

## 음향 탐지 성능지표 기반의 센서노드 최적 배치 연구

김선효<sup>1)</sup> · 김우중<sup>2)</sup> · 최지웅<sup>\*,1)</sup> · 윤영중<sup>2)</sup> · 박정수<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 한양대학교 해양융합학과

<sup>2)</sup> 연세대학교 전기전자공학과

<sup>3)</sup> 국방과학연구소 제6기술연구본부

### Optimal Deployment of Sensor Nodes based on Performance Surface of Acoustic Detection

Sunhyo Kim<sup>1)</sup> · Woojoong Kim<sup>2)</sup> · Jee Woong Choi<sup>\*,1)</sup> · Young Joong Yoon<sup>2)</sup> · Joungsoo Park<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Department of Marine Sciences and Convergent Technology, Hanyang University, Korea

<sup>2)</sup> Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Korea

<sup>3)</sup> The 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 13 March 2015 / Revised 19 August 2015 / Accepted 4 September 2015)

#### ABSTRACT

The goal of this study is to develop an algorithm to propose optimal deployment of detection sensor nodes in the target area, based on a performance surface, which represents detection performance of active and passive acoustic sonar systems. The performance surface of the active detection system is calculated from the azimuthal average of maximum detection ranges, which is estimated with a transmission loss and a reverberation level predicted using ray-based theories. The performance surface of the passive system is calculated using the transmission loss model based on a parabolic equation. The optimization of deployment configurations is then performed by a hybrid method of a virtual force algorithm and a particle swarm optimization. Finally, the effectiveness of deployment configurations is analyzed and discussed with the simulation results obtained using the algorithm proposed in this paper.

Key Words : Active Signal Excess(능동 신호초과), Passive Signal Excess(수동 신호초과), Optimal Deployment(최적 배치), Performance Surface(성능 지표)

#### 1. 서론

수중 무선 센서 네트워크(underwater wireless sensor network)를 구성하는 센서노드들은 수중 환경에서 각종 데이터를 수집하여 인접한 노드에 정보를 전달하는 역할을 수행한다. 이러한 센서노드들의 시스템 성능은

\* Corresponding author, E-mail: choijw@hanyang.ac.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

시·공간적으로 변동하는 수중 음향 환경에 의하여 탐지 반경 및 연결성에 큰 영향을 받게 되므로, 육상의 배치 방법론을 적용할 경우 효율성이 낮아지게 된다. 따라서 시스템 운용비용을 절감하고 효율적인 센서 네트워크의 운용을 위해서는 수중 음향환경이 고려된 센서노드 배치 최적화 알고리즘 연구가 요구 된다.

수중 환경에서 능·수동 센서노드의 배치 성능을 평가하기 위해서는 수중에 노드를 배치하고 표적 신호를 수신하여 그에 따른 표적 탐지 및 식별 성능 분석을 수행해야 하지만, 수중환경에서 이에 대한 성능을 평가하기에는 기회가 제한적이고 많은 시간과 고비용이 요구된다. 따라서 국내외 연구에서는 M&S 기법을 적용하여 센서노드의 배치 성능을 검증함으로써 실제 수중환경에서 노드 배치 시 발생할 수 있는 여러 문제를 사전에 파악하고자 시도하고 있다.

국내 연구로는 주로 육상 통신 센서노드를 배치하여 효율적이고 안정적인 네트워크를 수행하도록 발전시켜 왔다<sup>1-3)</sup>. 하지만 육상의 경우 환경 특성을 단순화하여 적용하기 때문에 수중환경과 같이 시·공간적으로 변동성이 큰 경우 방법론적으로 접근하기 어렵다. 또한 수중의 경우 육상에 비하여 고비용이 요구되므로, 수중음향 특성을 반영하여 센서노드를 최적 배치하기 위한 효율적인 알고리즘이 중요하다. 국외의 경우 다수의 수중 센서노드 배치에 관한 연구가 되어 왔으나<sup>4-6)</sup>, 이러한 연구에서도 해양환경 변동에 따른 음향 환경 특성을 배치에 반영하는 것보다는 제한된 탐지 반경의 노드를 이용한 최적 배치 알고리즘 연구가 주를 이루어왔다. 하지만, 수중에서는 시·공간적으로 변동하는 해양환경 변화에 의해 음파 굴절, 회절, 반사, 산란 등 복합적인 음파전달 특성을 가지므로 수중 센서노드의 배치성능을 평가하기 위해서는 이를 반영한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 수중음향 특성을 센서노드 배치에 반영하기 위해 해양환경 데이터베이스를 활용하여 능·수동 음향 탐지 시스템의 성능을 수치반경으로 나타내는 성능지표(performance surface)를 구현하였다. 또한 이를 기반으로 목표해역에서 센서노드를 최적 배치하기 위해 인력과 척력의 개념으로 센서노드의 재배치가 이루어지는 VFA(Virtual Force Algorithm)와 경험성을 바탕으로 최적의 해를 탐색하는 PSO(Particle Swarm Optimization)를 결합하여 적용하였고, 수중음향 특성이 고려된 탐지 성능지표 기반 하에서 위 알고리즘을 적용하여 센서노드의 최적 배치를 수행하였다<sup>18-20)</sup>. 본

연구의 결과에서는 목표해역에서 여름철 및 겨울철 수중 음향환경과 배치 형태를 반영한 능·수동 센서노드의 최적 배치 시뮬레이션을 통해 효율성을 분석 및 토론하였다.

## 2. 센서노드의 성능지표 모델 구현

수중 센서노드의 성능지표 모델이란 주어진 해양환경에서 음향 시스템의 상대적인 성능을 평가하기 위해 이를 공간적으로 수치화하여 표현하는 것을 뜻한다. 만약 센서노드들을 최적 배치하기 위해 센서노드 각각의 위치를 변경하여 탐지 성능을 도출하고, 이를 반복적으로 수행하게 되면 무한한 연산 시간이 소모 된다. 따라서 본 연구에서는 시간적 효율성을 높이기 위해 능·수동 센서노드의 탐지 시스템에 대한 성능을 평가하여 목표 해역의 시·공간에 따른 탐지성능 반경을 도출하였고, 이를 최적 배치 연구에 활용하였다<sup>7)</sup>.

### 2.1 능·수동 센서노드의 탐지 성능 도출

본 연구에서는 최적 배치될 센서노드로 Fig. 1과 같이 능동 및 수동 두 종류를 가정하였다. 능동 센서노드는 수중에 존재하는 표적을 탐지하기 위해 송신신호를 송출하고 표적으로부터 반향되는 신호, 불규칙한 경계면(해수면, 해저면)과 체적 산란체로부터 산란되어 수신되는 잔향음 신호 및 각종 해양소음신호를 수신하여 분석하는 소나시스템이며, 수동 센서노드는 표적에서 발생하는 신호 및 각종 해양소음신호를 수신하여 분석하는 소나시스템이다.

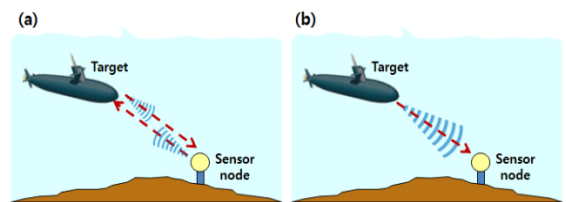


Fig. 1. Detection diagram of sensor node, (a) active, and (b) passive systems

#### 2.1.1 능·수동 신호초과 계산

능·수동 센서노드의 표적 탐지 성능은 일반적으로 표적 탐지 거리(detection range)를 가지고 평가할 수 있는데, 이는 소나방정식을 이용하여 계산되는 신호초과

(SE : Signal Excess)에 확률분포 함수를 적용한 표적의 탐지확률(detection probability)을 통해 도출된다. 따라서 표적의 탐지확률을 계산하기 위해서는 먼저 표적 신호 대 잔향음 및 주변소음의 비를 의미하는 신호초과를 계산하게 되는데, 능동 센서노드인 경우 식 (1), 수동 센서노드인 경우 식 (2)의 소나방정식을 이용하여 계산할 수 있다<sup>[8,9]</sup>.

$$ASE = SL - TL_1 - TL_2 + TS - (RL, NL) + DI - DT \quad (1)$$

$$PSE = SL - TL - NL + DI - DT \quad (2)$$

ASE는 능동 신호초과이고 SL은 능동 센서노드의 음원준위, TL<sub>1</sub>은 센서노드에서 표적까지의 전달손실, TL<sub>2</sub>는 표적에서 센서노드까지의 전달손실이다. 또한 TS는 표적강도, RL과 NL은 각각 잔향음 준위와 주변 소음준위, DI는 지향지수 그리고 DT는 탐지문턱을 나타낸다. 본 연구에서 적용한 능동 탐지 모델은 거리중속 환경에서 적용 가능하고 고주파수에서 효율적인 음선이론 기반의 BELLHOP<sup>[10]</sup> 알고리즘을 적용하였다. 그리고 센서노드에서 공간적으로 분포하는 표적 및 경계면간의 고유음선 정보(음파전달 손실, 전달 시간, 산란강도, 산란단면적 등)를 이용하여 잔향음<sup>[11]</sup> 및 능동 신호초과<sup>[12]</sup>를 계산하였다.

식 (2)에서 PSE는 수동 신호초과, SL은 표적에서 발생하는 소음 준위, TL은 표적에서 센서노드까지의 전달 손실, NL은 주변 소음준위를 나타낸다. 수동 탐지 시스템에 대한 성능을 평가하기 위해서 가상 표적의 방사소음 특성으로 가정한 저주파수 대역에 효율적인 연산 시간을 갖고, 공간적인 해양환경 변동성을 고려할 수 있는 포물선 방정식 기반의 RAM(Range-dependent Acoustic Model)<sup>[13]</sup>을 음파전달 모델로 적용하여 수동 신호초과를 계산하였다. Fig. 2는 식 (1)와 식 (2)의 소나방정식을 적용하여 도출된 공간적으로 분포된 표적에서의 능동 및 수동 신호초과를 나타낸다.

2.1.2 능·수동 탐지확률 및 최대 탐지거리 계산

식 (1)와 식 (2)에서 도출된 능·수동 신호초과는 확률분포함수의 관계를 나타내는 식 (3)을 이용하여 탐지확률로 변환 할 수 있다<sup>[14]</sup>.

$$P_d(SE) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{SE} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (3)$$

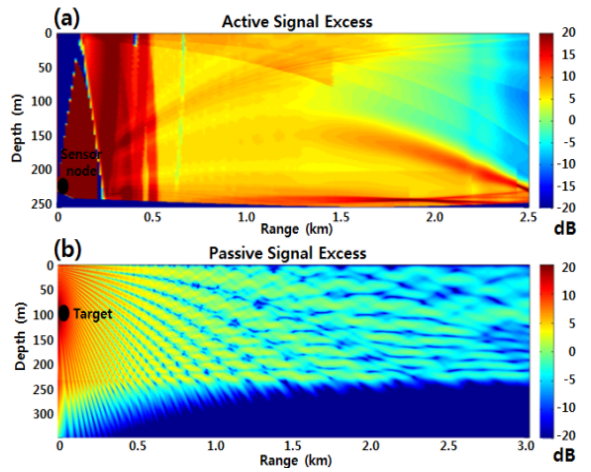


Fig. 2. Signal excess of sensor node, (a) active, and (b) passive systems

여기서  $\sigma$ 는 신호초과에 대한 표준 편차로 본 연구에서는  $\sigma$ 를 8 dB로 고려하여 탐지확률을 계산하였다<sup>[8]</sup>. 탐지 확률분포는 표준편차를 대입한 후 신호초과 축에서 적분을 수행하면 Fig. 3과 같이 능·수동 탐지 확률분포로 나타낼 수 있다.

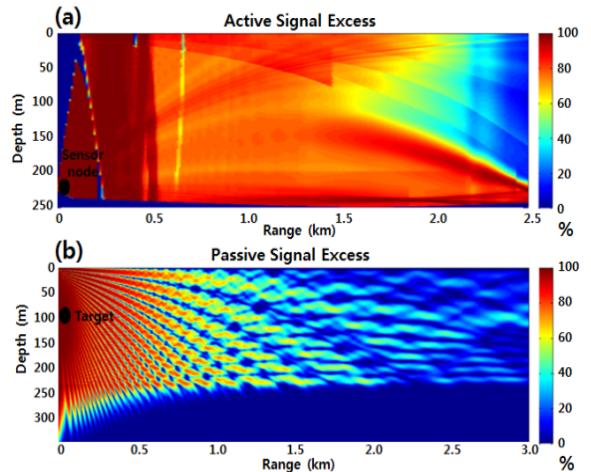


Fig. 3. Detection probability of sensor node for the case of, (a) active, and (b) passive systems

능동 탐지확률의 경우 표적이 공간적으로 분포하므로 목표 표적 수심에서의 거리에 따른 탐지확률로 나타낼 수 있으며, 목표 탐지확률을 50 %로 설정하면 Fig. 4와 같이 최대 탐지 거리를 도출 할 수 있다.

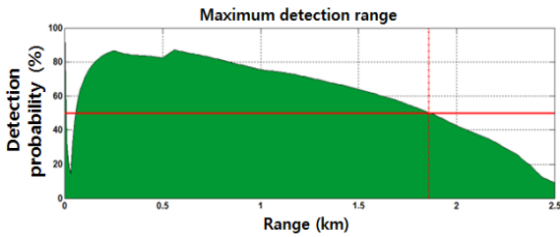


Fig. 4. Maximum detection range of Active sensor node

수동 탐지확률의 경우 센서노드 위치에서의 탐지확률을 도출하면 Fig. 5 (a)와 같이 거리에 따른 탐지확률로 나타낼 수 있다. 하지만 음파 전달 손실의 상호 간섭에 의하여 탐지확률이 거리에 따라 변동성을 가지게 되므로, 본 연구에서는 수평거리 10 m 간격으로 이동평균(moving average) 기법을 적용하여 Fig. 5 (b)와 같이 기준 탐지 확률을 만족시키는 최대 거리를 수동 센서노드의 탐지거리로 설정하였다<sup>[15]</sup>.

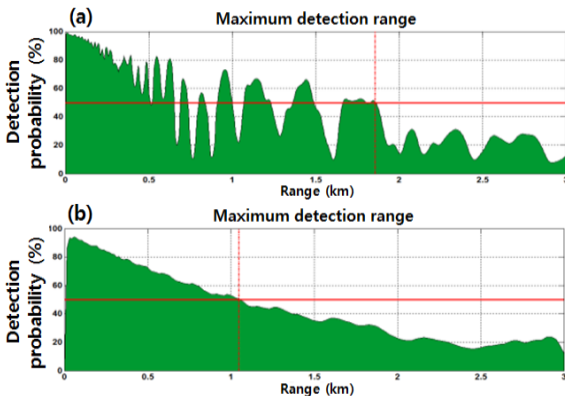


Fig. 5. Maximum detection ranges of Passive sensor node, of (a) before, and (b) after moving average

### 2.2 능·수동 센서노드의 성능지표 모델 구현

목표 해역에서 능·수동 센서노드의 성능지표 모델을 구현하기 위해서는 먼저 시·공간적인 환경 자료를 (수직 음속구조, 해저 지형 및 수심 자료, 해저면 구성 성분)가 필요하다. 본 연구에서 사용된 환경 자료 중 해저 지형 자료는 ETOPO1을 공간적으로 보간하여 추출하였다<sup>[16]</sup>. 또한 수직음속구조는 시간 해상도(연간, 계절별)와 공간 해상도(1°)를 갖는 해양 수치 모델 (GDEM : Generalized Digital Environment Model)<sup>[17]</sup>을

보간하여 활용하였으며, 수심에 따른 음속을 산출하였다. 연근해 해저면 구성 성분은 한양대에서 보유하고 있는 자료에 국방과학연구소에서 제공 받은 자료를 추가하여 활용하였다. 탐지 성능지표 모델을 구현하기 위해서는 먼저 목표해역을 설정하는데, 본 연구에서는 Fig. 6과 같이 동해 연근해역(가로: 22 km, 세로: 22 km)을 목표해역으로 설정하였다.

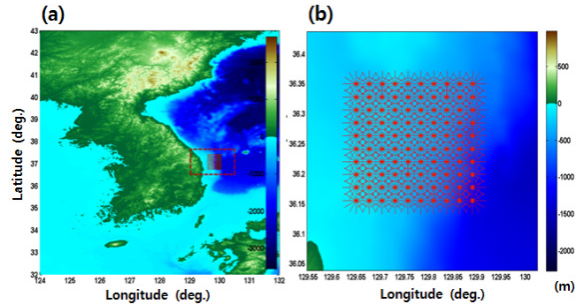


Fig. 6. Location of target area

목표해역에서의 환경 자료는 총 100 개의 정점에서 각 정점 당 12 방위각에 대해 추출하였다. Fig. 7은 방위에 따른 음속과 해저면 수심을 나타내며, 능·수동 탐지 모델에 적용하기 적합한 형태로 추출하여 탐지거리를 도출하는데 이용되었다. 또한 본 연구에서 사용된 시뮬레이션 시스템 변수는 Table 1과 같다.

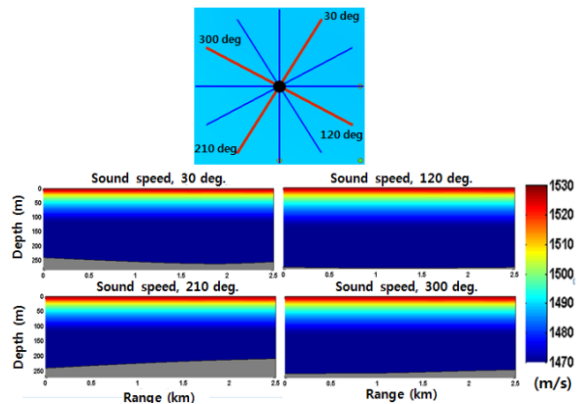


Fig. 7. Environmental data for the 12 azimuth angles

따라서 각 정점, 각 방위각에 따라 능·수동 탐지모델을 수행하면, Fig. 8 (a)와 같이 총 100개의 정점에서의 공간적 신호초파로 나타낼 수 있다. Fig. 8 (b)는 1 개 정점에서의 방위별 신호초파, 8 (c)는 방위별 탐지

확률, 8 (d)는 방위별 탐지거리로 화살표는 방위에 따른 최대 탐지 거리를 나타낸다.

Table 1. Simulation SONAR Parameters

Active SONAR Parameters	Value
Frequency	10 kHz
Source level	200 dB
Pulse length	50 ms
Source depth	Bottom
Target depth	100 m
Target strength	7 dB
Noise level	41 dB
Passive SONAR Parameters	Value
Target frequency	200 Hz
Target source level	130 dB
Target depth	100 m
Source depth	Bottom
Noise level	63 dB
Other Parameters	Value
Wind speed	5 m/s
Detection Probability	50 %
Directivity index	0 dB
Detection Threshold	0 dB

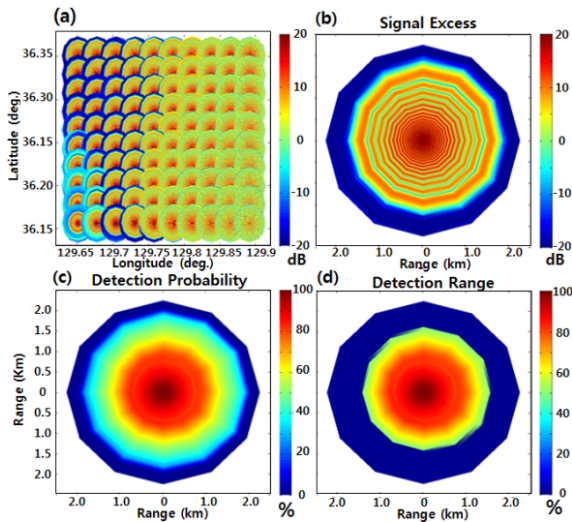


Fig. 8. (a) Signal excess for every site (b) signal excess at one site, (c) detection probability, (d) detection range

목표영역 내에서 센서노드 각각의 위치를 변경하여 탐지 성능을 평가하고, 이를 반복적으로 수행하여 최적 배치를 수행하면 무한한 연산 시간이 걸리게 된다. 또한 각 정점에서 방위별로 최대 탐지거리를 고려할 경우 성능지표 모델로 단순화하여 도식화하는 것이 불가능해지기 때문에 본 연구에서 제안하는 센서노드 배치 알고리즘 적용이 어렵다. 따라서 각 정점에서 탐지 센서노드의 성능을 나타내기 위해서는 방위에 따라 달라지는 탐지거리를 대표할 수 있는 값의 설정이 필요하다. 본 연구에서는 식 (4)와 같이 방위 평균(MDR : Mean Detection Range)을 적용하여 각 정점에서의 대표 성능으로 결정하였다. 센서노드의 운용 개념에 따라 기준을 최소, 최대 및 평균 탐지거리에 따라 설정 값을 변경할 수도 있다.

$$MDR = \frac{\text{방위별 탐지거리 합}}{\text{방위 수}} \quad (4)$$

Fig. 9는 능·수동 센서노드의 성능지표 모델을 동계(2월)와 하계(8월)에 대해 도출한 결과이다. 본 결과로부터 센서노드의 위치에 따라 탐지거리를 파악할 수 있게 되며, 따라서 해당 모델의 최적 배치 문제에 적용이 가능해진다.

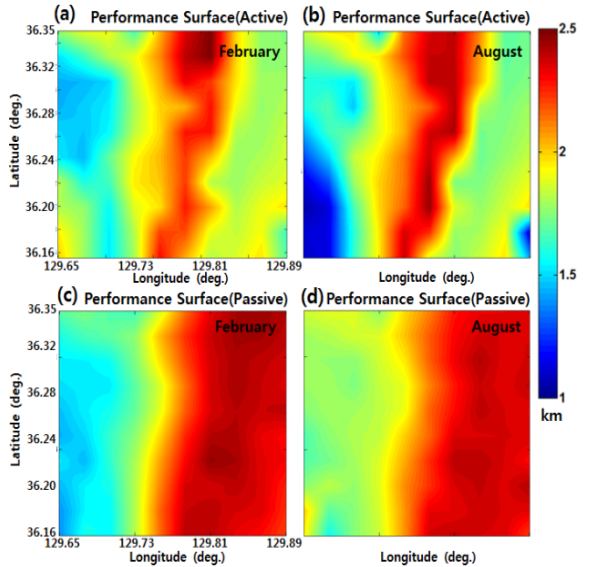


Fig. 9. Performance surface result of sensor node for, (a,b) active (February, August), and (c,d) passive (February, August) systems

### 3. 센서노드의 최적 배치 알고리즘

수중음향 환경을 반영하여 도출된 탐지 성능지표 를 기반으로 각 센서노드 위치에서의 탐지 반경을 고려한 최적 배치가 수행된다. 본 논문에서 배치 문제에 적용 할 알고리즘으로 VFA와 PSO를 결합하는 알고리즘을 적용하였다.

#### 3.1 VFA

VFA 알고리즘은 센서노드간의 인력(attractive force) 과 척력(repulsive force)을 가정하여 센서노드 간의 거리가 성능지표 모델을 통해 수치화된 탐지 반경보다 가까운 경우 밀어내는 힘인 척력과 먼 경우 잡아당 기는 힘인 인력을 이용하여 최적화하는 알고리즘이다<sup>[18]</sup>. 이 힘은 목표해역에 존재하는 센서노드 전체에 대해서 발생하게 되며, 각 센서노드에 작용하는 가상의 힘은 벡터합으로 표시된다. 따라서 계산된 각각의 벡터 값들의 합을 계산하여 센서노드의 최적 위치를 결정하게 된다. 센서노드 간에 발생하는 힘의 크기와 방향성을 가지는 벡터 합은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{F}_i = \sum_{j=1, j \neq i}^k \vec{F}_{i,j} \quad (5)$$

$$\vec{F}_{i,j} = \begin{cases} [w_A(d_{i,j} - d_{th}), \alpha_{i,j}] & \text{if } d_{i,j} > d_{th} \\ 0 & \text{if } d_{i,j} = d_{th} \\ [w_R \frac{1}{d_{i,j}}, \alpha_{i,j} + \pi] & \text{if } d_{i,j} < d_{th} \end{cases}$$

여기서  $\vec{F}_i$ 는 센서노드( $i$ )에 대한 전체 힘 벡터이고  $k$ 는 전체 센서노드 수를 나타낸다.  $\vec{F}_{i,j}$ 는 센서노드 ( $i$ )와 센서노드( $j$ )사이에 작용하는 힘으로 두번째 식 의 오른쪽 항과 같은 조건에 따라 각각 계산된다.  $d_{i,j}$ 는  $i$ 와  $j$ 사이의 탐지 반경의 합이고,  $d_{th}$ 는 센서간 기준거리이다.  $\alpha_{i,j}$ 는  $i$ 에서  $j$ 를 보는 시선각이다.  $w_A$ 와  $w_R$ 은 인력과 척력의 가중치로  $w_R \gg w_A$ 인 경우 배치 성능이 좋아짐을 알 수 있다<sup>[9]</sup>. 본 논문에서는  $w_A = 0.01$ ,  $w_R = 1$ 을 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 따라서 기준거리에 따라 Fig. 10과 같이 센서노드의 배치 형태가 결정된다. 본 연구의 결과는 2 종류의 배치 형태에 따른 배치 효율성을 평가하였다.

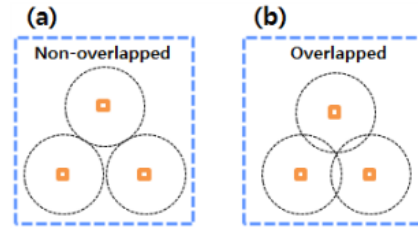


Fig. 10. Deployment diagrams for the standard range of sensor nodes, (a) non overlap case, (b) overlap case

#### 3.2 PSO

PSO 알고리즘은 군집의 탐색 개념을 단순화한 최적화 기법이다. 진화 연산 기법에서 세대를 업데이트 하여 최적 조건에 대한 임의의 해를 찾는 유전자 알고리즘(genetic algorithm)과 많은 유사점을 갖지만, 크로스 오버(cross over) 및 돌연변이가 없어 안정적으로 최적 해를 탐색할 수 있다는 장점을 가지므로 센서 배치 문제의 최적해를 찾기 위해 적용하였다<sup>[20]</sup>. 초기 목표 해역에 센서노드들이 배치되면 각각의 위치 및 탐지 반경을 통해 목표영역 내에서의 최적 위치와 센서노드 간의 차이인 적합 함수(fitness function)를 계산 하게 되는데, 이를 최소화 하는 방향으로 센서노드가 이동하게 된다. PSO는 식 (6)을 통해 계산된다.

$$\begin{aligned} v_{i,j}(t+1) &= v_{i,j}(t) + c_1 r_1 [p_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)] \\ &\quad + c_2 r_2 [p_{g,j}(t) - x_{i,j}(t)] \\ x_{i,j}(t+1) &= x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 첫 항  $v_{i,j}(t+1)$ 는 센서노드의 현재 벡터,  $[p_{i,j}(t) - x_{i,j}(t)]$ 는 각 센서노드의 과거 최적의 위치와 현재의 위치간 거리 차,  $[p_{g,j}(t) - x_{i,j}(t)]$ 는 전체 센서노드 중 최적의 위치와 현재 위치간 거리 차,  $x_{i,j}(t+1)$ 는 새로운 센서노드의 위치이다. 또한  $c_1$ 와  $c_2$ 는 수렴속도에 영향을 미치는 가중치 함수로 2의 동일한 값을 설정하였다<sup>[20]</sup>.  $r_1$ 와  $r_2$ 는 0에서 1의 범위를 갖는 무작위 수이다. 따라서 각각의 센서노드는  $v_{i,j}(t+1)$ 의 값이 최소가 되는 방향으로 이동하여 최적해로 수렴하게 된다.

#### 3.3 VFA + PSO

VFA는 자기 조직화 동작 배치에 탁월한 성능을 보

이지만, 인력 및 척력 간의 조직화 힘이 강하여 센서 배치에 있어서 특정 위치로의 이동을 저해하는 문제가 있다. 또한 PSO는 특정 위치(최적해)로의 수렴성이 좋으나, 센서노드들을 조직화하는데 어려움이 따르며 성능지표 내에 국부해들이 존재할 경우 여러 곳으로 수렴되는 현상이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 자기 조직화 장점을 갖는 VFA와 최적해로의 수렴성이 좋은 PSO 기법의 장점을 결합하여 적용하였다. 만약 다수의 국부해가 존재하더라도 최적해에 배치된 센서노드들이 국부해 인근에 위치하는 센서노드 각각에 인력의 힘을 미침으로써 벗어날 수 있다. 센서노드의 최적 배치 성능을 결정하기 위해 목표구역 전체 범위에서 센서노드들의 탐지 반경이 차지하는 비율로 결정하였다.

Fig. 11은 본 연구에서 적용된 배치 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 오른쪽으로 갈수록 탐지 성능이 증가하는 단순한 성능지표를 가정하였다. (a)는 센서노드 36개를 고려한 초기 격자 배치형태, (b)와 (d)는 VFA의 자기조직화 방법만을 적용한 배치 결과와 반복 횟수에 따른 탐지 범위이다. VFA의 강한 조직화 성격으로 인하여 센서노드들이 탐지 성능이 증가하는 구역과는 상관없이 조직화되기 때문에 반복 횟수에 따라 낮은 탐지 반경을 가지게 된다. (c)와 (e)는 VFA와 PSO를 결합한 배치 결과로 반복 횟수에 따라 탐지 범위로 탐지 성능이 증가하는 구역으로 센서노드들이 이동하여 조직화를 이루며 반복 횟수가 증가 할수록 탐지 범위가 증가하게 된다.

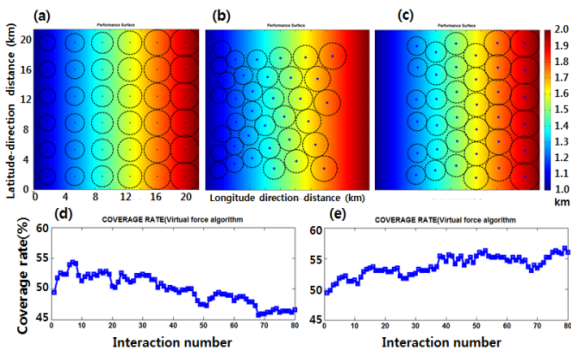


Fig. 11. Performance results obtained using the sensor node deployment algorithm (a) initial deployment, (b) result of VFA algorithm, and (d) its detection coverage, (c) result of VFA + PSO algorithm, and (e) its detection coverage

#### 4. 센서노드의 탐지성능 기반 최적 배치 모의

본 논문의 결과로 시·공간적인 해양환경에서 능·수동 센서노드의 탐지 성능지표를 기반한 최적 배치 알고리즘의 성능을 평가하는 시뮬레이션을 수행하였다. 능·수동 센서노드는 이동이 가능하고, 자체 시스템 성능(음원 준위, 주파수 등)은 동일하다는 가정하에 시뮬레이션을 수행하였다. 목표 해역의 범위, 시스템 변수, 표적 변수, 환경 변수는 Table 1과 동일하게 설정하였으며, 센서노드 간 공간의 허용 유무에 따라 배치 형태는 Fig. 10과 같고, 능·수동 센서노드 수는 각각 20개로 설정하였다. 따라서 초기 무작위 배치 후에 최적 배치 알고리즘을 적용하여 목표 구역 내에서 최대 탐

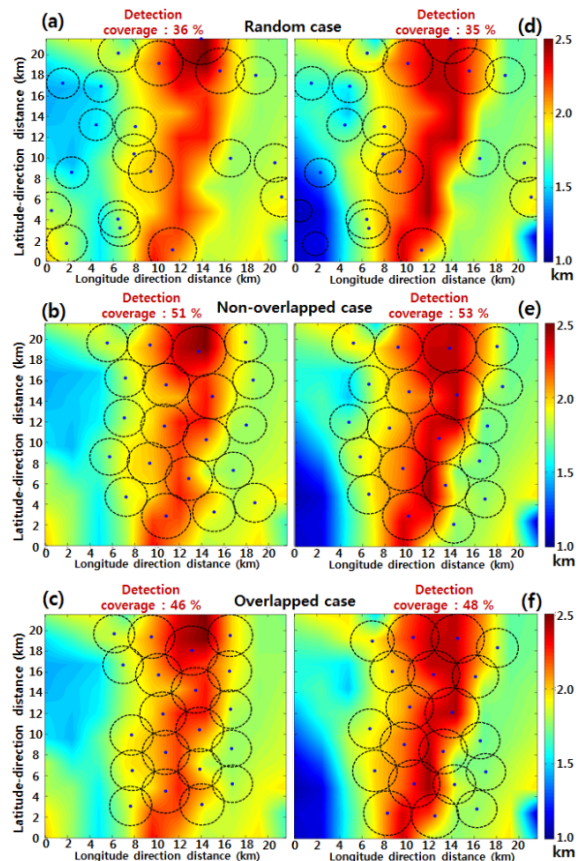


Fig. 12. Optimal sensor deployment result based on active detection performance surface, (a, d) initial deployments (February, August), (b, e) result of non overlap case(February, August), (c, f) result of overlap case(February, August)

지 범위를 가지는 것을 목적으로 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 12 (a, b, c)는 겨울철(2월), Fig. 12 (d, e, f)는 여름철(8월)에 대한 능동 센서노드의 배치성능 결과이다. Fig. 12 (a, d)는 센서노드들이 탐지 성능지표 상에 초기 무작위 배치되어 있는 상태로 탐지 면적 범위는 겨울철 및 여름철 모두 36 %였다. Fig. 12 (b, e)는 센서노드 사이의 공간을 허용하는 배치 형태의 결과로 탐지 면적 범위는 겨울철의 경우 51 %로 초기 무작위 배치보다 15 %가 증가하였고, 여름철의 경우 53 %로 17 %가 증가하였다. Fig. 12 (c, f)는 센서노드 사이의 공간을 허용하지 않는 배치 형태의 결과로 탐지 면적

범위는 겨울철의 경우 46 %로 초기 무작위 배치 보다 10 % 정도 증가했고, 여름철의 경우 48 %로 12 %가 증가하였다. 센서노드 사이의 공간을 허용하지 않는 배치의 경우 겹쳐지는 면적의 증가로 공간을 허용하는 경우에 비해 낮은 배치 성능을 보이고, 센서노드들이 탐지 성능이 상대적으로 좋은 중심 구역에서 배치를 형성하는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 13 (a, b, c)는 겨울철(2월)이고 Fig. 13 (d, e, f)는 여름철(8월)을 설정한 수동 센서노드의 배치성능 시뮬레이션 결과이다. 수동 센서노드의 배치 결과에서도 초기 배치(a, d)에 비해 최적 배치 알고리즘 적용 후 탐지 면적 범위가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 겨울철인 경우 초기 40 %, 센서노드 사이의 공간을 허용하는 최적 배치 59 %, 공간을 허용하지 않는 최적 배치 57 %이고 여름철인 경우 초기 39 %, 센서노드 사이의 공간을 허용하는 최적 배치 58 %, 공간을 허용하지 않는 최적 배치 57 % 결과가 도출되었다. 수동 센서노드의 탐지 성능지표가 여름철과 겨울철에 유사성을 가지므로 배치 결과도 유사함을 보이는 것을 확인 할 수 있다.

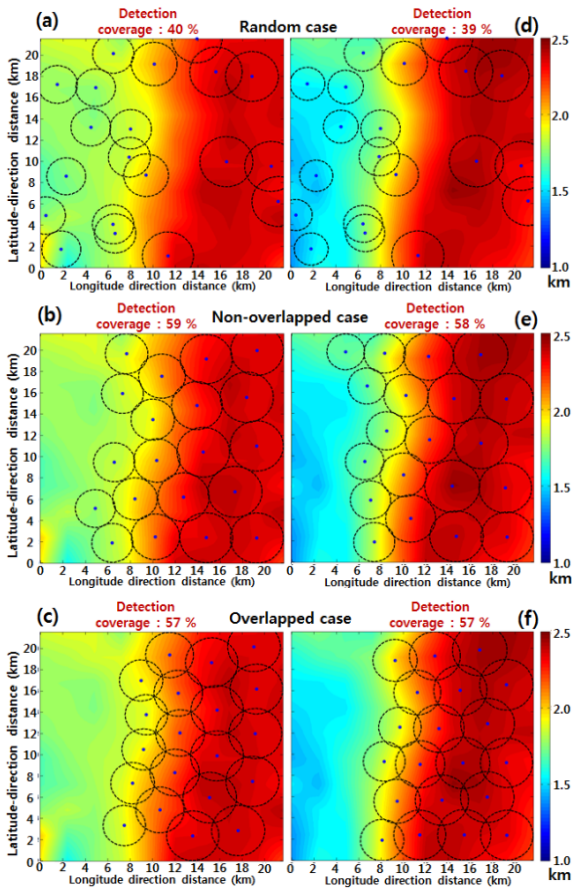


Fig. 13. Optimal sensor deployment result based on passive detection performance surface, (a, d) initial deployment (February, August), (b, e) result of non overlap case(February, August), (c, f) result of overlap case(February, August)

### 5. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 수중음향 특성을 센서노드 배치에 반영하기 위해 해양환경 데이터베이스를 활용하여 능·수동 음향 탐지 시스템의 성능을 수치반경으로 나타내는 성능지표 모델을 구현하였다. 이러한 성능지표 모델을 활용하여 목표해역에서 각 노드 위치에서의 탐지 반경을 고려한 최적 배치가 수행되는데, 본 논문에서 배치 문제에 적용한 방법은 VFA와 PSO의 장점을 결합한 하이브리드 방법을 적용하였다. 본 연구의 결과로 시·공간적인 해양환경에서 능·수동 센서노드의 성능지표를 기반한 최적 배치 알고리즘의 성능을 평가하는 시뮬레이션을 수행하였고, 최적 배치 알고리즘의 효율성을 확인하였다. 이전에 연구된 성능지표 모델의 경우 해양 환경을 고려한 시스템의 성능을 수치화 하였다는 점에서 본 연구와 유사성을 갖지만, 이를 센서노드의 배치 문제와는 연결시키지는 못하였다<sup>7)</sup>. 또한 최적 배치 알고리즘도 마찬가지로 센서노드의 배치 방법론에 대해서는 본 연구와 유사성을 갖지만, 해양 환경에서의 수중 음향 특성을 배치 문제에 결합하지 못하였다<sup>16,17)</sup>. 본 연구는 수중 음향환경에서 능·수동 센



서노드의 음향 탐지 성능을 반영한 최적 배치 방법을 제시하였다. 본 논문의 시뮬레이션에서는 여름철, 겨울철, 정해진 표적 수심 등 시나리오 기반의 최적 배치 결과를 도출하였지만, 이를 Fig. 14와 같이 월별, 표적 수심별, 표적 종류별 등 많은 시나리오기반 데이터베이스를 구축해 놓는다면, 준 실시간 탐지 센서노드의 운용 성능은 증대 될 것이다. 또한 본 논문에서 제시한 최적 배치알고리즘은 3차원 공간 벡터를 고려할 수 있기 때문에 센서노드의 3차원 최적 배치 연구로 확장이 가능할 것이다.

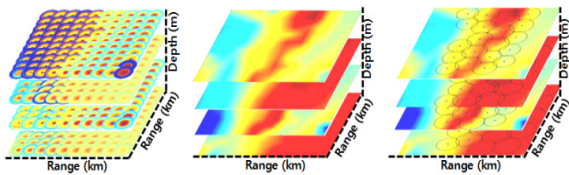


Fig. 14. Examples of optimal deployment database of sensor node

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소(계약번호 : UD130007DD)의 지원으로 수행되었습니다

## References

- [1] Y. H. Kim, K. Chung, "A Node Deployment Strategy Considering Environmental Factors and the Number of Nodes in Surveillance and Reconnaissance Sensor Network," *The Journal of Korea Information and Communications Society*, Vol. 36, No. 12, pp. 1670-1679, 2011.
- [2] J. Lee, M. Shon, and H. Choo, "Energy-Efficient Area Covering with Adjustable Range in WSN," *Review of Korean Society for Internet Information*, Vol. 9, No. 2, pp. 621-625, 2008.
- [3] Y. Kim, H. Peter, "Energy-Aware Deploy Method for Mobile Sensors in Hybrid Sensor Network," *Korea Computer Congress*, Vol. 33, No. 2(D), pp. 791-795, 2006. 10.
- [4] P. Dario, M. Tommaso, and F. A. Ian, "Three-Dimensional and Two-Dimensional Deployment Analysis for Underwater Acoustic Sensor Networks," *Ad Hoc Networks*, Vol. 7, pp. 778-790, 2009.
- [5] P. Chengsheng, J. Liangchen, C. Ruiyan, and D. Yuanming, "Modeling and Simulation of Channel for Underwater Communication Network," *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, Vol. 8, No. 3(B), pp. 2149-2156, 2012.
- [6] L. Hanjiang, G. Zhongwen, and D. Wei, "LDB : Localization with Directional Beacons for Sparse 3D Underwater Acoustic Sensor Networks," *Journal of Networks*, Vol. 5, No. 1, pp. 28-38, 2010.
- [7] M. Pamela, "Environmental and Statistical Performance Mapping Model for Underwater Acoustic Detection Systems," Ph. D. Dissertation, Univ. of New Or. 2010.
- [8] R. J. Urick, "Principles of Underwater Sound," 3rd edition, McGraw-Hill Book company, USA, pp. 17-29, 1983.
- [9] A. D. Waite, "Sonar for Practising Engineers, 3rd edition," WILEY and SONS, UK, pp. 119-124, 2002.
- [10] B. P. Michael, "Gaussian Beam Tracing for Computing Ocean Acoustic Fields," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 82, No. 4, pp. 1349-1359, 1987.
- [11] J. W. Choi, K. S. Yoon, J. Y. Na, J. S. Park, and Y. N. Na, "Shallow Water High-Frequency Reverberation Model," *J. Acoust. Soc. Kr.* 21, pp. 671-678, 2002.
- [12] R. E. Keenan, "An Introduction to GRAB Eigenrays and CASS Reverberation and Signal Excess," *Proc. MTS/IEEE Oceans 2000 Conf.*, Providence, Rhode Island, pp. 1065-1070, 2000.
- [13] M. D. Collins, "User's Guide for RAM Versions 1.0 and 1.0p," Technical Report, Naval Research Laboratory, Washington, pp. 1-14, 1995.
- [14] B. P. Michael, "Acoustic Models and Sonar Systems," *Journal of Ocean Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 425-437, 1993.
- [15] S. Finette, R. Oba, C. Shen, T. Evans, "Acoustic Propagation under Tidally Driven, Stratified Flow," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.

- 121, No. 5, pp. 2575-2590, 2007.
- [16] C. Amante and B. W. Eakins, "Etopo1 Arc-Minute Global Relief Model : Procedures, Data Sources and Analysis," NOAA Technical Memorandum, NGDC(National Geophysical Data Center), 2009.
- [17] M. R. Carnes, "Description and Evaluation of GDEM-V 3.0," Naval Research Laboratory, 2009.
- [18] Y. Zou and K. Chakrabarty, "Sensor Deployment and Target Localization Based on Virtual Forces," Proc. IEEE INFOCOM 2003 Conf., pp. 1293-1303, 2003.
- [19] Y. Yoo and D. P. Agrawal, "Mobile Sensor Relocation to Prolong the Lifetime of Wireless Sensor Networks," Vehicular Technology Conference Proceedings, pp. 193-197, 2008.
- [20] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," Neural Networks IEEE International Conference Proceedings, Vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.