

음향측정을 위한 수직선배열측정체계 설계 기법

손 권, 최 재 용*, 허 보 현, 도 경 철
국방과학연구소

Design of Underwater Acoustic Measurement System with Vertical Line Array

Kweon Son, Jae Yong Choi, Bo Hyeon Heo, Kyeong Cheol Dho
Agency for Defense Development

sk142298@sunam.kreonet.re.kr, jayochoi@sunam.kreonet.re.kr, hbhbj1@sunam.kreonet.re.kr,
kcdho@sunam.kreonet.re.kr

요약문

본 논문에서는 수중음향측정을 위한 수직선배열측정 체계 설계 개념을 연구한다. 본 연구에서는 수직선배열 측정체계를 이용한 음향측정 시 고려해야 할 설계 기법들을 고찰하고, 측정 주파수 대역에서 지향지수가 균일하게 유지되는 비선형 센서배열 설계 알고리즘과 피측정 음원의 위치추정을 위한 음향학적 능/수동 추적 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘의 유용성은 시뮬레이션과 해상시험으로 확인한다.

I. 서론

수중음향측정(Underwater Acoustic Measurement)은 수중배경소음 및 수중/수상 음원(Acoustic Source)으로부터의 음향을 왜곡없이 깨끗하게 측정/분석함이 목적이다. 이는 음향 토모그래피, 선박/함정 방사소음 측정/분석 및 배경소음을 비롯한 음향학적 환경 측정 분야에서 필요로 한다[1,2].

수중음향측정은 일반적으로 등방향성 단일 음향센서를 소수 개 사용함이 일반적이다. 그러나 산업활동 및 해상 통행량 증가로 수중배경소음 준위가 높아지면서 몇 개의 단일 음향센서만으로는 조용한 음원에 대한 음향측정이 점차 어려워지고 있다. 그러므로 최근에는 등방향성 음향센서를 다수 배열시킴에 의해 이득을 취함으로써, 높은 배경소음 환경에서 조용한 음향을 측정하고 있다. 이와 같은 목적으로 음향센서를 다수 개 수직 배열시킨 음향측정체계가 수직선배열측정체계이다.

본 연구에서는 음향측정을 위한 수직선배열측정체계 설계 시 고려해야 하는 주요 사항들을 고찰하고, 음향측정용 배열이득을 설계하기 위한 알고리즘 및 음원 위치추정을 위한 음향학적 능/수동 추적 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘의 시뮬레이션 결과와 함께 해상

시험 결과를 고찰함으로써 본 연구에서 제안한 알고리즘의 유용성을 확인한다.

II. 수직선배열측정체계 설계 요소

음향측정을 위한 수직선배열측정체계는 다음의 설계 요소들을 고려하여야 한다.

첫 째, 배열이득은 신호에 대한 증폭이득에 해당하므로 음질 보존을 위해서 측정 주파수 대역에서 배열이득이 일정하도록 해야 하며, 빔폭(Beam Width)은 표적의 물리적 크기를 포함하도록 충분히 넓혀야 한다. 그러므로 배열이득이 주파수에 따라 달라지고 빔폭이 좁은 전형적인 지연-합(delay-sum) 빔형성(Beamforming) 방식은 음향측정용으로 부적합하다. 따라서 새로운 방식의 빔형성 알고리즘이 설계되어야 한다. 설계 조건으로는 배열이득과 빔폭 및 부엽준위(Side-Lobe Level)가 고려되어야 한다[3,4,5]. 배경소음이 등방향성이고 배열 내의 모든 센서가 코히어런트한 신호를 수신한다고 가정하면 배열이득은 지향지수(Directivity Index)로 정의되므로, 본 연구에서는 지향지수를 고려한다.

둘 째, 음원의 절대값 산출과정에서 음향전달손실을 정확하게 보상하기 위해 센서배열과 음원과의 거리가 음향학적으로 산출되어야 한다. 음원과 센서배열과의 거리는 추적에 의해 이루어지며 음원의 방사소음을 이용하는 수동방식과 별도의 거리측정용 송수신 음향을 이용하는 능동방식을 고려할 수 있다. 능동방식에서는 음향송신기(Pinger)와 음향응신기(Transponder)를 사용하고, 거리측정용으로 사용하는 송수신 음향은 측정하고자 하는 주파수 대역과 중복되지 않도록 설계한다[6].

셋 째, 센서배열을 수직 부설하여 음향측정을 수행하는 동안 조류 등의 영향으로 배열이 수직으로 굳게 유지되지 못하고 굽어짐을 고려해야 한다. 이는 빔형성과

음원 거리 산출 양면에 영향을 미치므로 설계 시에 주의 깊게 고려해야 한다[6].

넷째, 수직선배열측정체계에서 실시간 측정을 위한 수신신호 상태 모니터링 기능과 음원 및 센서배열 상태 모니터링 기능이 설계되어야 함은 일반적인 경우와 동일하다. 분석기법 역시 기존의 단일 음향센서 이용방식과 동일하게 설계하되, 수직선배열측정체계에서는 빔을 사용하므로 실시간 모니터링을 위한 자동 빔지향 기능이 설계에 포함되어야 한다[5,6].

III. 음향측정을 위한 배열 및 빔형성 설계

1. 비선형 센서배열 설계 알고리즘 제안

탐지 목적으로 사용하는 기존의 지연-합 빔형성에서 빔은 옥타브(Octave) 대역별로 구분하여 형성된다. 센서는 일정간격으로 배치되며, 하위 옥타브 대역 사이에 상위 옥타브 대역 센서가 삽입되어 구성된다. 이는 각 옥타브 대역 내에서의 센서순번에 따라 동일 가중상수를 적용하여 빔을 형성시키는 삽입형 선형배열(Nested Linear Array, NLA)이다. NLA에서는 옥타브 대역 최상단과 최하단 주파수의 지향각수가 3dB만큼 차이가 나고[1,2], 옥타브 대역별로 다른 센서를 사용함에 따라 신호가 옥타브 대역으로 분리되므로 모든 측정 주파수 대역에서 단일 시간영역 신호 획득이 어렵다.

본 연구에서는 측정 주파수 대역에서 균일 지향지수 유지가 가능하며 전 측정 주파수 대역에서 단일 시간영역 신호를 제공하는 비선형 배열(Non-Linear Array)의 설계 알고리즘을 제안한다. 비선형 센서배열에서도 이론적인 배열이론이 적용되지만 NLA와는 달리 인접하는 센서 간의 간격이 비선형적으로 증가한다. 센서 M 개를 좌우대칭으로 배열하되 배열의 가운데에 위치하는 센서 간 간격은 측정하고자 하는 최고 주파수의 반파장 간격 p_0 로 배치하고, n번째 센서와 n-1번째 센서 간의 간격 $p(n)$ 은 경험적으로 최적화된 다음 식을 사용한다.

$$p(n) = p_0 \cdot \sqrt[3]{1 + \left(\frac{\gamma^n}{\beta}\right)} \quad (1)$$

식(1)에서 α , β 및 γ 는 최적 센서 간격을 위한 설계 변수이다. 배열 길이 128m의 예를 들어, 전 측정 주파수 대역에서 균일 지향지수를 가지도록 α , β 및 γ 를 최적화 하면 $\alpha=4$, $\beta=2.8$ 및 $\gamma=1.208$ 를 얻는다. 위 식을 이용하여 배열 중앙으로부터 n번째 센서까지의 거리 $x(n)$ 은 다음 식(2)로 표현된다[3,4].

$$x(n) = \frac{p_0}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} p(i) \quad (2)$$

2. 초점빔형성 알고리즘 제안

수직선배열을 이용하면 지향 빔에 의해 신호대잡음비가 증대되고 해표면 또는 해저면 반사파의 영향을 최소화시킬 수 있다. 높은 신호대잡음비로 음향을 측정하기 위해 가능하면 음원이 센서배열에 근접하여 지나가도록 하고 음향측정을 수행한다. 배열길이 보다 짧은 거리에 위치하는 음원에서 생성되는 신호는 평면파로 가정할 수 없다. 또한 해류 등에 의해 수직 센서배열은 항상 구배를 가지게 된다. 그러므로 어떠한 상황에서도 음원을 지향하는 빔을 형성하기 위해서는 음원에서 생성되는 신호를 이용하여 각 센서에 보상되어야 할 시간지연을 실시간으로 측정하여야 한다[5,6].

음원이 수직배열 중앙부를 지나가는 경우에 평면파로 가정하여 시간지연 오차를 살펴보면, 그림 1과 같이 배열의 가장자리 부위에서 상당한 오차가 있음을 알 수 있다. 이러한 오차는 지향 빔의 빔패턴(Beam Pattern)을 왜곡시키고 지향지수를 감소시키게 된다.

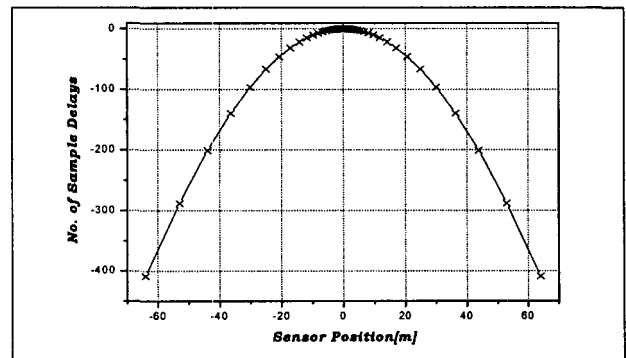


그림 1. 각 센서의 시간지연 오차(평면파 가정)

비선형 센서배열에서는 NLA와 달리 각 센서의 수신 주파수 대역을 제한한다. 이를 위해 센서위치 $x(n)$, 빔 폭 제어상수 k 에 의하여 결정되는 가우시안 필터를 각 센서에 적용한다. 본 연구에서 제안하는 초점빔은, 식 (3)의 가우시안 필터 $G(n, f, k)$ 특성을 갖는 시간영역 필터를 통과한 각 센서 출력에 시간지연을 보상한 다음 선형 합산하여 형성시키는 빔이다[3,4].

$$G(n, f, k) = \exp\left[-0.5\left(k \cdot \frac{x(n)}{C} \cdot f\right)^2\right] \quad (3)$$

IV. 음향학적 추적 알고리즘 제안

1. 능동추적 알고리즘 제안

능동모드 음원 추적에 의한 거리 산출 방식에서는, 배열 최 하단에 음향송신기를 설치하고 음향송신기 송신신호에 응답하여 신호를 송신하는 음향송신기를 음원

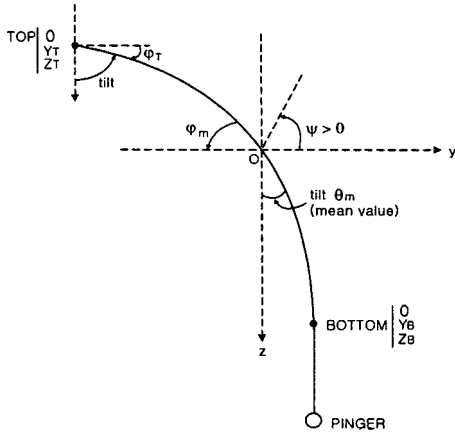


그림 2. 배열의 곡선 모델링

에 설치하여 운용한다. 송수신 장치는 상호 동기가 이루어져 신호 도달시간 차이에 의한 거리를 계산한다[6]. 음향측정용 센서와는 별도로 거리측정용 음향센서를 센서배열 내에 동일간격으로 배치하여 사용한다.

배열구배는 곡선 형태로 모델링 할 수 있다. 곡선 모델링은 고각 센서와 수심 센서 정보를 이용한다. 본 연구에서 배열 구배 모델링은 수중환경에 의해 그림 2와 같이 가정한다. 주어지는 정보는 배열 상단 고각 정보, 상단/하단 수심 정보, 배열 길이 정보 등 3가지이다.

그림 2와 같은 배열 모델링에 대해 배열의 각 센서에 대한 좌표(y,z)는 식(4)를 통해 계산된다. 여기서 phi는 배열길이를 따라 임의의 지점에서의 각도(90° - 임의의 지점에서의 고각)를 나타내고, T는 배열길이 방향의 장력을 나타낸다. K는 항력(drag force)과 장력과의 비이다.

$$y = Y_T - \frac{1}{K} \left(\frac{1}{\sin \varphi} - \frac{1}{\sin \varphi_T} \right) \quad (4)$$

$$z = Z_T - \frac{1}{K} \left[\text{Log} \left(\tan \frac{\varphi_T}{2} \right) - \text{Log} \left(\tan \frac{\varphi}{2} \right) \right]$$

그림 3에서는 세 개의 추적 센서만을 이용하여 음원 위치와 방위를 추정한다. H1은 배열 최상단, H5와 H6는 최하단에 위치한 추적용 센서이다. 추적센서는 최소 오차가 되도록 선정된다. 그림 3에서 세 개의 추적센서에 대한 거리 d와 도달시간과의 관계는 식(5)와 같이 정의할 수 있다. c는 음파전달속도 이고, t₁ t₂ t₃는 각 추적 센서가 음원의 음향송신기 신호를 수신한 시간이며, t_p는 음향송신기에서 신호를 내보낸 시간이다.

$$\begin{aligned} c(t_1 - t_p) &= d_p + d_1 \\ c(t_2 - t_p) &= d_p + d_2 \\ c(t_3 - t_p) &= d_p + d_3 \end{aligned} \quad (5)$$

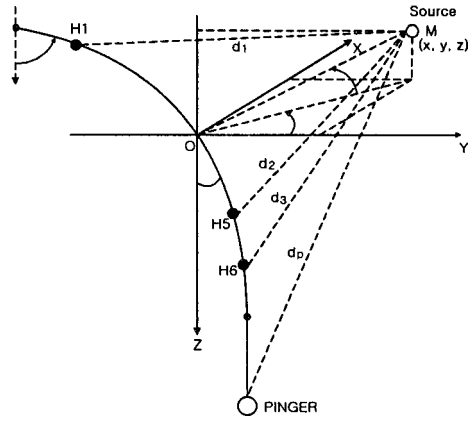


그림 3. 표적 위치 및 방위 추정

그림 3에서 음원의 x좌표는 다음과 같이 얻는다. ±는 음원의 좌현 측정 및 우현 측정에 따라 결정된다. y_p z_p는 음향송신기 위치이다.

$$x = \pm \sqrt{d_p^2 - (y - y_p)^2 - (z - z_p)^2} \quad (6)$$

2. 수동추적 알고리즘 제안

수동추적은 식(7)의 단순한 수학적 모델링을 이용한 시간지연추정(Time delay Estimation, TDE)에 의해 수행한다. s(n)은 음원신호이고, 센서 유입 잡음신호 w₁(n)과 w₂(n)은 0평균의 랜덤신호이며, 상호 상관관계가 없다. D는 두 센서가 동일 음원신호의 수신 과정에서의 시간지연을 나타낸다. 식(7)의 시간지연은 신호의 입사각에 해당하므로, 입사각을 이용한 기하학적 도식에 의해 음원과 거리 산출한다.

$$\begin{aligned} x_1(n) &= s(n) + w_1(n) \\ x_2(n) &= s(n - D) + w_2(n) \end{aligned} \quad (7)$$

본 연구에서는 수동추적을 위해 그림 4의 RLSLTDE (Recursive Least Square Lattice TDE)을 제안한다. 제안 RLSLTDE는 입력신호의 고유치 불균등에 영향을 받지 않으며, Newton 방식 적용에 의해 기존 LMS보다 빠르게 최소자승 해에 수렴하는 특성을 가진다.

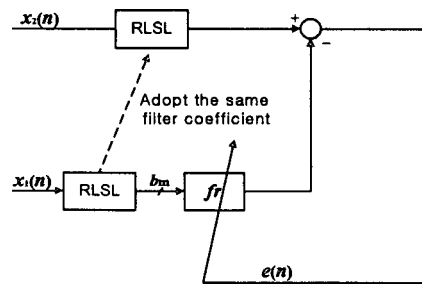


그림 4. RLSLTDE

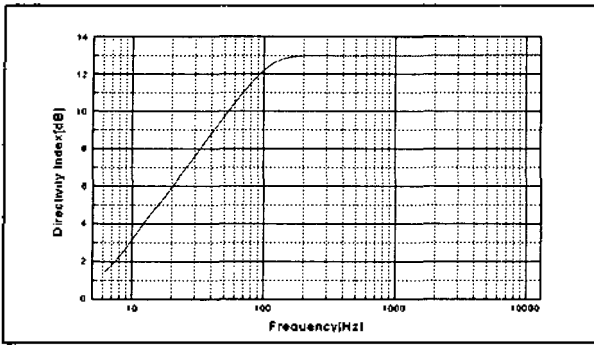


그림 5. 최대지향지수 모드에서의 지향지수

V. 시뮬레이션 및 구현 결과

그림 5는 본 연구에서 제안한 비선형 센서배열에서의 초점빔형성에 의한 지향지수 시뮬레이션 결과를 보여준다. 임의 주파수 이상의 측정 대역에서 지향지수가 균일하여 음향측정으로 적합함을 알 수 있다.

시간지연 샘플 $D=10$, 필터 길이 $L=16$ 로 하여 신호 대잡음비가 -12dB 에 대한 시간지연 추정 결과는 그림 6과 같다. 제안 RLSLTDE 알고리즘이 0.3초만에 시간지연을 정확하게 추정한다. 기존 LMSTDE 알고리즘의 시간지연 추정 속도 2초 보다 빨라 제안 RLSLTDE의 성능이 개선되었음을 알 수 있다.

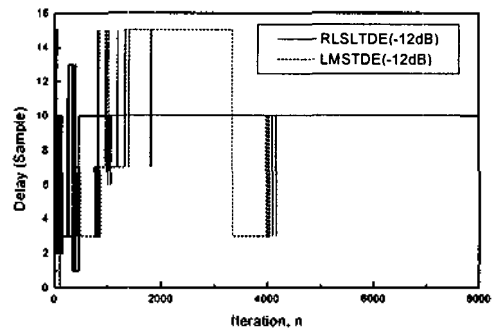
제안 알고리즘들을 적용시켜 구현한 실시간 측정화면은 그림 7과 같다. 구현 화면에서는 빔지향성과 빔출력 유효성을 모니터링하여 측정 타당성을 실시간 판단한다. 배열구배도 함께 모니터링하며, 음원을 지향하는 자동빔과 인접 2개의 수동빔을 실시간 조정하면서 출력을 비교 검토하도록 구현되었다. 그림 7의 실제 해상시험 적용 결과로부터 본 연구의 제안 알고리즘이 음향측정에 유용함을 확인할 수 있다.

VI. 결론

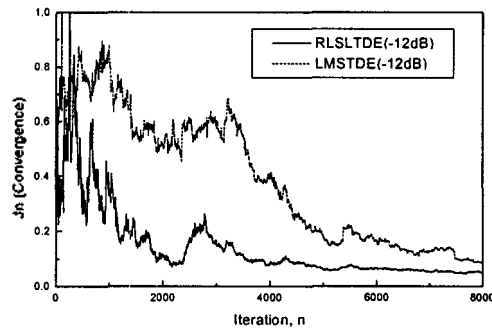
본 연구에서는 수직선배열추정체계를 이용한 음향 측정을 위해 센서배열, 빔형성, 음원추적, 배열구배 모델링 및 측정/분석 개념을 설계하였다. 본 연구에서는 측정 주파수 대역에서 지향지수가 균일하게 유지되는 비선형 센서배열 설계 알고리즘과 초점빔형성 알고리즘 및 피측정 음원의 위치추정을 위한 음향학적 능/수동 추적 알고리즘을 제안하였다. 알고리즘의 시뮬레이션 결과와 구현된 실시간 화면의 해상시험 적용을 통하여, 제안 알고리즘이 음향측정에 유용함을 확인하였다.

참고문헌

1. Robert J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd edition, McGraw-Hill Book Company.
2. Richard O. Nielsen, *Sonar Signal Processing*,



(a) 시간지연 추정



(b) 수렴 특성

그림 6. SNR : -12dB 경우의 TDE 특성 비교

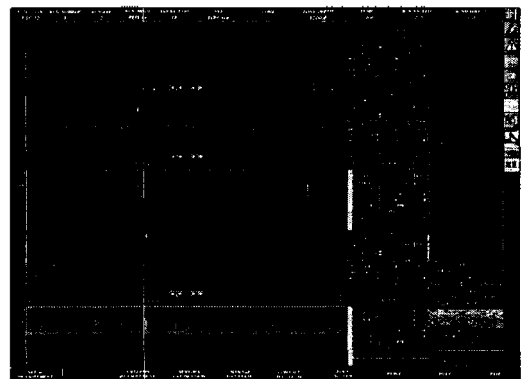


그림 7. 실시간 신호분석 화면

ArtechHouse Inc., 1991.

3. 도 경철, 손 권, 최 재용, "비선형 센서배열 설계기법 연구", 국방과학연구소 기술보고서, 1997.
4. 도경철, 손경식, "가우시안 가중치에 의한 광대역 단일빔의 지향특성", 한국음향학회지 제18권 제1호, pp.25~31. 1999.
5. 손 권, 최 재용, "비선형 센서배열 빔형성기 상세설계, 국방과학연구소 기술보고서, 1999.
6. 최 재용, 손 권, 도경철, "음향측정을 위한 능/수동 추적기법 연구", 제3회 해상무기체계 발전세미나 논문집, pp.412~417. 국방과학연구소, 2000