

해양환경을 고려한 수중기동표적 위치추적체계 최적배치에 관한 연구

김태형^{1),2)} · 김성용¹⁾ · 한민수¹⁾ · 송경준^{*,2)}

¹⁾ 국방과학연구소 국방시험연구원

²⁾ 부산대학교 기계시스템설계과

A Study on Optimal Placement of Underwater Target Position Tracking System considering Marine Environment

Taehyeong Kim^{1),2)} · Seongyong Kim¹⁾ · Minsu Han¹⁾ · Kyungjun Song^{*,2)}

¹⁾ Defense Test & Evaluation Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

²⁾ Department of Mechanical Design Engineering, Pusan National University, Korea

(Received 12 May 2023 / Revised 8 November 2023 / Accepted 20 November 2023)

Abstract

The tracking accuracy of buoy-based LBL(Long Base Line) systems can be significantly influenced by sea environmental conditions. Particularly, the position of buoys that may have drifted due to sea currents. Therefore it is necessary to predict and optimize the drifted-buoy positions in the deploying step. This research introduces a free-drift simulation model using ocean data from the European CMEMS. The simulation model's predictions are validated by comparing them to actual sea buoy drift tracks, showing a substantial match in averaged drift speed and direction. Using this drift model, we optimize the initial buoy layout and compare the tracking performance between the center hexagonal layout and close track layout. Our results verify that the optimized layout achieves lower tracking errors compared to the other two layout.

Key Words : Underwater Target Position Tracking(수중표적추적), Optimal Measurement System Placement(측정체계배치 최적화), Geostrophic Current(지형류), Simulated Annealing(담금질기법)

1. 서론

수중에서 기동하는 표적 및 무기체계의 위치추적은

수중무기체계 연구개발 과정 중 중요한 성능확인 항목 중 하나이다. 이를 위해 많은 연구가 수행되고 있으며, 특히 해양환경 극복을 위한 추적성능 고도화 분야의 연구가 많이 진행되고 있다.^[1-3] 수중표적 추적에 관한 대부분의 연구에는 수중 음향 텔레메트리 기술이 사용된다. 여기서 수중 음향 텔레메트리 기술은 사

* Corresponding author, E-mail: song3396@pusan.ac.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

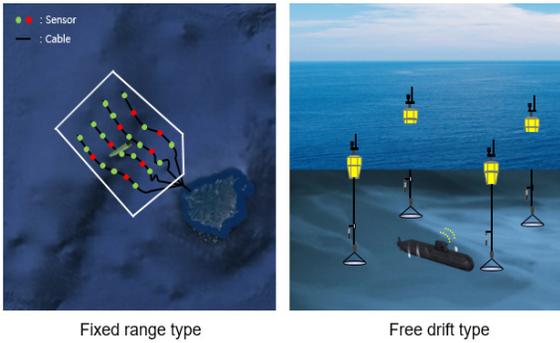


Fig. 1. Type of underwater target tracking system

전 정의된 음향신호를 표적에서 일정주기로 송신하고, 이를 추적 범위내에 분산 배치된 측정체계에서 획득 및 분석하는 장기선(Long Base Line) 기반 기술을 의미한다. 일반적인 장기선(LBL) 기술기반 수중추적 체계로는 Fig. 1과 같이 해저 고정형 체계와 표류형 체계로 구분된다⁴⁾.

해저 고정형 체계의 경우 육지로부터 시험해역까지 해저케이블을 이용하여 수중하이드로폰 및 수중 텔레메트리 등을 설치하고, 해당 해역에서 수중추적을 수행한다. 해저 고정형 측정체계는 정확하고 안정적인 데이터 획득 환경이 확보되나, 고정된 시험해역에서 시험을 수행함으로써 해양환경 불량 또는 주변 통행 선박이 지나갈 경우 시험수행에 제한사항이 발생한다.

표류형 측정체계의 경우 이동가능한 측정체계로써 고정된 해역을 사용하지 않아, 측정시 주변 환경의 영향이 적다. 하지만 측정체계가 해류 및 바람에 의해 자유 표류하므로써, 최적의 센서배치 유지가 어려워 표적 추적성능이 저하된다.

일반적으로 표적의 기동조건(경로, 속도, 시간 등)이 사전 정의된 환경에서 표류형 측정체계를 통한 수중 추적은 측정체계의 최초 배치가 매우 중요하다. 이는 측정체계의 수신부이(slave)가 해상시험선(master)에서 지정하는 위치로 실시간 이동이 불가하기 때문에, 측정시간이 지남에 따라 수신부이의 자유표류로 인해 추적성능이 저하되기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 사전정의된 측정시간동안 표적 추적성능 유지를 위한 추적체계의 최초 배치에 대하여 연구를 수행하였다. 이를 위해 측정체계의 표류를 예측하고 이를 바탕으로 BELLHOP 시뮬레이션 기반 측정체계 배치 최적화를 수행하였다. 그리고 최적배치시 기동표적에 대한 추적성능을 예측하고 이를 센터육각배치 및 경로 근

접 배치시 추적성능과 비교 분석하였다.

이때 사용된 BELLHOP 모델은 수중음파전달 환경을 시뮬레이션하기 위한 음선이론 기반 해석모델로 다양한 수중음향 해석분야에 널리 사용된다⁵⁻⁷⁾.

2. 수중표적 위치추정 알고리즘

수중 음향 텔레메트리를 활용한 수중기동표적의 추적에는 Fig. 2와 같은 ToA(Time of Arrival) 기법이 널리 사용된다^{8,9)}. ToA 기법은 먼저 표적(송신단)과 3 지점 이상의 수신점간 거리를 추정한다. 그리고 각 수신점을 원점으로 하고 추정된 거리를 반지름으로 하는 3개의 원의 교점을 계산함으로써 표적의 위치를 추정하는 직관적인 방법이다. 이때 요구되는 수중거리 계산에는 시간 동기화된 송/수신기에서 획득한 음향신호의 상호상관관계가 활용됨으로, 정확한 거리 추정을 위해서는 송신신호의 설계가 요구된다.

수중기동표적의 추적을 위한 수중 텔레메트리 송신 신호는 대표적으로 CW(Continuous Wave) 또는 LFM (Linear Frequency Modulation) 신호가 사용된다. CW 신호의 경우 신호 길이가 길어질수록 대역폭이 줄어들어 도플러에 취약하나, 상관이득이 높아진다. LFM 신호의 경우 CW 신호 대비 넓은 대역폭으로 거리 분해능 및 높은 상관이득을 갖을수 있으나, 도플러 발생시 시간지연 에러가 발생한다¹⁰⁾.

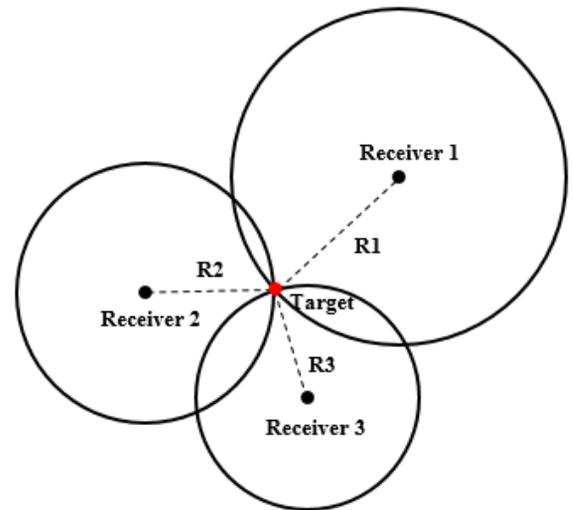


Fig. 2. Time of arrival method

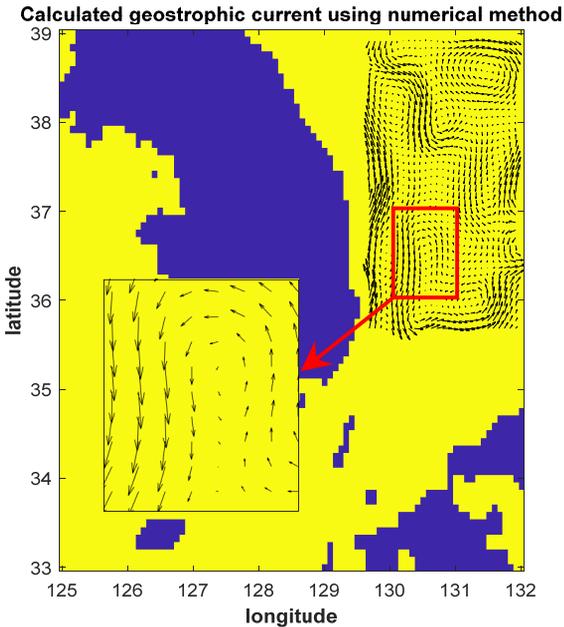


Fig. 3. Calculate result of geostrophic current

3. 수중 기동표적 추적체계 최적배치 기법

앞서 2장에서는 수중 기동표적의 위치추정 알고리즘에 대하여 소개 하였다. 이때 수중표적의 추적에는 측정시간동안 최소 3지점 이상의 수신점에서 양호한 송신신호가 지속적으로 수신되어야 한다. 하지만 표류형 측정체계는 해상에서 자유 표류상태임으로 표적의 기동방향과 측정체계의 표류방향에 따라 송신신호 획득에 어려움이 존재한다. 본 연구에서는 표류형 측정체계의 표류 방향 및 속도를 예측하고 이를 기반으로 측정체계의 최적배치를 수행하였다.

3.1 측정체계 표류예측

3.1.1 해류 추정

바닷물의 흐름으로 정의되는 해류는 표층해류, 심층해류, 기타해류로 구분할 수 있다. 표류형 측정체계는 주요 구조물이 부유식 구조물로 표층해류의 영향을 많이 받는다.

표층 해류는 대부분 지형류(geostrophic current)로 구성되어 있으며, 이는 Ekman transport에 의해 발생한 해수면 고도차 및 수압 경도력이 지구 자전에 의한 Coriolis force와의 관계로 발생한다. 따라서 해수면 고도

차를 알 경우 지형류는 아래와 같이 계산할 수 있다^[11].

$$u = -\frac{g}{2\omega \sin \varphi} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad v = \frac{g}{2\omega \sin \varphi} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (1)$$

여기서 u 는 경도방향 해류속도, v 는 위도방향 해류속도, g 는 중력가속도, ω 는 지구자전각속도, φ 는 계산지점의 위도, h 는 해수면 고도차이다.

본 연구에서는 유럽 CMEMS(Copernicus Marine Service)에서 제공하는 해수면 고도차 정보를 활용하여 대한민국 동해안의 지형류 크기 및 방향을 Fig. 3과 같이 추정하였다.

3.1.2 표류 모델

표류형 측정체계의 표류 예측을 위해서는 해류 및 바람이 고려된 표류모델이 필요하다. 이를위해 본 연구에서는 표류형 측정체계를 원통형 강체로 가정하였다. 이때 부이의 동적 거동 및 파랑에 의한 효과는 고려하지 않았다. 균일유동 조건에서 직경 d , 길이 L 을 갖는 원통형 강체의 항력은 다음과 같다.

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho v_{fluid}^2 C_d L d \quad (2)$$

여기서 ρ 는 유체 밀도, C_d 는 항력계수 이다. 표류형 추적체계는 Fig. 4와 같이 공기중에 노출되는 수상부와 물속에 잠기는 수중부로 구분된다. 따라서 수상부/수중부에 따른 유체물성, 유체속도 및 항력계수를 식 (2)에 적용하여 계산한 각 항력을 특정비율로 조합함으로써 표류형 추적체계에 작용하는 항력을 얻을 수 있다. 이때 수상부 항력계산에 사용된 유체속력은 기류데이터이며, 수중부의 경우 3.1.1 절에서 계산한 지형류 계산값 이다. 본 연구에서는 수상부에 적용되는 기류 데이터를 기상청 해양관측부이의 관측자료로부터 획득하였다.

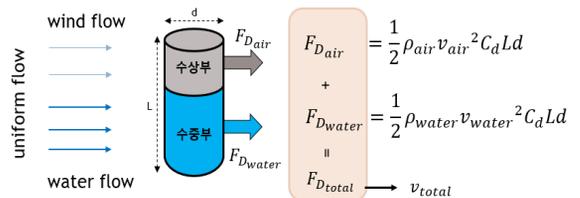


Fig. 4. Total drag force on tracking system

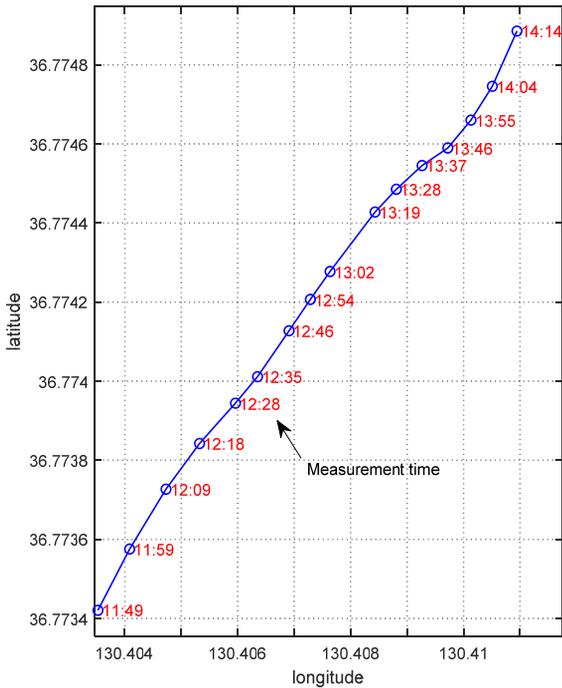


Fig. 5. Buoy drift position(measurement by GPS)

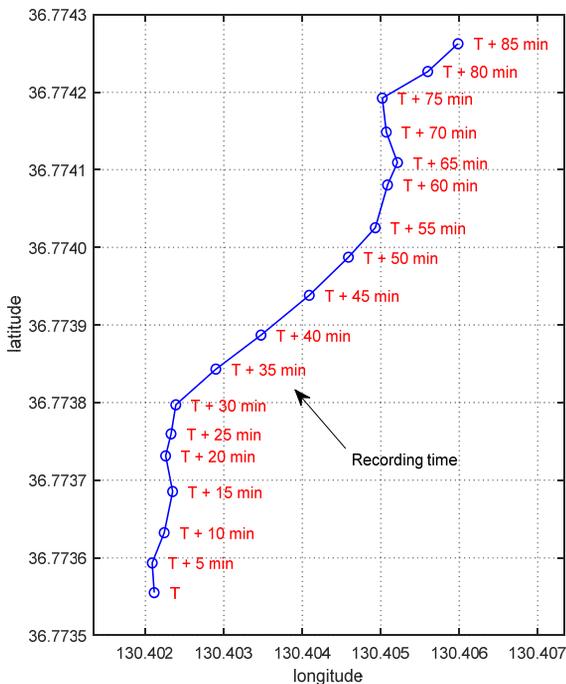


Fig. 6. Result of buoy drift simulation

3.1.3 표류 모델 검증

제안한 표류 모델의 검증을 위하여 표류 모델을 이용한 시뮬레이션 결과와 표류식 측정체계의 표류 실측자료를 비교 하였다. Fig. 5와 같이 포함 외해에서 실제 표류식 측정부위에 대한 표류위치를 GPS를 활용하여 측정한 결과, 평균 표류속도는 약 0.84 노트로 측정되었다. 해당 해역의 평균 풍속은 약 10 노트이며, 측정시기는 8월이다.

본 연구에서는 해역, 시기, 풍속 조건등이 유사한 상태에서 3.1.2절의 표류모델을 이용한 표류 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 Fig. 6과 같이 평균 표류속도는 약 0.71 노트로 추정되며, 실제 측정 결과 대비 오차는 해류 및 기류의 속력과 방향 오차에 의해 발생하는 것으로 추정된다.

3.2 최적화 기법 및 목적함수

3.2.1 최적화 기법

본 연구에서는 측정체계의 최적배치를 위해 simulated annealing 기법을 적용하였다. simulated annealing 기법은 메타휴리스틱 최적화 기법중 하나로 안정적인 전역 최적해를 찾을수 있다^[12,13]. 또한 기타 메타휴리스틱 최적화 기법대비 병렬계산이 용이하여 본 연구와 같이 목적함수 계산에 많은 시간이 소요되는 문제에 적합하다. simulated annealing 방법은 metropolis algorithm을 최적화 문제에 적용한 것으로, 최적화 목적함수가 식 (3)과 같은 수용확률을 갖고 온도 변화 스케줄에 따라 각 단계에서 평형을 이룰 때까지 반복 계산한다. Fig. 7은 Simulated annealing 기법의 흐름도이다.

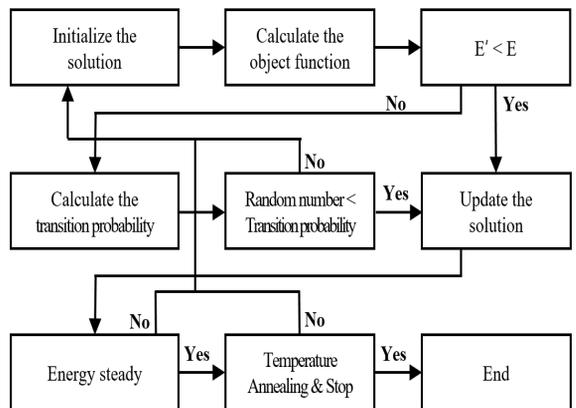


Fig. 7. Flowchart of simulated annealing

$$Transition\ Probability = \begin{cases} 1 & (E' < E) \\ \exp\left(-\frac{E' - E}{T}\right) & (E' > E) \end{cases} \quad (3)$$

여기서 E' 은 새로운 상태의 목적함수 값, E 현재의 목적함수 값, T 는 annealing 온도이다.

3.2.2 목적함수

표류형 측정체계는 각 수신부이(slave)에서 획득된 시간지연 정보를 시험소 또는 해상시험선(master)으로 무선 전송하여 수중표적의 위치를 추정한다. 따라서 표류형 측정체계의 추적 정확도는 수중 음향신호 획득환경 뿐만 아니라, 무선 통신환경의 영향을 크게 받는다. 무선 통신환경은 master와 slave 간의 LOS (Line of Sight) 거리가 가까울수록 양호해진다. 이를 고려하여 본 연구에서는 수신부이의 최적배치를 위해 각 수신부이간 이격거리(LOS 거리)와 해당 배치에서 예상되는 추적성능의 조합으로 목적함수를 설정하였다.

4. 측정체계 최적배치 결과

4.1 시뮬레이션 모델

4.1.1 시뮬레이션 조건

본 연구에서는 임의 기동하는 표적에 대한 측정체계 최적배치 및 추적오차를 계산하고, 이를 센터 육각 배치 및 경로 근접배치시 추적오차와 비교분석 하였다. 이를 위한 시뮬레이션 조건은 6개의 측정체계를 이용하여 10 km × 10 km 범위 내에서 6 노트로 기동하는 2개의 수중표적을 30분간 추적하도록 설정하였다. 이때 측정체계 설치 소요시간은 1개당 10분으로 가정하였고, 측정체계 설치 지점간 시험선 이동시간은 12 노트로 가정하였다.

4.1.2 송신신호 모델링

저속으로 기동하는 수중표적의 위치추정에는 도플러 효과의 영향이 미비하다. 따라서 본 연구에서는 도플러 효과에는 취약하나 높은 상관이득을 얻을 수 있는 LFM 신호를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 설계한 LFM 송신 신호는 Fig. 8과 같이 7,000 Hz ~ 8,000 Hz 대역폭을 갖고 100 ms의 길이 특성을 갖는다.

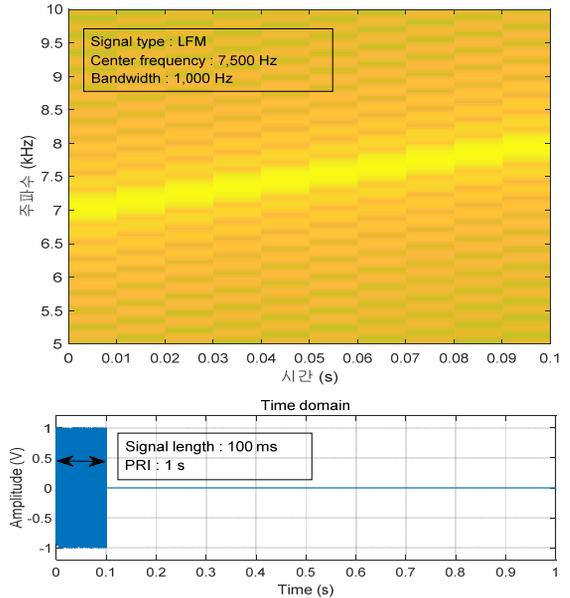
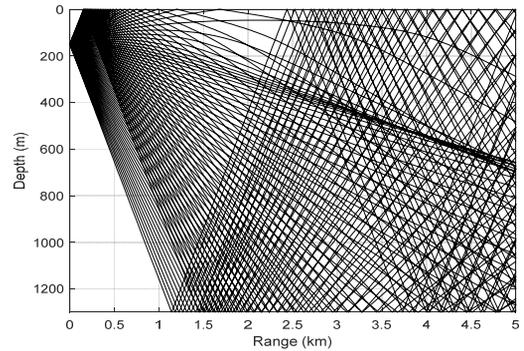
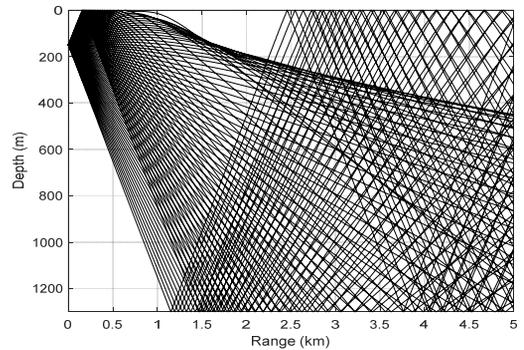


Fig. 8. Characteristic of source signal



(a) Sound propagation(winter)



(b) Sound propagation(summer)

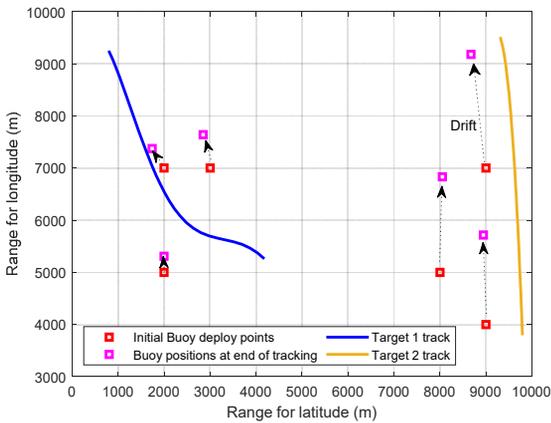
Fig. 9. Sound propagation according to the season

4.1.3 음파전달특성 조건

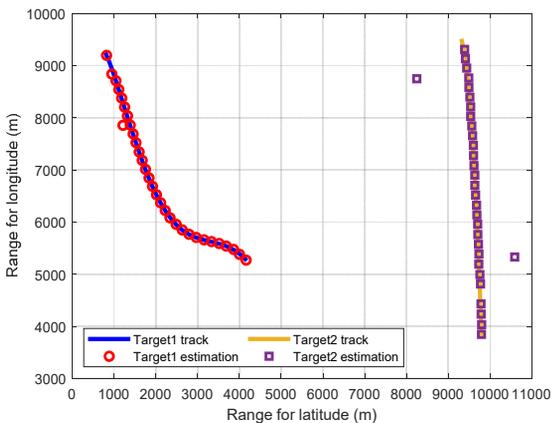
수중에서 음파의 전달은 계절별 수중음속분포에 따라 달라진다. 따라서 수중표적 추적시 요구되는 측정체계 최적배치 결과는 계절에 따라 다르다. 본 연구에서는 대한민국 동해외해에서의 계절의 따른 측정체계 최적배치를 수행하였고, 이때 사용된 수중음파전달 특성은 Fig. 9와 같다.

4.2 시뮬레이션 결과

계절별 시뮬레이션 결과 동계절 최적 배치시 측정체계 설치를 위한 시험선 기동거리는 13.36 km, 위치추적 오차는 약 262 m로 Fig. 10과 같다. 여기서 위치추적 오차는 시간에 따른 각 표적(2개) 위치에서의 시뮬



(a) System deploying points and drift position(winter)

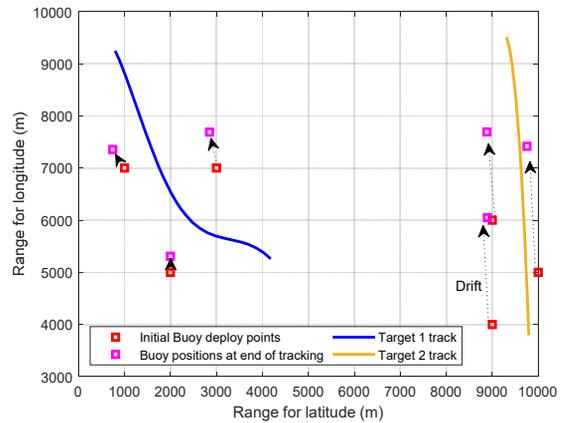


(b) Result of target tracking simulation(winter)

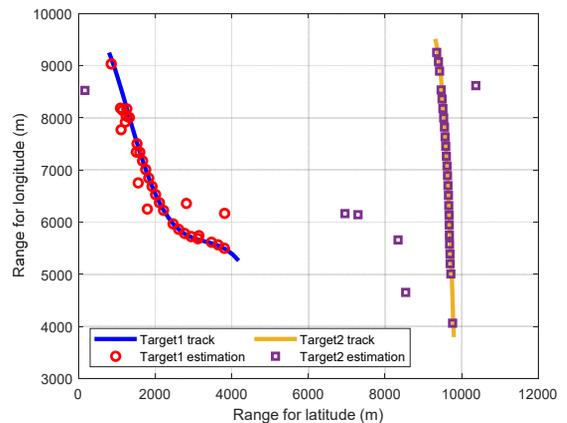
Fig. 10. Optimal system deploying points and result of target tracking simulation(winter)

레이션 추정값과 실제 위치의 차이에 대한 RMS 값이다. 하절기 최적 배치시 시험선 기동거리는 13.77 km, 표적에 대한 위치추적 오차는 약 1.4 km로 Fig. 11과 같이 계산 되었다. 계산결과 하절기에는 불량한 음파 전달환경으로 인하여 음파전달 음영구역이 발생해 일부 부위에 신호가 수신되지 않는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 2개의 표적이 기동하는 범위를 추적하기 위해서는 6개 이상의 측정체계가 필요한 것으로 판단된다.

측정체계 최적배치 결과의 추적성능을 확인하기 위해 센터 육각배치 및 경로 근접배치시 표적 추적오차를 Fig. 12 및 13과 같이 계산하였다. 이때 경로 근접배치란 사전정의된 표적의 경로인근에 측정체계를 임의

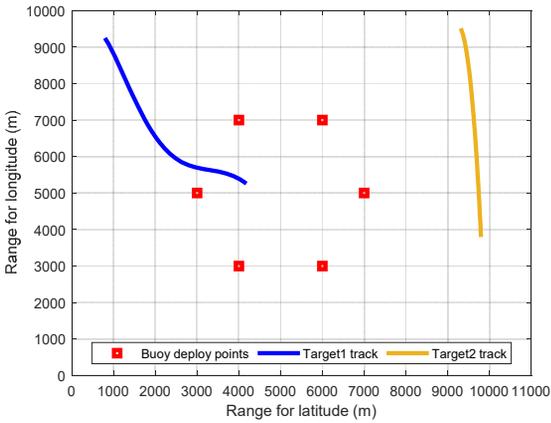


(a) System deploying points and drift position(summer)

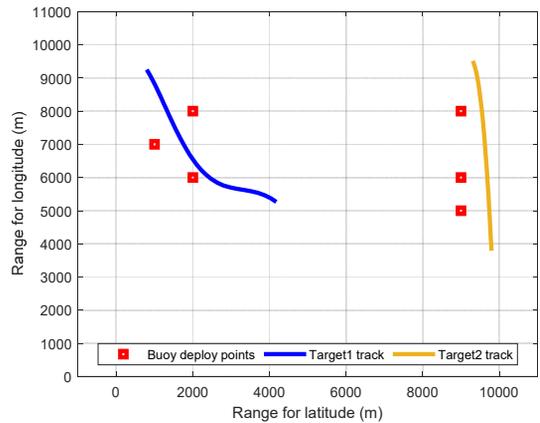


(b) Result of target tracking simulation(summer)

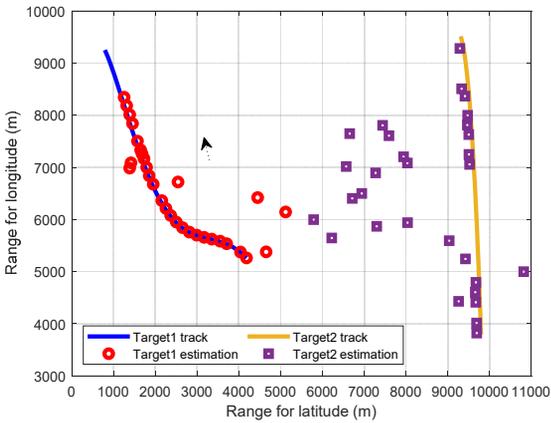
Fig. 11. Optimized buoy deploying points and result of target tracking simulation(summer)



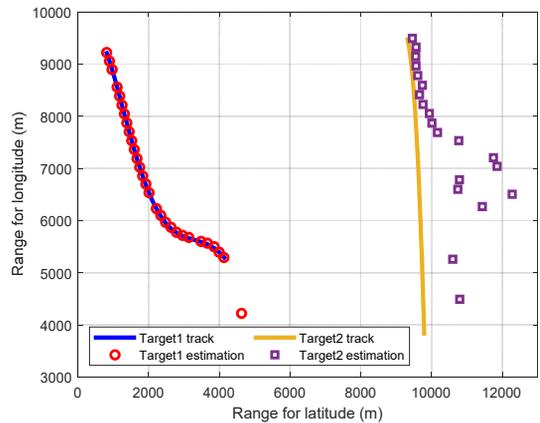
(a) System deploying points



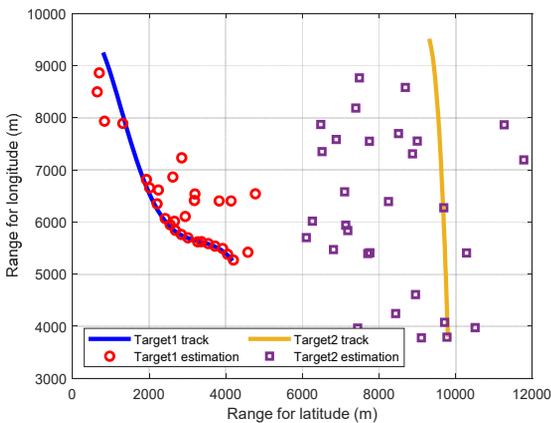
(a) System deploying points



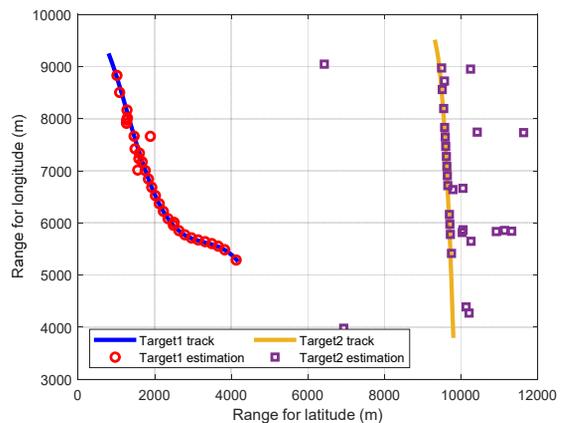
(b) Result of target tracking simulation(winter)



(b) Result of target tracking simulation(winter)



(c) Result of target tracking simulation(summer)



(c) Result of target tracking simulation(summer)

Fig. 12. System deploying points and result of target tracking simulation(center hexagonal layout)

Fig. 13. System deploying points and result of target tracking simulation(close track layout)

Table 1. Comparison of simulation errors

	Error (RMS)	
	Winter	Summer
Optimized layout	262 m	1.4 km
Center hexagonal layout	2.0 km	2.3 km
Close track layout	874 m	1.5 km

배치하는 방법으로, ToA 계산을 위해 각각의 경로 인 근 3지점에 측정체계를 배치하였다. 배치간 표적 추적 오차를 비교한 결과, Table 1과 같이 최적배치결과가 하절기 및 동절기 모두 적은 오차를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 이는 센터 육각배치 및 경로 근접배치의 경우 수신부이 표류와 표적기동을 고려하지 않은 배치이기 때문에 특정시점에서 수중위치 추정에 필요한 3지점 이상의 송신신호 획득이 불가하기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 수중기동표적의 수중추적을 위해 측정체계의 표류방향을 고려한 최적배치를 수행하였다. 이를 위해 대한민국 동해 지역의 지형류를 계산하고 이를 바탕으로 표류모델을 생성하였다. 그리고 실제 표류형 부이의 GPS 측정값과 비교검증을 수행 하였다. 최적배치를 위한 기법으로는 simulated annealing을 사용하였고, 목적함수는 수신부이 설치에 소요되는 시험선의 기동거리와 실제 표적위치 및 추정위치간의 거리오차의 합으로 설정하였다.

해당 시뮬레이션 모델을 활용하여 10 km × 10 km 범위에서 기동하는 2개의 표적에 필요한 계절별 수신부이 최적배치를 수행하고, 이를 센터 육각배치 및 경로 근접배치 결과와 비교하였다. 그 결과 최적배치시 위치추적오차(RMS)는 동계절 약 262 m, 하계절 1.4 km로 센터 육각배치 및 경로 근접배치 대비 양호한 결과를 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 측정체계 최적배치 방법을 실제 수중표적 추적시험에 적용할 경우, 측정시간동안 추적성능 저하를 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 소개한 추적체계 최적배치 방법은 수중 음향 텔레메트리 신호의 도플러 효과를 고려하지 않은 방법이다. 따라서 도플러 효과의 영향을 상당히

받는 고속기동 표적에 대한 적용에는 제한점이 있다. 따라서 도플러 효과에 강인한 수중 음향 텔레메트리 송신신호 개발과 수신신호의 도플러 효과를 보정하는 최적배치방법에 대한 향후연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 2023년 국방과학연구소 동해시험장 건설사업의 재원으로 수행된 연구 결과임.

References

- [1] M. S. Han, "Performance improvement of underwater target distance estimation using blind deconvolution and time of arrival method," The Journal of the Acoustic Society of Korea, Vol. 36, No. 6, pp. 378-386, 2017.
- [2] S. I. Cho, G. Byun, S. H. Byun and J. S. Kim, "Ray backpropagation-based ship localization," The Journal of the Acoustic Society of Korea, Vol. 37, No. 4, pp. 196-205, 2018.
- [3] M. S. Han, "Distance estimation of underwater maneuvering target using adaptive threshold detection," Journal of the Korea Society of Marine Engineering, Vol. 43, No. 6, pp. 470-476, 2019.
- [4] H. G. Thomas, "GIB buoys: An interface between space and depths of the oceans," In proceedings of IEEE Autonomous Underwater Vehicles, page 181-184, 1998.
- [5] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter and H. Schmidt, "Computational Ocean Acoustics, 2nd ED," Springer.
- [6] C. S. Park, Y. J. Cho, J. W. Ahn and W. J. Seong, "A Study on the Ray Based Broad Band Modeling for Shallow Water Acoustic Wave Propagation," The Journal of the Acoustic Society of Korea, Vol. 24, No. 6, pp. 298-304, 2006.
- [7] M. Siderius and M. B. Porter, "Modeling broadband ocean acoustic transmissions with time-varying sea surfaces," The Journal of Acoustical Society of America, Vol. 124, No. 1, pp. 137-150, 2008.

- [8] G. Isbitiren and O. B. Akan, "Three-Dimensional Underwater Target Tracking with Acoustic Sensor Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 60, No. 8, 3897-3906, 2011.
- [9] J. Zhang, Y. Han, C. Zheng and D. Sun, "Underwater target localization using long baseline positioning system," *Applied Acoustics*, Vol. 111, 129-134, 2016.
- [10] S. M. Choi, D. W. Do, W. S. Kim, D. H. Lee and H. M. Kim, "Fast LFM Target Detection Method with Robustness for Doppler Shift in Narrow-Band Sonar Systems," *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol. 51, No. 8, pp. 1798-1809, 2014.
- [11] L. D. Talley, G. L. Pickard, W. J. Emery and J. H. Swift, "Descriptive Physical Oceanography," Elsevier, 2011.
- [12] P. J. M. Laarhoven and E. H. L. Aarts, Aarts, "Simulated Annealing Theory and Application," Kluwer Academic Publishers, 1987.
- [13] S. S. Rao, "Engineering Optimization Theory and Practice," John Wiley & Sons, 2019.