

소음원 영상화를 위한 마이크로폰 배열설계 및 모의 성능 실험

윤종락*, S. A. L. Glegg**

Microphone Array Design and its Performance for Noise Source Imaging

Jong-Rak Yoon*, Stewart A.L. Glegg**

Abstract

본 논문에서는 광대역 소음원의 위치를 탐지하여 2차원 영상면에 소음원을 영상화할 수 있는 3차원 마이크로폰 배열을 제안 하였다. 배열요소간의 상호상관함수가 2차원 영상면의 화소의 밝기에 대응되도록 영상함수를 유도하였으며 영상면은 사각면 및 원통면등으로 선택 가능 하도록하여 소음원의 위치동정 해석이 용이하도록 하였다. 몇가지 소음원에 대한 수치 모의 실험결과는 제안된 배열이 소음제어 분야 등에 응용될 수 있음을 보인다.

1. 서론

소음원의 위치탐지나 음원의 음향특성 해석을 위한 시스템으로는 군용의 소나, 음향홀로그래피, 음향렌즈등이 있고 이들은 소음의 협대역 특성을 처리하는 시스템이다. 이들은 공간적인 신호의 샘플링문제 (Spatial Aliasing)를 야기시켜 시스템 설계단계에서 시스템의 물리적 크기가 제한되는 단점이 있고 시스템이 공간상에 고정되어 있을 경우 소음원의 위치에 따라 시스템의 응답특성이 좌우된다.

본 연구에서는 소음원이 광대역 특성을 갖는다는 가정하에 공간적인 신호의 샘플링 문제가 야기되지 않도록 상호상관함수가 영상함수가 되도록 하였고 배열을 3차원으로 배열하여 배열과 소음원의 상대 위치에 관계없이 소음원의 동정이 해석 될 수 있도록 하였다.

소음원의 2차원 영상화에 대한 최근의 연구는 수중 음향카메라에 대한 연구로 Glegg와 Buckingham⁽¹⁾은 해양배경잡음에 의한 표적체의 산란 및 영상화를 위한 음향강도 음향대비를 예측할 수 있는 이론을 정립하여 음향반사경 및 수신기로 구성되는 음향카메라를 이용하면 표적체의 영상화가 가능 하다고 제안하였다. 이와 더불어 공기 중 잔향 음장내에 존재하는

음향표적체를 대상으로 제안된 기법을 검증하였고 음향카메라의 구현 가능성을 확인하였다.

Buckingham⁽²⁾등은 또한 수중실험을 행하여 수중음향카메라의 기초적 영상기술을 제시하였으며 영상분해능 개선을 위해 고주파수신호를 수신·처리해야 하지만 해양배경잡음의 강도는 주파수에 반비례하므로 저주파수 신호를 이용하는 것이 유리하다고 발표하였다. 그러나 이러한 경우 수신 시스템(음향반사경, ...)의 기하학적 크기를 증대시켜야 한다는 제한점을 지적하였다.

Makris⁽³⁾등은 해양표면의 소음원에 의한 표적체의 탐지 가능성을 수치모의 실험으로 연구하여 최적의 탐지는 저주파수대역에서 가능함을 발표하였다.

Potter⁽⁴⁾등은 126개의 화소(pixel)에 의한 표적체의 영상화 시스템을 수치모의 실험으로 연구하였다. 각 화소에 대응되는 수신기는 음향 반사경의 초점에 설치하고 각 화소의 색깔과 밝기는 주파수와 스펙트럼 세기에 의해 결정되도록 하였다.

이상의 연구들은 소음체의 위치 즉 화소의 특성이 주파수와 스펙트럼세기에 의해 결정되는 무상관 영상기술에 기초한 것으로 영상분해능은 각 화소에 대응되는 청음기의 갯수에 일차적으로 좌우되어 분해능을 높이기 위한 청음

* Dept. of Telematics Engr. Pukyong University

** Dept. of Ocean Engr. Florida Atlantic University.

기 갯수의 증대가 수신 신호의 실시간처리에 가장 큰 제한점으로 작용한다.

이러한 제한점을 극복하려는 시도가 본 연구자들이 제안하는 기법으로 각 배열요소간의 시간영역 상호상관함수를 처리하여 영상화하는 기법으로 음향반사경이 불필요하며 적은 수량의 수신기로 음향표적체의 영상화를 꾀할 수 있어 실시간처리가 용이한 기법이다.

2. 배열센서 수신신호의 상호상관함수특성

Fig.1과 같이 두 개의 수신기를 고려하고 표적소음원들은 무상관 광대역 소음원으로 가정한다. 기준수신기는 좌표기준점에 위치하고 제 2의 수신기는 d_1 위치에 있다. 그림에서 각 소음원의 위치와 체적속도는 각각 r_n 및 $Q_n(t)$ ($n=1, 2, \dots, N$)으로 정의된다. 따라서 기준 수신기 및 제 2의 수신기에서 측정되는 음압 $P_0(t)$ 및 $P_1(t)$ 는 다음식으로 주어진다.

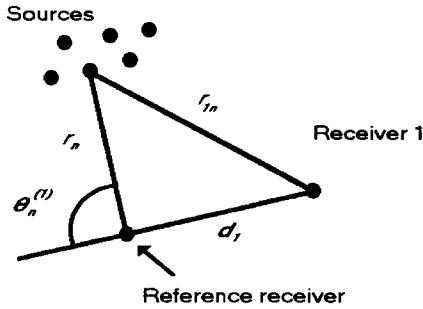


Fig. 1. Two receivers and uncorrelated distributed sources

$$P_0(t) = \sum_{n=1}^N \frac{\rho Q_n \left(t - \frac{|r_{1n}|}{c_0} \right)}{4\pi |r_{1n}|} \quad (1)$$

$$P_1(t) = \sum_{m=1}^N \frac{\rho Q_m \left(t - \frac{|r_{1m}|}{c_0} \right)}{4\pi |r_{1m}|} \quad (2)$$

여기서, $r_{1n} = r_n - d_1$

따라서 두 수신기간의 상호상관함수 $R_1(\tau)$ 는 다음식으로 주어진다.

$$R_1(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T P_0(t) P_1(t + \tau) dt$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \frac{\rho^2 Q_n \left(t - \frac{|r_{1n}|}{c_0} \right) Q_m \left(t - \frac{|r_{1m}|}{c_0} + \tau \right)}{16\pi^2 |r_{1n}| |r_{1m}|} dt$$

(3)
n번째와 m번째 소음원간의 상호상관함수를 $D_{nm}(\tau)$ 를 정의하면

$$D_{nm}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T \rho^2 Q_n(t) Q_m(t + \tau) dt \quad (4)$$

각 소음원은 무상관이므로,

$$D_{nm}(t) = \begin{cases} D_n(t) \neq 0 & \text{if } n = m, \\ 0 & \text{if } n \neq m. \end{cases} \quad (5)$$

배열의 크기가 소음원이 위치한 거리에 비해 무시될 수 있는 경우 ($|d_1| \ll |r_n|$)

식 (4) 및 (5)에 의해 식 (3)은 다음식으로 변환된다.

$$R_1(\tau) = \sum_{n=1}^N \frac{D_n \left(\tau - \frac{|r_{1n}| - |r_n|}{c_0} \right)}{16\pi^2 |r_n|^2} \quad (6)$$

$$= \sum_{n=1}^N \frac{D_n \left(\tau - \frac{d_1 \cos(\theta_n^{(1)})}{c_0} \right)}{16\pi^2 |r_n|^2}$$

여기서 $\theta_n^{(1)}$ 은 Fig.1에서 보는 바와 같이 수신기간을 잇는 직선과 n번째 소음원이 이루는 위치각이다. 소음원이 백색잡음의 특성일때 $D_n(\tau)$ 는 Dirac-delta 함수이고 따라서 식(6)의 상호상관함수는 시간지연지수 τ 가 다음조건을 만족하는 경우 최대값을 가질 것이다.

$$\tau = \frac{|d_1| \cos(\theta_n^{(1)})}{c_0} \quad (7)$$

따라서 $\theta_n^{(1)}$ 상호상관함수로부터 구할 수 있을 것이다. 소음원이 백색잡음이 아닌 경우 $D_n(\tau)$ 는 Dirac-delta 함수와는 달라 상호상관함수가 최대값을 보이는 위치의 시간분해능은 소음원의 대역폭에 반비례하게 되지만 일반적인 소음은 광대역 특성이므로 $D_n(\tau)$ 가 최대값을 갖는 τ 를 구할 수 있고 또한 수신신호에 pre-whitening 기법을 적용하면 Dirac delta 함수를 얻을 수 있을 것이다. 또한 Prewhitening 기법을 적용하지 않는 경우는 첨두치의 시간폭정보를 각 소음원의 주파수 대역 특성해석에 응용될 수 있을 것이다.

3. 상호상관함수의 영상화 기법

식(6)을 기준수신기와 임의의 i 번째 수신기와 의 상호상관함수에 적용하면 식(7)로 부터 시간 지연지수 $\tau_n^{(i)}$ 는 다음식으로 주어진다.

$$\tau_n^{(i)} = \frac{|d_i| \cos(\theta_n^i)}{c_0} \quad (8)$$

n 번째 소음원에 의한 $\theta_n^{(i)}$ 는 Fig. 2(a)에 보이는 바와 같이 원호상에 위치하므로 한 쌍의 배열로는 소음원의 위치를 유일하게 결정할 수 없고 따라서 Fig. 2(c)와 같이 최소한 세쌍의 배열이 있어야 소음원의 위치를 유일하게 결정할 수 있다. 또한 이러한 원리를 확장하면 배열이 수신대상으로하는 음장의 표적소음원들에 대한 영상화 기법을 유도할 수 있다.

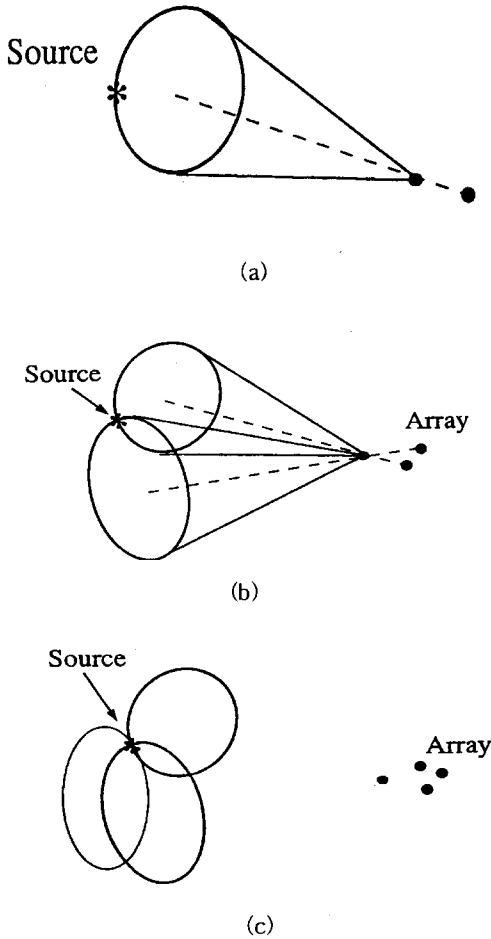


Fig. 2. Intersection of the conical surfaces which show the unique image of the noise source

배열요소수를 K ($i=1, 2, 3, \dots, K$)라 하고 영상면의 영상점을 $M * N$ 개 라하면 각 영상점은 Z_{sp} ($s=1, 2, 3, \dots, M, P=1, 2, 3, \dots, N$)로 주어진다.(Fig. 3 참조). 또한 Fig. 3에서 영상면과 배열기준점 과의 거리는 초점거리 f 로 정의된다. 따라서 영상면의 각 영상점 Z_{sp} 와 i 번째 수신기쌍간의 시간지연지수 $\tau_{sp}^{(i)}$ 다음식으로 주어진다.

$$\tau_{sp}^{(i)} = \frac{|z_{sp} - d_i| - |z_{sp}|}{c_0} \quad (9)$$

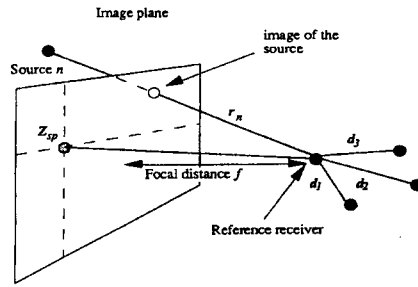


Fig. 3. Image plane and array for the noise source imaging

또한 n 번째 소음원은 원거리상의 γ_n 에 위치하므로 영상면에 투사된 소음원의 영상은 Fig. 3에서와 같이 정의 할 수 있으므로 소음원의 영상점은 다음식의 해로써 정의된다.

$$|z_{sp} - d_i| - |z_{sp}| = |r_n - d_i| - |r_n| = \tau_{sp}^{(i)} c_0 \quad (10)$$

상기의 식(10)이 만족 될 때 상호상관함수 $R_i(\tau_{sp}^{(i)})$ 는 최대값을 갖게 될 것이다. 따라서 $R_i(\tau_{sp}^{(i)})$ 의 크기를 대응되는 Z_{sp} 에 부가하면 소음원의 영상을 얻을 수 있다. 이러한 처리는 각 수신기쌍에 적용되고 각 쌍에 대응되는 소음원의 영상점이 교차되는 위치에서 최대의 음향대비를 갖게되어 정확한 소음원의 위치 및 음향 특징을 얻을 수 있게 된다.

4. 음향카메라 배열센서의 수량 및 기하학적 크기 결정

앞 절 “ 3. ” 에서 기술한 바와 같이 소음원을 유일하게 결정하기 위해서는 최소한 3쌍의 수신기가 소요되므로 기준 수신기를 포함하여 4개의 수신기가 필요하다. 그러나 두 개의 소음원이 특정 수신기쌍과 일직선 상에 위치하는

경우나 서로 인접한 경우 두 개의 소음원을 분리하기 위해서는 상호상관 함수에서 각 소음원에 대응되는 상관함수의 극대치가 영상화 될 수 있도록 각각의 극대값을 갖도록 배열을 설계해야 한다. 따라서 두 개의 소음원이 일직선상에 위치하는 경우를 가정하여 추가의 수신기 쌍이 필요할 것이다. 그러나 인접하는 소음원의 분리를 위해서는 소음원의 대역특성에 좌우되는 상관함수의 극대치 분해능과 수신기간의 기하학적 거리에 대한 기하학적 해석이 필연적이다.

두 개의 인접소음원 K, L을 가정하고 각각의 영상점 위치를 Z_k, Z_l 이라 하면 식(7)로부터 i번째 수신기 쌍에 대한 시간지연지수는 각각 다음식으로 주어진다.

$$\tau_k^{(i)} = \frac{|z_k - d_i| - |z_k|}{c_0} \quad (11)$$

$$\tau_l^{(i)} = \frac{|z_l - d_i| - |z_l|}{c_0}$$

따라서 각 소음원에 대한 시간지연지수의 차는 다음식으로 주어진다.

$$\tau_k^{(i)} - \tau_l^{(i)} = \frac{|d_i|}{c_0} \{ \cos(\theta_k^{(i)}) - \cos(\theta_l^{(i)}) \} \quad (12)$$

$\theta_k^{(i)} = \theta_l^{(i)} - \Delta\theta$ 로 정의 하면 식(12)는 다음식으로 근사된다.

$$\tau_k^{(i)} - \tau_l^{(i)} = \frac{|d_i|}{c_0} \Delta\theta \sin(\theta_l^{(i)}) \quad (13)$$

상호상관 함수에서 각 소음원에 대한 극대치에 대응되는 시간지연지수를 분리할 수 있는 최소 시간차를 T라 하면 소음원의 각 분해능은 다음식으로 주어진다.

$$|\Delta\theta| > \left| \frac{Tc_0}{|d_i| \sin(\theta_l^{(i)})} \right| \quad (14)$$

따라서 배열의 각 분해능은 수신기간의 거리 $|d_i|$, 소음원 위치 $\theta_l^{(i)}$ 및 최소시간차 T에 의해 결정되고 시스템의 설계 단계에서 수행해야 할 연구는 T의 값을 최소화 시키는 것으로 소음원이 백색잡음이 아닌 경우에 소음원의 중심 위치를 정확히 해석하기 위해서는 상호상관 함수에 Prewhitening 기법 즉 Deconvolution 기법을 적용 할 수 있다.

T가 결정되면 $|d_i|$ 및 $\theta_l^{(i)}$ 은 수치해석에 의해 최적화 될 수 있다.

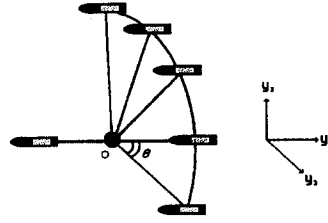


Fig. 4. Array configuration and the coordinate system

5. 수치모의실험

Fig. 4는 4절에서 기술한 배열설계기준에 따라 설계된 배열의 구조이다. 그림에서 기준점 O와 각 배열요소와의 거리는 약 2m, 부채꼴 형태로 구성되는 배열의 배열요소간 각도 θ 는 약 36° 이다. Fig. 5(a)~(c)는 각각 한쌍, 두쌍, 및 세쌍의 배열로 처리된 단일 소음원의 영상으로 3차원 공간에 위치하는 소음원에 대해 배열의 각 쌍은 서로 다른 영상함수를 갖지만 영상함수가 최대치가 교차하는 점이 소음원의 위치를 나타냄을 보인다.

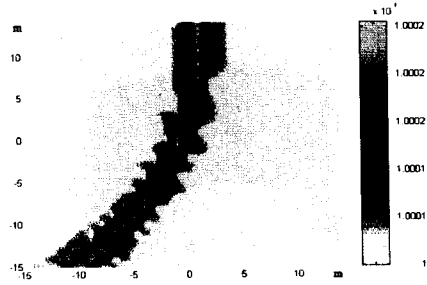


Fig. 5(a) Source Image processed using a single pair micro phones.
source position : $f=20m, y_1=20m, y_2=0m, y_3=0m$



Fig. 5(b) Source Image processed using two pairs of microphones.
source position : Same as Fig. 5(a)

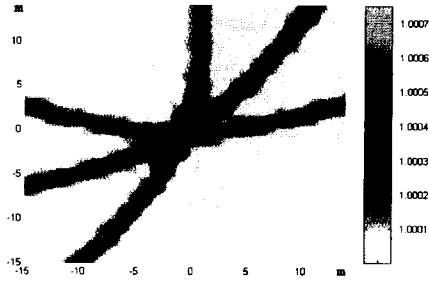


Fig. 5(c) Source Image processed using three pair of microphones.
Source position : Same as Fig. 5(a)

Fig. 6은 Fig. 5와 동일한 소음원에 대해 영상면을 원통형으로 한 경우로 배열에 대해 소음원의 위치는 상대방위로 영상화 된다. 그림에서 배열의 위치는 원통면 내의 중심위치에 있다. Fig. 7 및 Fig. 8은 세 개의 소음원에 대한 영상으로 각 소음원의 대역 특성에 따른 영상의 크기가 다르게 나타난다. 즉 그림에서 A는 B, C에 비해 소음의 대역폭이 좁아 상관함수의 침투치 시간대역이 넓게 되어 영상은 크게 나타나는 특성을 보인다.

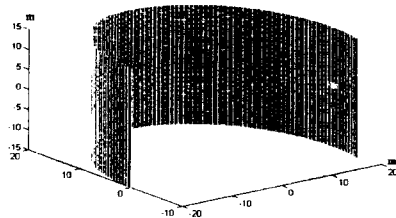


Fig. 6. Source Image processed in circular cylindrical surface.
Source position : Same as Fig. 5(a)

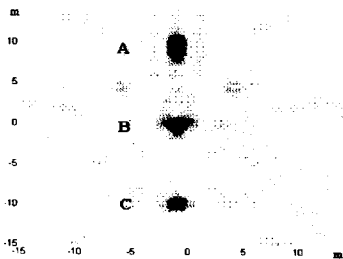


Fig. 7. Source Image processed in rectangular surface. $f=20\text{m}$

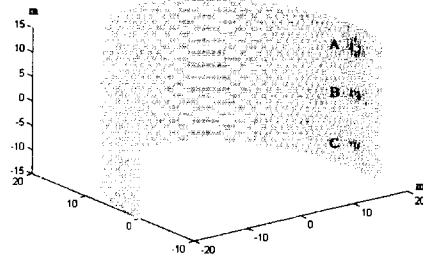


Fig. 8. Source Image processed in circular cylindrical surface. $f=20\text{m}$

6. 결론

본 논문에서는 광대역 소음원의 2차원 영상화를 위한 마이크로폰 배열을 제안하였고 모의 실험을 통해 소음원의 영상화가 가능함을 보였다. 3차원 공간에서의 소음제어분야, 소음표적 탐지 및 식별 등에 제안된 기법의 응용이 가능하다고 판단되며 추후의 연구방향은 실제 음장에 본 기법을 적용하는 것과 또한 분해능 개선을 위한 prewhitening 기법 도입등이 될 것이다.

참고문헌

- (1) S.A.L Glegg & M.J. Buckingham. "Acoustic Daylight:a new way to explore the ocean ?" Florida Atlantic University.(1990).
- (2) M.J. Buckingham, S.A.L. Glegg & B.V. Berkhout."A new way explore the ocean", NATURE Vol.356. 327-329(1992).
- (3) N.C. Makris, W.A. Kuperman & F. Ingenito," Detection of asubmerged object insonified by surface noise in an ocean waveguide", JASA Vol. 92. 2416(1992).
- (4) J.R. Potter,"Acoustic Daylight : Theory and simulations for an imaging system using-ambient noise in the ocean", JASA Vol. 92. 2351(1992).
- (5) M. Oliveri & S.A.L. Glegg, "A broadband signal processor for acoustic imaging using ambient noise", Florida Atlantic University.(1994).
- (6) J.S. Bendat & A.G Piersol, "Engr. applications of correlation and Spectral analysis", John Wiley & Sons, 1980