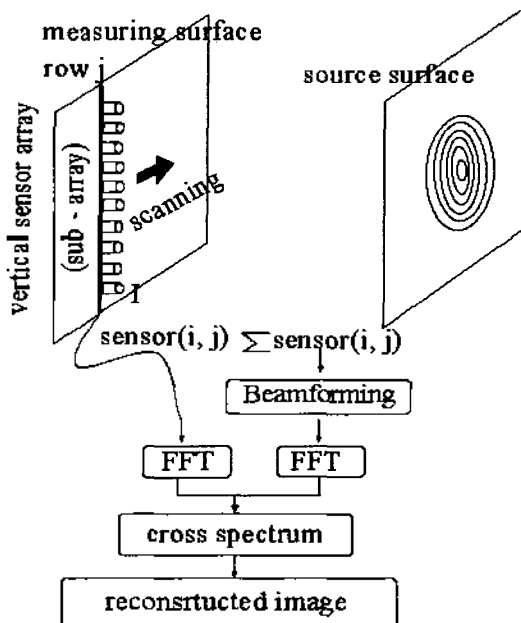


그림 1. 빔포밍을 이용한 음향홀로그래피법의 원리도  
Fig. 1. Principle of acoustic holographic method using beamforming.

위의 식 (5)를 이용하여 3차원 좌표 공간상의 임의의 점P에 홀로그래프를 재생할 수 있으며, 그 재생식은 식 (6)와 같다.

$$\begin{aligned}
 & \sum_y Q_{jm}(w) \cdot S_y^*(w) \cdot \exp(-kwr_{ijm}/c) \\
 &= \sum_y \left[ \frac{1}{r_{ijm}} \cdot |A_{jm}|^2 \exp(kw(r_{ijm} - r_{ijp})/c) \right. \\
 &+ A_{jm}(w) \cdot \sum_{n=1}^N \frac{1}{r_{ijn}} A_{jn}^* \exp(kw(r_{ijm} - r_{ijp})/c) \\
 &+ \left. \left\{ \frac{1}{I} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{r_{ijm}}{r_{ijn}} A_{jn} \exp(kw(r_{ijm} - r_{ijn} - r_{ijp})/c) \right\} \right. \\
 &\cdot \left. \left\{ \frac{1}{r_{ijm}} A_{jm}^* \exp(kwr_{ijm}/c) \right\} \right] \\
 &+ \left. \left\{ \frac{1}{I} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{r_{ijm}}{r_{ijn}} A_{jn} \exp(kw(r_{ijm} - r_{ijn} - r_{ijp})/c) \right\} \right. \\
 &\cdot \left. \left[ \sum_{n=1}^N \frac{1}{r_{ijn}} A_{jn}^* \exp(kwr_{ijn}/c) \right] \right\} \quad (6)
 \end{aligned}$$

본 연구에서 구현하고자 하는 측정시스템은 소수의 마이크로폰들을 직선배열하여 횡축방향으로 주사함으로써 측정대상물의 공간적 음의 분포상태 및 발생음원의 위치 추정이 목적이다. 따라서 음원의 주파수 대역에 따른 측정면의 크기 및 마이크로폰간격 등의 최적 조건을 결정하기 위하여 계산기상의 수치계산을 행하였다. 측정시 마이크로폰수가 한정된 경우, 3차원 음향공간상의 홀로그래프 재생은 마이크로폰간격에 따라 평행 간섭파의 영향으로 공간주파수 추상에서 부극이 나타난다. 따라서 음원의 파장 λ에 대해 나이키스트 조건을 만족하도록 설정하여야 하므로 최소 1/2 λ 이하로 한다. 그러므로 마이크로폰 간격을 1/3 λ로 고정하고, 대상음원 주파수를 2kHz로 하여 측정면의 크기를 1 λ, 2 λ, 5 λ, 10 λ 등으로 변화시켜 가며 시뮬레이션을 행하여 주극의 반치폭을 계산한 결과를 그림 2에 나타내었다.

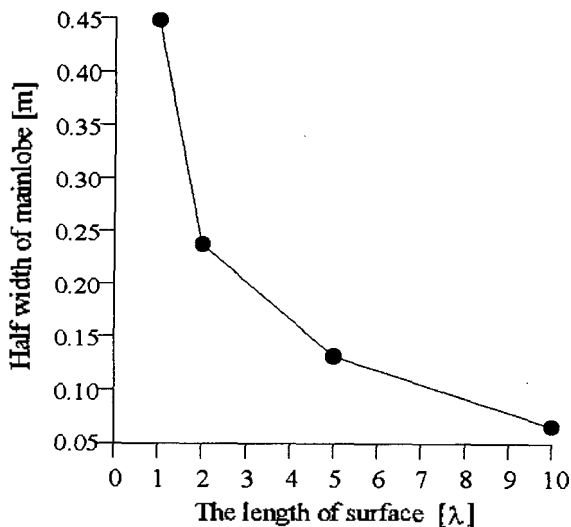


그림 2. 측정면 크기의 변화에 의한 주극의 반치폭  
Fig. 2. Half width of the main lobe by the change of measuring surface.

그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 측정면의 크기가 음원의 파장과 동일한 크기로 한 경우보다, 그 크기를 10배 이상 증가시킴으로써 주극의 반치폭이 90% 이상 감소되지만, 마이크로폰들이 등간격으로 배열되어져야 함으로 많은 수의 마이크로폰들이 요구되는 문제점을 갖고 있다. 일정수의 측정용 마이크로폰을 사용하는 경우, 그림 2의 결과로부터 측정면의 크기가 2 λ 이상에서는 음원의 위치가 좌표상의 한 점으로 나타나므로 측정면 크기를 2 λ로 고정하고 마이크로폰 간격을 1 λ, 1/2 λ, 1/3 λ, 1/6 λ, 1/10 λ 등으로 변화시켜 가며 계산하였다. 마이크로폰 간격에 따른 주극의 반치폭 변화를 조사한 결과, 그림 3과 같은 결과를 얻었다. 그림에서 마이크로폰 간격이 음원의 파장보다 1/3 λ 이하인 경우, 약 30% 이상의 주극의 반치폭 변화를 나타내고 있으므로 그에 상당하는 분해능 향상을 가져올 수 있음을 시사하고 있다. 따라서 본 연구에서는 상술한 계산기상의 시뮬레이션 결과들을 근거로 측정면의 크기 및 마이크로폰간격 등을 각각 2 λ, 1/3 λ로 설정하여 실음장 측정을 행하였다.

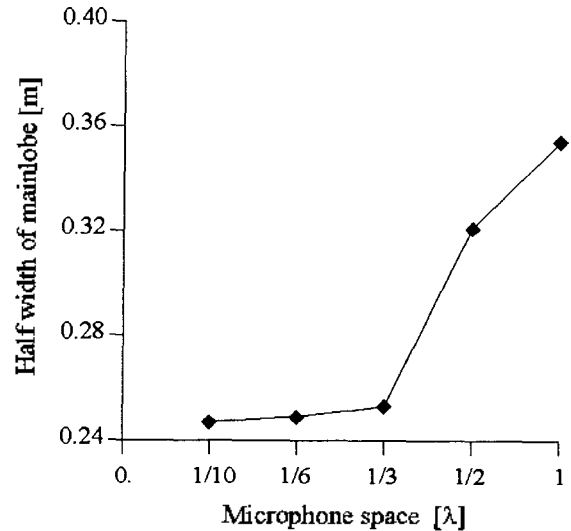


그림 3. 마이크로폰 간격의 변화에 의한 주극의 반치폭  
Fig. 3. Half width of the main lobe by the change of microphone space.

### III. 측정시스템 및 데이터 처리과정

음원위치 추정을 위한 측정시스템의 전체 구성도는 그림 4와 같으며, 실제 제작된 시스템은 그림 5과 같다. 측정용 마이크로폰으로는 신뢰성이 높은 고감도 무지향성 마이크로폰인 B&K4130 8개와 프리앰프 B&K2642를 사용한 경우와 저렴한 일반 콘덴서 마이크로폰 및 자체 제작한 프리앰프를 이용한 경우로 평가하였다. 등간격으로 직선 배열된 8개의 마이크로폰들의 이동과 측정지면 시간의 계산 및 마이크로폰들의 출력신호를 8채널 디지털 오디오 테이프 레코드(SONY PC208AX)에 기록하는 등의 모든 제어를 컴퓨터로 일괄처리가 가능하도록 시스템을 제작하였다.

실음장 측정은 대상음원 신호를 2kHz로 기준한 시물레이션 결과를 토대로 하여, 측정면의 크기와 음원과 측정면간의 거리 및 마이크로폰 간격등을 각각  $2\lambda$ ,  $4\lambda$ ,  $1/3\lambda$ 로 설정하여 실험을 행하였다. 대상음원으로는 신호발생기 HP8904A에서 발생한 순음을 증폭기를 통하여 스피커로 방성하였다. 마이크로폰에서 수음한 신호는 8채널 DAT에 수록하고 전용 인터페이스장치(Digital Interface Adapter PCIF-1)를 이용하여 디지털 신호로 퍼스널 컴퓨터에 저장한다. 저장된 디지털 데이터들은 식 (4)에서 식 (6)까지의 계산알고리즘에 따라 3차원 공간좌표 상에 허상인 홀로그램을 재구성한다. 홀로그램 재생을 위한 신호처리 과정은 그림 6와 같다.

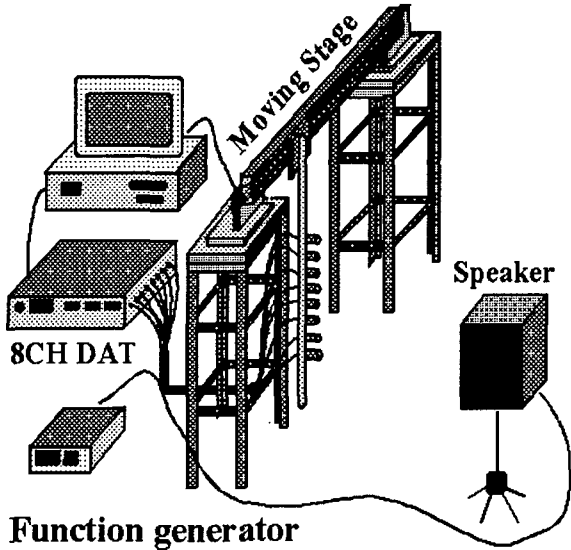


그림 4. 전체 시스템 구성도  
Fig. 4. Construction diagram of the system.

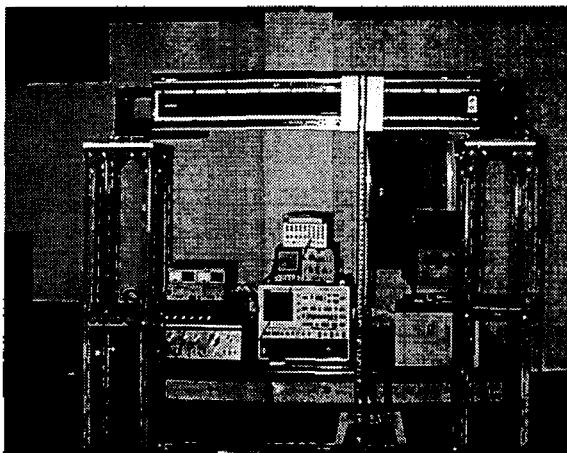


그림 5. 측정시스템 전경  
Fig. 5. Mcausing system.

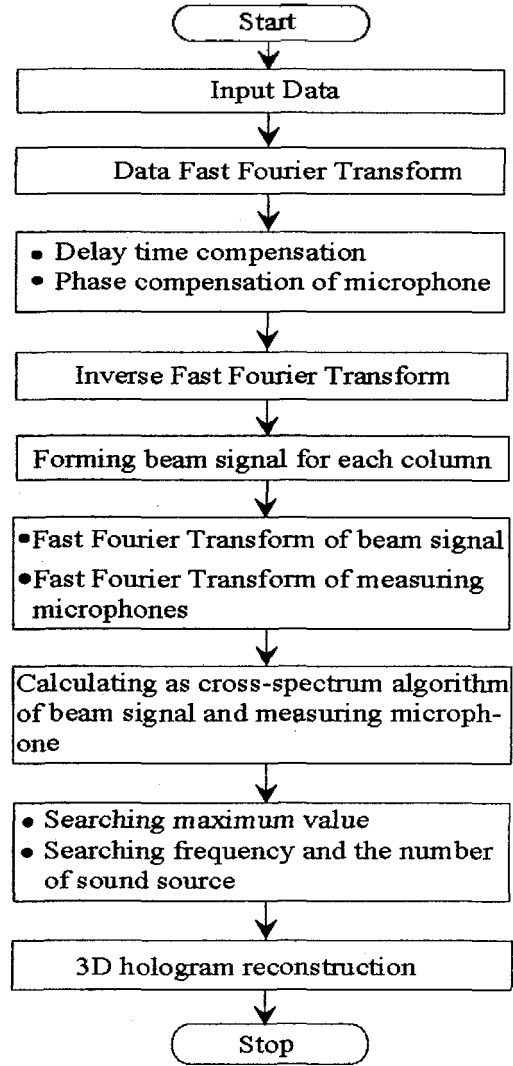


그림 6. 데이터처리 프로그램 순서도  
Fig. 6. Block duagram of the data processing.

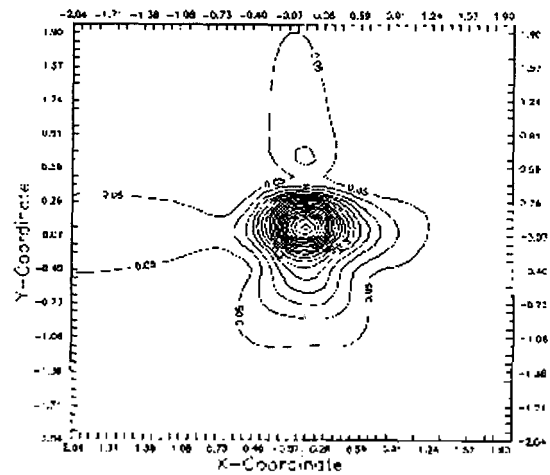
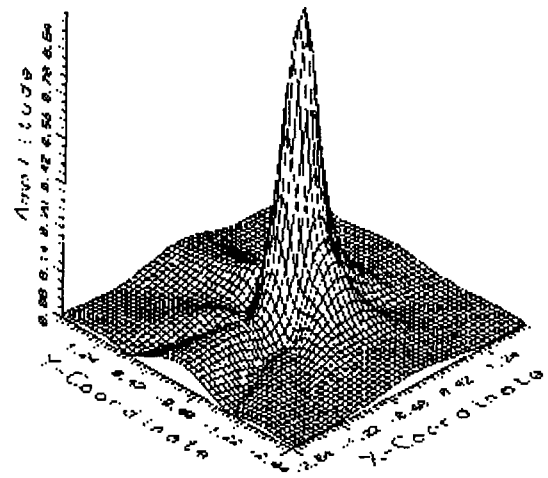
컴퓨터에 저장된 데이터들을 고속 푸리에 변환하고 각 측정지점마다의 측정지연 시간보상 및 각 마이크로폰들의 위상편이를 보정한 후, 역 푸리에 변환하여 시간영역 합수로 재현한다. 각 열 측정시, 직선배열된 마이크로폰에 수음된 신호들만으로 빔포밍 신호를 형성한다. 그리고 각 마이크로폰에 수음된 신호와 빔포밍 신호를 각각 고속 푸리에 변환한 다음, 크로스 스펙트럼 알고리즘을 이용하여 계산한 후, 각 지점의 최대값과 주파수를 찾으므로써 측정면의 홀로그램을 구성한다. 마지막으로 측정면에 형성된 홀로그램을 음원면에 재생시키므로써 가상적인 3차원의 음압분포를 나타내는 음원면의 홀로그램을 구현한다. 그 결과 음원면에 재구성된 홀로그램의 최대진폭 변화를 나타내는 지점을 음원의 위치로 추정한다.

IV. 실음장 측정 및 다중음원 위치추정

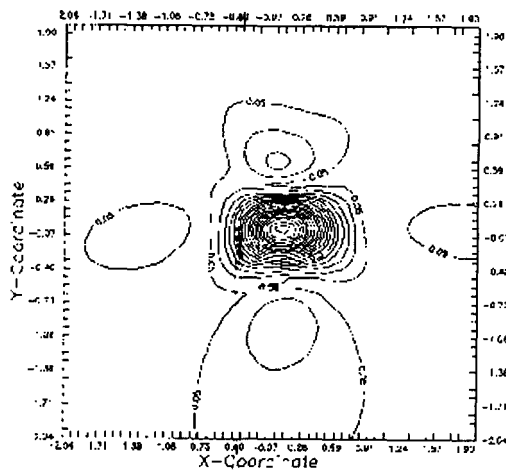
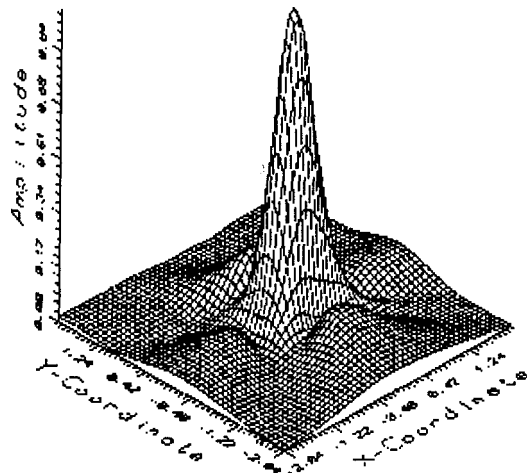
실음장에서 대상음원 신호는 단일 주파수의 2kHz 정현파

를 신호원으로 하고, 잡음원은 백색잡음을 방사하여 신호대 잡음비를 약 28dB로 설정하였다. 그리고 측정방법은 기준 마이크로폰을 이용한 경우와 빔포밍법으로 측정된 두가지 경우를 행하였다. 각 방법에 따라 측정된 신호들을 시간차 함수를 사용하여 10회 평균한 경우한 후, 측정된 음압분포를 음원면에 재생시킨 3차원 홀로그램과 등압선 음압분포를 그림 7에 나타내었다.

음원인 스피커를 음장의 중앙 부분에 설치하였으므로 중심점을 기준으로 주극의 조밀한 등압선 변화를 나타내고 있으며, 그에 대칭적으로 부극이 나타난다. 등압선 음압분포의 상호비교에서, 빔패턴을 형성하여 음원의 위치를 추정된 경우가 기준용 마이크로폰을 이용한 것보다 조밀한 음압분포를 나타내고 있음을 관찰할 수 있다. 이것은 기준신호 측정용 마이크로폰에 동일성분의 잡음이거나 반사파 및 간섭파 등의 혼입이 신호대 잡음비의 열화를 초래시키며, 빔포밍법에 비해 음원추정의 분해능을 상대적으로 떨어뜨리는 원인이 된다.



(b) 빔포밍법



(a) 기준 마이크로폰법

그림 7. 기준 마이크로폰과 빔포밍을 이용한 3차원 홀로그램 및 등압선 분포

Fig. 7. Three dimensional hologram and isobaric line distribution using reference microphone and beamforming.

또한 일반 콘덴서 마이크로폰을 이용하여 상술한 두가지 측정법에 따라 음원의 주파수를 변화시키며, 각각 실음장 측정을 행하였다. 측정된 데이터로부터 주극의 반치폭(half width of mainlobe) 변화를 비교하였으며, 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 주극의 반치폭이란 최대 진폭에서 -3dB 떨어지는 점의 주극폭을 의미하고 그 변화에 따라 음원위치추정의 분해능이 좌우된다. 그리고 음원의 주파수를 2kHz로 가정하여 시뮬레이션에서 마이크로폰 간격을 결정하였으므로, 주파수가 2kHz인 음원에서 주극의 반치폭이 최소가 됨을 알 수 있다. 시간차 함수를 이용하여 평균횟수에 따른 반치폭 변화를 비교·검토한 결과들 그림 9에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 7개의 마이크로폰을 이용한 경우에도 빔포밍법이 기준 마이크로폰법에 비해 상대적으로 반치폭이 20%이상 감소되므로 좁은 음원위치 추정이 가능함을 시사하고 있다. 또한 빔포밍법

을 사용한 경우가 10회 평균만으로도 기준 마이크로폰법으로 측정된 경우보다 분해능이 향상되고 그 계산시간을 단축할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 그리고 일반 콘덴서 마이크로폰을 사용한 경우에도 충분한 분해능을 가지고 음원위치 추정이 가능함을 그림 8과 그림 9의 결과로부터 알 수 있다.

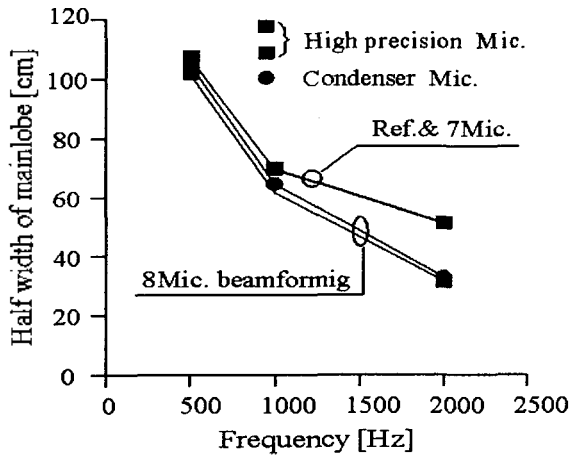


그림 8. 주파수 변화에 따른 주극의 반치폭 변화  
Fig. 8. Half width variance of the main lobe by the change of frequency.

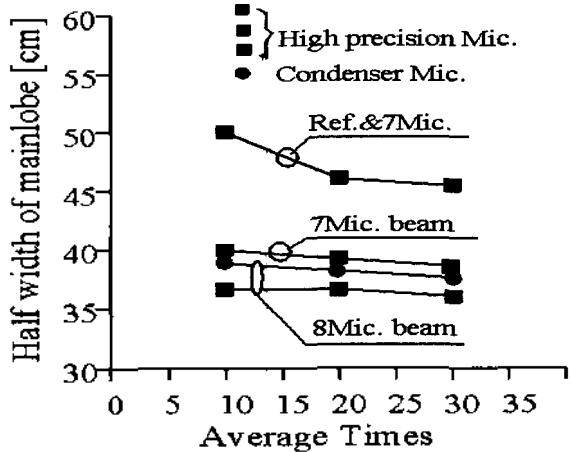


그림 9. 평균횟수에 따른 주극의 반치폭 변화  
Fig. 9. Half width variance of the main lobe by the change of average time.

음원면에 재생한 홀로그램상에 음원위치를 나타내는 주극과 함께, 노이즈와 반사파 및 간섭파의 영향으로 허상인 부극이 나타날 수 있다. 만약 부극이 주극보다 큰 진폭을 가지게 되면 음원위치 파악이 불가능하므로, 부극이 음원 위치 추정에 미치는 영향을 조사할 필요가 있다. 그러므로 본 연구에서는 음원을 주파수 2kHz인 순음을 기준으로 간 이용 무향실과 일반강의실에서 고감도 마이크로폰과 일반 콘덴서 마이크로폰을 이용하여 실험을 행하였고, 그 결과를 그림 10에 나타내었다.

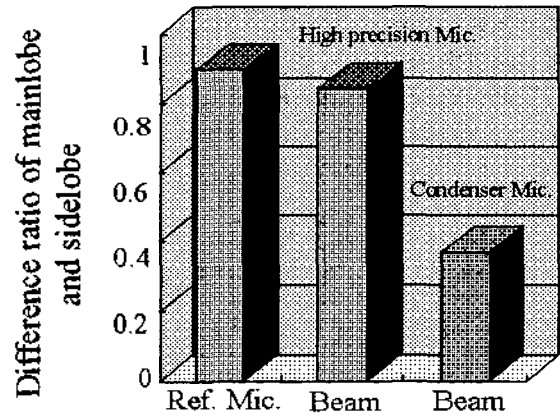


그림 10. 고감도와 저감도 마이크로폰에 있어서 주극과 부극의 크기 차  
Fig. 10. Difference ratio of the main and side lobe with high and low sensitivity.

그림 10에서 고감도 마이크로폰을 이용하여 기준 마이크로폰법과 빔포밍법에 의해 주극과 부극의 진폭크기 차를 비교한 결과, 빔포밍법보다 기준 마이크로폰법의 경우가 크게 나타나고 있다. 이것은 홀로그램 재생을 위한 계산 과정에서 빔포밍법의 경우에는 분해능이 높기 때문에 평균 횟수를 10회로 하지만, 기준 마이크로폰법의 경우 평행 간섭파 혹은 반사파의 영향이 크기 때문에 30회의 평균 횟수로 계산하였기 때문이다. 그러나 홀로그램 재생에 소요 되는 계산시간과 주극의 침예성을 고려한다면 빔포밍법이 훨씬 우수함을 그림 9의 결과에서 확인하였다.

그리고 빔포밍법을 일반 콘덴서 마이크로폰에 적용한 경우, 주극과 부극의 크기차가 약 50%로 나타났으며 그 이유로는 자체 제작한 프래임프 및 마이크로폰의 자체 전기적 노이즈 성분의 영향으로 고려된다. 그러나 분해능의 침예성을 고려하면 고감도 마이크로폰을 이용한 경우에 비해 약 5%이내의 오차를 가지므로 음원위치 추정에는 충분한 것으로 사료된다. 그 응용성을 재검토하기 위하여 본 연구에서는 빔포밍법으로 일반 마이크로폰을 사용하여 잔향시간이 150ms 이상이고 암소음이 약 55dB인 일반강의실에서 다중 음원에 대한 실험을 행하였다. 두개의 음원을 설치하고 두음원의 음압을 동일하게 설정하여 음장 실험을 행하였다. 음원으로는 주파수가 다른 두가지의 순음을 이용하고 각각의 주파수를 2kHz와 3kHz로 설정하였다. 또한 두 음원의 음압은 동일하며 주변 소음에 대한 신호대 잡음비를 각각 30dB로 음압의 크기를 설정하였다. 그리고 음원과 음원간의 거리는 40cm이며, 측정면의 크기와 마이크로폰 간격 및 음원과 측정면 사이의 거리는 계산기상의 시뮬레이션 결과를 토대로한 최적조건으로 결정하였다.

이중 음원에 대한 실험장 측정에서 분석한 음원면의 홀로그램 재생상과 등압선 음압분포를 그림 11에 나타내었다. 그림 11(b)의 조밀한 등압선 음압분포에서 두 음원간의 거리가 40cm임을 추정할 수 있으며 실험에서 설정한 두 음원간의 간격과 동일하므로 음원위치 추정의 정확성

을 알 수 있다. 또한 주변 잡음에 대한 강인성을 평가하기 위하여, 다중음원에 대해 음장의 압소음만 존재하는 경우와 동일 음장에 다른 두 종류의 잡음을 인위적으로 각각 발생시켜 실험을 행하였다. 실험조건으로는, 음원은 이중음원으로 신호 주파수를 각각 2kHz와 2.75kHz로 설정한 순음을 이용하고 두음원의 음압은 동일하게 설정하였으며, 인위적으로 발생시키는 두 종류의 잡음으로는 진주파수 성분을 포함하는 백색잡음과 특정 주파수 대역이 강하게 나타나는 유색잡음을 선택하고 음원과 발생시킨 잡음과의 신호대 잡음비를 약 10dB로 설정하였다. 실험 결과는 주극과 부극의 진폭차의 비율로 계산하여 그림 12에 나타내었다. 결과에서 주파수가 2kHz인 음원보다 2.75kHz의 음원의 주극과 부극의 차의 비율이 낮게 나타나는 것은, 음원측정시 마이크로폰 간격 및 측정면의 길이를 주파수 2kHz의 음원을 중심으로 설정하였기 때문이다.

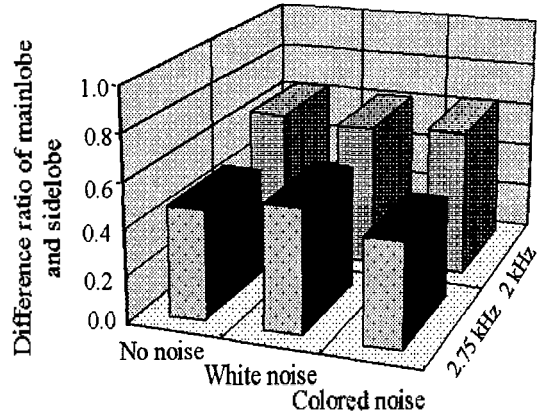
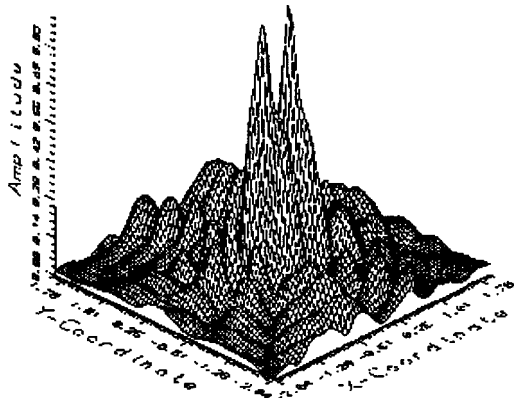
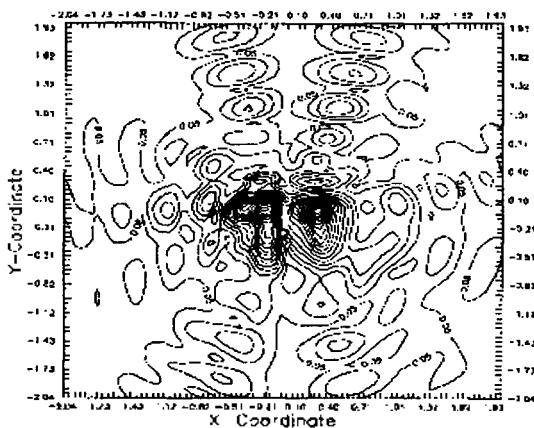


그림 12. 일반 강의실에서 이중 음원의 주극과 부극의 크기 차의 비율

Fig. 12. Difference ratio of main and side lobe of two sound source in the lecture room.



(a) 3차원 홀로그램 재생상



(b) 등압선 음압분포

그림 11. 이중음원에 대한 3차원 홀로그램 재생상과 등압선 음압분포

Fig. 11. Reconstruction of three dimensional hologram for two sound source and isobaric line sound pressure distribution.

그리고 유색잡음을 방성한 경우가 다른 두 경우보다 그 비율이 낮게 나타나는 이유는 음원의 주파수 성분을 포함한 단속적이고 특정 주파수 대역이 강한 유색잡음이었기 때문에 서론에서도 언급한 바와 같이 그 영향이 나타난 것으로 사료되지만 음원의 주극과 부극의 진폭차의 비율이 50%이상이므로 음원의 위치추정에는 문제시 되지 않음을 여러 실험을 통하여 확인하였다.

본 연구에서 수회의 반복실험을 통하여 재현성을 확인하였을 뿐만 아니라, 저렴한 일반 콘덴서 마이크로폰을 사용한 여러 실험장 실험을 통하여 음원위치 추정의 가능성을 검증하였으며, 제안한 방법 및 측정시스템의 유용성 및 우수성을 확인하였다.

### V. 결론

본 연구에서는 기준 마이크로폰과 측정용 마이크로폰들간의 크로스스펙트럼 알고리즘으로 음원의 위치를 추정하는 음향홀로그래피법의 문제점들을, 개발한 빔포밍 음향홀로그래피 측정시스템으로 개선하였으며 계산기상의 사전 시뮬레이션을 통한 측정조건의 설정방법 등을 제안하였다. 그리고 처리속도의 개선적 측면에서 빔포밍법을 적용함으로써 동일 시간당 함수를 이용하여 10회의 평균만으로도 약 20%이상의 분해능 향상을 가져왔다. 또한 저렴한 일반 콘덴서 마이크로폰을 사용한 다중 음원측정 및 잡음에 대한 강인성 평가 실험을 통하여 고감도 마이크로폰에 비해 5%이내의 오차를 갖지만 음원의 절대 위치 추정의 정확성을 검증하였으며 본 연구에서 제안한 측정조건의 설정법 및 개발한 측정시스템의 유용성 및 우수성을 여러 실험장 실험을 통하여 확인하였다.

### 참고 문헌

1. 小野, "音響インテンシティの自動車騒音測定の適用例," 日本音響學會誌, 43巻12, pp975-982, 1987.
2. M. Kaveh and A.J. Barahell, "The statistical performance of

2. M. Kaveh and A.J. Barabell, "The statistical performance of the MUSIC and minimum algo Satoshi Hongo, Masato Abe, Yoshiaki Nemoto, and Noriyoshi Chubachi: A method to estimate the acoustic holography using a sub-array decreasing the effect of other sound sources and reflections," Inter Noise 93 Proceedings Vol.3 1993.
3. Masahide Yoneyama, Jun-ichiroh Fujimoto & Hideki Ogawa, "Holographic Recording Methods for Vibrating Mode of Loudspeaker under External Disturbance," J. Acoustic. Soc. Jpn Vol. 31, No. 10 1975.
4. 口高, 安久, 橋: "複素音響 インテンシティによる音場解析" 日本音響學會誌43卷12号, pp. 994-1000, 1987.
5. D.H.Johnson and S. R. DeGraaf, "Improving the resolution of bearing in passive sonar array by eigenvalue analysis," IEEE Trans. of ASSP, Vol. ASSP-30, No.4 pp. 638-647 1982.
6. 本郷 哲, "複素センサによる音響ホログラフィ法の音源探索への応用に關する研究," 東北大學 審査博士學位論文
7. 장 비, 심동연, 김천덕, 차경환, 이채봉, "직선배열형 음향센서 어레이를 이용한 3차원 음향홀로그래피," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, pp. 201-206(1996. 11).
8. 김천덕, 심동연, 장 비, 이채봉, "3차원 음향홀로그래피법을 이용한 음원위치 추정에 관한 연구," 한국음향학회지, Vol. 16, No. 5, pp. 76-82, July. 1997.
9. JDan E. and Russell M, "Multidimensional digital signal processing," Prentice-hall, Inc.

▲김 천 덕(Chun-Duck Kim)

1997년 3월~현재: 부경대학교 전기공학과 교수  
(한국음향학회지 Vol. 15, No. 3 참조)

▲심 동 연(Dong-Youn Sim)

1998년 3월~현재: 동북대학교 벤처 Business center 연구원  
(한국음향학회지 Vol. 16, No. 5 참조)

▲장 비(Jang Bee)

1998년 3월~현재: 부경대학교 음향진동공학과 박사과정  
(한국음향학회지 Vol. 16, No. 5 참조)

▲차 경 환(Kyung-Hwan Cha)

현재: 동서대학교 정보통신공학부 교수  
(한국음향학회지 Vol. 15, No. 5 참조)

▲이 채 봉(Chai-Bong Lee)

현재: 동서대학교 정보통신공학부 교수  
(한국음향학회지 Vol. 15, No. 5 참조)