

해저고정 소나표적의 위치교정기법과 오차해석

A Calibration Technique and its Error Analysis for the Position of Seabed Sonar Target

이 상 국*
Lee Sang Kug

이 용 곤*
Lee Yong Gon

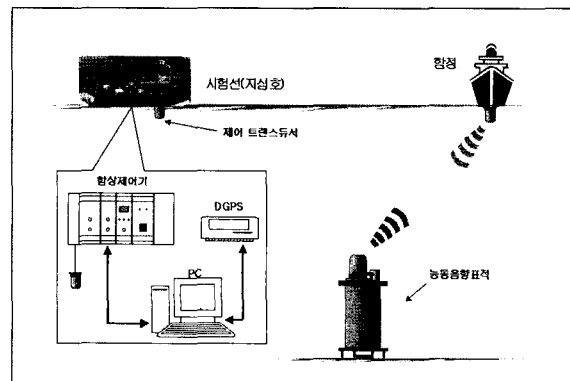
ABSTRACT

This paper contains a precise calibration technique for the position of seabed acoustic target and theoretical error analysis of calibration results. The target is deployed on seabed as a standalone transponder. The purpose of target is performing accuracy test for active sonar as well as position calibration itself. For the position calibration, relative range between target and test vessel should be measured using target's transponder function. The relative range data combined with vessel position can be converted into a estimated position of target by the application of nonlinear LSE method. The error analysis of position calibration was divided into two stages. One is for relative range estimator and the other for target position estimator. Numerical simulations for position calibration showed good matching between results and developed CRLB.

주요기술용어 : Position Calibration(위치교정), CRLB(Cramer-Rao Lower Bound)
LSE(Least Square Estimation)

1. 서 론

해저고정형 소나표적은 소형장비와 적은 인력으로 능동소나의 탐지성능을 평가하기 위한 측정체계로 설계되었다. 본 논문에서는 해저고정 소나표적의 절대위치를 정밀 교정하기 위한 기법과 결과의 신뢰성을 위한 교정오차의 이론적 분석 기법을 정립하였다.



[그림 1] 해저고정형 소나표적 구성도

* 국방과학연구소 연구원

소나표적은 그림 1과 같이 해저센서부와 선상제어부로 구성되며, 해저센서부는 음향 트랜스듀서와 전자부로 구성되어 있고, 선상제어부는 송수신 및 모니터링 장치와 수중음향 트랜스듀서로 구성되어 있다.

소나표적 운용은 먼저 해저에 투하 설치한 소나표적의 위치를 음향학적으로 측량하는 과정인 위치교정을 수행한다. 소나표적의 운용모드를 시험대상 소나에 맞게 주파수 및 에코신호를 설정한 후 피시험함을 표적 부근으로 정해진 패턴의 항로에 따라 기동하며 표적을 탐지한다. 능동소나의 탐지정확도 평가는 함정에 탑재한 DGPS(Differential Global Positioning System)를 이용하여 소나와 소나표적간의 상대위치를 측정하고, 소나탐지자료와 비교함으로써 이루어진다. 해저고정센서의 위치교정은 시험선에 설치된 음향 트랜스듀서와 소나표적 사이의 음향신호 전달시간의 추정에 의해 직선거리를 산출하고, 이를 소나표적 주위의 여러 관측위치에서 측정을 수행한다.

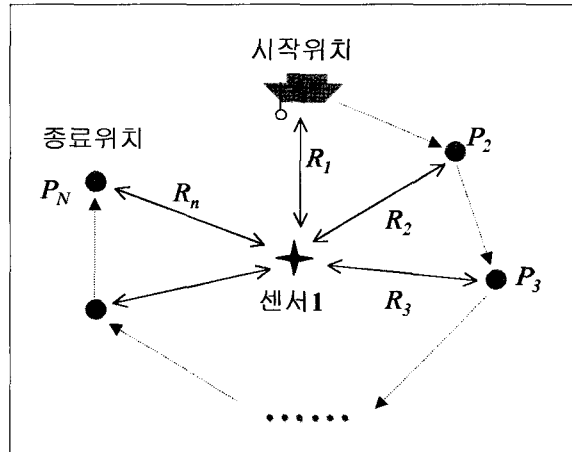
Stockton과 McLennan^[1]의 연구와 같이 70년대에 해저석유채굴과 수중음향에 의한 항해술 등이 본격적으로 발달하면서 수중위치추적에 많은 연구가 있어 왔으며, 이들 연구결과를 실제 시스템과 결부시켜 Milne^[2]가 정리함으로써 기초적인 배경을 알 수 있도록 하였다.

시간지연추정에서 발생될 수 있는 오차분산의 최저치에 대한 연구에서도 Quazi^[3]는 능동 및 수동체계에 대해 정리하는 등 이론적인 연구도 활발하였다. 본 연구에서는 해저 단일센서의 위치추정법을 기본적인 개념 위주로 제시하고, 이 추정법을 대상으로 Kay^[4]의 저서에서 다루고 있는 크라머-라오 최저경계(CRLB) 정의에 의해 CRLB를 유도하여 오차분석을 수행하고자 한다.

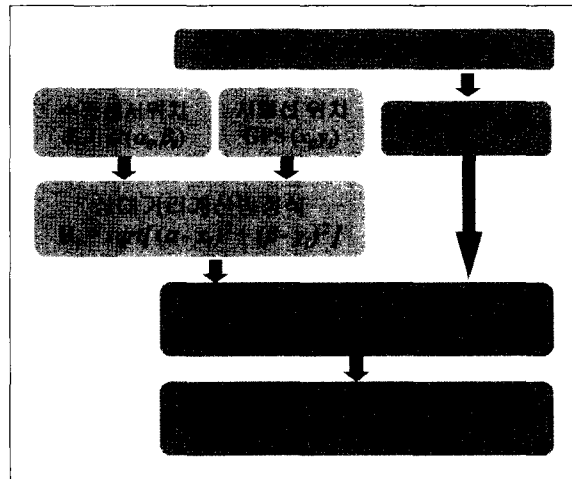
2. 해저고정 소나표적 위치교정 기법

2.1 해저고정 소나표적 위치교정의 개념

일반적인 방법으로서, 장거리 기선방식에서 수중추적을 위한 다수의 해저센서의 동시 교정방법은 시험선이 일정 속도로 기동하면서 지속적으로 해저센서들



[그림 2] 위치추정을 위한 기하학적 위치



[그림 3] 측정된 자료들을 이용한 위치교정 계산 흐름도

과 음향신호를 주고받음으로써 교정이 수행된다. 이 경우 시험선의 음향센서는 선저에 돌출된 돔(Dome) 형태로 장착 운용된다. 본 연구에서는 그림 2와 같이 시험선이 소나표적을 반경으로 원형 관측 패턴을 이루는 경우를 대상으로 한다.

2.2 위치교정의 이론적 접근

앞에서 설명한 바와 같이 위치교정을 위하여 여러 위치에서 측정된 상대거리 자료들은 그림 3과 같은 과정을 통하여 x-y 좌표계에서 표적센서위치(α, β)를 추정한다.

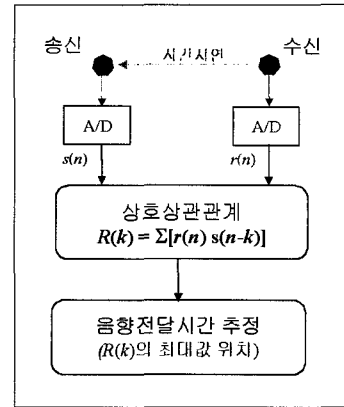
먼저 i번째 시험선 위치를 예로 들면, 우선 음향평을 송수신하여 음향전달시간을 추정하여 상대거리를 산출하며, 동시에 GPS에 의하여 시험선의 절대 위치를 획득한다. 이들 자료들을 이용하여 그림 3과 같은 최소자승오차계산방정식에 의해 추정된 거리와 상대거리 계산 방정식에 의한 상대거리 사이의 오차를 최소화시키는 표적센서 위치를 추정하게 된다.

2.3 위치교정의 이론적 배경

시험선에서 송신된 음향신호는 표적센서를 트리거 시키며, 표적센서는 시험선으로 에코신호를 되돌려 준다. 시험선에서 수신된 신호와 송신신호는 정합필터에 의해 두 신호간의 시간지연을 추정하는데 이용되며, 일반적인 방법은 다음의 그림 4와 같다. 정합필터 출력은 수신과 송신신호를 각각 $r(m)$ 과 $s(m)$ 이라 할 때 식(1)과 같다.

$$Z(k) = \sum_{m=0}^{M-1} r(m)s(m-k) \quad (1)$$

시간지연 $\hat{\tau}$ 는 식 (1)의 최대화하는 k 를 구하는 것



[그림 4] 정합필터에 의한 시간지연 추정

이며, 수신신호 $r(m)$ 에 포함된 $\hat{\tau}$ 가 가지는 랜덤한 오차특성은 백색 가우시안 잡음에 기인하는 것으로 가정한다.

표적센서의 수평좌표 벡터는 $\theta = [\alpha, \beta]^T$ 로 두고, 관측위치는 (x_{s_i}, y_{s_i}) 로 표현하면 i번째 관측위치에서 표적센서까지의 수평거리 R_i 는 식 (2)와 같다.

$$R_i(\theta) = \sqrt{(x_{s_i} - \alpha)^2 + (y_{s_i} - \beta)^2} \quad 1 \leq i \leq N \quad (2)$$

여기서 수중센서의 수심은 압력센서를 통해 직접 측정할 수 있으므로 R_i 는 3차원 경사거리를 2차원 평면으로 투영한 거리이다. R_m 을 N개의 거리측정치로 이루어진 열벡터로 표현하면, 센서위치 추정을 위한 최소자승법은 식 (3)의 측정벡터 R_m 과 측정방정식 $R(\theta)$ 의 차가 최소가 되도록 하는 θ 를 구하는 것이다^[3,5,6].

$$e(\theta) = [R_m - R(\theta)]^T W^{-1} [R_m - R(\theta)] \quad (3)$$

식 (3)의 W 는 측정신호의 신호대잡음비에 반비례하

는 가중치 행렬로서 원형 관측패턴의 경우 동일한 거리에서 모든 측정이 이루어지므로 동일한 값을 갖는 대각행렬이다. 일반적으로 최소자승법은 측정데이터 수가 추정파라미터 수보다 많은 경우 유용하고 측정잡음의 통계학적인 특성을 모를 때에도 적용 가능하며, 특히 백색잡음일 경우 ML(Maximum Likelihood) 추정법과 동일한 성능을 가진다. 식 (3)의 최소자승 추정법의 해는 식 (4)의 형태로 표현되는 재귀적 뉴턴-랩슨 알고리즘을 이용하여 표현할 수 있다.^[5]

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \mu_{n+1} \cdot (F^{-1})_{\theta = \theta_n} \cdot (\text{grad } f)_{\theta = \theta_n} \quad (4)$$

여기서 μ_{n+1} 은 n+1번째 재귀에서의 수렴방향 벡터의 절대 크기, F 는 스칼라 함수 $e(\theta)$ 의 피셔(Fisher) 행렬, $(\text{grad } f)$ 는 스칼라 함수 $e(\theta)$ 의 경도벡터로서 다음과 같이 표현된다.

$$F_i = \left[\frac{\partial R(\theta)}{\partial \theta_i} \right]^T [W^{-1}] \left[\frac{\partial R(\theta)}{\partial \theta_i} \right]; 1 \leq i \leq 2 \quad (5)$$

$$(\nabla f)_i = \left[\frac{\partial R(\theta)}{\partial \theta_i} \right]^T [W^{-1}] [R_m - R(\theta)]; 1 \leq i \leq 2$$

θ_n 의 초기값은 수렴속도에 영향을 미치지만 정확도와는 무관하며, 일반적으로 표적센서 부설 초기 위치를 적용한다.

3. 해저고정 표적센서 위치교정 기법의 이론적 오차 예측

이론적인 오차 예측은 일반적으로 추정기의 오차분산 최저치를 정의하기 위하여 많이 사용되는 CRLB

를 이용한다. 그림 3의 흐름도에서 나타난 전체 위치 추정을 위한 CRLB는, 우선 상대거리 추정기에 대한 CRLB를 유도하고, 이를 최소자승법에 의한 위치추정 기법에 대한 식으로 변환함으로써 얻을 수 있다.

CRLB는 이론적으로 가능한 추정기의 추정분산 최저 경계를 정의하는 한 방법으로서, 추정기들 사이의 성능평가 척도가 된다. 식 (6)은 CRLB를 정의하는 식으로서, 추정하고자 하는 파라미터 θ 의 최저분산을 측정자료 x 의 확률밀도함수에 의해 유도한다.

$$\text{var}(\theta) \geq I^{-1}(\theta) = \frac{1}{E \left[\left[\frac{\partial \ln p(x; \theta)}{\partial \theta} \right]^2 \right]} \quad (6)$$

3.1 상대거리추정 CRLB

상대거리는 음향전달시간에 음속을 곱하여 계산되므로 시간지연추정 CRLB를 이용하여 구할 수 있고, 시간지연추정 CRLB는 식(7)과 같다^[3].

$$\sigma_r^2 \geq \frac{1}{8\pi} \frac{1}{\text{SNR}} \frac{1}{BT} \frac{1}{f_0^2} \frac{1}{1 + B^2/12f_0^2} \quad (7)$$

여기서, SNR은 신호대잡음비, T는 펄스길이, B는 대역폭, f_0 는 중심주파수를 의미한다. SNR은 잡음과 위에 대한 신호파위의 비율, 시간은 sec, 주파수는 Hz를 단위로 사용한다. 그림 2의 교정에서는 높은 신호대잡음비를 얻을 수 있으므로, 정합필터는 비편향 ML 추정기법이며, 수신신호 $r(t)$ 에 포함된 잡음이 백색잡음이라 가정하면 시간지연 추정오차는 CRLB 최소경계를 만족한다.

3.2 위치추정 CRLB

시험선에서 표적센서까지의 거리는 평균거리 $R(\theta)$

에 공분산이 C인 백색정규분포를 가진 잡음 w_m 이 실린 것으로 가정한다.

$$R_m = R(\theta) + W_m \quad (8)$$

$N \times N$ 의 정방행렬 C는 그림 4의 정합필터 출력 분산에 해당하며, $(c\sigma_r)^2$ 의 동일한 분산을 가지는 대각행렬로 가정하며, c는 평균수증음속이다. 추정치 분산 최소경계는 식 (9)의 피서정보 행렬 I의 역수에 해당한다.

$$[I(\theta)] = \left[\frac{R(\theta)}{\partial \theta} \right]^T C^{-1}(\theta) \left[\frac{\partial R(\theta)}{\partial \theta} \right] \quad (9)$$

$$\frac{\partial R(\theta)}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial[R_1(\theta)]}{\partial \alpha} & \frac{\partial[R_1(\theta)]}{\partial \beta} \\ \frac{\partial[R_2(\theta)]}{\partial \alpha} & \frac{\partial[R_2(\theta)]}{\partial \beta} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial[R_N(\theta)]}{\partial \alpha} & \frac{\partial[R_N(\theta)]}{\partial \beta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

ϕ_i 가 표적센서에 대한 관측위치 x_{s_i} 의 상대방위라 하면 식 (10)의 $\partial R_i(\theta)/\partial \alpha$ 와 $\partial R_i(\theta)/\partial \beta$ 는 각각 $\cos(\phi_i)$ 와 $\sin(\phi_i)$ 로 표현할 수 있다. 그리고 그림 2와 같이 수중센서를 중심으로 원형패턴을 이루면서 관측하는 경우의 피서행렬은 다음과 같이 유도된다.

$$[I(\theta)] = \frac{1}{(c\sigma_r)^2} \sum_{i=0}^N \begin{bmatrix} \cos \phi_i \\ \sin \phi_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_i & \sin \phi_i \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\approx \frac{1}{(c\sigma_r)^2} \frac{N}{2\pi} \begin{bmatrix} \pi & 0 \\ 0 & \pi \end{bmatrix}$$

그러므로 수중센서 위치인 (α, β) 의 추정오차 최소값은 다음의 식 (12)와 같다.

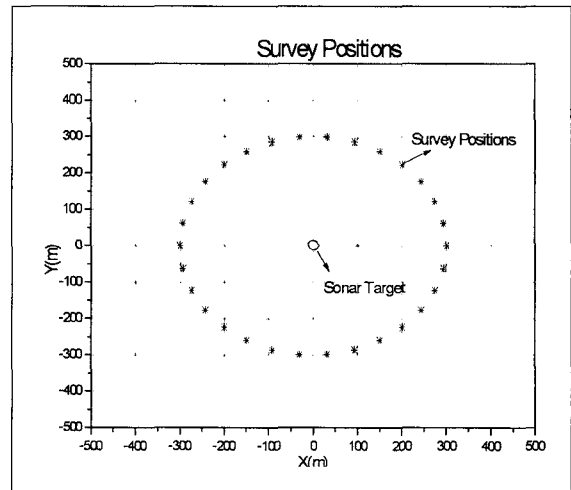
$$\sigma_\alpha (= \sigma_\beta) \geq \sqrt{\frac{2}{N}} c\sigma_r \quad (12)$$

식 (12)는 CRLB의 경우에도 추정점이 원형패턴인 경우 추정점 개수의 제곱근에 비례하여 추정오차 분산이 감소하는 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

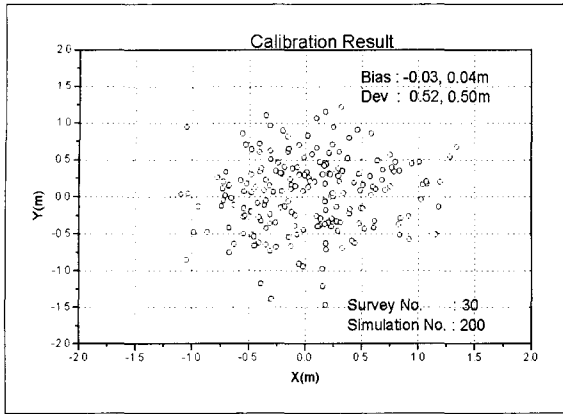
4. 수치실험에 의한 위치교정 알고리즘 고찰

해저에 부설된 소나표적 주위로 임의의 위치에서 측정하기 보다는, 그림 5와 같이 반경 300m인 원의 원주상의 위치로서 30개의 측정점에서 측정한 결과를 가정하였다. 이는 식 (12)의 소나표적위치 추정 최소치를 수치실험 결과와 비교할 수 있도록 하기 위함이다.

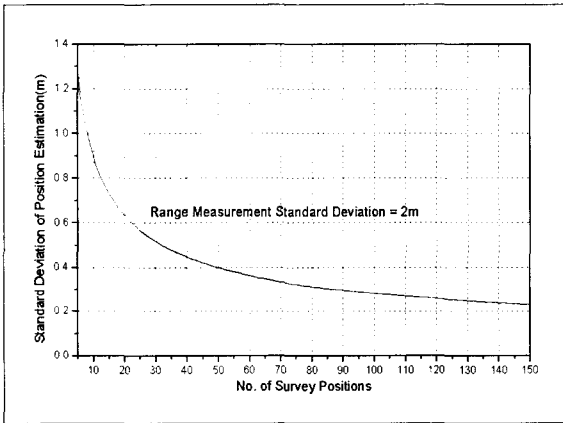
시간지연 추정오차에 따른 거리측정오차는 약 1m 정도로 가정하고, 여기에 GPS 오차와 조류, 파도, 바람 등의 환경적 요인의 오차, 그리고 GPS 안테나와 시험선의 교정용 음향센서 수직위치 불일치 등 여러 가지 요인들에 의한 오차를 고려하여 경험적으로



[그림 5] 원형교정 패턴(반경 300m)



[그림 6] 소나표적 위치 추정 결과



[그림 7] 관측점 수에 따른 소나표적 위치추정 정확도

거리 추정 분산치 $\sigma_R (= c\sigma_r)$ 을 2m로 선정하여 수치실험을 수행하였다. 이들 개별 오차요인들에 의한 정량적인 영향은 제반 측정 여건에 종속적이므로 대체로 일반적인 조건을 대상으로 하였다. 수치실험결과, 그림 6에서와 같이 x축 및 y축 추정 표준편차가 0.5m 이하로 소나표적의 위치를 구할 수 있음을 알 수 있다.

그림 7은 관측점 개수에 따른 소나표적 x, y 위치 추정 최소치를 보여주며, 특히 측정점의 수가 100개

이상에는 교정 정확도가 크게 증가하지 않음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 위치교정 알고리즘의 정립과 그 이론적인 성능을 해석하여 간이형 해저고정 소나표적의 위치교정 정확도를 예측하고 분석하였다.

제안된 교정정확도의 예측은 먼저 해저고정센서와 시험선간의 음향평 송수신에 의한 거리추정오차를 위한 CRLB를 선정하였다. 많은 측정점들에서 획득된 이들 거리추정자료를 바탕으로 표적센서의 위치추정을 수행하므로 이에 대한 CRLB를 유도하였다. 이와 같은 이론적인 오차 한계는 실제 위치추정을 위한 측정에서 측정체계의 정확도 한계, 측정점의 개수, 외부 환경에 의한 정확도의 영향 등을 미리 분석할 수 있는 도구로 활용할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] T.R. Stockton and M.W. McLennan, "Acoustic position measurement, an overview", Offshore Technology Conference 2172, pp.254~264, 1975.
- [2] P.H. Milne, Underwater Acoustic Positioning Systems, E&F. N. SPON 1983.
- [3] A.H. Quazi, "An overview on the time delay estimate in active and passive systems for target localization", IEEE Trans. on ASSP., Vol ASSP-29, No.3, pp.527~533, 1981.

- [4] S.M. Kay, Fundamentals of statistical Signal Processing-Estimation theory, Prentice Hall, 1993.
- [5] More, User Guide for MINPACK-1, Argonne National Laboratory Report ANL-80-74, Argonne, Illinois, 1980.
- [6] 국방과학연구소, 수중센서 상대좌표 추정기법 연구, 국방과학연구소, 1997.