

3차원 음향홀로그래픽을 이용한 음원위치 추정에 관한 연구

A Study Absolute Position Estimation of Sound Source Using 3D Acoustic Holography

김 천 덕*, 심 동 연*, 장 비**, 이 채 봉***, 차 경 환***

(Chun-Duck Kim*, Dong-Youn Sim*, Bee Jang**, Chai-Bong Lee***, Kyung-Hwan Cha***)

※본 연구는 한국과학재단 '96 핵심전문 연구[과제번호:(961-0921-114-2)] 지원을 받아 수행된 것입니다.

요 약

본 논문은 음원의 절대위치를 정확하게 추정할 수 있는 음향홀로그래픽법에 관하여 계산기상의 시뮬레이션 및 측정시스템을 이용한 실험결과에 대하여 서술한다. 이 연구에서는 원거리 음장을 만족하도록 측정면을 설정하여 7개의 마이크로폰을 직선으로 배열한다. 음원의 측정은 음원면에 근접한 위치에 한 개의 기준 마이크로폰을 설치하고 측정면의 마이크로폰들을 등간격으로 스캐닝하면서 각지점의 음을 동시 기록한다. 수음한 기준음과 측정음간의 크로스 스펙트럼 알고리즘에 의하여 음원의 절대위치를 측정한다. 그리고 각 마이크로폰의 위상차는 기준 마이크로폰을 대상으로 위상보상 하였으며, 측정시의 시간지연은 제 1열 측정시점을 기준으로 시간보상을 행하였다. 측정면에 설정한 마이크로폰들의 최적 간격은 수치 시뮬레이션에 의하여 정한다. 음원신호는 정현파를 이용하고 S/N비를 30dB의 조건하에서 각각 실험을 행하였다. 시뮬레이션과 실험에서 결정한 최적 마이크로폰 간격은 2kHz인 정현파 음원을 기준으로 하여 공간상의 나이퀴스트 조건을 만족하도록 설정하였다. 무향실에서 측정한 실험결과, 500Hz와 1kHz의 신호원에 대한 음원이 2kHz인 경우의 추정된 3차원 홀로그램의 주극폭이 각각 87%와 30%씩 감소하였고, 그 결과 수치 시뮬레이션의 타당성을 확인할 수 있었다. 그러므로 본 연구에서 제안하는 3차원 음향 홀로그래픽법을 이용한 음원위치 추정에 관한 연구의 유용성을 검증하였다.

ABSTRACT

This paper describes simulations and experimental results using a measuring system which utilizes the acoustic holographic method in order to exactly estimate an absolute position of a sound source. The measuring surface is installed to satisfy with a far field to the sound source and is composed of linear arrayed seven microphones. A measurement is simultaneously recorded by a reference microphone setting up a neighbour sound source and the linear arrayed seven microphones which are moved to the same interval. An absolute position of sound source is estimated by the cross-spectrum method to the received sounds between a reference and the measuring microphones. Phase differences of each microphone and time delays during scanning are compensated to the reference microphone and the measuring time of the first column. An optimal interval for each microphone in the measuring surface is decided by a numerical simulation. A source signal makes use of a sinusoid, and S/N ratio is 30dB in the experiment. The optimal microphone's interval in the simulation and the experiment is decided in order to satisfy with the Nyquist space sampling condition related to the wave length of 2kHz sinusoid. Mainlobe width of a estimated 3D hologram in the case of 2kHz source signal is decreased to 87% and 30% in comparison to 500Hz and 1kHz, and then a valid of simulation results is confirmed. Therefore, we verified a utilization of the study for a sound source estimation using 3D acoustic holographic method.

I. 서 론

최근에는 다차원 디지털 신호처리 기술의 발달에 따라 공간상의 음원위치 추정이나 음원의 영상화에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다¹⁾. 특히, 공간상의 음원위치 추정법은 자동차 및 항공기 등과 같은 여러 가지 기계요소들의 다양한 조합의 구조물에서 발생하는 소음이나 이상음 등의 위치를 추정하여 제어하고 진단하는데 응용되

*부경대학교 전기공학과
**부경대학교 대학원 음향진동공학과
***동서대학교 전자기계공학부
접수일자: 1997년 4월 9일

고 있다. 그러므로 음원위치 추정법은 고분해능이 요구되어지며, 정확한 음원위치 동정이 요구된다.

종래의 일반적 음원위치 추정법으로는 음향인텐시티법^[2], 직선배열 센서어레이를 이용한 음원의 도래방향 추정법^[3] 및 선형예측 모델법^[4] 등이 널리 알려져 있다. 그러나 이들 방법들은 많은 계산량과 장시간 처리가 요구되며 음원의 수를 모르는 실용장애 응용하는 데는 여러 가지 문제점들을 갖고 있다. 따라서 이 연구에서는 1948년 가보루에 의해 제안된 광학적 홀로그래피법의 이론에 근거하여 크로스스펙트럼법을 응용한 음향홀로그래피법을 이용한 공간상의 음원 위치 추정법을 제안한다.^{[1][5][6]} 짧은 계측시간과 잡음 환경에 대한 강인성 및 측정 장비의 저렴성 등의 잇점을 갖고 있다.

따라서 본 연구에서는 한정된 센서로 측정 시스템을 구성하여 계측시간의 단축과 직선 배열형 음향센서 어레이를 이용하여 측정대상 음원에 등간격으로 직접 주사시켜 음원의 위치추진을 행하였다. 공간상에 참조센서를 고정시키고 각 측정센서 어레이들의 출력과 크로스 스펙트럼을 행하여 측정대상의 각 지점마다 음압을 기록한 후, 그 음압분포를 3차원 음향공간인 음원면상에 재생시켜 음원위치를 추정한다.

II. 3차원 음향홀로그래피법의 원리

음향홀로그래피의 일반적 원리도는 그림1. 과 같다^[1]. 음원이 존재하는 면을 음원면이라 하면 그 면에 평행하게 측정면을 설정한다. 그림1에서 공간상의 음원면에 하나의 점음원이 존재한다고 가정하면, 점음원의 위치벡터는 r_a 이고 그 지점의 음압 스펙트럼은 A 이다. 그리고 측정면상의 임의의 한점 S 의 위치벡터를 r_s 라 가정하면, 그 관측지점에서의 음압진폭은 식(1)과 같이 표현된다.

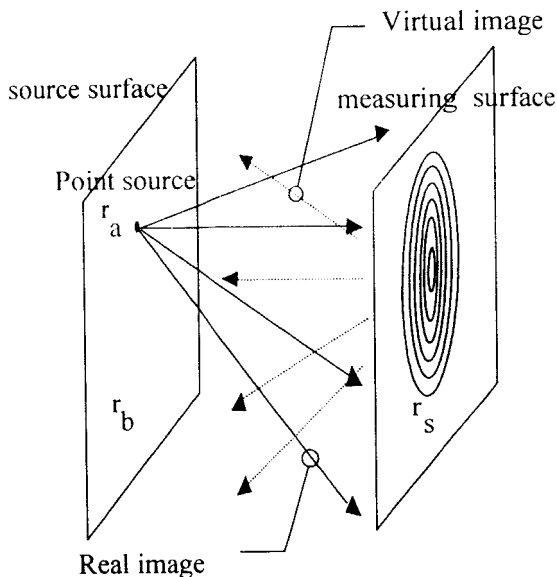


그림 1. 음향 홀로그래피의 원리도

$$P_s(r_s) = \frac{A}{|r_s - r_a|} \exp(-j\omega|r_s - r_a|/c) \quad (1)$$

여기서 c 는 음속이다.

식(1)로 부터 측정면상의 음압진폭 분포를 3차원 음향공간인 음원면상에 그 허상을 재생시킬 수 있다. 이때 측정면상의 음향센서 간격을 무한히 작게 하고 음향센서 어레이 형상을 무한히 크게 한다면, S 평면의 그 재생 허상은 수학적으로 공간상의 적분형태를 띠게 되고 음원면상의 임의의 한점 B (임의의 위치벡터 r_b)에서의 음압분포는 식(2)와 같다.

$$P_B = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{A}{|r_s - r_a|} \exp(-j\omega|r_s - r_a|/c) \cdot \frac{1}{|r_s - r_b|} \exp(+j\omega|r_s - r_b|/c) dS_s = A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(j\omega(|r_s - r_b| - |r_s - r_a|)/c)}{|r_s - r_b| \cdot |r_s - r_a|} dS_s \quad (2)$$

여기서 dS_s 는 측정면 s 에서의 미소면적을 의미한다.

식(2)에서 측정면의 길이와 센서간격이 유한일 때 식(3)과 같이 이산화 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_B = A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\{j\omega(|r_s - r_b| - |r_s - r_a|)/c\}}{|r_s - r_b| \cdot |r_s - r_a|} dx dy = \lim_{l \rightarrow \infty} \lim_{d \rightarrow 0} \sum_{m_x = -l/(2d)}^{l/(2d)} \sum_{m_y = -l/(2d)}^{l/(2d)} A \frac{\exp\{j\omega(|r_s - r_b| - |r_s - r_a|)/c\}}{|r_s - r_b| \cdot |r_s - r_a|} \quad (3)$$

여기서 l 은 측정면의 길이 이고, d 는 센서의 간격이다. 그리고 x 와 y 는 가상 홀로그래피면의 가로, 세로 좌표이다. 그리고 적분식에서 미소거리 dx, dy 는 이산화 합 의 식에서 m_x, m_y 로 대체된다.

한정된 소수의 음향센서 어레이를 이용하여, 고분해능의 음향홀로그래피를 구현할 수 있다. 그림2와 같이 기준센서를 음원면 가까이에 설정하고 직선형 센서어레이를 이용하여 음원면에 대해 직접 주사시킨 후, 각각의 크로스 스펙트럼을 취하면 고분해능의 음향홀로그래피를 구현할 수 있다. 이를 기준센서를 이용한 주사형 음향홀로그래피법이라 명한다. 그림2에서 사각형 측정면에 직선형으로 배열된 동시 측정이 가능한 각 센서군을 부분 어레이군이라 하고, l 개의 센서로 구성되어 진다. 부분센서 어레이군을 제1열에서 J 열까지 주사하면 측정면상에 $l \times J$ 개의 센서배열을 얻을 수 있다. 음원이 N 개 존재할 경우, n 번째 음원에서 발생하는 주기성 시간파형의 주파수 스펙트럼을 $A_n(\omega)$ 라 한다. J 열로 구성된 부분센서 어레이군이 존재할 때, 각 열의 센서 어레이군에서 수음된 음원의 주파수 특성은 다르게 나타난다.

3차원 음향공간상에 재생되는 홀로그램은 각센서의 출력 $S_{ij}(\omega)$ 와 j 열 관측시의 기준센서 출력인 $S_{rj}(\omega)$ 와의

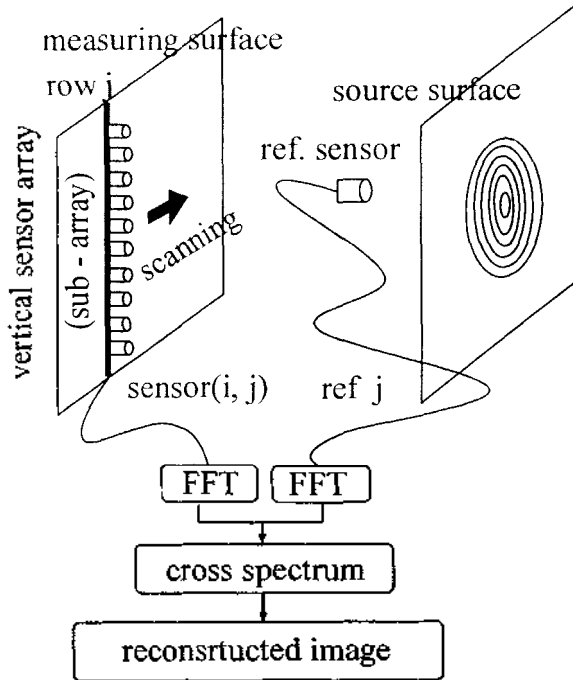


그림 2 기준센서와 음향센서들간의 크로스 스펙트럼을 이용한 음향홀로그래피법

크로스 스펙트럼을 구함으로써 얻어지고 수학적으로는 식(4)과 같이 표현되어진다.

$$S_{rj}(w) \cdot S_{ij}^*(w) = \left[\sum_{n=1}^N \frac{1}{r_{rn}} A_{jn} \exp(-jwr_{rn}/c) \right] \cdot \left[\sum_{n=1}^N \frac{1}{r_{jn}} A_{jn}^* \exp(+jwr_{jn}/c) \right] \quad (4)$$

여기서 r_{rn} 는 n 번째 음원과 기준센서와의 거리이고, A_{jn} 는 j 열에서 수음한 n 번째 음원의 주파수 스펙트럼이다. 그리고 *는 켈레 복소수이다.

Ⅲ. 계산기상의 3차원 음향공간 홀로그래픽 시뮬레이션

음향홀로그래피법을 실용화 하는데는 검토되어야 할 2가지 사항이 있다. 측정시 음향센서의 수가 한정된 경우, 3차원 음향공간 홀로그래픽 재생은 센서간격에 따라 평행간섭파의 영향으로 인해 공간주파수 축상에서 일그러짐 현상이 나타나므로 그 간격의 결정은 홀로그래픽의 공간주파수가 나이퀴스트의 조건을 만족하여야만 한다. 그래서 센서간격은 신호음의 반파장 이하의 조건이 필요하다.

한편 측정면이 크면 클수록 재생상의 주극폭(mainlobe)이 좁아지고 분해능이 향상되지만, 한정된 센서로는 센서간격을 무한정 넓히는 것은 불가능하다. 따라서 실음장의 측정에 앞서 측정면의 크기와 센서간격 및 음원으로 부터 측정면까지의 거리를 최적화하기 위해서 식(3)과 식(4)을 이용하여 계산기상에서 3종류의 수치시뮬레이션

의 실험을 하였다.

첫번째는 신호원의 파장을 앞에서 기술한 바와 같이, 최소한 센서간격은 나이퀴스트의 조건에 따라 파장의 $1/2\lambda$ 이하가 되도록 설정한다. 따라서 센서간격을 $1/3\lambda$ 로 고정하고, 대상음원 신호원의 주파수를 2kHz, 음원과 측정면과의 거리는 4λ 및 재생면의 크기를 $2 \times 2[m]$ 로 한 후, 측정면의 길이를 $1\lambda, 2\lambda, 5\lambda, 10\lambda$ 로 변화시켜가며 수치시뮬레이션을 행한 결과를 그림3에 나타내었다. 그림3에서 센서간격이 고정되어 있을 때, 측정면 크기의 증가에 따라 고분해능을 갖지만 그 반면에 많은 센서가 필요하다. 실음장 측정시, 이 연구에서는 1개의 기준센서와 7개의 측정용 센서를 이용한 크로스 스펙트럼법을 응용하므로 측정면 길이가 최소 2λ 로 설정하는 것이 적합하다.

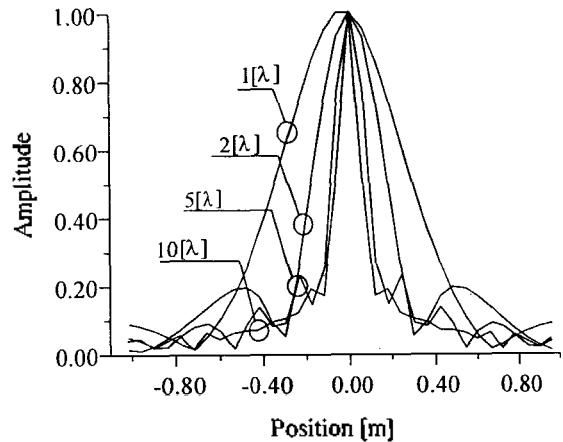


그림 3. 측정면 크기에 따른 홀로그래픽 재생상

두번째로는 첫번째의 시뮬레이션 결과로부터 최적의 측정면 길이인 2λ 를 고정시키고, 센서간격을 $1\lambda, 1/2\lambda, 1/3\lambda, 1/6\lambda, 1/10\lambda$ 로 변화시키면서 시뮬레이션을 행하였다. 그리고 그 결과를 그림4에 나타내었고, 센서간격이 $1/3\lambda$ 이하에서는 주극폭 변화가 거의 나타나지 않는다. 따라서 최소 음향센서 간격을 $1/3\lambda$ 로 하여 실음장 측정을 행하였다.

세번째는 그림3과 동일한 조건으로 음원과 측정면 사이의 거리를 $3\lambda, 4\lambda, 5\lambda$ 로 변화시켰을때, 주극의 최대치에서 -3dB 떨어진 곳의 주극폭의 변화를 조사한 결과를 그림5에 나타내었다.

그림5로 부터 음원에서 측정면까지의 거리가 근접할수록 고분해능을 가지며 주극의 폭이 좁아짐을 알 수 있다. 그러나 실음장 측정시 측정면의 센서와 기준센서와의 설치 관계가 문제시 되므로 측정면까지의 거리를 3λ 이하로 하는것은 불가능하다. 그러므로 이 연구에서는 음원과 측정면 사이의 거리를 4λ 로 규정하는 것이 가장 적절하다고 사료된다.

상기의 수치시뮬레이션 결과를 근거로 실음장의 음원 위치 추정에 이용될 측정면의 길이와 센서간격 및 음원

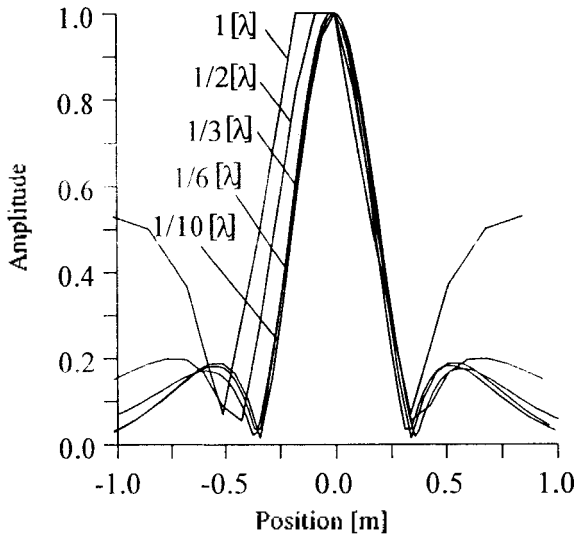


그림 4. 센서간격에 따른 2차원 홀로그램 재생상

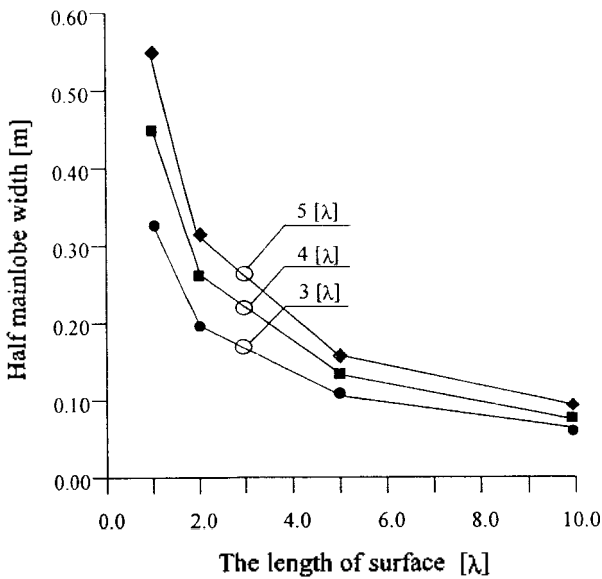


그림 5. 음원과 측정면 간의 거리에 따른 주극폭의 변화조사

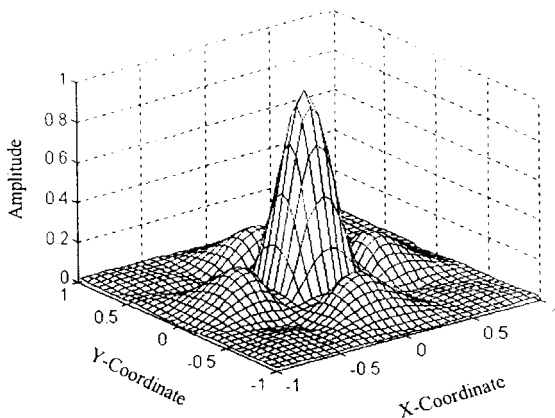


그림 6. 센서간격 1/3λ의 3차원 홀로그램 재생상

과 측정면사이의 거리를 각각 2λ , $1/3\lambda$, 4λ 로 규정하였다. 동일 조건으로 측정면의 음압분포를 음원면에 3차원적으로 재생시킨 음향홀로그래픽의 시뮬레이션 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 주극의 정점은 음원면에서 점음원의 위치를 나타낸다. 주극을 중심으로 부극이 나타나고 그 부극의 산과 같은 재생시 평행 간섭파의 영향 때문이다.

IV. 실음장에서의 음원위치 추정 실험

음원위치 추정을 위한 측정 시스템의 전체 구성도는 그림 7과 같다. 측정용 음향센서는 무지향성 마이크로폰인 B&K4130의 8개를 이용하고 프리앰프는 B&K2642이다. 그리고 1개의 기준센서와 7개의 측정용 센서로 구성되어 있으며, 센서간격과 동일한 열의 이동 및 이동시의 정확한 지연시간의 계산과 8개의 음향센서 출력률 동시 기록이 가능한 8채널 디지털 오디오 테이프 레코드 제어 등을 PC/AT급 퍼스널 컴퓨터로 하였다.

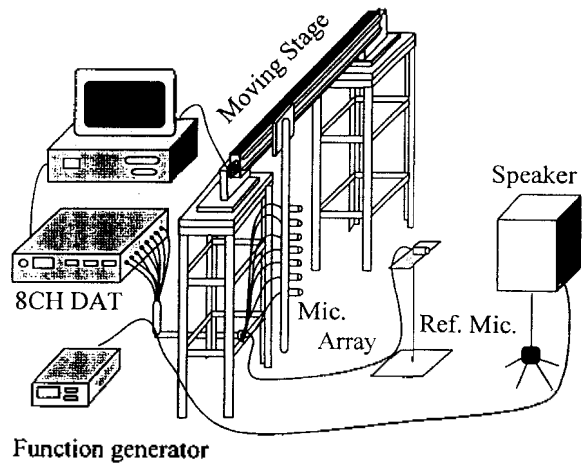


그림 7. 측정시스템의 구성

실음장의 측정은 대상음원 신호를 2kHz로 기준한 시뮬레이션 결과를 토대로 하여 측정면의 길이, 음원과 측정면의 거리, 센서간격 및 재생면의 크기를 각각 2λ , 4λ , $1/3\lambda$, $2 \times 2[m]$ 로 하여 음원 주파수를 500~4kHz까지 변화시켜 가며 측정을 행하였다.

측정음장은 자유음장에 가까운 간이용 무향실이며, 음원으로는 무향실내에 설치한 스피커에 신호 발생기 HP8904A를 구동한 신호를 음원으로 이용하였다. 음향센서로 측정한 출력 신호들을 8채널 DAT(SONY PC208AX)에 수록한 후, 그림 8과 같은 절차에 따라 처리한다. 8채널 DAT 출력을 전용 인터페이스 장치(Digital Interface Adapter PCIF-1)를 이용하여 디지털 데이터를 퍼스널 컴퓨터에 저장한 후, 기준센서에 대해 7개의 음향센서의 위상 및 이득 보상을 행하고 크로스 스펙트럼법에 의해 3차원 음향공간 홀로그램을 계산한다.

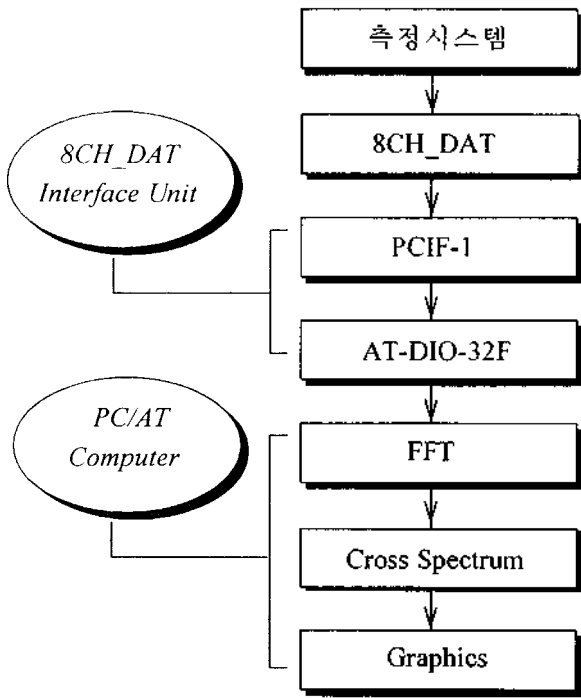


그림 8. 신호처리 분석절차

그림9는 실음장에서 대상음원 신호의 주파수를 2kHz로 하고 실내압소음에 대해 S/N비가 10회 평균한 경우 측정된 음압분포를 음원면에 재생한 2차원 홀로그램의 등압선 음압분포를 나타낸다. 음원인 스피커를 음장의 중앙 부분에 설치하였으므로 중앙점을 기준으로 주극의 조밀한 변화를 알 수 있으며, 중앙에 주극이 나타나고 그에 대칭적으로 부극이 나타난다.

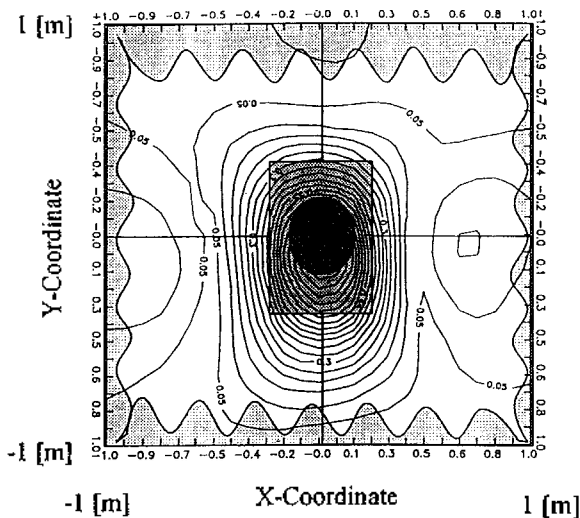


그림 9. 실음장에서의 정원과 2kHz에 대한 등압선 음압분포

그림10은 대상신호의 주파수를 2kHz로 하여 측정면의 크기, 센서간격 및 음원과 거리를 시뮬레이션을 통하여 설정한 후 주파수에 따른 최대 진폭치에서 -3dB 되는

지점의 주극의 반치폭 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시뮬레이션 결과와 유사하게 대상 음원 신호의 주파수가 1kHz에서는 주극의 반치폭이 넓게 나타나므로 음원위치 추정이 부정확하다.

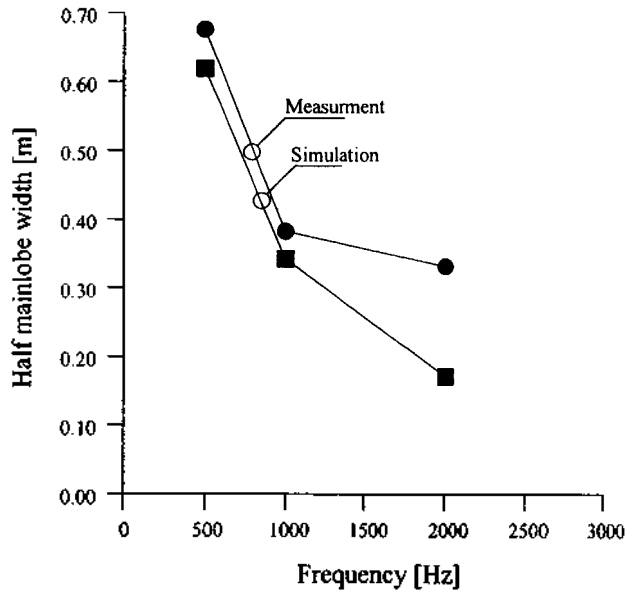
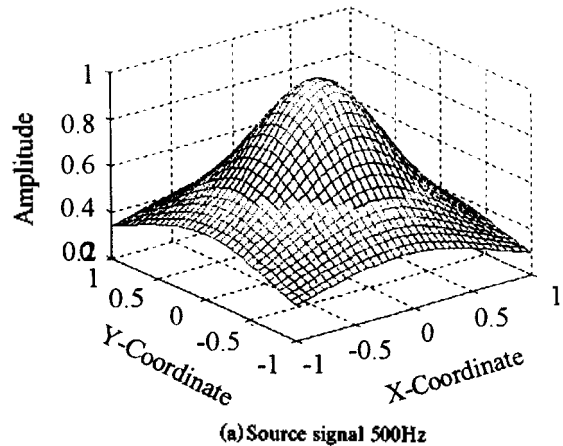
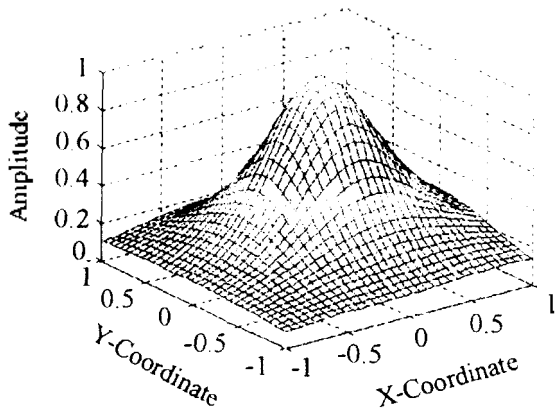


그림 10. 주파수 변화에 따른 주극의 반치폭 조사

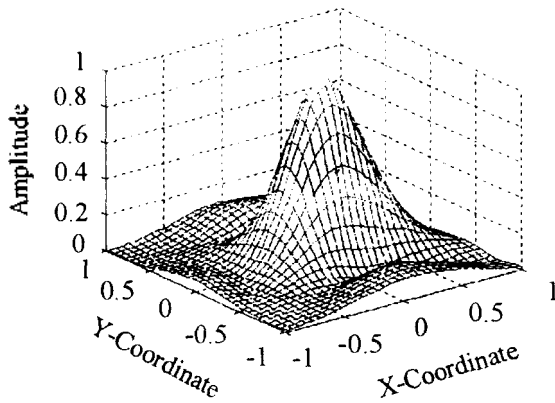
그림11은 대상신호의 주파수 변화에 따라 음원면에 재생한 3차원 음향홀로그램을 나타내고 있다. 그림11(a), (b)의 500Hz와 1kHz에서는 그림10에서 살펴본 바와 같이 주극의 폭이 넓으므로 음원의 위치 추정이 불가능하다. 음원 신호의 주파수가 2kHz인 경우는 그림11(c)와 같이 주극폭이 좁고 음원의 위치인 정중앙에 최대 음압 분포를 나타내고 있으므로 정확한 음원의 절대위치를 알 수 있다. 그러나 4kHz의 음원인 경우, 그림11(d)와 같이 중앙에 주극이 나타나지 않고 두 개의 음원이 존재하는 것으로 나타난다. 실제 음원이 존재해야 할 중앙의 위치에 음압의 최대치가 나타나지 않고 그와 반대로 영점이 나타난다. 이와 같은 현상은 공간상의 나이키스트 조건을 만족하지 않으므로 생겨난 현상으로 추정된다.



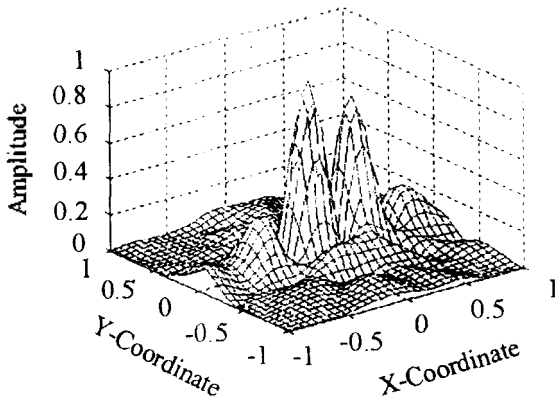
(a) Source signal 500Hz



(b) Source signal 1kHz



(c) Source signal 2kHz

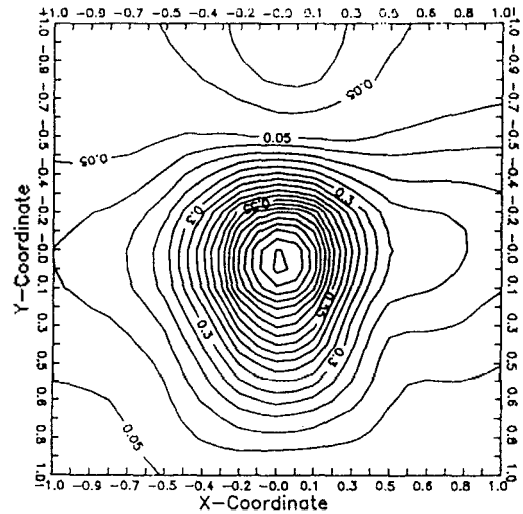


(d) Source signal 4kHz

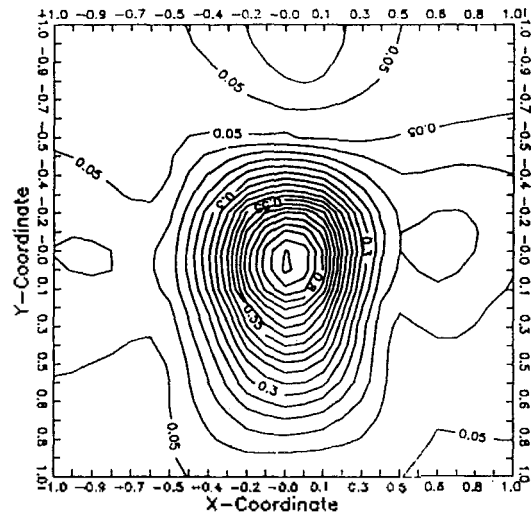
그림 11. 주파수 변화에 따른 3차원 음향홀로그래프 재생산

대상음원신호를 2배로 기준하여 S/N비에 따라 실험을 행한 결과, 그림12와 같은 등압선 음압분포를 찾아내었다. S/N비가 30dB이고 10회 평균한 결과는 그림9와 같이 중앙을 기준으로 대칭적인 음압분포를 나타내지만, S/N비가 20dB인 경우는 동일 평균횟수로 계산하여도 노이즈의 영향으로 인하여 그림12(a)와 같이 등압선 음압분포가

넓게 나타나므로 정확한 음원의 위치 추정이 어렵다. 그러나 평균횟수를 100회로 증가시키면 그림12(b)와 같이 중앙의 음원의 위치에서 주극폭이 좁고 상하 좌우로 대칭적인 정확한 음원위치 추정이 가능함을 알 수 있다. 따라서 S/N비가 낮은 경우는 기준센서에 노이즈가 혼입되므로 음원위치를 정확하게 추정할 수 없다는 것을 알 수 있다.



(a) 10 average times



(b) 100 average times

그림 12. S/N비가 20dB인 정현파 2kHz에 대한 등압선 음압분포 변화

V. 결 론

본 연구에서는 실음장 측정에 앞서 고려되어야 할 중요 사항인 측정면의 크기와 센서간격 및 음원과 측정면 간의 거리를 계산기상의 수치시뮬레이션을 통하여 결정하는 방법을 제안하였다. 그리고 실제 설계·제작된 측정

시스템을 이용하여 소수의 센서로 음원의 위치추정 실험을 하였다. 대상 신호원의 2kHz의 주파수를 기준으로 하여 측정시스템을 구성하였으므로, 그 주파수에서는 정확한 음원 절대위치 추정이 가능하였다. 센서간격이 나이키스트 조건을 만족하지만 측정면의 크기가 작은 경우, 특히 대상음원 신호의 주파수가 500Hz와 1kHz인 경우 센서간격은 나이키스트 조건을 만족하지만 측정면의 크기가 신호원의 파장에 비해 작으므로 주극의 반치폭이 2kHz의 음원 신호에 비해 각각 약 87%, 30% 증가하여 음원위치의 정확한 추정이 불가능하였다. 또한 대상 신호원 4kHz인 경우는 센서간격이 나이키스트조건을 만족하지 않으므로 실제와는 달리 두 개의 음원이 존재하는 것처럼 측정되었고 음원이 존재하는 중앙 부분에 음압 분포가 최대로 되지않고 그와 반대로 영점이 나타나는 현상을 알 수 있었다. 이것은 센서간격이 음원위치 추정에 중요한 파라메타임을 실험을 통하여 확인하였다.

본 연구는 수치시뮬레이션 결과와 실음장의 측정을 비교·검토함으로써 그 유효성을 확인하였고 음원의 위치추정에 음향홀로그래피법의 우수성을 검증하였다. 기준센서를 이용한 주사형 음향홀로그래피법은 기준센서의 신호와 각지점의 측정 센서들간의 상호 상관성을 이용하여 음원의 위치추정을 행하기 때문에 다수 음원이 존재하는 경우, 많은 기준센서가 요구되고, 만약 참조센서에 잡음 혼입시 정확한 음원 추정이 불가능하다는 단점을 갖고 있다.

따라서 이들 문제점들을 해결하기 위해, 본 연구 이후 부분센서 어레이군으로 빔을 형성하고 이것을 참조신호로 함으로써 기준신호에 혼입되는 노이즈 영향을 줄이기 위하여 각지점의 센서들과 크로스 스펙트럼을 행하여 고분해능의 음원위치 추정이 가능한 방법을 연구·진행중이다.

참 고 문 헌

1. Masahide Yoneyama, Jun-ichiroh Fujimoto & Hideki Ogawa, "Holographic Recording Methods for Vibrating Mode of Loudspeaker under External Disturbance", J. Acoust. Soc. Jpn Vol. 31 No. 10 (1975)
2. 押野: "音響インテンシテイの自動車騒音測定の適用例", 日本音響學會誌43卷12, pp. 975-982, (1987)
3. 日高, 安久, 橘: "複素音響 インテンシテイによる音場解析" 日本音響學會誌 43卷12, pp. 994-1000, (1987)
4. Masato Abe, Ken'iti Kido, "An application of composite complex sinusoidal modeling to the estimation of direction and spectra of an incident plane wave", J. Acoust. Soc. Jpn., E3, pp. 213-223, (1982)
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. J. D. Markel and A. H. Gray, "On autocorrelation equations as applied to speech analysis, "IEEE Trans. AU-21, pp.

- 68-79 (1973)
7. D. Gabor, Proc. Phys. Soc. B64, 449 (1951)
8. 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 reflection ", Inter Noise 93 Proceedings Vol. 3 (1993)
9. 장 비, 심동연, 김천덕, 차경환, 이채봉, "직선배열형 음향센서 어레이를 이용한 3차원 음향 홀로그래피," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, pp. 201-206(1996. 11).
10. J. D. Maynard, E. G Williams, and Y. Lee, "Nearfield acoustic holography I: Theory of generalized holography and the development NAH", J. Acoust., Soc. Am. Vol. 78 pp.1395-1413, (1985)

▲김 천 덕(Chun-Duck Kim)

1997년 5월 현재:부경대학교 전기공학과 교수(한국음향학회지 11권 6호 참조)

▲심 동 연(Dong-Youn Sim) 1964년 7월 18일생



1989년 2월:부산수산대학교 전자통신공학과(공학사)
 1991년 2월:부산수산대학교 전자통신공학과(공학석사, 디지털신호처리 전공)
 1996년 3월:일본 동북대학교 기계전자공학과(공학박사, 정밀공학 전공)

1991년 6월~1993년 6월:일본 Eagle 주식회사 주임연구원
 1997년 5월~현재:부경대학교 전기공학과 시간강사
 ※관심분야:반도체 진동센서, 마이크로 머신, 수중음향 변환기, 실내음향 및 음원추정

▲장 비(Bee Jang)

1971년 5월 18일생



1996년 2월:부산 동서대학교 컴퓨터공학과 졸업(공학사)
 1996년 3월~현재:부산 부경대학교 음향진동공학과 석사과정 재학중

▲이 채 봉(Chai-Bong Lee)

1997년 5월~현재:동서대학교 전자기계공학부 전자공학과 조교수(한국음향학회지 15권 5호 참조)

▲차 경 환(Kyung-Hwan Cha)

1997년 5월~현재:동서대학교 전자기계공학부 정보통신공학전공 전임강사(한국음향학회지 15권 5호 참조)