

수직선배열을 이용한 저소음 함정음향 측정 및 분석기법

A Measurement and Analysis of Low Level Radiated-Noise Using Vertical Line Array

최재용*
Choi, Jae-Yong

손권*
Son, Kweon

도경철*
Dho, Kyeong-Cheol

ABSTRACT

Underwater acoustic noise measurement is an essential element for vulnerability assessment of modern naval platforms. But during the last few decades environmental conditions have drastically changed due to the gradually increasing sea ambient noise level and decreasing submarine radiated noise level.

A real-time underwater acoustic measurement system with vertical line array is designed for the quiet submarine radiated noise assessment in challenging environment.

This system has a constant directivity index in measurement frequency range and accurate tracking capability for the transmission loss compensation and navigation aids inside the submarine.

This system has been validated at sea and used several times for the submarine noise measurement.

주요기술용어 : Underwater Acoustic Measurement(수중음향측정), Focused Beam(초점빔), Vertical Line Array(수직선배열), Directivity Index(지향지수)

1. 서론

수중음향측정은 수중배경소음 및 수중/수상 음원 (Acoustic Source)으로부터의 음향을 왜곡 없이 깨끗하게 측정하여 분석함이 목적이다. 이는 음향 토모그래피, 선박/함정 방사소음 측정/분석 및 배경소음을

비롯한 음향학적 환경 측정 분야에서 필요로 한다^[1,2].

수중음향측정은 등방형성 단일 음향센서를 소수 개 사용함이 일반적이다. 그러나 산업 활동 및 해상 통행량 증가로 수중배경소음 준위는 높아지고 있는 반면, 함정 건조 기술의 발달로 인하여 함정의 방사소음 준위가 낮아지고 있다. 특히 잠수함의 방사소음 준위는 수중배경소음보다 크게 높지 않아, 몇 개의 단일 음향센서만으로는 저소음 음원에 대한 음향측정이 점차

* 국방과학연구소 연구원

어려워지고 있다. 따라서 이를 극복하기 위해서는 배경소음과 방사소음의 신호대잡음비를 음향학적으로 높여야 한다. 그러므로 최근에는 등방향성 음향센서를 다수 배열시킴에 의해 이득을 취함으로써, 높은 배경소음 환경에서 저소음 음향을 측정하고 있다.

본 연구에서는 수직선배열을 이용한 저소음 합성음향 측정 체계 설계시 고려해야 하는 주요 요소들을 고찰하고, 음향측정용 배열이득을 설계하기 위한 알고리즘과 음원 위치추정을 위한 음향학적 능/수동 추적 알고리즘을 제안함으로써, 실시간 음향측정체계를 설계하고 구현한다.

2. 저소음 합성음향 측정 및 분석 고려요소

저소음 합성음향 측정을 위한 핵심적인 설계 요소들은 다음과 같이 고려된다.

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 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 곧게 유지되지 못하고 굽어짐을 고려해야 한다. 이는 빔형성과 음원 거리 산출 양면에 영향을 미치므로 설계시에 주의 깊게 고려해야 한다^[6].

넷 째, 실시간 음향측정을 위한 수신신호 상태 모니터링 기능과 음원 및 센서배열 상태 모니터링 기능이 설계되어야 함은 일반적인 경우와 동일하다. 분석기법 역시 기존의 단일 음향센서 이용방식과 동일하게 설계하되, 본 시험체계에서는 빔을 사용하므로 실시간 모니터링을 위한 자동 빔지향 기능이 설계에 포함되어야 한다^[5,6].

그 외에도 운용형태, 운용환경 및 정비유지 측면도 깊이 고려되어야 하나, 본 논문에서는 다루지 않는다.

3. 음향측정 배열 설계 및 빔형성 기법 제안

3.1 비선형 센서배열 설계 기법

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. 이

는 각 옥타브 대역 내에서의 센서 순번에 따라 동일 가중상수를 적용하여 빔을 형성시키는 삽입형 선형배열(Nested Linear Array, NLA)이다. NLA에서는 옥타브 대역 최상단과 최하단 주파수의 지향지수가 3dB 만큼 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. 제안 알고리즘에서는 센서 간의 간격을 비선형적으로 증가시킨다. 센서 M개를 좌우대칭으로 배열하되 배열의 가운데에 위치하는 센서 간 간격은 측정하고자 하는 최고 주파수의 반파장 간격 p_0 로 배치하고, n 번째 센서와 $n-1$ 번째 센서 간의 간격 $p(n)$ 은 경험적으로 최적화된 다음 식을 사용한다.

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

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 $\gamma=1.20803034$ 을 얻는다. 위 식을 이용하여 배열 중앙으로부터 n 번째 센서까지의 거리 $x(n)$ 은 다음 식(2)로 표현된다^[3,4].

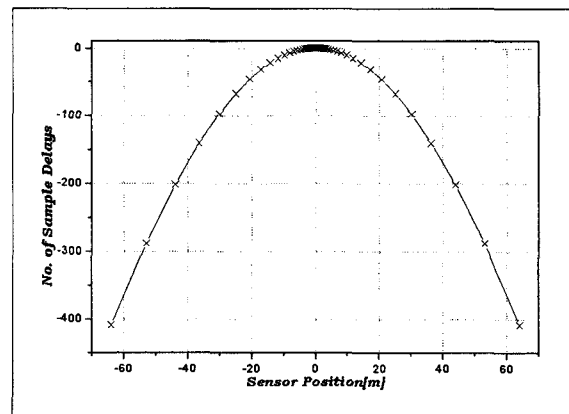
$$x(n) = \frac{p_0}{2} + \sum_{i=1}^{N-1} p(i) \quad (2)$$

3.2 초점빔 형성 기법

높은 신호대잡음비로 음향을 측정하기 위해 가능한 음원이 센서배열에 근접하여 지나가도록 하고 음향측정을 수행한다. 그런데 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 평면파라 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.

본 연구에서는, 식 (3)의 가우시안 필터 $G(n, f, k)$ 특성을 갖는 시간영역 필터를 통과한 각 센서 출력에 시간지연을 보정한 다음 선형 합산하여 형성시키는 초점빔을 제안한다^[3,4]. 제안 알고리즘에서는 센서위치 $x(n)$ 빔폭 제어상수 k 에 의해 각 센서의 수신 주파수 대역을 제한한다.



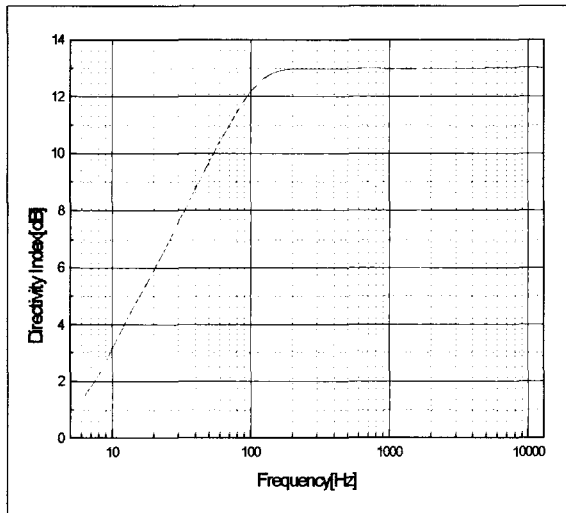
[그림 1] 각 센서의 시간지연 오차(평면파 가정)

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

3.3 지향지수

지향지수는 음향 모듈에 포함되는 수중청음기의 개수를 결정하고, 측정 주파수와 더불어 음향모듈의 길이 설정하는 주요 변수가 된다. 특히 수중청음기 개수는 전치증폭기와 디지털 변환장치의 하드웨어 구성뿐만 아니라 소프트웨어 연산량에도 영향을 미치므로, 지향지수는 매우 신중하게 설계된다. 본 논문에서 제안한 빔형성 알고리즘을 이용하면, 최대지향지수 모드에서의 주파수별 지향지수는 64개 센서의 비선형 센서배열에 의해 그림 2와 같이 구현된다.

그림 2에 나타난 지향지수를 만족하는 일반적인 선형센서배열에서는 75개의 센서가 요구되며, 더욱이 각 옥타브대역내의 지향지수가 그림 2와 같이 균일하지 못하다. 그러므로 제안 알고리즘은 지향지수 측면에서 상당한 장점을 가짐을 알 수 있다.



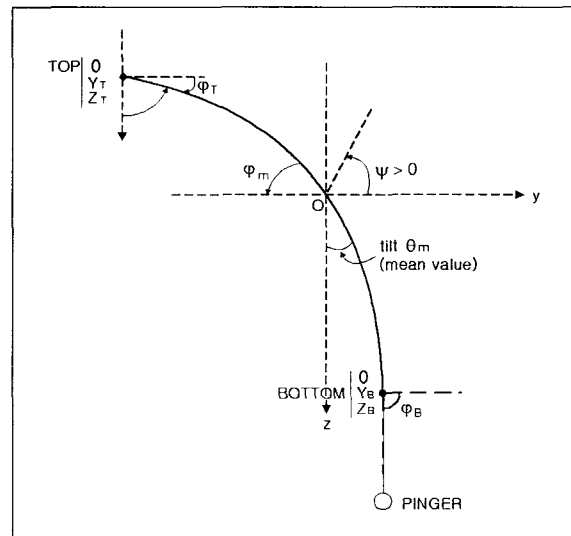
[그림 2] 최대지향지수 모드에서의 지향지수

4. 음향학적 추적 기법제안

4.1 배열형상 구배 추정

수중에 설치된 센서배열은 조류 및 해류와 같은 해양 환경에 의해 수직성을 유지하지 못하고 어떤 형태의 구배를 가지게 되며, 이는 빔지향에 영향을 미치므로 구배 추정이 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 두 개의 수심센서와 한 개의 고각센서를 이용하여 그림 3과 같이 근사 모델링을 통한 구배 추정기법을 제안한다.

그림 3에서 보조센서 위치는 배열 맨 위에 수심 센서와 고각센서를 설치하고, 맨 아래에 수심센서를 설치한다. 그리고 배열 맨 하단에는 표적의 위치를 능동 추적하기 위한 음향송신기(Pinger)를 설치한다. 원점 O는 배열의 중심을 나타내며, 배열은 직각 좌표계의 Oyz 평면에 놓여있다. 따라서 배열의 x수치는 0이고, φ_T 는 $\varphi_T = 90^\circ - \text{고각}$ 을 나타낸다.



[그림 3] 배열센서의 구배 모델링

배열 맨 아래 φ_B 는 90° 보다 작지만 거의 90° 라고 가정하며, 위 모델링에서 알고 있는 정보는 3가지로서 배열 맨 위 고각 정보, 배열 맨 위 및 맨 아래 수심 정보, 배열 길이 정보이다.

그러면 배열 모델링은 다음의 미분방정식에 의해 유도된다^[6].

$$\begin{cases} \frac{dx}{ds} = 0 \\ \frac{dy}{ds} = \cos \varphi \\ \frac{dz}{ds} = \sin \varphi \\ T \cdot \frac{d\varphi}{ds} = K \cdot T_0 \cdot \sin^2 \varphi \end{cases} \quad (4)$$

여기서 ds 는 3축 좌표계에서 배열 미소 길이, φ 는 배열 길이를 따라 임의 지점에서의 각도(90° - 임의 지점에서의 고각), T 는 배열 길이 방향의 장력, T_0 는 균형추의 무게를 나타낸다. 식 (4)에서 배열 장력 T 와 균형 추 무게 T_0 는 동일하며 일정하게 유지된다. 이 개념을 이용하여 다음 식 (5)를 유도할 수 있다.

식 (5)는 3개의 미지수 ($K, \varphi_B, Y_T - Y_B$)와 3개의 알고 있는 값($S_o, \varphi_T, Z_T - Z_B$)으로 구성되어 있다.

$$\begin{cases} T = \text{constant} = T_0 \\ K \cdot S_o = \frac{1}{\tan \varphi_T} - \frac{1}{\tan \varphi_B} \\ Y_T - Y_B = \frac{1}{K} \left(\frac{1}{\sin \varphi_B} - \frac{1}{\sin \varphi_T} \right) \\ Z_T - Z_B = \frac{1}{K} \left(\text{Log} \left(\tan \frac{\varphi_T}{2} \right) - \text{Log} \left(\tan \frac{\varphi_B}{2} \right) \right) \end{cases} \quad (5)$$

여기서 $S_o = S_B - S_T$ 는 배열 길이이며, Y_T, Z_T 는 배열 맨 위 좌표이고, Y_B, Z_B 는 배열 맨 아래 좌표이

다. 여기서 K 는 식 (5)의 네 번째 수식과 Log함수의 특성에 의해 식 (6)과 같이 얻어진다.

$$K = \frac{1 - t + \text{Log} \left[\tan \left(\frac{\varphi_T}{2} \right) \right]}{Z_T - Z_B} \quad (6)$$

여기서 $t = \tan(\varphi_B / 2)$ 이며, 삼각 함수 정리에 의해 $\tan(\varphi_B) = \frac{2t}{(1-t^2)}$ 이다.

그러면, 식 (5)로부터 배열의 각 센서에 대한 좌표 (y, z)는 다음 식 (7)에 의해 계산된다.

$$y = Y_T - \frac{1}{K} \left(\frac{1}{\sin \varphi} - \frac{1}{\sin \varphi_T} \right) \quad (7)$$

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

여기서 φ 는 계산하고자 하는 센서가 위치한 지점의 각도로서 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{1}{\tan(\varphi)} = \frac{1}{\tan(\varphi_T)} - K \cdot S_o \quad (8)$$

4.2 능동추적 기법

능동모드 음원 추적에 의한 거리 산출 방식에서는, 그림 3과 같이 배열 최 하단에 음향송신기를 설치하고 음향송신기 송신신호에 응답하여 신호를 송신하는 음향수신기를 음원에 설치하여 운용한다. 송수신 장치는 상호 동기가 이루어져 신호 도달시간 차이에 의한 거리를 계산한다^[6]. 음향측정용 센서와는 별도로 거리 측정용 음향센서를 센서배열 내에 동일간격으로 배치하여 사용한다.

구배 모델링을 이용한 표적 위치 추적 개념은 그림 4와 같이 배열 센서에 설치된 3개의 센서만을 이용하

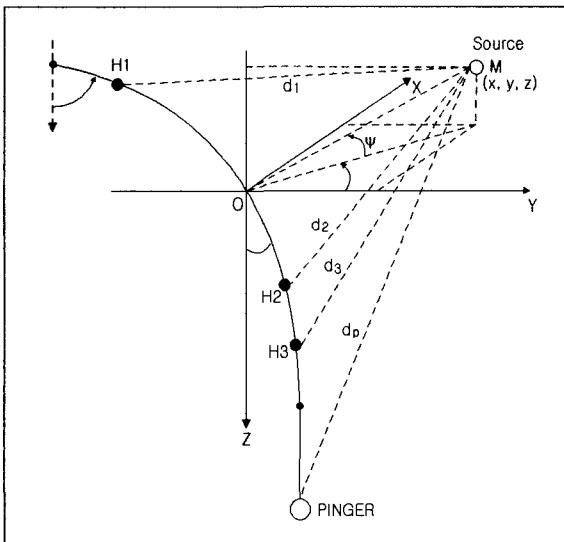
여 다음과 같은 수식을 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} c(t_1 - t_p) &= d_p + d_1 = \alpha_1 \\ c(t_2 - t_p) &= d_p + d_2 = \alpha_2 \\ c(t_3 - t_p) &= d_p + d_3 = \alpha_3 \end{aligned} \quad (9)$$

또한 그림 4에서 배열의 전체가 OYZ 평면에 놓여 있기 때문에 다음과 같은 기하학적인 수식을 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} d_1^2 &= x^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 \\ d_2^2 &= x^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 \\ d_3^2 &= x^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 \\ d_p^2 &= x^2 + (y - y_p)^2 + (z - z_p)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 y_1, y_2, y_3, y_p 및 z_1, z_2, z_3, z_p 는 배열 모델링을 통하여 얻을 수 있는 정보이다. 그러면 식 (9)와



[그림 4] 구배 모델링을 통한 표적 위치 추적

(10)에서 d_1^2 과 d_p^2 를 조합하여 다음 수식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} d_1^2 - d_p^2 &= (d_1 - d_p)(d_1 + d_p) \\ &= \alpha_1 \cdot (\alpha_1 - 2d_p) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_1^2 - d_p^2 &= -2y(y_1 - y_p) - 2z(z_1 - z_p) \\ &\quad + (y_1^2 - y_p^2) + (z_1^2 - z_p^2) \end{aligned} \quad (11)$$

따라서 식 (11)의 두 수식을 조합하면 식 (12)가 구해진다.

$$\begin{aligned} \alpha_1^2 - \frac{y_1^2 + y_p^2 - z_1^2 + z_p^2}{2\alpha_1 d_p} - 2(y_1 - y_p)y - 2(z_1 - z_p)z \end{aligned} \quad (12)$$

마찬가지로 d_2^2 과 d_p^2 , d_3^2 과 d_p^2 를 각각 조합하여 다음과 같은 결과를 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha_2^2 - \frac{y_2^2 + y_p^2 - z_2^2 + z_p^2}{2\alpha_2 d_p} - 2(y_2 - y_p)y - 2(z_2 - z_p)z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_3^2 - \frac{y_3^2 + y_p^2 - z_3^2 + z_p^2}{2\alpha_3 d_p} - 2(y_3 - y_p)y - 2(z_3 - z_p)z \end{aligned} \quad (13)$$

식 (12)와 (13)의 세 수식을 조합하면 (d_p, y, z) 을 얻을 수 있으며, 식 (10)의 마지막 수식에서 표적의 x 좌표를 산출할 수 있다.

$$x = \pm \sqrt{d_p^2 - (y - y_p)^2 - (z - z_p)^2} \quad (14)$$

4.3 수동추적 기법

수동추적은 식(15)의 단순한 수학적 모델링을 이용

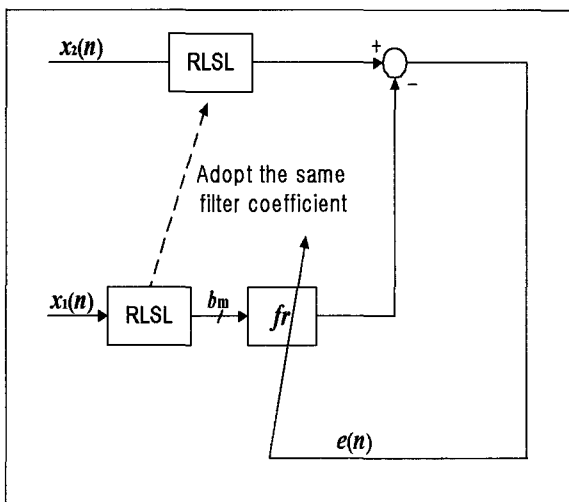
한 시간지연 추정에 의해 수행한다. $s(n)$ 은 음원신호이고, 센서 유입 잡음신호 $w_1(n)$ 과 $w_2(n)$ 은 0평균의 랜덤 신호이며, 상호 상관관계가 없다. D 는 두 센서가 동일 음원신호의 수신 과정에서의 시간지연을 나타낸다.

식(15)의 시간지연은 신호의 입사각에 해당하므로, 입사각을 이용한 기하학적 도식에 의해 음원과의 거리를 산출한다.

$$x_1(n) = s(n) + w_1(n) \tag{15}$$

$$x_2(n) = s(n-D) + w_2(n)$$

본 연구에서는 수동추적을 위해 그림 5의 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 5] RLSLTDE

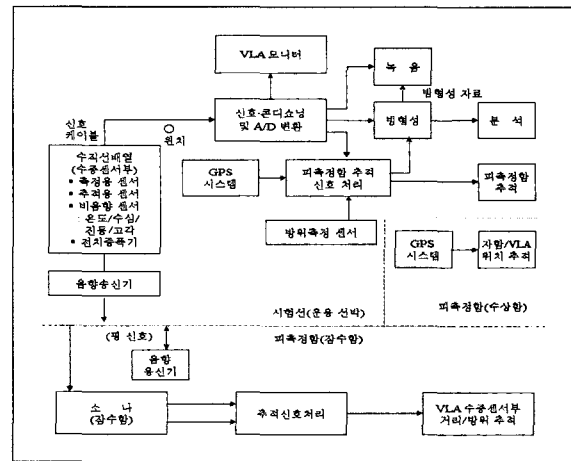
5. 제안 기법의 구현 및 시험 결과

5.1 하드웨어 구현

저소음 합정음향 측정 장비는 수직선배열, 수중케이 블, 음향송신기, 음향응신기 및 부이 등으로 구성되는 수중부와 시험선에 설치되어 신호를 측정, 녹음 및 분석하는 선상부 및 피 측정함에 설치되어 합정의 기동 궤적과 측정용 배열과의 거리, 방위를 제공하는 항해 보조장치부로 크게 구분된다.

시험해역에서 측정 중에는 안전시험 및 측정상태 모니터를 최우선으로 하여야 하며, 이를 위하여 표적함의 거리, 방위 및 배열구배, 배열수심 등의 시험상황을 모니터 하기 위한 화면과 측정된 신호를 모니터 하기 위한 화면으로 구성된다. 그러나 사후에 정밀 분석을 위하여 모든 데이터는 1차적으로 하드디스크에 기록이 되며, 저장된 데이터를 이용하여 다양한 빔을 형성하여 정밀 분석을 수행한다.

본 연구 결과 저소음 합정음향 측정 장비의 각 기능별 세부 구성도는 그림 6과 같다.

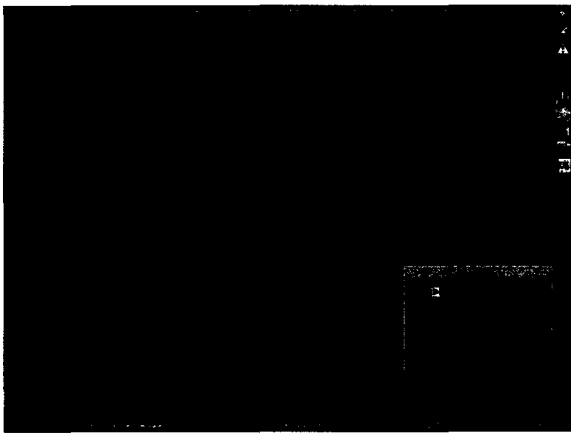


[그림 6] 하드웨어 세부 구성도

5.2 소프트웨어 구현

본 연구에서 그림 6의 운용 화면은 메뉴, 실시간 측정/분석, 실시간 모니터링, 실시간 신호 재생/분석 및 사후 분석 모드로 구성하였다.

실시간 수중음향측정체계의 대표적인 구현 화면은 그림 7~10과 같다. 그림 7은 표적 함정에 대한 음향학적 실시간 추적화면이다. 그림의 오른쪽 장에는 배열구배가 표시되어 측정 상황의 유용성 여부를 판단하게 한다.

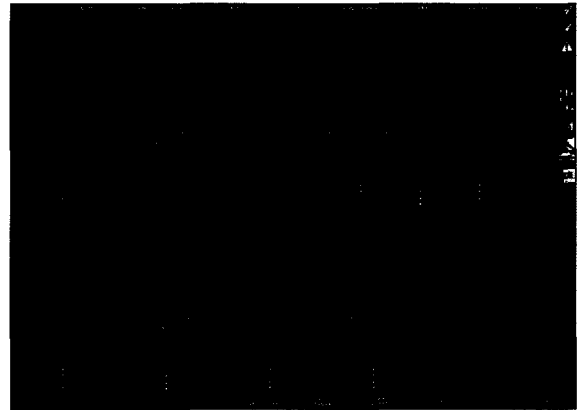


[그림 7] 실시간 추적화면

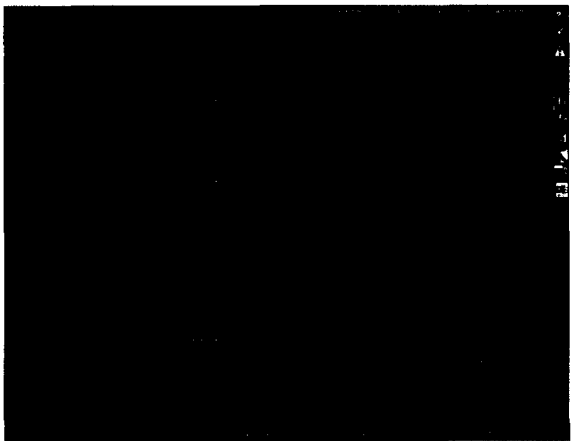
그림 8은 실시간 측정 및 분석 화면이다. 주파수에 따른 진폭과 로파그램이 표시되며, 오른쪽 창은 빔지향각을 보여준다. 빔은 자동으로 추적되고 필요시 운용자에 의해 수동 조정될 수도 있다.

그림 9는 배열 내 각 센서들의 상황을 모니터링 하는 화면이다. 음향센서뿐만 아니라 비음향센서의 기능을 실시간으로 모니터링 가능하도록 구현되어 있다.

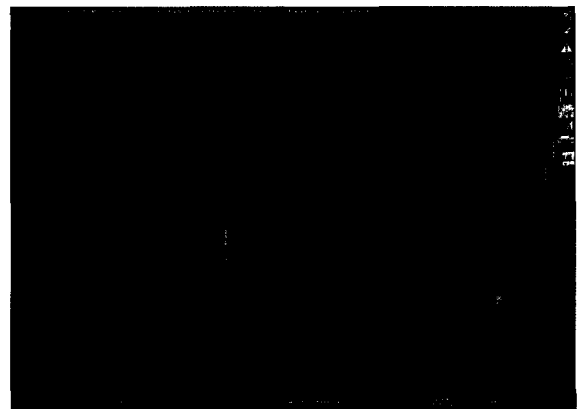
그림 10은 측정환경을 실시간으로 모니터링하고 이를 분석에 적용하기 위한 화면이다. 음향전달 특성에 대한 상세한 정보가 운용자에게 제공된다.



[그림 9] 음향센서 실시간 모니터링 화면



[그림 8] 실시간 측정 및 분석 화면

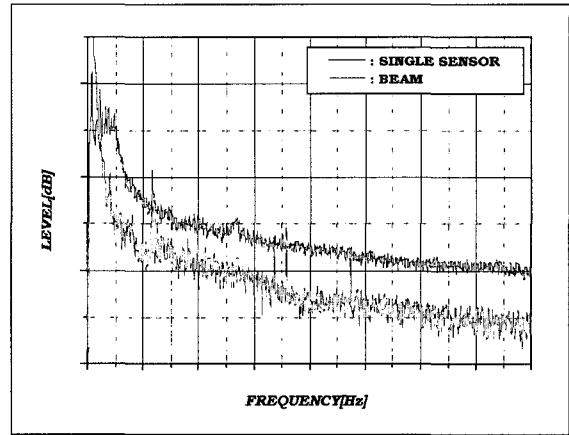


[그림 10] 음향환경 실시간 모니터링 및 분석

5.3 시뮬레이션 및 해상시험 결과

그림 11은 수동추적에 대한 시뮬레이션 결과로서 시간지연 샘플 $D=10$ 필터길이 $L=16$ 으로 하여 신호대잡음비가 -12dB 에 대한 시간지연 추정 결과를 보여준다. RLSLTDE 기법은 0.3초만에 시간지연을 정확히 추정하고 있으며, LMSTDE보다 빠르게 추정하고 있다.

추정 정확도는 교정된 표준트랜스듀서를 일정 거리에서 송신하고 수직선배열에서 수신한 빔출력 준위와 비교함으로써 수행하였다. 추정 결과 협대역 및 광대역에서 2.0dB 이하의 추정 정확도를 가져 함정 음향



[그림 12] 지향지수 성능시험 결과

측정에 유용하다고 판단되었다.

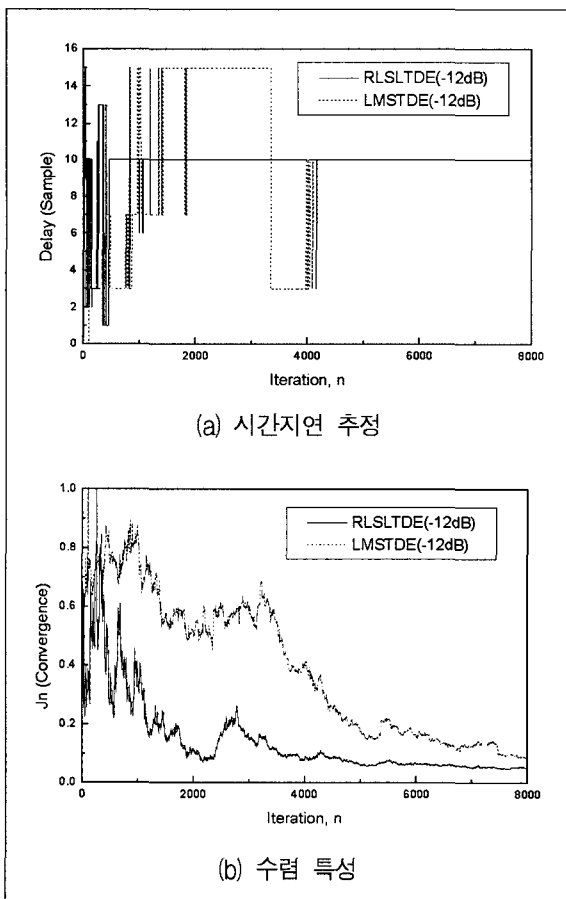
지향지수는 무지향성 단일 수중청음기가 수신하는 음향준위와 배열 내 각 센서들의 수신신호를 빔형성시켜 비교하는 결과로서 성능을 판단할 수 있다.

그림 12에서 단일 수중청음기에 의한 수신준위 보다 배열에 의한 측정 준위가 전반적으로 낮음을 알 수 있으며, 이는 배열을 이용한 지향지수의 효과에 의한 것이다. 그러므로 본 연구에서의 측정체계는 수중 배경소음 보다 낮은 도달 음향의 측정이 가능함을 알 수 있다.

그리고 본 연구에서는 실제 저소음 함정을 기동시키면서 종합적인 해상성능 시험을 수행하였다. 시험결과, 음향학적 실시간 능동 및 수동 추적과 실시간 모니터링 및 실시간 측정/분석을 목표대로 수행함으로써, 설계 및 구현된 저소음 음향추정체계의 유용성을 확인하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 수중배경소음이 높은 우리나라 해역



[그림 11] 수동 추적 결과(SNR=-12dB)

에서 저소음 함정의 수중방사소음을 측정할 목적으로 센서배열, 빔형성, 음원추적, 배열구배 모델링 및 측정/분석 기법을 제안하고 측정체계를 설계하였다. 즉, 측정 주파수 대역에서 지향지수가 균일하게 유지되는 비선형 센서배열 설계 알고리즘과 초점빔형성 알고리즘 및 피측정 음원의 위치추정을 위한 음향학적 능/수동 추적 알고리즘을 제안하였다. 또한 본 논문에서는 실제 구현된 하드웨어와 소프트웨어는 해상시험을 통하여 그 유용성을 확인하였으며, 실제 잠수함을 이용한 방사소음 측정을 수행함으로써 음향측정체계의 유용성이 검증되었다.

참 고 문 헌

[1] Robert J. Urick, *Principles of Underwater*

Sound, 3rd edition, McGraw-Hill Book Company, 1983.

[2] Richard O. Nielsen, *Sonar Signal Processing*, ArtechHouse Inc., 1991.

[3] 도경철, 손 권, 최재용, “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, 최재용, “비선형 센서배열 빔형성 기 상설계, 국방과학연구소 기술보고서, 1999.

[6] 최재용, 손 권, 도경철, “음향추정을 위한 능/수동 추적기법 연구”, 제3회 해상무기체계 발전세미나 논문집, pp.412~417. 국방과학연구소, 2000.