

효과도 분석을 통한 천해용 수중분산 센서망 설계 연구

김완진¹⁾ · 배호석^{*,1)} · 김우식¹⁾ · 이상국¹⁾ · 최상문¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제6기술연구본부

A Study on the Design of an Underwater Distributed Sensor Network for the Shallow Water by An Effectiveness Analysis

Wan-Jin Kim¹⁾ · Ho Seuk Bae^{*,1)} · Woo Shik Kim¹⁾ · Sang Kug Lee¹⁾ · Sang Moon Choi¹⁾

¹⁾ The 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 14 May 2014 / Revised 8 September 2014 / Accepted 19 September 2014)

ABSTRACT

In this paper, we have described the characteristics of the Underwater Distributed Sensor Network (UDSN) and proposed the conceptual design guideline by an effectiveness analysis. To perform the effectiveness analysis, we defined an battlefield environment, and then analyzed principal components which compose the UDSN to find out simulation parameters and system constraints. We have chosen a measure of effectiveness based on a target trajectory, which could enhance intuitive understanding about current status, and performed various simulations to reveal critical design parameters in terms of sensor node types, arrangement, cost and combination of detection information.

Key Words : Underwater Distributed Sensor Network(수중분산 센서망), Effectiveness Analysis(효과도 분석), Network Centric Warfare(네트워크 중심전), Surveillance System(감시 체계)

1. 서론

천해지역에서 잠수함과 같은 위협 세력에 효율적으로 대응하기 위해서는 상시 감시가 가능한 경계 체계 구축이 요구되나, 초계기, 초계함 및 잠수함과 같은 전통적인 유인 플랫폼만으로는 소기의 목적을 달성하기가 쉽지 않다. 이에 미국에서는 수중에 설치된 음향/비

음향 센서 및 무인잠수정(Unmanned Underwater Vehicle) 등으로 구성된 수중 분산 센서망(UDSN : Underwater Distributed Sensor Network)을 이용하여 대잠감시체계를 구축하는 방법에 관한 연구가 수행되어왔으며, 그 대표적인 예에는 DADS(Deployable Autonomous Distributed Sensor Network), PLUSNet(Persistent Littoral Underwater Surveillance Network), Seaweb등이 있다¹⁾. 이러한 분산 센서망들은 형태상 송신기와 수신기가 분리된 다중상태 소나(Multi-static Sonar)에 해당하므로 기존의 단상태 소나(Mono-static Sonar)에 비해 표적의 탐지 및 추

* Corresponding author, E-mail: belfre@add.re.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

적 측면에서 상당한 이득이 있는 것으로 알려져 있다^[2]. 그러나 실질적으로 수중환경뿐만 아니라, 센서노드의 종류, 탐지방식, 배치 방법, 데이터 처리 방법 등과 같은 다양한 요소에 의해 망의 성능이 크게 좌우되므로, 핵심 구성 요소를 선별/분석한 후 이를 토대로 비용-성능측면에서 최적화된 시스템 설계안을 도출하는 것이 바람직하다.

천해용 수중분산 센서망에서 구성 요소의 영향력은 효과도 분석(Effectiveness Analysis)을 통해 파악할 수 있으며, 이를 수행하기 위해서는 전장 환경에 대한 정의가 선행되어야 한다. 본 논문에서는 수중분산 센서망의 전장 환경 구성요소를 크게 센서노드(Sensor Node), 표적(Target), 그리고 지상기지(Landbase)로 구분하였으며, 센서노드는 표적탐지를, 지상기지는 망 제어(Network Control), 표적 추적/식별 및 대응책 수립의 역할을 수행한다고 가정하였다. 이를 토대로 각 구성 요소의 세부요소들을 정의하였으며, 기존 연구들의 한계점을 극복하기 위해 다음과 같은 사항들을 추가적으로 고려하였다. 기존 연구는 센서망에 사용되는 수신노드가 모두가 동일하다고 가정하였으나^[3], 본 논문에서는 센서망 운용에 유연성을 부여하기 위하여 성능에 따라 총 3종의 수신 센서노드를 고려함으로써 노드의 종류에 따른 영향을 관찰할 수 있도록 하였다. 표적의 경우 기존의 2차원 양상태 표적강도(TS : Target Strength) 모델대신, 분석 결과의 정확도를 향상시키기 위해 다중상태용 3차원 표적강도 모델을 개발하여 사용하였다.

이렇게 정의된 전장 환경 하에서 유의미한 결과를 산출하기 위해서는 신뢰성 있는 효과도 척도(MOE : Measure of Effectiveness)를 선정할 필요가 있다. 기존 연구들에서 주로 사용된 탐지 성능, 탐지 거리와 같은 평가 척도는 특정 분산 센서망의 성능을 나타내기에는 적합하나, 분산 센서망의 종합적인 성능을 대표할 수 없으므로 새로운 MOE를 선정해야할 필요가 있다. 천해용 분산 센서망은 센서노드간의 정보 공유와 협력을 통해 전장상황 인식 및 획득 정보 품질 향상을 통한 지휘결심 지원을 목적으로 하고 있으므로, 본 논문에서는 추후 실제 운용자가 취합된 정보를 이용하여 표적의 위협도 및 처리 우선순위 결정이 가능하도록 시스템을 설계하는데 초점을 맞추어 표적 레직 정보에 기반을 둔 새로운 MOE를 정의하였다. 정의된 전장 환경과 MOE를 이용하여 다양한 측면에서 효과도 분석을 실시하였으며, 이를 통해 국내 환경에 적합

한 수중분산 센서망 설계 방안에 대해 고찰하였다.

2. 천해용 수중분산 센서망 전장 환경 분석

천해용 수중분산 센서망 설계 개념을 도출하기 위해서는 성능에 영향을 미치는 주요 변인을 파악해야 한다. 이를 위해서는 수중분산 센서망을 분석하여 구성요소를 파악한 후, 각 구성요소들을 매개변수화(Parameterization)해야 할 필요가 있다.

2.1 수중분산 센서망 분석

천해용 수중분산 센서망은 표적 탐지가 어려운 천해 환경에서 Fig. 1과 같이 분산 배치된 센서와 유/무선 수중 통신망을 이용하여 관심영역에 대한 경계임무를 수행하는 감시체계이다. 이러한 수중분산 센서망은 크게 송·수신노드(Tx node/Rx node), 마스터노드(Master Node) 및 무선부이(RF Buoy)로 구성되며, 송·수신노드는 표적 탐지를 마스터노드 및 무선부이는 탐지된 정보를 취합하여 지상기지로 전송하는 역할을 수행한다. 본 논문에서는 센서망 구성 요소 중 자기 센서 등과 같은 비음향 센서노드와 같은 보조탐지 수단이나 마스터노드나 무선부이와 같이 기 개발 연구를 활용해 성능예측이 가능한 요소를 제외한 나머지 구성요소만을 분석한 후 파라미터를 정의하였다.

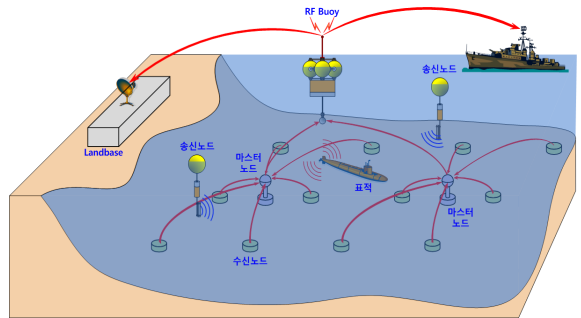


Fig. 1. Concept graphic of an UDSN.

2.1.1 운용 주파수

수중분산 센서망을 분석하기 위해서는 우선 운용주파수 대역을 설정해야 하며, 수중분산 센서망의 사용주파수 대역은 Fig. 2와 같이 통신 대역, 수동 탐지 대역, 그리고 능동 탐지 대역으로 구성된다. 통신 대역의 경우 통신 거리에 따라 일반적으로 수 kHz에서

수십 kHz 대역을 사용하며, 수동 탐지 대역은 별도의 제한이 없으며 표적의 방사소음 특성에 의해 대역폭이 결정된다. 능동탐지 대역의 경우 탐지거리를 확보하면서 통신 대역과의 간섭을 피해야 하므로 사용가능한 주파수 대역이 제한된다. 제한된 대역폭 내에서 동시에 운용되는 송신노드의 수, 망 확장성, 주파수 재사용을 등을 고려할 때, 송신노드의 배치는 상용통신망에서 일반적으로 사용되는 육각형 배치 구조를 채택하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 그러나 이 경우 전체 대역폭을 최소 7개 이상으로 분할해야하므로, 노드별로 사용 가능한 대역폭 역시 전체 대역폭 1/7로 이하로 제한되며, 인접 채널간 간섭을 방지하기 위한 보호대역(Guard Band) 등을 고려할 경우 실제 사용가능한 대역폭은 그 이하가 되므로 이를 기준으로 능동신호 대역을 설정하여 효과도 분석에 사용하였다.



Fig. 2. Example of Operation frequency band for the UDSN

2.1.2 탐지 가능 거리 분석

설정된 탐지 주파수 대역별로 센서 배치간격을 가능하기 위해서는 탐지 가능 거리를 예측해야 하므로, 여기서는 소나 방정식(Sonar Equation)을 이용하여 능·수동 탐지 예상 가능거리를 추정하였다. 환경잡음은 Fig. 3에 도시된 Wenz 커브를 사용하였으며^[4], 수동 탐지 방식으로는 에너지 탐지와 LOFAR(Low Frequency Analysis and Recording) 탐지를 고려하였다. 지향성 지수(DI : Directivity Index)에 따른 이득이 0 dB인 단일 센서를 사용하여 10 knots 이하의 표적을 탐지하는 경우에 대해 탐지 예상 거리 산출한 결과, 에너지 탐지는 200 m, LOFAR 탐지는 1000 m 정도였다. 이에 반해 능동 탐지는 표적강도를 5~10 dB 정도 가정한 경우 약 2.5~3 km 정도의 탐지 예상 거리를 가졌다. 탐지 예상 거리는 수동의 경우 표적의 방사 소음 준위에, 능동의 경우 송신 음압에 영향을 받으므로 산출된 결과가 절대적인 탐지거리를 의미하지는 않는다. 시뮬레이션을 통해 얻은 탐지 예상 거리와 천해 환경에서의 수중 통신 가능 거리를 고려하면 수신노드 간의 최대 이격 거리는 5 km 정도이므로, 이 값을 센서 이격 간격의 상한으로 설정하였다^[5].

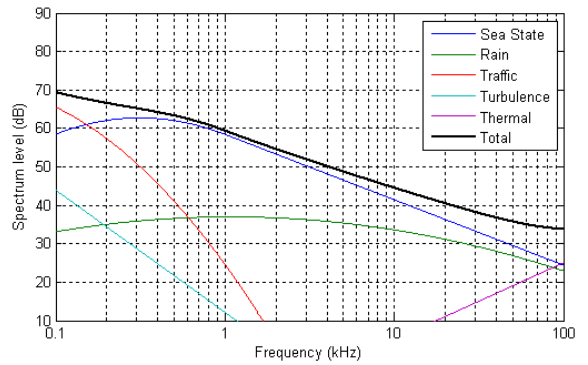


Fig. 3. An example of the environmental noise(Wenz Curve)

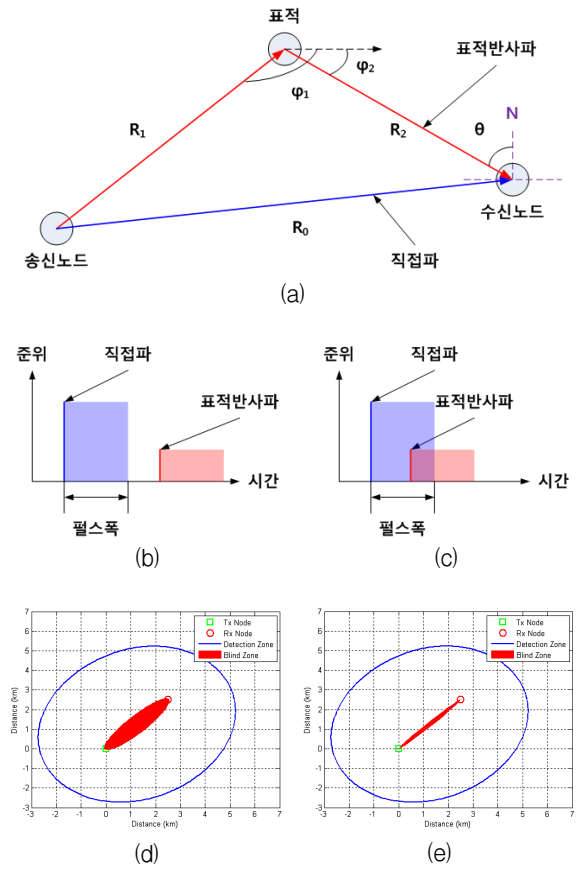


Fig. 4. Examples of a received signal in an active sonar system : (a) geometry, (b) separated received signal, (c) overlapped received signal (d) blind zone(CW pulse), and (e) blind zone (LFM pulse)

2.1.3 탐지 불능 구역

능동 탐지의 경우 수신노드는 Fig. 4.(a)에서 보는 바와 같이 송신노드, 표적, 수신노드의 위치에 따라 직접파와 표적 반사파를 수신하며, Fig. 4.(b)와 같이 직접파와 표적 반사파가 시간적으로 이격되어 있는 경우에는 수신노드는 표적 반사파를 탐지할 수 있다. 그러나 Fig. 4.(c)처럼 두 파의 도달시간이 유사한 경우에는 시간적으로 중첩되어, 표적 탐지가 되지 않는 탐지 불능 구역(Blind Zone)이 발생한다. 이러한 탐지 불능 구역은 Fig. 4.(d)와 (e)에 도시된 바처럼 송신노드의 종류에 의해 달라질 수 있다.

2.1.4 수신노드 정의

수중분산 센서망에서 동일한 수신노드를 사용하면 장비의 획득/유지/보수 측면에서 많은 이점이 있다. 그러나 능·수동 탐지를 동시에 사용할 경우 상이한 요구사항을 가지므로, 수동탐지 기준에 맞춰 센서 사양을 상향시켜 수신노드를 제작할 경우 획득비용이 증가하는 문제가 발생할 수 있다. 획득비용을 최소화하기 위해서는 센서노드의 부품 중 기구부와 전자부를 공통으로 사용하고, 센서만을 교체하여 추가적인 정보 획득이나 탐지거리 확장을 가능케 하는 방안을 고려해 볼 수 있다. 본 논문에서는 이러한 개념에 기초하여 3가지 종류의 수신노드를 정의하였으며, 그 내용은 Table 1에 정리되어 있다. 이진 센서노드를 사용하므로 탐지범위가 좁고 추가적인 정보획득이 불가하나, 획득 비용이 낮은 특징을 가진다. 이에 반

해 선배열 센서노드나 DIFAR(Directional Frequency Analysis and Recording) 센서노드^[6]는 DI 측면에서 이득을 가지며 추가정보 획득이 가능하나, 성능향상을 위해 센서부 구성에 추가 비용이 소요되므로 이진 센서노드 가격 대비 획득비용이 각각 20 %와 50 % 정도 증가하게 된다. 따라서 수신노드의 배치방법 및 혼합 비율에 대한 분석을 통해, 최적화된 망 구성방법을 도출하는 것이 필요하다.

2.1.5 획득 정보 종류 및 조합 방법

수신노드 종류별로 획득 가능한 정보가 상이하므로, 획득된 정보의 종류와 이를 조합하는 방법에 따라 위치 추정 성능이 달라질 수 있다. 우선 수동 탐지의 경우 표적 존재 여부, 에너지 준위 및 최근접 정보(CPA : Closest Point of Approach), 표적 주파수 성분, 그리고 방위정보 등을 획득할 수 있으나, 이들 정보를 이용하여 표적의 위치를 특정하기는 어렵다. 만약 표적의 대략적인 방사 소음 준위(RL)를 알고 있고 잡음 준위(NL)를 추정할 수 있는 경우, 소나 방정식을 이용하여 식 (1)과 같이 탐지 문턱값(DT)에 따른 개략적인 탐지 범위(RE)를 산출할 수 있다.

Table 1. RxNode types for the UDSN

구분	특징
이진 센서노드	- 능/수동 탐지 시 표적 존재 여부만 판단 - 짧은 탐지거리 및 방위정보 획득 불가
선배열 센서노드	- 능/수동 탐지 가능 - 배열 이득을 통한 탐지거리 증대 - 센서 길이 방향 방위 추정 가능 (단, 탐지거리 및 방위 정확도는 센서 개수에 좌우됨)
DIFAR 센서노드	- 능/수동 탐지 가능 - 배열 이득을 통한 탐지거리 향상 - 방위 정확도 우수(위상차 방위 추정)

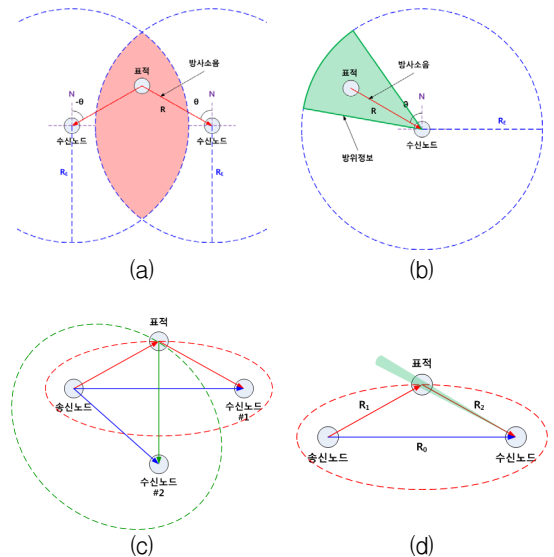


Fig. 5. Examples of localization using acquired detection information: (a) two passive detection information, (b) passive detection information and bearing information, (c) two TDOA information, and (d) TDOA information and bearing information

$$R_E = 10^{(RL - NL + DI - DT)/20} \quad (1)$$

예상 탐지 범위를 이용하여 Fig. 5.(a)와 같이 두 개의 수신노드에서 동시에 표적이 탐지된 경우나, Fig. 5.(b)와 같이 방위정보가 있는 경우에는 표적의 위치를 제한된 영역으로 특정할 수 있으며, CPA를 이용하여 표적의 속도 추정도 가능하다^[7].

능동 탐지의 경우 표적 반사파를 이용하여 존재 여부와 방위정보를 알 수 있으며, 직접파와 표적 반사파로부터 도달 시간 차(TDOA : Time Difference of Arrival), 주파수차(FDOA : Frequency Difference of Arrival), 준위차(LDOA : Level Difference of Arrival)를 얻을 수 있다. TDOA, FDOA 및 LDOA는 식 (2) ~ (4)과 같이 표현할 수 있으며, 이를 이용하여 Fig. 5.(c), (d)의 예와 같이 표적의 위치를 추정할 수 있다^[8].

$$TDOA = [(R_1 + R_2) - R_0]/c \quad (2)$$

$$FDOA = S(\cos\phi_1 + \cos\phi_2)f/c \quad (3)$$

$$LDOA = 20\log_{10}(R_0) - 20\log_{10}(R_1R_2) + TS \quad (4)$$

여기서, c 는 음속, S 는 표적 속도, f 는 송신 주파수를 의미한다. ϕ_1 은 표적과 송신노드의 사이각이고, ϕ_2 는 표적과 수신노드의 사이각이며, TS 는 표적강도를 의미한다. 그러나 실제 수중 환경에서는 다양한 원인에 의해 관측 값이 왜곡되므로, 위치 추정 시 오차가 발생하게 된다. 능·수동 탐지 정보 조합에 따른 표적 위치 추정 성능을 살펴보기 위해, 탐지 획득 정보 중 가장 안정적으로 획득 가능한 TDOA 정보와 다른 획득 정보를 조합하는 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 시 센서망은 송신노드의 수는 1개였으며, 이진 센서노드는 4 km 간격으로 정방행렬(3×3) 형태로 배치하였다. 사용된 표적 궤적의 종류는 Fig. 6에 도시되어 있으며, 위치 추정 오차(E_{pos})는 다음과 같이 계산하였다.

$$E_{pos} = \frac{1}{I \times N} \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \|x(n) - \hat{x}(n,i)\|_2 \quad (5)$$

여기서, $N = T/\Delta t$ 은 시뮬레이션 시간을 시간 간격(Time Step)으로 나눈 값이며, I 는 시뮬레이션 반복

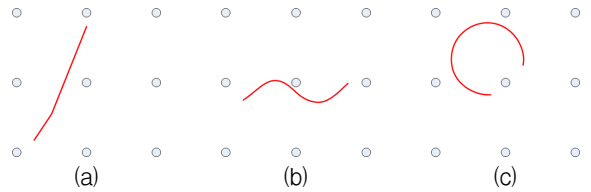


Fig. 6. Target Trajectories : (a) straight shape, (b) 'S'-shape, (c) circle shape

Table 2. Estimation error of localization by information combination

구 분		직선 기동	S자 기동	원형 기동
능동	TDOA	163.5 m	280 m	181.2 m
수동	-			
능동	TDOA	46.1 m	23.8 m	23.2 m
수동	에너지 탐지/LOFAR탐지			
능동	TDOA/FDOA	45.9 m	23.5 m	22.5 m
수동	에너지 탐지/LOFAR탐지			
능동	TDOA/LDOA	45.7 m	22.3 m	21.6 m
수동	에너지 탐지/LOFAR탐지			
능동	TDOA/FDOA/LDOA	45.5 m	21.6 m	20.5 m
수동	에너지 탐지/LOFAR탐지			

횟수를 i 와 n 은 각각 시뮬레이션 인덱스와 시간 인덱스를 $x(n)$ 과 $\hat{x}(n)$ 은 각각 표적의 실제 위치와 추정 위치를 의미한다. $I = 50$ 인 시뮬레이션 결과는 Table 2에 제시되어 있으며, 결과에서 볼 수 있듯이 조합된 정보의 수가 많아질수록 표적 존재 영역을 특정할 수 있으므로 추정 오차가 감소하는 경향을 볼 수 있다.

방위정보를 사용하는 경우에 대한 성능 분석을 위해 상기의 시뮬레이션과 동일한 배치에서 이진 센서 일부를 선배열과 DIFAR 센서로 교체한 후 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 TDOA와 방위정보를 조합하는 경우에는 S자 기동과 원형 기동에 대한 위치 추정 오차는 각각 22.1 m와 23 m였으며, TDOA, 방위 정보 및 수동 탐지 정보를 조합한 경우에는 각각 21.2 m와 20.1 m였다. 시뮬레이션 결과와 탐지 정보 획득을 위한 연산량을 종합적으로 고려해 볼 때 효율적인 정보 조합은 'TDOA+수동 탐지 정보' 또는 'TDOA+방위

정보'이므로 효과도 분석 시 이들 조합을 위주로 분석을 수행하였다.

2.1.6 표적 추적 방법

표적 추적은 획득된 탐지 정보를 조합하여 산출된 표적 위치와 운동 모델과의 비교를 통해 표적의 실제 궤적을 추정하는 기술로, 운동 모델과 추적 필터로 구성된다. 대표적인 운동 모델에는 가장 간단한 운동 모델인 Nearly Constant Velocity Model(NCVM), 가속도 운동에 적합한 Wiener Process Acceleration Model(WPAM), 원형과 같은 회전 운동을 표현하는데 적합한 Coordinated Turn Model(CTM), 그리고 두 개 이상의 운동 모델을 결합하여 사용하는 Interacting Multiple Model(IMM)이 있다. 추적 필터 기법에는 가우시안 에러 모델을 이용하는 Kalman Filter(KF), 비선형 모델에 대응하기 위한 Extended Kalman Filter(EKF), 그리고 이전 상태를 기준으로 관측 값을 샘플링하여 다음 상태를 예측하는 UKF(Unscented Kalman Filter)가 있다⁹⁾. 표적 추적 성능은 표적의 실제 기동 궤적과 운동 모델과의 유사성 여부와 사용된 추적 필터의 종류에 따라 상이하므로, 모델과 필터에 조합에 따른 성능을 살펴보기 위해 2.1.5항과 동일한 환경에서 이진 센서 노드만을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 시 4가지 운동 모델을 모두 사용하였으며, 추적 필터는 비선형 모델에 적용할 수 없는 KF를 제외하고 EKF와 UKF만을 사용하였다. Table 3에 제시된 시뮬레이션 결과에서 보는 바와 같이 표적 추적 성능은

Table 3. Performance comparison by the combination of kinetic model and tracking filter

구 분		직선 기동	S자 기동	원형 기동
운동 모델	추적 필터			
NCVM	EKF	92.4 m	24.0 m	79.1 m
NCVM	UKF	92.2 m	23.8 m	79.0 m
WPAM	EKF	61.4 m	21.3 m	21.5 m
WPAM	UKF	61.4 m	21.3 m	21.5 m
CTM	EKF	60.9 m	20.7 m	23.6 m
CTM	UKF	60.9 m	20.6 m	23.6 m
IMM(NCVM+CTM)	EKF	59.7 m	19.4 m	19.6 m
IMM(NCVM+CTM)	UKF	59.2 m	19.1 m	19.2 m

추적 필터의 종류보다 운동 모델에 영향을 많이 받는 것을 볼 수 있으며, 운동 모델로는 표적의 다양한 운동에 대응하기 위해서는 IMM을 사용하는 것이 유리할 것임을 짐작할 수 있다.

2.2 표적강도 모델

수중환경에서 표적은 음향학적 특성으로 모델링되며, 수동 소나 방정식의 경우 방사 소음 특성으로, 능동 소나 방정식의 경우 표적강도로 표현할 수 있다. 방사 소음의 경우 일반적으로 선형, 추진 기관, 프로펠러의 종류에 따라 그 특성이 좌우되며, 표적강도는 표적의 체적, 형상, 재질 및 입사방향 등에 의해 결정된다. 본 논문에서는 효과도 분석을 위해 일반적인 방사소음 특성을 참고하여¹⁰⁾, 임의의 함정에 대한 속도/주파수별 방사소음에 토널 주파수를 혼합하여 수동 신호를 모의하였다.

표적강도 모델의 경우 나비 패턴(Butterfly Pattern)이나 이를 확장한 2차원 양상태 모델이 널리 사용되어 왔으나¹¹⁾, 수중분산 센서망은 운용 개념상 송·수신 노드와 표적의 위치 및 심도가 상이한 3차원 다중상태 소나에 해당하므로 기존 모델이 적용 가능한지의 여부를 확인해야 한다. Fig. 7은 다중상태 소나에서의 수신 신호의 특성을 파악하기 위해 수행된 시험의 결과를 도시한 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 송·수신노드 및 표적의 심도가 달라지는 경우 표적 반사파의 에너지 분포가 상이한 양상을 보임을 확인할 수 있었다¹²⁾. 이러한 결과는 수중분산 센서망 효과도 분석을 위해 3D 표적강도 모델이 필요함을 의미하며, 이를 위해 Table 4에 제시된 3가지 표적강도 모델을 고려하였다^{13,14)}. 3가지 표적강도 모델 중 정확성 측면에서는 FDM이 가장 우수하나 연산에 과도한 시간이 요구되므로, FDM과 유사한 결과를 얻을 수 있으면서 상대적으로 빠른 연산이 가능한 Kirchhoff 모델을 사용하였다. Fig. 8은 송신노드의 고도각(S_0)과 방위각(S_θ)에 따라 획득된 Kirchhoff 표적강도 모델의 결과를 도시한 것으로, Fig. 8.(c)~(f)에서 보는바와 같이 수신노드가 고도각 0°인 평면상에 위치할 때 송신노드의 위치에 따라 표적강도가 달라지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8.(g)와 (h)는 수신노드가 모든 공간상에 존재한다고 가정하였을 때의 표적강도를 3차원적으로 표현한 것으로 그림에서 보는 바와 같이 송신노드-표적간 사이각뿐만 아니라 표적-수신노드간의 사이각에도 영향을 받음을 알 수 있다. 효과도 분석 시에는 이러

한 요소들을 모두 고려하여 표적강도를 계산함으로써, 실제 환경과 유사한 표적강도 값을 획득할 수 있도록 하였다.

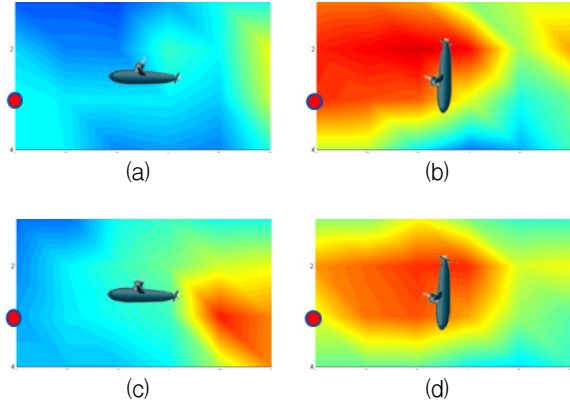


Fig. 7. Energy distribution of the target reflection wave by the scaled target aspect angle : (a) target depth < Tx node depth < Rx node depth, aspect angle = 0°, (b) target depth < Tx node depth < Rx node depth, aspect angle = 90°, (c) target depth < Tx node depth = Rx node depth, aspect angle = 0°, and (d) target depth < Tx node depth = Rx node depth, aspect angle = 90°

Table 4. Comparison of 3D Target Strength Models

구분	특징
Finite Difference Method (FDM)	<ul style="list-style-type: none"> - 파동 전파의 모든 경우를 해석할 수 있으며, 연산량 문제로 주로 저주파수 해석에 사용 - 내부 구조물까지 고려 가능 - 2D/3D 공간상 표적강도 분포 예측가능 - 메모리양에 따라 구현 가능한 한계 존재
Specular Reflection Model	<ul style="list-style-type: none"> - 거울면 반사격자(Highlight)의 면적을 이용하여, 빠른 표적강도 계산이 가능함 - 복잡한 구조물의 경우 반사격자 손실로 인해 표적강도 예측 시 정확성이 낮아짐
Kirchhoff Model	<ul style="list-style-type: none"> - 음파 투영 가시영역의 음장을 적분하여 표적강도 분포를 예측 - 다중반사 및 내부구조물의 효과를 표현하는데 한계가 있음

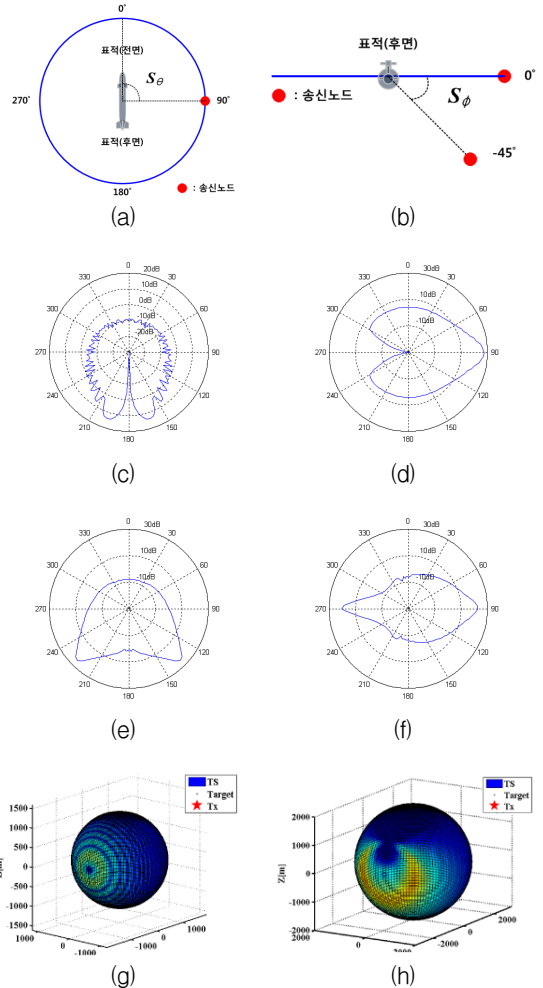


Fig. 8. Target strength expectation results by the Tx node position (S_{ψ} , S_{θ}) using Kirchhoff model : (a) horizontal geometry, (b) vertical geometry, (c) 2D target strength at (0°, 0°), (d) 2D target strength at (0°, 90°), (e) 2D target strength at (-45°, 0°), (f) 2D target strength at (-45°, 90°), (g) 3D target strength at (0°, 0°), and (h) 3D target strength at (-45°, 0°)

2.3 시스템 파라미터 정의

수중분산 센서망의 전장 환경 분석 내용을 토대로 효과도 분석 시 환경, 표적 특성, 그리고 분산 센서망의 구성 및 성능을 조절할 수 있도록 고려된 대표적인 시스템 파라미터는 Table 5에 제시되어 있다. 시스템 파라미터 중 환경 파라미터는 잠음 준위 및 전달 손

Table 5. Definition of the system parameter

대분류	소분류	세부 항목	
환경	환경 잡음	해상상태/강수량/교통량	
	전달 손실	등방성/비등방성	
	조류	방향, 속도	
송신 노드	노드 정보	종류/수량/비용/위치/송신음압 등	
	펄스 정보	펄스 종류/길이/반복 주기 등	
수신 노드	배치 정보	종류/수량/비용/위치(배치간격) 등	
	측정 오차 (능동 탐지)	TDOA/FDOA/LDOA 오차	
		방위추정 오차	
	측정 오차 (수동 탐지)	방위추정 오차	
CPA 추정 오차			
표적	표적 종류	소형/중형/대형(3D TS 모델 사용)	
	표적 속도	속도, 방사소음/토널 준위	
위치 추정	정보 조합	능동	탐지여부, TDOA, 방위정보
		수동	탐지여부(Energy/LOFAR) 방위정보
표적 추적	운동 모델	IMM(NCVM+CTM)	
	필터 종류	UKF	

실, 송·수신노드의 위치에 오차를 미치는 조류항목으로 구성되어 있다. 송신노드의 경우 부이형 소나나 디핑 소나와 같은 노드의 종류, 수심을 포함한 위치정보, 송신 음압 범위 등을 포함하는 노드 정보와 펄스 종류, 주파수 대역, 펄스 반복 주기와 같은 펄스 운용 정보를 설정할 수 있도록 하였다. 수신노드의 경우도 센서노드의 종류 선택하고 선택된 종류의 센서노드 수와 배치 간격을 입력할 수 있도록 하였으며, 각 수신노드마다 신호 대 잡음비(SNR : Signal-to-Noise Ratio)가 상이한 다중상태 소나의 특성을 표현하기 위해 모든 측정값에 오차 항목을 포함하도록 하였다. 대표적인 측정값인 TDOA와 방위정보의 오차는 각각 다음과 같이 정의하였다^[15].

$$Var[\hat{\tau}] = [SNR_O \beta^2]^{-1}, \tag{6}$$

$$where \beta = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 |S(f)|^2 df / \int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df}$$

$$Var[\hat{\theta}] = \left[\frac{2E}{N_0} \cdot \frac{\pi^2 L^3}{2\lambda^3} \right]^{-1}, \tag{7}$$

where $L = d/2 = c/(2f_c)$, and $\lambda = c/f_c$

표적의 경우 표적의 크기에 따라 소형, 중형, 대형을 고려하였으나, 천해 환경의 특성상 주 탐지 대상이 소형 표적이므로 효과도 분석 시 소형 표적에 대해 시뮬레이션을 수행하였으며, 속도 별로 방사소음 및 토널 준위를 설정하여 수동 탐지 범위가 달라질 수 있도록 하였다. 위치 추정과 표적 추적의 경우 파라미터 조합에 따라 시뮬레이션 횟수가 급격하게 증가하는 것을 방지하기 위해 성능 측면에서 우수한 조합만을 선별하여 사용하였다.

3. 천해용 수중분산 센서망의 효과도 분석

2장에서 분석된 내용을 토대로 천해용 분산 센서망 설계를 위한 효과도 분석을 수행하기 위해서는 우선 효과도 척도(MOE)를 설정하고 효과도 척도를 비교하기 위한 센서망 기본 배치를 정의해야 한다. 천해용 분산 센서망의 경우 수신노드들의 탐지 결과를 융합하여 표적 탐지 및 표적 추적 성능 향상시킴으로써 지상 기지에 신뢰성 높은 탐지 정보를 제공하고, 이를 통해 지휘 결심을 지원하는 것이 주목적이므로 이에 부합하는 MOE를 정의해야 한다. 지상 기지 운용자는 모든 센서 노드에 전송되는 정보를 일일이 관찰할 수 없으며, 탐지 결과만을 전시하더라도 오탐지를 포함한 모든 탐지가 유의미한 정보인지를 판단해야 하므로 운용자 편의를 위해서는 정보의 필터링 또는 재가공이 요구된다. 이런 측면에서 볼 때 탐지 정보를 취합하여 일정 시간 이상 생성된 궤적정보는 확실한 표적의 존재를 나타내며, 궤적정보에 포함된 위치, 침로, 속도 등의 부차적인 정보는 아군세력에 대한 위협 정도와 대응 시간을 산출할 수 있으므로 수중분산 센서망에 가장 적합한 성능 척도라고 볼 수 있다. 따라서 표적의 실제 궤적에 가까운 궤적을 추정할수록 분산 센서망의 구성과 배치가 효율적으로 이루어져 있다고 판단할 수 있으며, 실제 궤적과 추정 궤적의 평균오차로 정의되는 MOE는 2장의 식 (5)를 사용하였다.

정의된 MOE를 이용하여 효과도 분석 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 센서망 기본 배치를 정해야 한다.

센서망 기본 배치는 수중 통신 및 탐지 정보의 중첩성, 노드 수에 따른 획득비용 등을 고려하여 다양한 다각형 배치 방법 중 Fig. 9.(a)와 같은 정방행렬 형태를 선택하였으며, 송신노드는 모든 수신노드에서 능동 탐지가 가능하도록 정중앙에 위치시켰다. 이 때 수신노드간 거리(D)는 능동 탐지 거리 및 최대 통신 가능 거리를 고려하여 5 km를 상한으로 설정하였으며, 사용된 노드 종류는 총 4종으로 이진 센서노드(Binary), 선배열 센서노드 I(LA I), 선배열 센서노드 II(LA II), DIFAR 센서노드였다. LA I과 LA II는 동일 종류의 센서에서 성능차이에 따른 영향을 보기 위해 센서 수를 다르게 하여, DI와 방위 해상도 측면에서 차이를 가지도록 하였다. 시뮬레이션 시 궤적은 Fig. 9와 같이 'A'로 표시된 지역에서 다양한 방향과 시간으로 망을 통과하는 경우를 상정하였으며, 모든 궤적의 위치 오차를 취합하여 MOE를 산출하였다.

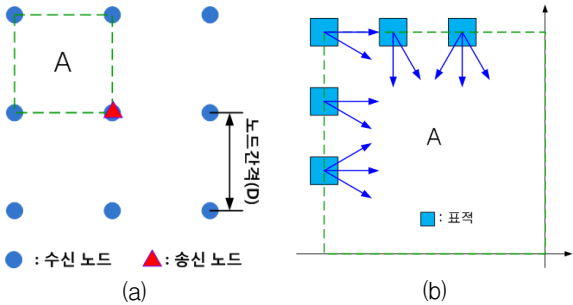


Fig. 9. Sensor network configuration and target trajectory : (a) default configuration, and (b) target initial points and courses

효과도 분석을 수중분산 센서망 설계에 필요한 사항을 도출하기 위해 우선 배치 간격에 따른 영향을 살펴보기 위해 4종류의 표적 속도를 사용하였으며, 위치 추정 시 TDOA 정보를 사용하였다. 10×10 km²의 영역에서 수신노드 간격을 0.5 / 1 / 2 / 5 km로 조정해 수신노드 종류별로 시뮬레이션을 수행한 결과는 Table 6에 제시되어 있다. 결과를 살펴보면 수신노드의 종류에 관계없이 간격이 좁을수록 동시에 탐지되는 노드의 수가 증가해 표적 위치를 정확히 추정할 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 노드간 거리 감소는 센서망에 사용되는 수신노드 수의 증가를 의미하여 이는 획득비용 상승을 의미하므로 다른 대안이 요구된다.

Table 6. MOE comparison by Rx node distance

노드 종류	수신노드 간격(km)			
	0.5	1	2	5
Binary	46	232	325	1743
LA I	29	171	301	727
LA II	25	142	243	714
DIFAR	30	180	315	739

Table 7. MOE comparison by combination of detection information

정보 조합	노드종류	수신노드 간격(km)		
		1	2	5
P	Binary	217	513	1032
	LA I	119	486	1846
	LA II	106	354	1950
	DIFAR	152	503	1777
T+P	Binary	105	187	1138
	LA I	106	192	606
	LA II	87	146	581
	DIFAR	111	209	583
T+B	Binary	232	325	1743
	LA I	105	162	310
	LA II	49	130	280
	DIFAR	20	22	23
T+B+P	Binary	105	187	1138
	LA I	65	110	268
	LA II	32	80	234
	DIFAR	15	22	23

노드간 거리 감소 없이 MOE를 향상시키기 위해서는 2.1.5절에서 설명한 바와 같이 탐지 정보를 조합하여 사용해야 한다. 조합에 따른 영향을 보기 위해 4종류의 표적 속도, 수신노드 간격 1/2/5 km인 경우에 대해, 수동탐지(P) / TDOA+수동탐지(T+P) / TDOA+방위(T+B) / TDOA+방위+수동탐지(T+B+P)를 사용하여 MOE를 계산하였다. 수동탐지와 능동탐지에 대해 각

각 30 %와 70 % 이상 표적을 탐지한 경우에 대해서만 MOE를 산출하였으며 그 결과는 Table 7에 제시되어 있다. 제시된 시뮬레이션 결과를 살펴보면 수동탐지 정보만을 사용하는 경우 능동탐지 정보를 사용하는 경우에 비해 큰 위치추정 오차를 가지는 것을 볼 수 있으며, 방위정보 획득이 불가능한 이진 센서노드를 제외하고 방위정보가 조합되는 경우 MOE가 Table 6의 TDOA만을 사용하는 경우에 비해 크게 향상됨을 볼 수 있다. 선배열 센서노드에 비해 DIFAR의 MOE가 우수한 것은 방위추정 정확성이 높기 때문이다.

성능이 상이한 수신노드를 동일 간격으로 배치하여 시뮬레이션을 수행하는 경우 DI에 따른 성능차가 결과에 영향을 미치므로, 이를 보상하여 배치간격을 조정된 결과는 Fig. 10에 도시되어 있다. 이러한 배치간격을 이용하여 4종류의 표적 속도와 T+B+P 정보 조합을 이용하는 경우에 대해, 시뮬레이션을 수행한 결과는 Fig. 11에 도시되어 있다. Fig. 11.(a)는 수신노드 종류별로 MOE를 산출한 결과를 나타내고 있으며, 그림에서 보듯이 센서의 성능을 보정한 경우 방위 추정 성능이 우수한 DIFAR 센서노드가 가장 작은 위치오차를 가짐을 볼 수 있다. Fig. 11.(b)는 Fig. 10과 같은 배치를 한 경우에 대해 망 획득비용을 분석한 것으로, 설치된 센서 노드 수가 가장 작은 LA II를 기준으로 했을 때 상대적 비용차이를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 Binary의 경우 중복 영역을 통해서만 위치를 추정해야 하므로, 요구되는 센서노드 수가 많아 LA II 대비 약 8.5배의 획득비용이 필요한 것을 볼 수 있다. MOE와 획득비용을 동시에 고려할 경우 방위 분해능과 DI가 높은 센서를 사용해야 함을 알 수 있으며, 단일 센서노드만을 사용해야 하는 경우에는 DIFAR 센서노드가 가장 유리함을 짐작할 수 있다.

기본 센서망의 경우 망 내부에서는 표적이 탐지가 잘 이루어지므로 위치추정 오차가 감소하나, 망 경계로 갈수록 탐지 성능이 저하되어 위치추정 오차가 증가하게 된다. 따라서 추적 성능이 상대적으로 낮은 수신노드를 망 내부에 배치하고, DI가 높은 수신노드를 망 경계에 배치하는 것이 유리하다. 이렇게 수신노드를 혼합하여 사용하는 경우에 대한 이점을 알아보기 위해 이진 센서노드와 선배열 센서노드 II, 그리고 DIFAR 센서노드를 혼합하여 사용하는 경우를 가정하여 효과도 분석을 추가적으로 수행하였다. 우선 센서망을 단일 수신노드로 구성하는 경우와 망 외곽 전체를 다른 종류의 수신노드로 대체하는 경우, 그리고 극

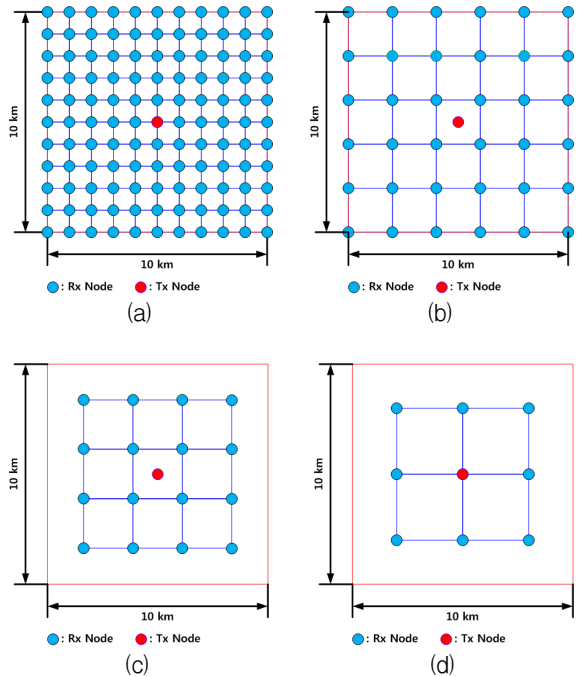


Fig. 10. Rx node configuration for compensating detection performance by DI : (a) binary, (b) DIFAR, (c) line array I, and (d) Line array II

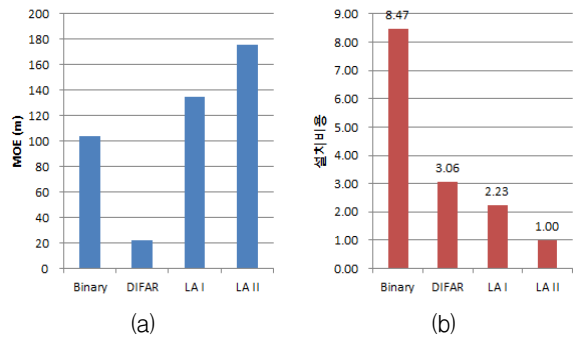


Fig. 11. Comparison of the effectiveness analysis results by Rx node type : (a) MOE comparison, (b) acquisition cost comparison

단적으로 외곽 코너 4개소만을 대체하는 경우에 대한 획득비용을 분석하였으며, 분석 결과는 Table 8에 제시되어 있다. Table 8에서 노드 조합 명은 ‘망 내부배치 / 망 외부배치’ 순이며, ‘A’는 외곽 전체를 대체한 경우를 ‘C’는 코너만을 대체한 경우를 가리킨다. 그리고 Table 8에 제시된 결과는 5 km 간격으로 이격된

Table 8. Acquisition cost comparison by Rx node combination

노드 조합 (망내부/망외부)	수신노드 간격(km)			
	0.5	1	2	5
Binary Only	49.00	13.44	4.00	1.00
LA II Only	77.77	21.34	6.35	1.59
DIFAR Only	59.48	16.32	4.86	1.21
Binary / LA II (A)	54.22	16.05	5.30	1.52
Binary / DIFAR (A)	50.90	14.40	4.48	1.19
LA II / DIFAR (A)	74.46	19.68	5.52	1.26
DIFAR / LA II (A)	62.80	17.98	5.69	1.55
Binary / LA II (C)	49.26	13.71	4.26	1.26
Binary / DIFAR (C)	49.10	13.54	4.10	1.10
LA II / DIFAR (C)	77.61	21.17	6.18	1.42

이진 센서노드 망의 획득비용을 1로 했을 때 각 경우에 대한 획득비용을 상대적인 비로 나타냈다. 정리된 결과를 살펴보면 배치 간격이 2 km 미만인 경우 망 획득비용이 최대 80배 정도까지 증가하는 경향을 보이므로, 배치 간격은 2~5 km 정도가 적절함을 유추할 수 있다.

MOE 측면에서 수신노드 조합에 따른 성능 차이를 보기 위해 이격 거리를 2 km로 하였으며, 이 경우 수신노드 종류별 내부배치 대 외부배치 비율은 외곽 전체배치의 경우 16:20, 외곽 코너 배치의 경우 32:4였다. 시뮬레이션은 이전과 동일한 조건 하에서 수신노드 조합별로 수행하였으며, 시뮬레이션을 통해 산출된 MOE를 분석한 결과 송신노드가 중앙에 위치하므로 Fig. 12에서 보는바와 같이 망 외곽에 해당하는 궤적의 시작과 끝 부분에서는 음영구역문제로 인해 큰 위치추정 오차가 발생해 정확한 성능 평가가 어려움을 확인하였다. 망 외곽에서 발생하는 오차에 인한 영향을 최소화한 후 성능 평가를 수행하기 위해 전체 위치추정 결과 중 망 외곽부분에 해당하는 약 15 %를 배제하고 MOE를 재산출하였으며, 그 결과는 Table 9에 제시되어 있다. 제시된 결과를 살펴보면 대체적으로 망 외곽 전체에 DI가 높은 수신노드를 배치하는 것이 유리함을 확인할 수 있으며, Binary / DIFAR (A)와 T+B 정보 조합을 사용하는 경우 Table 8을 참고하면

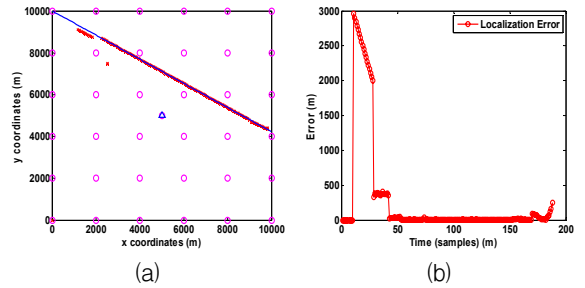


Fig. 12. Localization error example at the target tracking output : (a) true and estimated target position, (b) localization error by time

Table 9. MOE comparison by Rx node combination

노드 조합	정보 조합	
	TDOA	TDOA+bearing
Binary / LA II (A)	40.8	32.6
Binary / DIFAR (A)	52.8	17.0
LA II / DIFAR (A)	76.5	19.5
DIFAR / LA II (A)	59.6	36.6
Binary / LA II (C)	57.8	65.9
Binary / DIFAR (C)	57.7	64.1
LA II / DIFAR (C)	81.0	40.5
DIFAR / LA II (C)	56.1	17.4

4.5배 정도의 획득비용 상승으로 가장 우수한 MOE를 얻을 수 있으므로 탐지 빈도가 높은 망 내부는 이진 센서노드로, 망 외부는 DIFAR 센서를 배치하는 전략이 유효함을 알 수 있다.

수신노드를 조합해 사용하는 경우 망 획득비용은 절약하면서 MOE 측면에서 어느 정도의 성능향상을 이룰 수 있으나, 망 외곽의 음영구역에서 큰 오차가 발생하는 문제는 여전히 해결하기 어렵다. 이를 해소하기 위해서는 송신노드를 추가로 배치할 필요가 있으며, 이에 따른 영향을 살펴보기 위해 망 중앙과 외곽코너 4개소에 송신노드를 배치한 후 시뮬레이션을 실시하였다. Table 10은 5개의 송신노드 운용할 경우에 대해 T+B 정보 조합을 사용한 경우에 대한 MOE를 보여주고 있으며, Table 7의 제시된 동일 경우에 대한 결과와 비교해 보면 송신노드 추가 배치를 통해

Table 10. MOE comparison by Rx node distance

노드 종류	수신노드 간격(km)			
	0.5	1	2	5
Binary	14	25	162	415
LA I	6	10	17	39
LA II	4	8	14	43
DIFAR	3	7	9	14

음영구역을 최소화할 경우 수신노드의 종류에 관계없이 MOE가 크게 향상되므로 노드간 이격 거리를 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

효과도 분석을 통해 획득한 결과를 종합하면 수중 분산 센서망의 경우 DI와 방위해상도가 높은 센서노드를 사용해야 하며, 표적 추적 측면에서는 수동탐지보다 능동탐지를 통해 획득할 수 있는 TDOA와 방위정보를 결합하는 것이 유리함을 확인할 수 있었다. 이러한 사항을 참고할 때 DIFAR 센서노드를 이용하여 망을 구성해야 하나, 망 획득비용을 고려할 경우에는 이진 센서와 DIFAR 센서노드의 조합을 사용하는 것이 바람직함을 볼 수 있었다. 수중통신 범위와 수신노드의 탐지 범위를 고려하면 수신노드간 이격 거리는 2~5 km 정도이므로, 망의 최소 크기는 10×10 km²로 정하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 최소 망의 크기를 기준으로 이진 센서노드와 DIFAR 센서노드 조합을 이용하여 망을 구성한 예는 Fig. 13과 같으며, 정의된 센서망 구성단위를 상/하/좌/우로 확장하면 차단, 구역 감시와 같은 다양한 형태의 망을 구성할 수 있다. 또한 망 확장 시 망 코너의 교차점에 송신 노드를 배치하면 음영 구역을 최소화하여 탐지 및 추적 성능을 극대화하거나, 수신노드간 이격 거리를 증대시켜 망 획득비용을 감소시킬 수도 있다. 그러나 이러한 망 구성은 표적 추적 성능을 확보하기 위해 능동탐지를 기본으로 하고 있으므로, 감시체계에 요구되는 은밀성이 보장되지 않는 문제가 있다. 망 은밀성과 표적추적 성능을 동시에 확보하기 위해서는 표적의 수동 탐지 후 표적이 망 내부로 진입한 경우에만 능동을 사용하는 방안을 고려할 수 있으나, 본 논문에서 고려된 수신노드는 제한적인 수동탐지 성능을 가지므로 망 외부에 위치하는 표적의 탐지가 어려우므로 이러한 방안을 적용하기 어렵다.

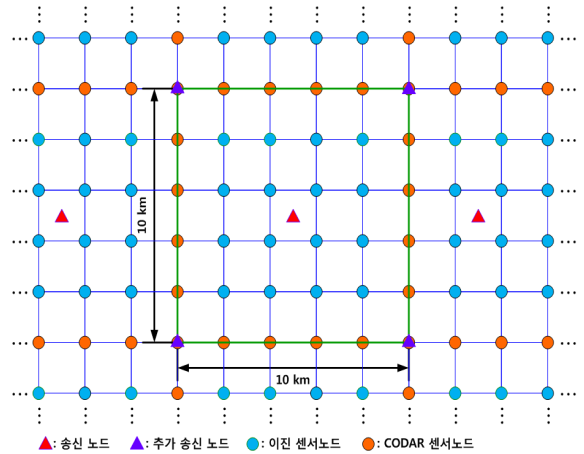


Fig. 13. An example of the UDSN structure

따라서 원거리에서 표적을 수동탐지가 가능한 기존 수중감시체계와 수중분산 센서망을 결합하는 방법을 고려할 수 있으며, 이에 관해 시뮬레이션을 수행한 결과에 대한 예제는 Fig. 14에 제시되어 있다. Fig. 14.(a)에서 보는 바와 같이 수동탐지 모드에서는 망 외부에 위치한 두 개의 장거리 소나 감시체계만을 사용하여 표적의 존재 여부와 진행 방향에 대해 판단하며, 표적이 망에 근접하는 경우 능동탐지로 전환하여 표적 추적을 수행하면 Fig. 14.(b)와 같이 표적의 위치를 정확하게 추정할 수 있음을 볼 수 있다. 따라서 실질적인 수중분산 센서망은 침투 예상경로에 위치한 센서노드 일부만을 장거리 수동감시가 가능한 센서노드로 대체하여 구성하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

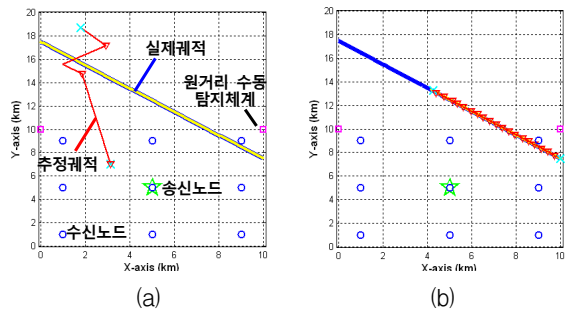


Fig. 14. Simulation result on the combination of the long range sonar system and the UDSN : (a) passive detection mode result, (b) active detection mode result

4. 결론

본 논문에서는 천해용 수중분산 센서망 설계를 위하여, 수중분산 센서망의 전장 환경을 정의하고 구성요소들을 분석해 매개변수화한 후 효과도 분석을 실시하였다. 효과도 분석 시에는 비용, 정보 조합, 배치 방법 등 다양한 측면에서 시뮬레이션을 수행함으로써 효과적으로 분산 센서망을 구성할 수 있는 설계방안에 대해 고찰하였다. 본 논문에서 사용된 분석 방법과 망 설계방법은 향후 수중분산 센서망 및 이를 활용한 감시체계 구축에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] W. T. Oh, Y. G. Kim, C. Y. Joh, I. I. Kim, S. I. Kim, and H. S. Seo, "Report of Investigation for Policy and Planning in Defense R&D(An Investigation Study on Network Centric Underwater Anti-Submarine Warfare Systems)," Agency for Defence Development, ADDR-115-080125, Jan. 2008.
- [2] M. P. Fewell, and S. Ozols, "Simple Detection-Performance Analysis of Multistatic Sonar for Anti-Submarine Warfare," DSTO-TR-2562, June, 2011.
- [3] J.-H. Jang, B.-H. Ku, W.-Y. Hong, I.-I. Kim, and H.-S. Ko, "The Effectiveness Analysis of Multistatic Sonar Network Via Detection Performance," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 9, No. 1, pp. 24-32, March 2006.
- [4] A. D. Waite, "SONAR for Practising Engineers," 3rd Ed., John & Wiley & Sons Ltd., England, pp. 83-91, 2002.
- [5] S.-G. Kim, S.-M. Kim, C. H. Yun, and Y.-K. Lim, "Performance Analysis of Receiver for Underwater Acoustic Communications Using Acquisition Data in Shallow Water," The Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 29, No. 5, pp. 303-313, July 2010.
- [6] D. H. Dini, and D. P. Mandic, "An Enhanced Bearing Estimation Technique for DIFAR Sonobuoy Underwater Target Tracking," 2012 Sensor Signal Processing for Defence, pp. 1-4, 2012.
- [7] H. H. Shin, C. J. Cho, W. S. Kim, W.-Y. Hong, and H.-S. Ko, "Refinement of the Velocity of Target Via Closest Point of Approach in Underwater Sensor Networks," Proceeding of the Acoustical Society of Korea Conference, pp. 216-218, May 9-10 2013.
- [8] I. S. Kim, W.-J. Kim, H. S. Bae, and W. S. Kim, "Target Motion Tracking with Active and Passive Detection Information for Binary Sensor Network," Agency for Defence Development, ADDR-515-121475, Sep. 2012.
- [9] H. H. Shin, C. J. Cho, W. S. Kim, W.-Y. Hong, and H.-S. Ko, "Tracking of Submarines utilizing Multiple Binary Sensors," 9th Naval Weapon Systems Conference, 2012.
- [10] R. P. Hodges, "Underwater Acoustics : Analysis, Design, and Performance of Sonar," John & Wiley & Sons Ltd., pp. 183-187, 2010.
- [11] R. J. Urick, "Principles of Underwater Sound," 3rd Ed., McGraw-Hill Inc., pp. 306-308, 1983.
- [12] H. S. Bae, W.-J. Kim, W. S. Kim, and S. M. Choi, "Energy Distribution Characteristics of the Target Signals using Underwater Distributed Sensor Networks," KIMST Annual Conference Proceedings, July 2013.
- [13] J. S. Kim, W. K. Chung, "Target Signal Model Development using Underwater Distributed Sensor Network," Agency for Defense Development, ADDR-417-131347, Aug. 2013.
- [14] Y. H. Ji, H. S. Bae, G. H. Byun, J. S. Kim, W. S. Kim, and S. Y. Park, "Investigation of Target Echoes in Multi-Static SONAR System: Numerical Modeling with Experimental Verification(Part. II)," Journal of the Korean Society of Ocean Engineering, to be Published, Oct. 2014.
- [15] W. S. Burdic, "Underwater Acoustic System Analysis," 2nd Ed., Prentice-Hall Inc., USA, pp. 381-388, 2002.