

무향수조 내에서 MUSIC 알고리즘을 이용한 음원의 위치 추적

김시문* · 최영철* · 이종무* · 박종원* · 임용곤*

*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

Source Localization in the Anechoic Basin at KRISO/KORDI by Using MUSIC Algorithm

SEA-MOON KIM*, YOUNG-CHEOL CHOI*, CHONG-MOO LEE*, JONG-WON PARK*, AND YONG-KON LIM*

*Ocean Development System Laboratory, KRISO/KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Source Identification 음원 위치 추적, Anechoic Basin 무향수조, MUSIC Algorithm 뮤직 알고리즘, Phase Delay Sum 위상보정합, Minimum Variance Method 최소분산법

ABSTRACT: Localization with array sensors has been applied for not only military but also non-military purposes. The identification of submarines and fish finding are those examples. Nowadays the demand for noise identification is increasing to characterize noise sources and improve acoustic performance of underwater acoustic equipment. For that reason KRISO/KORDI recently constructed an anechoic basin which has reflection only at the free surface. This paper suggests a noise identification methods using MUSIC algorithms in such an acoustic field. For comparison phase delay sum and minimum variance methods are also described. At first basic principles are described. A several numerical simulations are also performed. The results say that reflection effect may cause a new non-real source although good estimation is obtained under no reflection conditions.

1. 서 론

소음원 위치 추적에 대한 연구는 잠수함 탐지 등의 군사적인 목적을 위하여 오래전부터 수행되어 왔으며, 이는 배열 센서에서 감지된 위상 차이를 보정하여 합산하는 빔형성기법 (beamforming method) (Shan et. al., 1985)에 기초하고 있다. 본 방법은 어군 탐지나 통신 장비 등에서도 응용되고 있는 실정이며, 근래에 들어서는 생활 수준의 향상 및 소음 저감에 대한 관심으로 인하여 공기중에서의 소음원 탐지에 대한 연구도 수행되고 있다.

무인잠수정을 비롯한 많은 수중 장비들이 데이터 전송을 위해 초음파 통신시스템을 가지고 있거나 혹은 위치 탐지를 위해서 LBL, SBL, SSBL 시스템을 이용하고 있는데, 이는 프로펠러 등에서 발생하는 수중 소음에 의해서 성능이 감소하게 된다. 따라서 공기중에서뿐만 아니라 수중에서도 소음원의 특성을 분석하는 일은 점차 중요시되고 있다.

소음원 추적 방법으로는 위상보정합 방법 이외에도 최소분산법(Pillai, 1989)이나 MUSIC 알고리즘(Schmidt, 1986) 등이 개발되었다. 위상보정합 방법이 잡음에 대해서 강건한 특성을 가지는 장점이 존재하나 해상도와 분해능이 떨어지는 단점으로 인하여 해상도가 월등한 최소분산법이나 MUSIC 알고리즘도 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 MUSIC 알고리즘을 이용하여 본 연구원이 보유하고 있는 무향수조와 같이 반사파가 존재하는 공간에서의 소음원의 위치 파악에 대한 연구를 수행하고자 한다. 다른 방법과의 비교를 위해서 위상보정합과 최소분산법에 대한 연구도 수행하였다. 이를 위하여 먼저 소음원 탐지의 기본적인 이론에 대해서 살펴보고 있으며 표면 반사파가 존재하는 경우에 대한 수식을 유도하고 있다. 끝으로 여러 변수 및 조건을 변화시켜가면서 모의 실험을 수행하여 각 방법에 대한 결과를 비교하고 있다.

2. 소음원 탐지의 기본 이론

배열 센서를 이용한 소음원 탐지 방법의 기본 이론은 음원의 모델링을 바탕으로 유도된다. 가장 많이 사용하는 음원 모델로는 평면파와 구면파 음원이 있다. 평면파 가정은 음원이 먼 곳에서부터 온다는 가정하에 입사 각도를 예측하게 되며 구면파 가정은 음원이 근접장에 있다는 가정으로부터 위치를 예측하게 된다. 두 경우 유도식은 동일하므로 본 연구에서는 구면파 가정의 경우에 국한시키고자 하며, 각 방법에 대해서 살펴보면 다음과 같다.

2.1 빔형성기법

반사파가 존재하지 않는 공간내에 (x_s, y_s, z_s) 의 위치에 구면파 음원이 존재하는 경우 음장은

제1저자 김시문 연락처: 대전시 유성구 유성우체국사서함23호

042-868-7275 smkim@kriso.re.kr

$$p(x, y, z) = A \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (1)$$

과 같이 표현된다. 여기서 A 는 단극음원 세기(monopole strength)를 $k = \omega/c$ 는 파수를 나타내며 r 은 음원까지의 거리를 의미한다. M 개의 하이드로폰 배열 센서를 이용하는 경우 m 번째 하이드로폰 (x_m, y_m, z_m) 에서의 음압 p_m 은

$$p_m = A \frac{e^{-jkr_m}}{r_m} \quad (2)$$

와 같으며 위상 보정을 위한 가중치 w_m 을

$$w_m = \frac{1}{\sqrt{M}} e^{-jkr_m} \quad (3)$$

와 같이 정의하면 가정된 r_m 값과 실제 r_m 값이 일치하는 경우 $\sum_m p_m^* w_m$ 은 최대값을 갖는다. 이를 벡터 형태로 표현하면

$$\Pi_{pds} = W^H R W \quad (4a)$$

$$W = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_M \end{pmatrix}, \quad P = \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_M \end{pmatrix}, \quad R = E[PP^H] \quad (4b,c,d)$$

와 같으며 Π_{pds} 이 가장 큰 값을 가지게 하는 가정 음원의 위치가 예측 음원의 위치가 된다.

2.2 최소분산법

최소분산법의 경우의 파워는

$$\Pi_{mv} = \frac{1}{W^H R^{-1} W} \quad (5)$$

와 같이 유도되며 상관행렬(covariance matrix) R 의 역함수 계산 과정이 포함된다. 이는 위상보정을 이용한 빔형성 기법에 비해서 보다 많은 계산 시간이 소요됨을 의미한다.

2.3 MUSIC 알고리즘

MUSIC 알고리즘에 의한 파워는

$$\Pi_{music} = \frac{1}{W^H R_{noise}^{-1} W} \quad (6a)$$

$$R_{noise} = \sum_i V_i V_i^H \quad (6b)$$

와 같으며 여기서 V_i 는 잡음영역에 해당하는 고유벡터, 즉 고유치가 작은 값들에 해당하는 고유벡터를 나타낸다. 이 방법이 앞서 설명된 음원 탐지 방법보다 계산량이 많다.

2.4 표면 반사 보정

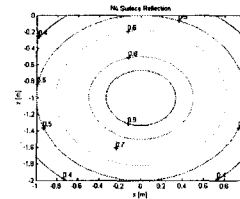
앞 소절에서 살펴본 바와 같이 배열 센서에 의한 소음원 추적 방법은 위상보정벡터 W 를 이용하게 된다. 반사파나 다른 음원이 존재하지 않는 공간에서는 실제 음장과 예측된 음원에 의한 음장이 동일하므로 위상 차이가 나타나지 않으나 무향수조와 같이 표면에 반사파가 존재하는 경우에는 표면 반사파에 의해 위상이 변화한다. 공기의 음향 임피던스가 물의 음향 임피던스보다 작아 무시할 수 있는 경우에 표면에서는 완전 반사가 일어나며 위상은 180도 바뀌게 된다. Fig. 1과 Fig. 2는 구면파 음원이 존재할 때 표면 반사파가 있는 경우와 없는 경우의 크기와 위상을 비교하고 있다. 표면반사파에 의해서 크기는 물론 위상도 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 음원 추적을 하는 경우에도 보다 정확한 예측을 위해서는 이를 고려해야 하며 이때 가중치 w_m 은

$$w_m = \frac{1}{\sqrt{M}} e^{j\phi_m} \quad (7a)$$

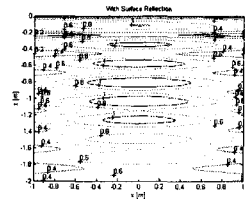
$$\phi_m = \angle p_m \quad (7b)$$

$$p_m = A \left(\frac{e^{-jkr_m}}{r_m} - \frac{e^{-jkr'_m}}{r'_m} \right) \quad (7c)$$

와 같다.

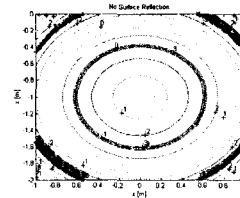


(a) No surface reflection

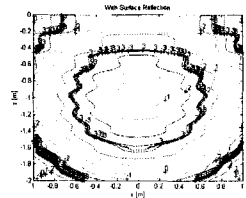


(b) With surface reflection

Fig. 1 Pressure magnitude at $y=1m$ by a spherical wave source, source position $(x,y,z)=(0,0,-0.1m)$, frequency=10kHz, wave speed=1465m/s



(a) No surface reflection



(b) With surface reflection

Fig. 2 Pressure phase at $y=1m$ by a spherical wave source, source position $(x,y,z)=(0,0,-0.1m)$, frequency=10kHz, wave speed=1465m/s

3. 전산 모의 실험

앞 장에서 설명된 소음원 탐지 방법에 대하여 구면파 음원이 존재하는 경우에 대한 전산 모의 실험을 수행하였다. 음원의 개수, 반사파의 존재 여부 등을 변화시켜 가면서 각 방법에 대한 파워를 구하였으며 사용된 변수는 Table 1과 같다.

Table 1 Variables used in the numerical simulations

Source form	Spherical waves
Number of sources	1 or 2
Source location	(0, 0.75m, -1m) (-0.1m, 0.75m, -1m) & (0.75m, -1m)
Number of hydrophor	16
Hydrophone spacing	5cm
Source frequency	10kHz
Sampling frequency	25kHz
Spectral resolution	20Hz
Number of averages	30
S/N ratio	20dB
Surface reflection	exist / not exist
Scanning distance	2.5cm
Speed of sound	1465m/s

3.1 표면 반사가 없는 경우

먼저 반파사가 존재하지 않는 공간에 구면파 음원 1개가 있는 경우에 대한 모의 실험을 수행하였다. Fig. 3은 이에 대한 결과를 나타낸다. 세가지 방법 모두 음원의 위치를 정확히 예측하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 위상 보정합에 의한 방법은 다른 방법에 비해서 해상도가 떨어지는 것을 알 수 있다.

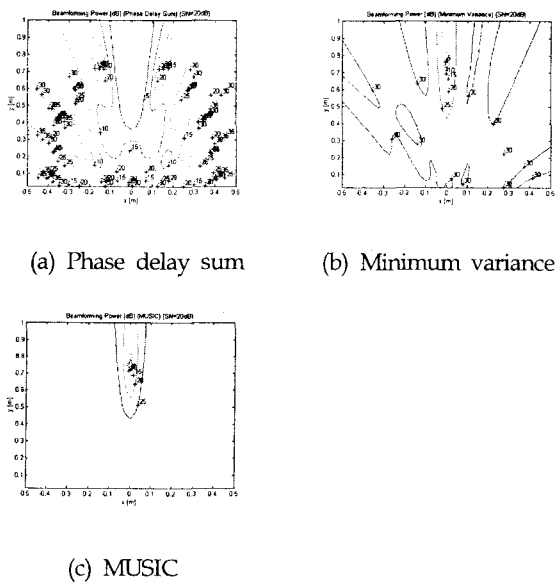


Fig. 3 Beamforming power when one spherical source exists in an acoustic field without reflection

다음은 반파사가 존재하지 않는 공간에 서로 상관성이 없는 구면파 음원 2개가 있는 경우에 대한 모의 실험을 수행하였다. Fig. 4는 이에 대한 결과를 나타낸다. 음원 사이의 간격이 0.2m이며 위상보정합을 이용하는 경우에는 구분을 잘 하지 못하는 것을 알 수 있다. 최소분산법과 MUSIC 방법은 두 음원의 위치를 정확히 예측하고 있다. 따라서 상관성이 없는 2개 이상의 음원을 구분하기 위해서는 최소분산법이나 MUSIC 방법을 사용하여야 함을 알 수 있다.

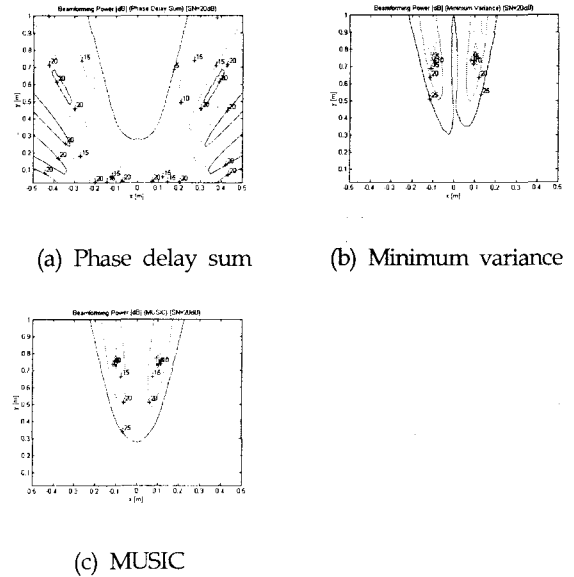


Fig. 4 Beamforming power when two incoherent spherical sources exist in an acoustic field without reflection

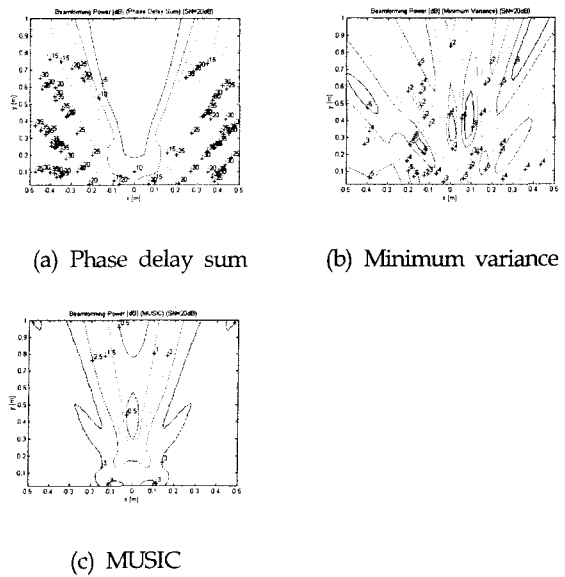


Fig. 5 Beamforming power when two coherent spherical sources exist in an acoustic field without reflection

Fig. 5는 상관성이 있는 2개의 음원이 존재하는 경우이다. 본 모의실험에서는 동일한 위상과 크기를 갖는 것으로 가정하였다. 위상보정합의 경우에는 비록 하나의 음원이 있는 것처럼 보이나 위치는 비교적 정확한 것을 알 수 있다. 그러나 최소분산법이나 MUSIC의 경우에는 전혀 다른 곳에서 음원이 존재하는 것처럼 보인다. 따라서 상관성이 있는 음원의 경우에는 다른 방법이 필요함을 알 수 있다.

3.2 표면 반사가 존재하는 경우

반사파가 존재하는 경우는 상관성이 있는 또 하나의 음원이 존재하는 것으로 생각할 수 있다. 무향수조와 같이 표면에서 180도 위상이 반전된 완전 반사가 일어나는 경우에도 같은 경우로서 위상의 변화에 의해 음원의 위치를 정확히 예측하지 못할 것이라는 생각을 할 수 있다. Fig. 6는 수심 1m에 구면파 음원이 존재하는 경우에 대한 결과를 나타낸다. 반사파에 의한 위상 변화에 의해서 음원의 위치를 정확히 예측하지 못하는 것을 알 수 있다. 위상보정합의 경우에는 분해능이 좋지 않아서 음원의 위치를 정확히 예측하는지 알 수 없으나 최소분산법과 MUSIC의 경우에는 마치 음원이 (0,0.85m)의 위치에 있는 것처럼 보인다. 따라서 반사파에 의한 영향을 반드시 보정해야 함을 알 수 있다.

표면반사에 대한 보정을 위하여 식 (7)과 같이 가중벡터를 이용하여 음원의 위치를 추적하였다. Fig. 7은 이에 대한 결과를 나타낸다. 앞의 경우와는 달리 가중벡터에 반사파를 고려하였기 때문에 위치의 변화에 따라서 요동 현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 음원의 위치는 정확히 예측하고 있으나 실제 음원 이외에 (0,0.9m)의 위치에서 또 다른 음원이 존재하는 것처럼 보인다. 따라서 반사파를 고려하는 경우에는 어느 음원이 실제 음원인지를 파악하는 노력이 더 필요함을 알 수 있다.

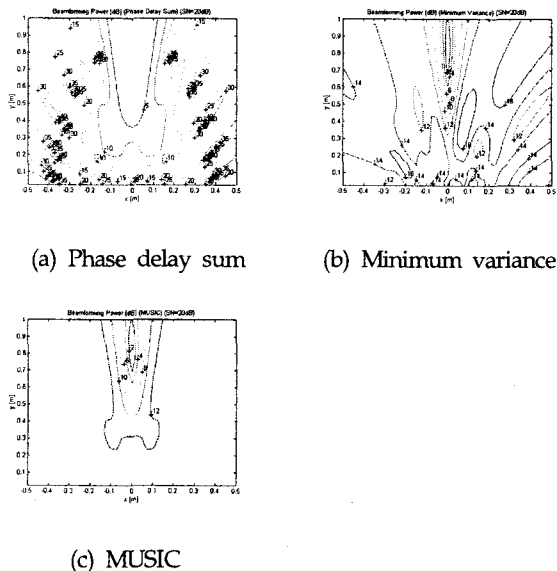


Fig. 6 Beamforming power when one spherical source exists in an acoustic field with surface reflection

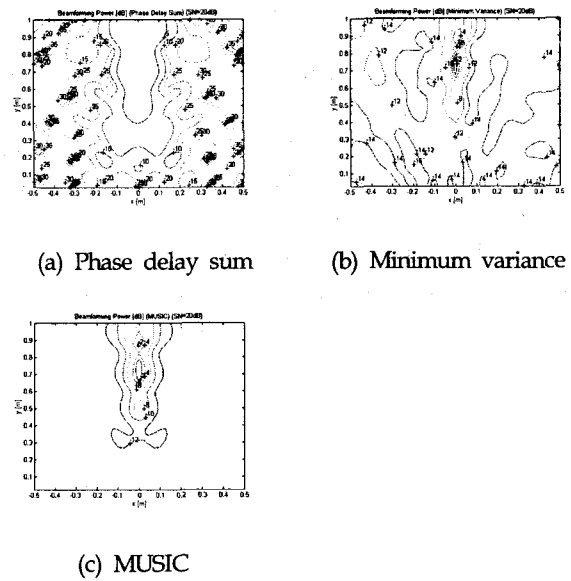


Fig. 7 Beamforming power when one spherical source exists in an acoustic field with surface reflection (considering surface reflection effect)

4. 결 론

본 논문에서는 한국해양연구원의 무향수조와 같이 위상이 180도 반전된 반사파가 존재하는 경우에 대하여 배열 센서를 이용하여 음원의 위치를 추적하는 전산 모의 실험을 수행하였다. 음원의 위치 추적 방법으로는 위상보정합, 최소분산법, MUSIC 등 세가지 방법을 사용하였으며 음원이 1개 혹은 2개 존재하는 경우, 반사파 존재의 유무에 따른 수치해석을 수행하였다. 수치 해석 결과 1개의 음원이 존재하는 경우, 2개의 비상관 음원이 존재하는 경우에 대해서는 정확히 예측이 가능함을 알 수 있었다. 2개의 상관된 음원이 존재하는 경우에는 분해능은 떨어지나 위상보정합을 이용한 방법만이 음원 근방의 위치를 예측할 수 있었다. 반사파가 존재하는 경우에는 예측 음원의 위치에 오차가 존재하는 것을 알 수 있었으며, 반사파를 고려하여 가중치를 설정한 경우에는 정확한 음원의 위치를 알 수 있었으나 또 하나의 음원이 존재하는 결과를 얻었다. 따라서 반사파가 존재하는 경우에는 제 2의 음원을 제거하기 위한 알고리즘이 필요함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 한국해양연구원의 기본연구사업으로 수행된 연구 결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Pillai, S. (1989) "Array Signal Processing", Springer-Verlag, New York, Chapter 2.
- Schmidt, R. O. (1986) "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol AP-34, No. 3, pp. 276-280.
- Shan, T. and Kailath, T. (1985) "Adaptive Beamforming for Coherent Signals and Interference", IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol ASSP-33, No. 3, pp. 527-530.