

# TDoA 기반 3차원 측위기법을 이용한 침몰 선박 위치 측정 기술

## Location Estimation of a Sunken Vessel using 3D TDoA Positioning Technique

김도형\* · 조기완\*\* · 남상혁\*\*\* · 김동윤\*\*\*\*

Kim, Dohyeong · Jo, Giwan · Nam, Sang-Hyeok · Kim, Donguon

본 연구는 수중 음파를 이용하여 침몰 선박의 수중위치를 찾아내는 3차원 측위 기술을 소개한다. 선박에 미리 설치되어 침몰 시 작동하는 음파 발생장치에서 생성된 음파가 수면에 위치하고 있는 5개의 수신장치에 도달하는 시각의 차이를 이용하여 침몰 선박의 수중위치를 특정하는 알고리즘을 소개한다.

**핵심용어** : TDoA, 3차원 측위, 수중음파, 발생장치, 수신장치

### 1. 서 론

선박 침몰 사고 발생 시, 수중 선박 위치 소실로 막대한 인원 투입과 장기간의 수색이 요구되며, 수색 장기화로 인한 인양 포기는 2차 사고 또는 선박의 부식에 따른 기름이나 화학물질 유출로 인한 환경 오염의 요인이 된다. 수중 침몰 선박의 위치를 신속·정확하게 특정할 수 있는 기술 개발은 인명구조에 중요한 골든 타임 확보 및 조기 선박 인양을 가능케 하며, 이를 통해 인적·경제적 피해 또는 해양 환경 오염 문제를 최소화할 수 있다. 본 연구에서는 침몰 선박의 수중위치를 식별 및 파악하여 효과적으로 측위가 가능한 기법을 제시한다.

### 2. 수중 위치 측위 알고리즘: 최소자승법(Least square method)

선박이 침몰하게 되면 선박에 설치되어 있던 음파발생장치가 자동으로 작동되어 음파 신호를 발신하게 된다. 발신된 음파는 수면 가까이 위치하고 있는 다수의 수신장치에 도달하게 되며, n개의 수신장치 사용 시 n-1개의 음파 도달 시각(ToA) 차이(TDoA, Time Difference of Arrival)를 얻을 수 있게 된다. 위치 계산시 발생할 수 있는 계산 오류(singularity error)를 줄이기 위해 다섯 개의 음파 수신장치를 이용하여 침몰 선박의 3차원 위치를 측정하게 되고, 수신장치 간의 TDoA와 수신장치의 좌표를 최소자승법을 이용하여 침몰 선박 위치 좌표를 특정할 수 있다.

그림 1과 같이 수신장치 좌표는  $(x_1, y_1, z_1)$ ,  $(x_2, y_2, z_2)$ , ...,  $(x_n, y_n, z_n)$ , 침몰 선박의 좌표를  $(x, y, z)$ 로 한다. 수신장치 간

TDoA는 1번 수신장치를 기준으로 각각의 수신장치에 음파가 도달한 시각과의 차이이며, n번 수신장치와 1번 수신장치와의 TDoA는  $TDoA_n$ 으로 나타낸다. 음파 발생장치와 수신장치 간 거리가  $r_n$ 이고 음파 속도가  $S$  일 때, 식 (1)과 같이 나타내어지며, 수신장치 좌표와 수신장치 간 거리 차이를 행렬식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

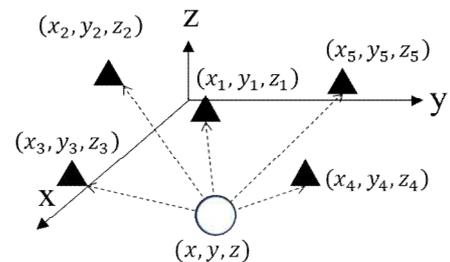


그림 1. 3차원 공간상 수신장치 및 음파발생장치 좌표

\* 정정회원 · ㈜이엔지소프트 차장, 공학박사 (E-mail:dhkim@engsoft.kr) - 발표자

\*\* ㈜이엔지소프트 사원, 공학석사 (E-mail:gwjo@engsoft.kr)

\*\*\* 정회원 · 교신저자 · ㈜이엔지소프트 대표, 공학박사 (Corresponding Author · E-mail:shnam@engsoft.kr)

\*\*\*\* ㈜오션플래닛 대표, 석사 (E-mail:daum5665@hanmail.net)

\*\*\*\*\* 정회원 · 경상국립대학교 토목공학과 교수 (E-mail:Lskang@gnu.ac.kr)

$$S \times TDoA_n = r_{n1} \quad (\because r_{n1} = r_n - r_1) \tag{1}$$

$$2 \begin{bmatrix} x'_2 & y'_2 & z'_2 & r_{21} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_n & y'_n & z'_n & r_{n1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ r_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_2^2 - x_1^2) + (y_2^2 - y_1^2) + (z_2^2 - z_1^2) - r_{21}^2 \\ \vdots \\ (x_n^2 - x_1^2) + (y_n^2 - y_1^2) + (z_n^2 - z_1^2) - r_{n1}^2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기에서  $x'_n = x_n - x_1$ ,  $y'_n = y_n - y_1$ ,  $z'_n = z_n - z_1$ ,  $r_{n1} = r_n - r_1$ 이며, 식 (2)의 각 행렬을 순서대로  $A$ ,  $p$ , 그리고  $k$ 로 치환하면 식 (3)과 같다. 이때,  $A$ 와  $k$ 는 수신장치 좌표를 바탕으로 계산되는 값으로 식 (3)을 음파 발생장치의 위치를 계산하기 위해  $p$ 에 대해 정리하면 식 (4)와 같다.

$$2Ap = k \tag{3}$$

$$p = 0.5(A^T A)^{-1} A^T k \tag{4}$$

### 3. 알고리즘 검증

TDoA 기반 측위 알고리즘인 최소자승법의 검증을 위해 실제 상황에서도 알려진 값으로 주어지는 수신장치 좌표  $(x_1, y_1, z_1)$ ,  $(x_2, y_2, z_2)$ ,  $(x_3, y_3, z_3)$ ,  $(x_4, y_4, z_4)$ ,  $(x_5, y_5, z_5)$ 와 음파 속도  $S$ 를 특정값으로 지정하였다. 이와 함께 측위 결과와 비교할 참값인 음파 발생장치의 좌표  $(x, y, z)$ 와 음파 발생 시각을 가정하여 각 수신기의 ToA를 계산하여 측위 알고리즘을 통해 음파 발생장치의 위치를 계산하였다. 수중에서 음파에 영향을 주는 간섭 조건이 없는 이상적인 상황으로 가정하여 시뮬레이션한 결과 정확한 위치 계산이 가능한 것을 확인하였다.

측위 결과에 영향을 미칠 것으로 예상되는 ToA의 정밀도가 측위 결과에 미치는 영향을 검토하기 위해 ToA의 소숫점 이하 자릿수를 변수로 하여 시뮬레이션 한 결과는 표 1과 같으며, 소숫점 이하 자릿수가 9자리 이상일 때, 1% 미만의 정확한 측위 결과를 보였다.

표 1. TDoA 소숫점 이하 자릿수에 따른 측위 오차

소숫점 이하 자릿수	x 오차	y 오차	z 오차	평균 오차
6	17.13%	17.75%	15.44%	16.77%
7	16.03%	16.15%	14.84%	15.67%
8	1.26%	1.26%	1.15%	1.22%
9	0.03%	0.04%	0.03%	0.03%

### 4. 결 론

본 연구에서는 최소자승법을 이용한 TDoA 기반 3차원 측위 알고리즘을 소개하였고, 해당 알고리즘을 검증하였다. 3차원 수중 측위 시 위치 계산 오류를 방지하기 위해 5개의 음파 수신장치를 사용하였으며, 정밀한(오차 1% 이하) 측위를 위해서는 ns(nano second) 단위의 ToA 측정 성능이 요구됨을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 대한민국 정부 산업통상자원부 및 방위사업청 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. (협약번호 2022DCME01)

### 참고문헌

1. Dohyeong Kim, Sang-Hyeok Nam, Jongryong Choi, Donguoon Kim (2023), "Visualization System for the Positioning of Sunken Vessels Using Underwater Acoustic Devices", GEOProcessing 2023, The Fifteenth International Conference on Advanced Geographic Information Systems, Applications, and Services, pp.41-43