

다중경로 환경에서의 해저면 설치 수신기 3차원 위치 추정

오택환*, 오선택*, 박정수**, 나정열*

*한양대학교 지구해양학과 해양음향연구소, **국방과학연구소(진해)

3D localization of bottom-mounted receivers in multipath environment

Taekhwan Oh*, Suntaek Oh*, Jung-Soo Park**, Jungyul Na*

*Dept. of Earth and Marine Sciences, Hanyang University

**Agency for Defense Development (Chinhae)

E-mail: booster@ihanyang.ac.kr

* 이 논문은 수중음향특화연구센터의 연구비에 의하여 연구되었음.

요약

본 논문은 수중 음향을 이용하여 다중경로(Multipath) 환경에서의 해저면 설치 수신기의 3차원 위치 추정 알고리즘을 제안한다. 해저면 설치 수신기의 위치 추정을 위해 기준 음원의 위치와 음원과 수신기 사이의 수평거리를 사용하며, 수평거리 산출시 다중경로의 영향을 고려하기 위해 음선 이론 모델을 사용하여 음원과 수신기 사이의 수평거리를 추정한다. 또한 특이치 분해법(Singular Value Decomposition estimator; SVD)을 사용하여 설정된 3차원 위치 추정 문제의 최적해를 추정하며, 이를 사용하여 동해 해상 실험 자료를 분석한다. 논문의 연구 결과 제안된 해저면 설치 3원 위치 추정 알고리즘은 다중경로 환경에서도 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있다.

1. 서론

해양에 설치된 음향센서를 이용하여 수신 신호의 방향 및 표적의 위치를 추정함에 있어, 일반적으로 수신

신호의 방향 및 표적의 위치는 수중에 설치된 센서의 위치를 기준 좌표로 상대적인 좌표로서 표시한다[1]. 그러나 수중에 설치된 센서는 해양 매질의 운동에 의해 계획한 위치에서 벗어나 임의의 지점에 위치하게 되며, 이 때문에 정확한 수신 신호의 방향 및 표적의 위치 추정 분석이 어렵다.

또한 최근 해양 탐사시 그 사용이 증가하는 선배열(Line Array) 수신기의 배열 신호처리(Array signal processing), 즉 정합장 신호처리(Matched field Processing; MFP) 및 빔형성 신호처리(Beamforming) 분석에 있어 사용된 선배열의 형상을 선형으로 가정한다[2,3]. 그러나 수중에 설치된 선배열의 형상은 선형을 유지하기 힘들며, 선배열의 형상 왜곡은 배열 신호처리시 오류를 발생 시킨다[4].

따라서 수중에 설치된 기준 센서의 정확한 위치 추정은 해양에서 수중음향을 이용한 실험 자료 분석시 반드시 선행되어야 한다.

수중 설치 센서의 위치 추정 기법으로는 비 음향학적인 측정 장비를 이용하는 직접적인 방법과 음향 신호를

이용하는 간접적인 방법이다[5]. 음향 신호를 이용하는 간접적인 방법은 설치된 수중 센서 중 몇 개의 추정된 센서의 위치로부터 기하학적인 측량치를 이용하여 나머지 센서의 위치를 추정하는 방법과 수중 설치된 각각의 센서를 음파 도달시간을 이용하여 추정하는 방법으로 나누어진다[4,6]. 몇 개의 추정된 센서의 위치로부터 기하학적인 측량치를 이용하여 나머지 센서의 위치를 추정하는 경우 각 수신기 사이의 간격이 멀거나, 그 왜곡 현상이 심한 경우 수중 설치 센서의 정확한 위치를 추정할 수 없다[7]. 음파의 도달시간을 이용하여 각 수신기의 위치를 추정할 경우 다중경로에 의한 도달시간 오차 보정을 위해 음선 이론 모델인 Ray 모델[8]을 사용한다[4].

최근 음향 센서를 사용한 해상 실험에서는 비교적 간단한 장비를 사용하여 수중 설치 센서의 3차원 위치를 신속 정확하게 추정하는 알고리즘이 절실히 요구되고 있다.

본 논문은 수중음향 및 특이치 분해법(SVD)을 사용한 해저면 설치 수신기의 3차원 위치 추정 알고리즘을 제안하며, 제안된 알고리즘을 이용하여 모의 실험 및 해상 실험 자료 분석 결과를 서술한다.

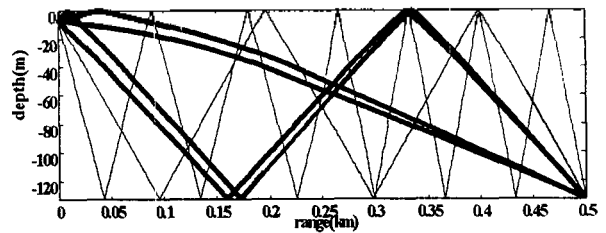
2. 3차원 위치 추정 알고리즘

2.1. 다중경로에 의한 시간 오차 보정

수중 센서 설치시 해양 매질의 운동에 의해 변화된 센서의 3차원 위치 추정을 위해 여러 기준 음원의 위치 정보와 도달시간에 의해 추정된 음원과 수신기 사이의 기하학적인 수평거리 자료를 사용한다.

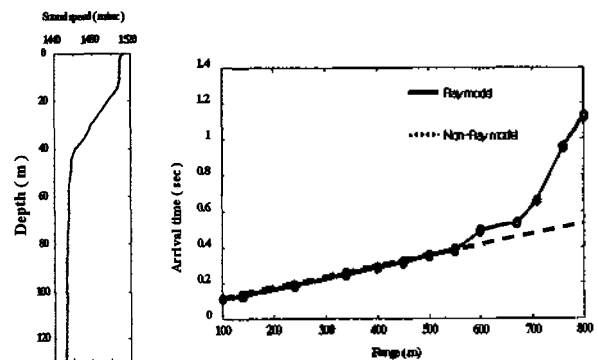
수중 음파 전파시 해수면 및 해저면에 의한 반사와 해양 매질의 음속 구조에 따른 굴절로 인하여 음원으로부터 방사된 송신 신호는 다중경로를 통하여 수신기에 수신된다(그림1,[9]). 다중경로를 통하여 수신된 음파 도달시간은 음원과 수신기 사이의 기하학적인 거리에 의한 도달시간과 차이를 갖는다. 수중 설치 수신기의 3차원 위치 추정 분석에 있어 음원과 수신기 사이의 기하학적인 거리의 오차는 추정된 수신기 위치의 신뢰도를

크게 저하시킨다.



[그림 1.] 다중경로를 통한 수중 음파 전파

다중경로에 의한 도달시간 보정을 위해 Ray 모델을 사용하여 수평거리 및 도달시간 상관 그래프를 작성한다. 수평거리 및 도달시간 상관 그래프는 수중 센서 설치 해역의 대략적인 수심과 음원의 수심을 Ray 모델의 음원 및 수신기의 수심 자료로 사용하며, 음원과 수신기 사이의 수평거리를 점차 증가시면서 고유음선(Eigenray)을 계산하여 작성한다. Ray 모델에 의해 계산된 고유음선의 신뢰도 향상을 위해 실험시 측정했던 XBT에 의한 음속구조를 사용한다(그림 2).



[그림 2.] XBT에 의한 음속구조(좌), Ray 모델에 의한 수평거리 및 도달시간 상관 그래프(우); 수평거리 700m 이후의 기울기 증가는 다중경로에 의한 영향이다.

그림 2.의 음속구조는 동해 해상 실험시 측정했던 XBT 음속구조이다. 수평거리 및 도달 시간 상관 그래프를 통하여 실험 해역은 수평거리 500m 이내의 구간에서는 다중경로에 의한 영향이 비교적 적음을 알 수 있으며, 700m 이후부터 다중경로에 의한 영향이 증가하여 수신 신호의 도달시간이 기하학적인 수평거리의 도달시간 보다 크게 증가함을 알 수 있다. 이 때문에 발생하는 수평거리 오차는 최대 약 1036m이며 수평거리가 증가함에 따라 오차 역시 증가함을 알 수 있다.

2.2. 특이치 분해법에 의한 수중 센서 위치 추정

기준 음원의 위치 (x_n, y_n, z_n) 및 다중경로에 의한 영향을 고려한 수평거리 R_n 과 추정하고자 하는 수신기 위치 (X, Y, Z) 사이의 관계는 구의 방정식으로 간단하게 표현할 수 있다(식(1)).

$$R_n = \sqrt{(X - x_n)^2 + (Y - y_n)^2 + (Z - z_n)^2} \quad (\text{식1})$$

식 1.의 미지수를 추정하는 문제는 미지수의 수가 3 개 이상이므로 음원 및 수평거리의 자료가 3개 이상일 경우 Over-determined case 의 역문제가 되어 최소 자승법(Least Square Estimator, LSE) 및 특이치 분해법(Singular Value Decomposition estimator, SVD)를 이용하여 최적해를 구할 수 있다. 음원 및 수평거리의 자료가 3 개 미만인 경우 Under-determined case 의 역문제가 되어 추정 위치가 부정확해 진다. 따라서 기준 음원의 위치를 충분히 변경하여 수평거리 자료를 획득해야만 한다.

해상 실험 신호 분석시 기준 음원의 위치 및 수평거리 자료는 오차를 포함하게 되며, 기준 음원의 자료 수가 증가함에 따라 오차에 의한 영향도 증가하게 된다. 따라서 기준 음원을 중심으로 하는 모든 구가 한 점에서 교집하지 않으므로 최적의 교점을 추정해야 한다. 특이치 분해법은 Row Weighting Matrix 에 의해 신뢰도가 높은 자료에 대해 가중치를 부여하여 오차에 의한 영향을 최소화할 수 있어 최소 자승법에 의한 최적해 산출 방법보다 좋은 추정치를 얻을 수 있다[10].

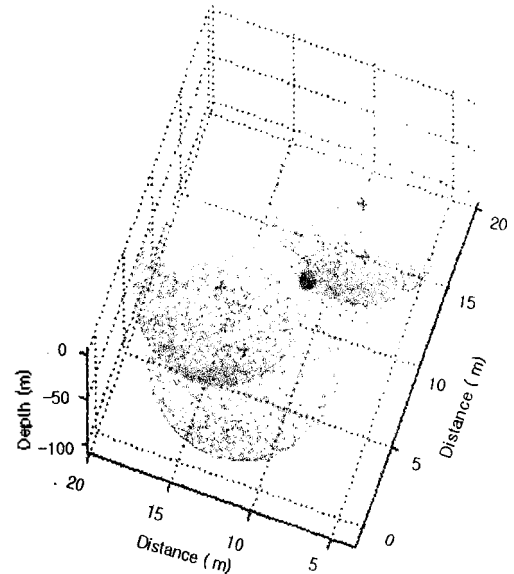
해저면 설치 수신기 위치의 최적해는 특이치 분해법을 이용하여 Model matrix, E 의 고유치(Eigenvalue), L 및 고유벡터(Eigenvector), V, U 를 구하여 식 2와 같이 구한다.

$$\begin{aligned} EX &= Y \\ X &= VL^{-1}U^T \end{aligned} \quad (\text{식2})$$

3. 모의 실험

본 논문에서 제안된 해저면 설치 수신기의 3차원 위치 추정 알고리즘 검증을 위해 수치 모의 실험을 실시하였다(그림 3).

모의 실험시 기준 음원은 4개를 사용하였으며, 음원의 위치 및 수평거리는 오차를 포함한다고 가정하였다. 또한 기준 음원의 위치는 추정하고자 하는 수신기를 중심으로 원형으로 위치 하였으며, 기타 해양 환경 조건은 동해 해상 실험과 동일한 조건으로 가정하였다.



[그림 3.] 해저면 설치 수신기의 3차원 위치 추정 모의 실험 결과, • 수신기 추정 위치, + 기준 음원의 위치

모의 실험 결과 본 논문에서 제안된 수신기 3차원 위치 추정 알고리즘이 다중경로 환경에서도 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 설정된 위치 추정 문제에서 추정하고자 하는 미지수의 수 보다 기준 음원에 대한 자료의 수가 많지 않기 때문에 추정된 최적해에 대해서 각 자료의 포함 오차가 갖는 지배력이 매우 큰 것을 알 수 있다. 특히 X, Y 의 추정치에 비해 Z 의 추정치 오차 범위가 큰 것을 확인하였다.

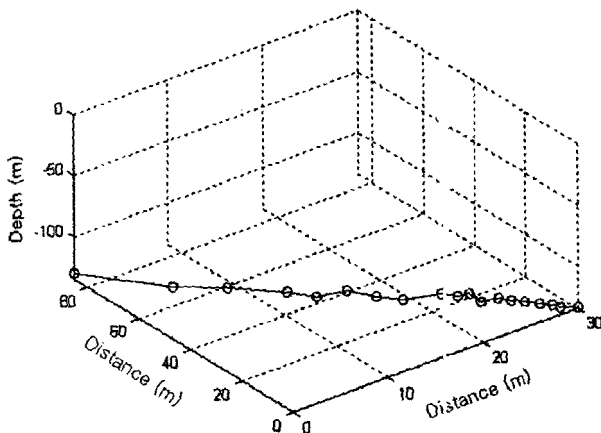
4. 동해 실험 및 결과

2000년 10월 동해항 부근 수심 132m 의 지형이 비교적 평탄한 해역에서 해저면 설치 선배열 수신기 위치 추정을 위한 해상 실험을 실시 하였다.

총 길이 90m, 25개 채널로 구성된 선배열 수신기를 사용하였으며, 19개의 수신기에 대한 3차원 위치 추정

분석을 실시하였다. 기준 음원은 시험선계 의해 3노트의 저속으로 예안되었으며, DGPS 에 의해 음원의 위치를 관측하였다. 또한 실험 당시 해양 환경자료의 수집도 병행하였다. 송신 신호는 위상 변조 신호를 사용하였으며[11], 수신 신호는 RF 를 이용하여 실시간으로 시험선에서 전송되어 디지털 녹음기를 사용하여 기록하였다.

동해 실험 분석 결과는 그림 4.와 같다.



[그림 4.] 동해 해상 실험 자료 분석 결과

4. 결론 및 토의

본 논문에서는 수중음향을 이용하여 해저면 설치 선배열 수신기의 3차원적 위치 추정 알고리즘을 제안하였다. 실험 해역이 넓을수록 다중경로에 의한 신호 변형은 심해진다. 이를 보정하기 위해 Ray 모델을 사용하였다.

본 논문의 연구 결과 다중경로 환경에서도 제안된 알고리즘이 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있으며, 또한 알고리즘이 비교적 간단하여 수치적인 구현이 용이하다. 그러나 Z 성분의 추정시 오차 범위가 증가하였다. 이는 사용되어진 Ray 모델의 계산 오차에 의한 수평거리 및 도달시간 상관 그래프의 성능이 저하 되었기 때문에 기준음원과 수신기 사이의 기하학적인 거리를 정확히 추정하지 못하였기 때문인 것으로 사료 된다.

차후 향상된 위치 추정 결과를 얻기 위해 해양 매질의 움직임에 의한 센서의 운동 추정 연구가 필요하다.

참고문헌

1. S. M. Jesus, M. B. Porter, Y. Stephan, E. Coelho, O. C. Rodriguez, X. Demoulin, "Single sensor source localization in a range-dependent environment," Proc. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, Vol. 2, pp. 865-868.
2. R.O. Nielsen, *Sonar Signal Processing* (Artech house, Boston, 1991), Chap. 2, pp. 51~72.
3. A. Tolstoy, *Matched Field Processing for Underwater Acoustics* (Singapore: World Scientific, 1993), Chap. 1, pp. 1~10.
4. 오택환, 오선택, 박정수, 나정열, "음향 신호를 이용한 해저면 설치 선배열 센서의 정밀 위치 추정," 2000년 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 제20권 제1(s)호, pp. 653~656.
5. W.S. Hodgkiss, D.E. Ensberg, "Comparison of Acoustic and Non-Acoustic Methods of Vertical Line Array Element Localization," Proc. OCEANS'95 MTS/IEEE Conf., Vol. 2, pp. 1296-1302, 1995
6. 이상국, "수중운동 추적체계의 수중센서 상대좌표 추정 기법 연구," 국방과학연구소 기술 보고서, pp. 64, 1997
7. 박희영, 김인익, 오원천, 윤대회, 이충용, "소나 시스템을 위한 어레이 형상 추정 기법의 성능 비교 및 개선," 한국음향학회지, 제20권 제4호, pp. 12~116, 2001.
8. James B. Bowlin, *Ocean Acoustical Ray-Tracing Software Ray* (WHOI, 1992)
9. H. Medwin, C. S. clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography* (Academic press,1998), Ch. 3.2, pp. 77~83.
10. W. Menke, *Geophysical Data Analysis : Discrete inverse theory* (Academic press, Inc.,1984), Chap. 7, pp. 119~125.
11. R. L. Peterson, R.E. Ziemer, and D.E. Borth, *Introduction to spread-spectrum communications* (Prentice Hall, New Jersey, 1995), Chap. 3, pp. 89-148.