

주사형 음향 홀로그래픽법을 이용한 음원위치 추정에 관한 연구

A Study of Sound Source Estimation using Scanning Acoustic Holography

장 비*, 심동연**, 김천덕**, 차경환***, 이채봉***

*부경대학교 음향·진동공학과, **부경대학교 전기공학과, ***동서대학교 정보·통신공학과

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

(*Dept. of Interdisciplinary Program of Acoustics and Vibration, Pukyong, **Dept. of Electrical Eng. Pukyong., ***Dept. of Information & Communication Eng. DongSeo)

요 약

이 연구는 영상 홀로그래픽의 원리를 이용하여 직선배열형 음향센서 어레이를 측정대상에 직접 주사시켜 고분해능을 가지고 짧은 계속시간에 정확한 음원의 절대위치 추정에 그 목적을 두고 있다. 시뮬레이션을 통하여 재생시 평행간섭과의 영향을 제거하기 위해 측정면의 길이와 센서간격을 나이퀴스트 조건이 성립하는 최적조건을 찾아내었고, 실험을 통하여 실제음장에서 음원 위치 추정을 행하여 비교·검토한 결과, 계산기상의 시뮬레이션 결과와 일치함이 확인되었다.

I. 서 론

기계 요소들로 구성된 자동차나 항공기 등에 발생하는 소음이나 이상음을 찾아내는데 신호 처리 기법을 이용한 음원위치 추정법이 응용되고 있다. 이와 같은 방법은 고분해능이 요구되며, 절대위치 추정이 가능하여야 한다. 일반적 음원위치 추정법으로는 음향인텐시티법^[1], 직선배열 센서어레이를 이용한 음원의 도래방향 추정법^[2] 및 선형예측 모델법 등이 널리 알려져 있다. 그러나 이들 방법들은 많은 계산량과 처리 시간이 요구되며, 음원의 수를 모르는 실음장에 응용하는데는 여러 가지 문제점 등을 가지고 있다.

이 연구에서는 위에서 기술한 여러 문제점들에 대해, 짧은 계속시간에 직선 배열형 음향센서 어레이를 측정대상에 직접 주사시켜 음원의 절대위치 추정을 행하기 위하여, 음향홀로그래픽법을 응용한다. 이것은 측정대상의 각 지점마다 음압을 기록한 후, 그 음압분포를 3차원 음향공간인 가상 홀로그래밍면에 재생시키는 방법이다.

II. 음향홀로그래픽법의 원리

음향홀로그래픽의 일반적 원리도는^[3] 그림1과 같다. 음원이 존재하는 면을 음원면이라 하면 그 면에 평행하게 측정면을 설정한다.

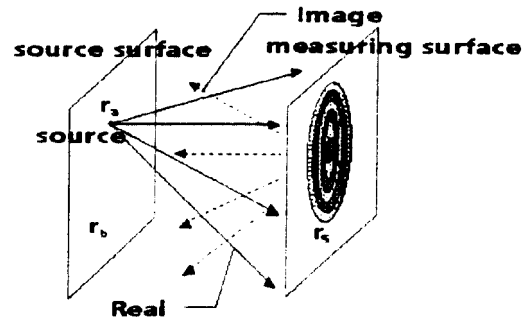


그림1. 음향홀로그래픽의 원리

그림1.에서 공간상의 음원면에 하나의 점음원이 존재한다고 가정하면, 점음원의 위치벡터는 r_s 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.

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

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, 그 재생 허상은 수학적으로 적분형태를 띠게 되고 음원면상의 임의의 한점 B에서의 음압분포는 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} P_B &= A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\{j\omega(r_s - r_a - |r_s - r_a|)/c\}}{|r_s - r_a||r_s - r_a|} dx dy \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} A \int_{-l/2}^{l/2} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{\exp\{j\omega(r_s - r_a - |r_s - r_a|)/c\}}{|r_s - r_a||r_s - r_a|} dx dy \quad (2) \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \sum_{n=-l/2\Delta x}^{l/2\Delta x} \sum_{m=-l/2\Delta y}^{l/2\Delta y} A \frac{\exp\{j\omega(r_s - r_a - |r_s - r_a|)/c\}}{|r_s - r_a||r_s - r_a|} \end{aligned}$$

여기서 l 은 측정면의 길이이고, d 는 센서의 간격이다. 그리고 x 와 y 는 가상 홀로그래프면의 가로, 세로 좌표이다.

적은 수의 음향센서 어레이를 이용하여, 고분해능의 음향홀로그래픽을 구현할 수 있으며, 이를 기준센서를 이용한 주사형 음향홀로그래픽법이라 명한다. 이 방법은 그림2와 같이 기준센서를 음원면 가까이 설정하고 직선형 센서 어레이를 이용하여 음원면에 대해 직접 주사시킨 후, 각각의 크로스 스펙트럼을 구하는 것이다.

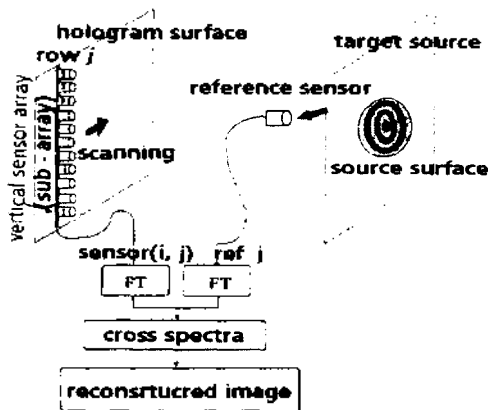


그림2. 기준센서와 음향센서들간의 크로스 스펙트럼을 이용한 음향홀로그래픽법

그림2에서 사각형 측정면에 직선형으로 배열된 등사측정이 가능한 각 센서군을 부분어레이라 하고, J 개의 센서로 구성되어 있다. 부분 어레이를 제1열에서 J 열까지 주사하면 측정면상에 $I \times J$ 개의 센서배열을 얻을 수 있다.

음원이 N 개 존재할 경우, n 번째 음원에서 발생하는 주기성 시간파형을 $a_n(t)$ 라 하고 그 주파수 스펙트럼을 $A_n(\omega)$ 라 한다. J 열로 구성된 부분어레이가 존재할 때, 각 열의 부분어레이에서 수용된 음원의 시간파형은 다르게 나타난다. 예를 들면, 부분어레이가 J 열에 있을 때, n 번째 음원에서 방사된 시간파형은 $a_{jn}(t)$ 가 되고 그 주파수 스펙트럼을 $A_{jn}(\omega)$ 로 표기할 수 있다. 음원신호의 주기성으로 부터 시간상의 길이가 충분히 길다는 가정하에서 식(3)과 식(4)가 성립한다.

$$a_j(t) \approx a(t - \tau_j) \quad (3)$$

$$A_j(\omega) \approx A(\omega) \exp(-j\omega\tau_j) \quad (4)$$

여기서 τ_j 는 J 열의 각 측정센서마다의 시간지연을 나타낸다.

자유공간에 있어서 음의 전파지연과 거리에 따른 감쇄를 고려하면, j 열 i 번째 센서의 주파수 스펙트럼 $S_{ij}(\omega)$ 은 식(5)와 같다.

$$S_{ij}(\omega) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{r_{ijn}} A_{jn}(\omega) \exp(-j\omega r_{ijn}/c) \quad (5)$$

여기서 r_{ijn} 는 n 번째의 음원과 j 열 i 번째의 센서간의 거리이고, A_{jn} 는 j 열에서 n 번째 음원의 주파수 스펙트럼의 크기성분이다.

3차원 음향공간상에 재생되는 홀로그래프는 각센서의 출력 $S_{ij}(\omega)$ 와 j 열 관측시의 기준센서 출력인 $S_{jn}(\omega)$ 와의 크로스 스펙트럼을 구하므로써 얻어지고 수학적으로는 식(6)과 같이 표현되어 진다.

$$S_n(\omega) \cdot S_n^*(\omega) = \left[\sum_{i=1}^J \frac{1}{r_{in}} A_{in} \exp(-j\omega r_{in}/c) \right] \cdot \left[\sum_{i=1}^J \frac{1}{r_{in}} A_{in}^* \exp(-j\omega r_{in}/c) \right] \quad (6)$$

여기서, r_{in} 는 n 번째 음원과 기준센서와의 거리이다.

Ⅲ. 계산기상의 3차원 음향공간 플로그래픽 시뮬레이션

음향 플로그래픽법을 실용화 하는데는 검토되어야 할 2가지 사항이 있다. 측정시, 음향센서의 수가 한정된 경우, 3차원 음향공간 플로그래픽 재생은 센서간격에 따라 평행 간섭파의 영향으로 인해 공간주파수 축상에서 비틀림 현상이 나타나므로, 그 간격의 결정은 플로그래픽의 공간 주파수가 나이키스트의 조건을 만족하여야만 한다 즉, 센서간격은 신호음의 반파장이어야만 한다는 것을 의미한다.

한편 측정면이 크면 클수록 재생상의 주극폭(mainlobe)이 좁아지고 분해능이 향상되지만, 상술한 바와 같이 센서간격을 무한정 넓히는 것은 불가능하다. 따라서 실용장 측정에 앞서 측정면의 크기 및, 센서간격의 최적조건을 결정하기 위하여 다음과 같은 5가지 조건에 따라 계산기상의 시뮬레이션을 행하였다.

- ① 주파수 : 2kHz
- ② 음원과 측정면상의 거리 : 0.7m
- ③ 센서간격 : $1/3\lambda$
- ④ 측정면의 길이 : $1\lambda, 2\lambda, 5\lambda, 10\lambda$
- ⑤ 재생면의 길이 : 2m

상기의 조건과 식(2)와 식(6)을 이용하고 2차원 음향플로그래픽의 크기는 $2m \times 2m$ 라 가정하여 센서간격을 고정시키고 측정면의 크기를 변화시켜 계산한 시뮬레이션 결과를 그림3.에 나타낸다.

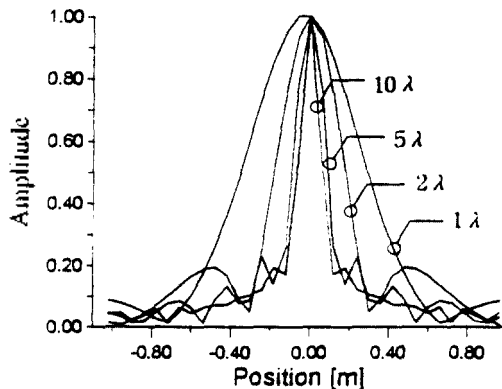


그림3. 측정면 크기에 따른 2차원 플로그래픽 재생상

그림3.으로 부터 센서간격이 고정되어 있을 때 측정면 크기의 증가에 따라 음향 플로그래픽법은 고분해능을 가짐을 알 수 있다. 그러나 이 연구에서는 1개의 기준센서와 7개의 측정용센서로 실용장 측정을 행하므로, 측정면의 크기를 2λ로 했을 때 시뮬레이션의 결과에 따르면 센서 간격이 $1/3\lambda$ 이하에서 주극폭(mainlobe)의 변화가 거의 나타나지 않았다. 이에 따라 센서간격을 $1/3\lambda$ 로 했을 때의 측정면의 음압분포를 음원면에 3차원적으로 재생시킨 음향 플로그래픽이 그림4.와 같다.

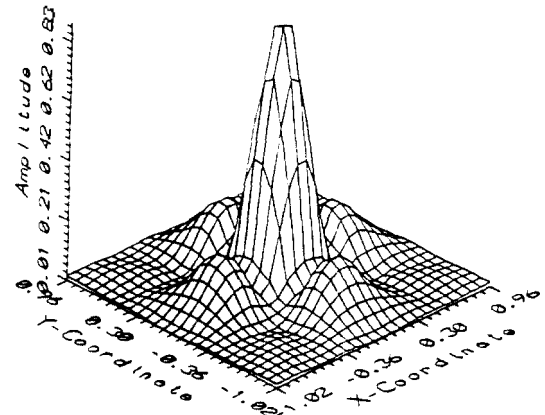


그림4. 센서간격 $1/3\lambda$ 의 3차원 플로그래픽 재생상

그림4.에서 주극의 정점은 음원면에서 점음원의 위치를 나타낸다. 주극을 중심으로 부극이 나타나고 그 부극의 산과 같은 재생시의 평행 간섭파로 인한 영향이다.

Ⅳ. 자유음장(간이 무향실)에서의 음원추정 실험

음원위치 추정을 위한 측정 시스템의 전체 구성도는 그림5.와 같다. 측정용 음향센서는 무지향성 마이크로폰인 B&K4130를 이용하고 프리앰프는 B&K2642이다. 그리고 1개의 기준센서와 7개의 측정용 센서로 구성되어 있으며, 센서간격과 동일한 열의 이동 및 이동시의 정확한 지연시간의 계산과 8개의 음향센서 출력을 동시 기록이 가능한 8채널 디지털 오디오 테이프 레코더 제어 등을 PC/AT급 퍼스널 컴퓨터로 하였다.

실용장의 측정은 시뮬레이션을 토대로 하여

아래와 같은 조건하에서 행하였다.

- ① 주파수 : 2kHz
- ② 음원과 측정면상의 거리 : 0.7m
- ③ 센서간격 : $1/3 \lambda$
- ④ 측정면(개구장)의 길이 : 0.36m
- ⑤ 재생면의 길이 : 2m

측정음장은 자유음장에 가까운 간이용 무향실이며, 음원으로는 무향실내에 설치한 스피커에 신호 발생기 HP8904A를 구동한 신호를 이용하였다. 음향센서로 측정한 출력 신호들은 8채널 DAT(SONY PC208AX)에 수록한 후, 그림6.와 같은 절차에 따라 처리한다. AD변환 및 플로그램의 계산은 TMS320C를 이용한 디지털 신호처리 전용 DSP-16와 퍼스널 컴퓨터로 수행한다.

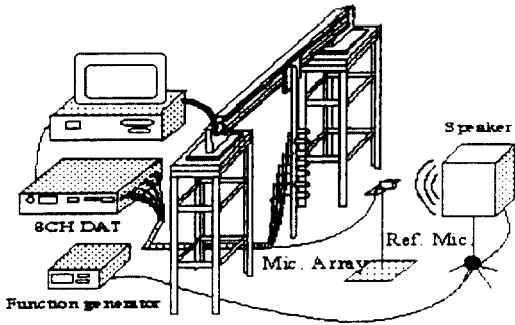


그림5 측정시스템의 구성

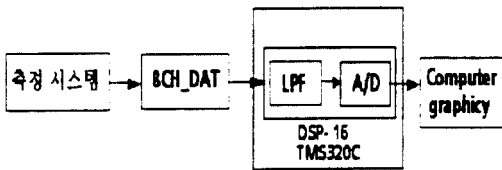


그림6. 신호처리 분석절차

신호처리 절차로는 각 채널을 A/D변환하고 기준센서를 기준으로 7개의 음향센서의 위상 및 이득 보상을 행한 후, 크로스 스펙트럼법에 의해 3차원 음향공간 플로그램을 계산한다.

그림6은 실음장에서 측정된 음압분포를 음원면에 재생한 3차원 플로그램의 등고선 음압분

포를 나타낸다. 음원인 스피커를 음장의 중앙 부분에 설치하였으므로 중앙점을 기준으로 주극의 조밀한 등고선의 변화를 알 수 있으며, 부극이 존재하는 부분 또한 등고선적 변화가 나타나고 있다.

그림7.은 음원면에 재생시킨 3차원 음향공간 플로그램을 나타내고 있으며 계산기상의 시물레이션과 거의 동일한 결과를 나타내고 있다.

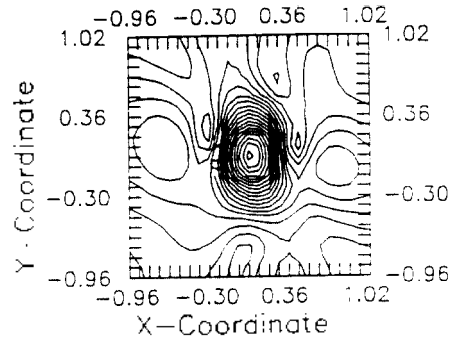


그림6. 실음장에서 측정된 등고선 음압분포

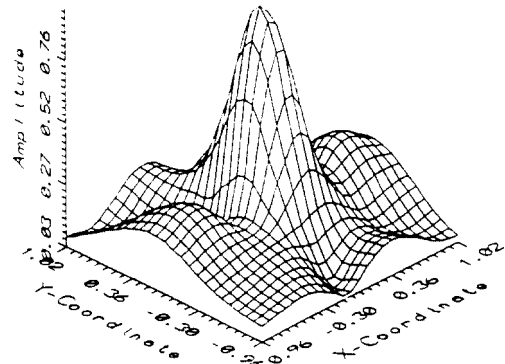


그림7. 3차원 음향공간에 재생된 음원의 위치

V. 결론

이 연구는 음향 플로그래픽법을 실제음장에 적용하는데 있어서 고려되어야 할 중요사항인 측정면의 크기와 센서간격, 계산기상의 시물레이션을 통하여 결정하는 방법을 제안하였다. 시물레이션결과와 실음장의 측정결과를 비교·검토함으로써 그 정당성을 입증하였고 음원의 절대 위치 추정에 음향 플로그래픽법의 우수성을 확인하였다.

기준센서를 이용한 주사형 음향 홀로그래픽 방법은 다수 음원이 존재하는 경우, 많은 기준센서가 요구되는 단점을 가지고 있다.

따라서 앞으로의 연구 방향으로는 이런문제를 해결하기 위해 부분센서 어레이를 이용하여 빔빔을 형성하고 이것을 각지점의 센서들과 크로스 스펙트럼법에 의해 처리하는 방법을 연구할 예정이다.

< 알 림 >

한국과학재단 '96년 핵심 전문 연구 지원과제의 일환으로 연구개발비를 지원받고 있으며 이 실험에 연구장비를 지원해주신 진해 국방과학연구소 여러분들에게 감사드립니다.

<참고 문헌>

- [1] 押野 : "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号 pp975-982,(1987)
- [2] 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.(E) 3,pp.213-pp.223,(1982)
- [3] J.D. Maynard, E.G Williams, and Y.Lee:"Nearfield acoustic holography-I. Theory of generalized holography and the development NAH",J.Aco. Am.78,pp1395-1413.(1985)