

## 수중 센서 네트워크에서 최소 비용 위치 결정 문제를 위한 타부 서치 알고리즘

장길웅\*

### A Tabu Search Algorithm for Minimum Cost Localization Problem in Underwater Sensor Networks

Kil-woong Jang\*

Department of Data Information, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

#### 요 약

일반적으로 수중 센서 네트워크에서 모든 센서 노드는 위치가 결정된 앵커 노드를 이용하여 자신의 위치를 결정한다. 본 논문에서는 수중 센서 네트워크에서 모든 센서 노드의 위치를 결정하기 위해 최소의 수를 가진 앵커 노드를 결정하기 위한 타부 서치 알고리즘을 제안한다. 네트워크에서 센서 노드의 수가 증가함에 따라 앵커 노드의 수를 결정하는 계산량은 급격히 늘어나게 된다. 본 논문에서는 밀집도가 높은 네트워크에서 적정한 시간 내에 최소의 앵커 노드수를 결정하는 타부 서치 알고리즘을 제안하며, 효율적인 검색을 위해 타부 서치 알고리즘의 효과적인 이웃해 생성 동작을 제안한다. 제안된 알고리즘은 최소 앵커 노드의 수와 실행시간 관점에서 성능을 평가하며, 평가 결과에서 제안된 알고리즘이 기존의 알고리즘에 비해 성능이 5-10% 우수함을 보인다.

#### ABSTRACT

All sensor nodes generally determine their positions using anchor nodes that are located in underwater sensor networks. This paper proposes a Tabu search algorithm to determine the minimum number of anchor nodes for the location of all sensor nodes in underwater sensor networks. As the number of the sensor nodes increases in the network, the amount of calculation that determines the number of anchor nodes would be too much increased. In this paper, we propose a Tabu search algorithm that determines the minimum number of anchor nodes within a reasonable computation time in a high dense network, and propose an efficient neighborhood generating operation of the Tabu search algorithm for efficient search. The proposed algorithm evaluates those performances through some experiments in terms of the minimum number of anchor nodes and execution time. The proposed algorithm shows 5-10% better performance than the conventional algorithm.

**키워드** : 수중 센서 네트워크, 타부 서치, 위치 결정, 메타 휴리스틱

**Key word** : Underwater sensor networks, Tabu search, localization, meta-heuristic

Received 06 December 2016, Revised 07 December 2016, Accepted 30 December 2016

\* Corresponding Author Kil-woong Jang(E-mail:jangkw@kmou.ac.kr, Tel:+82-51-410-4375)

Department of Data Information, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

Open Access <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.5.929>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서론

위치 정보는 이벤트 탐지, 목표 추적, 환경 감시, 노드 배치와 같은 다양한 무선 센서 네트워크의 응용에 사용될 수 있다[1]. 한편, 위치 정보는 센서 네트워크의 성능을 향상시킬 수 있는 네트워크 프로토콜에 영향을 줄 수 있으며, 위치 기반 라우팅을 이용한 데이터 전송이나 지리적 방법을 이용한 네트워크 토폴로지 제어, 위치 정보를 이용한 라우팅에서의 트래픽 배분 등에 사용된다. 그러나 각 노드의 위치를 수동적으로 조정하거나 GPS를 가진 노드를 배치하는 것은 비용이 많이 드는 단점이 있으며, 대부분의 센서 네트워크에서는 사용 불가능한 경우가 발생한다. 따라서 무선 센서 네트워크의 설계에서 위치 결정 문제는 기본적으로 중요한 문제이다[2].

특히 수중 환경에서는 지상 환경보다 노드의 위치를 파악하는 데 더 많은 어려움이 있다. 수중 환경에서는 GPS 신호가 수중으로 전달되지 않으며 무선 신호 또한 수중에서 빠르게 왜곡이 되기 때문에 노드의 위치를 파악하기 힘들다. 이러한 문제를 해결하기 위해 수중환경에서는 음파가 주로 사용되고 있다. 기존의 협력 방식을 통한 위치 확인 기술들이 수중의 낮은 대역폭과 높은 전송 지연시간, 높은 전송 오류로 인해 실제로 적용하는 데 어려움이 있다. 또한 음파 신호의 속도는 염분, 압력, 온도에 따라 달라질 수 있기 때문에 수중 노드 간에 정확한 거리를 구하기가 어렵다. 따라서 3차원 공간에서의 노드 배치는 더 많은 앵커 노드가 요구되며, 이러한 것들이 수중에서 정확한 노드 위치를 결정하는 데 중요한 고려사항이 된다[3].

자신의 위치를 미리 알고 있는 앵커 노드를 이용하여 수중 센서 네트워크의 노드 위치를 결정하는 방법은 일반적으로 노드의 위치는 통신 신호 감도를 이용하여 이웃 노드간의 거리를 측정함으로써 결정하게 된다 [4-6]. 무선 네트워크상에서 모든 노드에 대해 위치를 결정하는 비용을 최소화하는 문제가 중요한 이슈가 되고 있으며, 이를 최소 비용 위치 결정 문제라고 한다. 최소 비용 위치 결정 문제는 많은 수의 노드와 제한된 앵커노드를 결정하기 위해서 방대한 계산량이 요구된다. 이 문제는 조합 최적화 문제로서 NP-hard 문제로 증명되어 있다[7]. NP-hard 문제에 대한 최근 연구들은 근사치 방식을 이용하여 접근하고 있다. 특히 이 방식들 중에 최적해(global solution)를 찾는 완전 검색 알고리즘

(exhaustive search algorithm)이 일반적이다. 그러나 완전 검색 알고리즘은 계산비용이 크다는 문제점을 가진다. 따라서 계산의 어려움과 계산량을 줄이기 위해 최적해를 찾는 대신 계산 시간은 줄이고 최적해에 가까운 해를 찾을 수 있는 메타 휴리스틱 알고리즘이 대안으로 제시되고 있다[8].

본 논문에서는 수중 센서 네트워크에서 최소 비용 위치 결정 문제에 대하여 메타 휴리스틱 알고리즘인 타부 서치 알고리즘을 제안한다. 효율적으로 좋은 결과를 얻기 위해 제안된 알고리즘에서는 새로운 이웃해 생성 방식을 제안하며, 제안된 알고리즘을 평가하기 위해 다양한 조건하에서 최소 앵커 노드 수와 알고리즘 실행시간 관점에서 기존의 다른 알고리즘과 비교 평가한다.

## II. 관련연구

무선 센서 네트워크에서 위치 결정 문제는 다양한 접근 방식에서 연구되었다. 주로 위치 결정 문제에 대한 연구는 네트워크에서 최대한 많은 센서의 위치를 결정하는 데 목표를 두고 있다[7,9,10]. *Aspnes et al.*[7]은 위치 결정 문제에 대한 이론적인 개념을 제시하였다. 이 연구에서는 미리 위치 정보를 가지는 앵커 노드를 일부 배치시키고, 위치가 결정되지 않은 나머지 노드는 인접한 노드로부터 거리를 측정함으로써 위치를 결정하게 된다. 이때 앵커 노드는 정지된 상태를 유지하고, 위치 결정 과정은 이동 노드에 의해 수행된다. *Ssu et al.*[9]은 위치가 결정된 앵커 노드를 배치하여 전송 범위를 고려하지 않는 방식을 제안하였다. 앵커 노드는 네트워크를 이동하며 주기적으로 자신의 위치를 브로드 캐스팅하여 위치가 결정되지 않은 노드의 위치를 결정한다. *Azim et al.*[10]은 고정된 위치를 가진 앵커 노드의 집합을 고려하여 나머지 노드의 위치를 결정하는 방식을 제안하였다. 이 방식에서도 이웃한 노드 간에 거리 측정을 기반으로 노드의 위치를 결정한다.

최근에는 네트워크의 모든 노드의 위치를 결정하기 위해 앵커 노드의 수를 최소화하는 연구가 이루어지고 있다. *Huang et al.*[2]은 3개 이상의 앵커 노드를 사용하여 위치가 결정되지 않은 노드의 위치를 결정하는 방식의 탐욕 알고리즘(greedy algorithm)을 제안하였다. 이 알고리즘에서는 위치가 결정되지 않은 노드의 인접한

앵커 노드의 수가 3개보다 작을 경우에는 그 노드는 앵커 노드로 설정하고 다음 단계부터는 인접 노드의 정보를 기반으로 앵커를 설정하고 모든 노드의 위치를 결정하는 과정을 수행한다. Zhang et al.[4]은 최소 비용 위치 결정 문제에 대하여 메타 휴리스틱 방식인 유전 알고리즘을 제안하였다.

### III. 문제의 정식화

본 논문에서는 수중 센서 네트워크에서 모든 센서 노드의 위치를 결정하기 위해 최소의 수를 가진 앵커 노드를 결정하기 위한 네트워크 모델과 제약조건을 우선 기술한다. 네트워크 모델은 비방향성 그래프인  $G = (V, E)$ 로 나타낼 수 있으며,  $V$ 는 모든 센서 노드의 집합을 의미하며,  $E$ 는 모든 노드간의 연결을 나타내는 링크의 집합을 의미한다. 각 링크의 길이는 노드의 전송거리보다 짧거나 같아야 한다. 링크의 거리는 유클리드 거리함수에 의해 결정된다.

노드의 위치를 결정하기 위해서는 인접한 곳에 위치가 결정된 노드가 적어도 3개 이상 있어야 된다. 여기서 위치를 결정하기 위해 2가지 종류의 노드가 존재할 수 있다. 하나는 앵커 노드이며, 또 다른 하나는 앵커 노드는 아니지만 이미 위치를 알고 있는 노드이다. 즉 위치가 결정되지 않은 노드는 자신의 위치를 알고 있는 인접한 노드가 3개 이상이면 위치를 결정할 수 있다. 최소 비용 위치 결정 문제에서 앵커 노드를 결정함에 있어 앵커 노드들 중에 이 노드에 인접한 앵커 노드이거나 위치가 미리 결정된 노드가 3개 이상이면 앵커 노드에서 제외하고 위치가 결정된 노드로 변경한다[11]. 따라서 본 논문에서 사용되는 노드는 앵커 노드, 위치가 결정된 비앵커노드, 위치가 결정되지 않은 비앵커 노드로 구분된다.

본 논문의 목적함수는 수중 센서 네트워크에서 앵커 노드의 수를 최소화하는 것이다. 따라서 제안된 네트워크 모델에서 앵커 노드의 수를 최소화하기 위한 문제는 다음과 같은 목적함수를 최소화하는 조합 최적화 문제로 정식화할 수 있다.

최소화

$$\|A\| = \sum_{i=1}^N s(i) \quad (1)$$

관하여

$$s(i) = \begin{cases} 1, & \text{if } i = anchor \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \text{ for } i = 1, \dots, N \quad (2)$$

식 (1)은 전체 노드의 수가  $N$ 개일 때, 앵커 노드의 수를 최소화하는 목적함수를 나타낸다. 식 (2)는 노드  $i$ 가 앵커 노드일 경우에는 1을 돌려주고, 그렇지 않을 경우 0을 돌려주는 함수를 나타낸다.

### IV. 제안된 타부 서치 알고리즘

본 논문에서 제안된 문제에 대한 타부서치 알고리즘은 다음과 같은 순서로 진행된다.

단계 1. 해(solution)의 인코딩 설계

단계 2. 하나의 초기 해 생성

단계 3. 인접해 생성

3-1. 이동(Movement)

3-2. 가장 우수한 하나의 해 선택

3-3. 타부리스트 갱신

단계 4. 정지 기준을 만날 때까지 단계 3을 반복

인코딩 설계에 따라 알고리즘의 성능은 달라지기 때문에 최적의 해를 찾기 위해 적절한 해에 대한 인코딩을 설계한다. 해에 대한 인코딩이 설계되면 제약식을 만족하는 하나의 초기해를 랜덤하게 생성한다. 초기해는 타부리스트라고 불리는 메모리 리스트에 저장되고 임시 최적값으로 일단 저장된다. 초기해에 대하여 제안된 이동 방법에 의하여 인접해를 생성한다. 생성된 인접해 중에 타부리스트에 저장되어있지 않은 해 중에 가장 우수한 해를 선택하여 타부리스트에 저장하고 임시 최적해와 비교한다. 비교된 결과에서 새로운 해가 임시 최적해보다 더 좋은 해일 경우 이 해를 임시 최적해로 바꾸고 임시 최적해를 이용하여 다음 단계의 인접해 생성을 위해 사용한다. 만약 임시 최적해보다 결과가 좋지 않을 경우에는 그 해를 임시 최적해로 저장하지 않고 다음 단계의 인접해 생성을 위해 사용한다. 이러한 방식으로 정지 기준을 만날 때까지 인접해 생성 과정을 반복하여 최적해를 찾아낸다.

#### 4.1. 해 인코딩

제안된 알고리즘에서는 앵커 노드들의 좌표에 대한

집합을 해의 인코딩으로 사용한다. 본 논문에서는 해의 인코딩을 위해 모든 노드의 위치는 랜덤하게 미리 결정하고, 인접해 생성방식에 따라 앵커 노드는 변경된다. 그림 1은 앵커 노드의 좌표로 구성된 해의 인코딩을 나타낸 것이다.

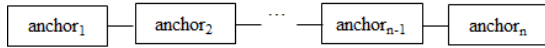


Fig. 1 Solution encoding

4.2. 초기해 생성

제안된 해 인코딩 방식을 이용하여 타부 서치 알고리즘에 적용할 초기해를 생성한다. 초기해 생성은 다음과 같이 이루어진다.

- 단계 1. 모든 노드를 false 상태로 둔다.
- 단계 2. 1번 노드부터 차례로 인접 노드의 수를 검사한다. 노드의 상태가 false 상태에서 인접 앵커 노드의 수( $r(s_i)$ )가 2이하이면 앵커로 설정하고 1번 노드의 상태를 true로 놓는다. 만약 인접 노드의 수가 3이상이면 인접 노드 중 3개를 랜덤하게 선택하여 앵커로 설정하고, 1번 노드와 앵커로 설정된 인접 노드의 상태를 true로 놓는다.
- 단계 3. 모든 노드의 상태가 true가 될 때까지 진행한다.
- 단계 4. 앵커 노드 중 인접한 노드가 앵커 노드이거나 위치가 결정된 비앵커 노드의 수가 3 이상인 노드는 위치가 결정된 비앵커 노드로 변경한다.

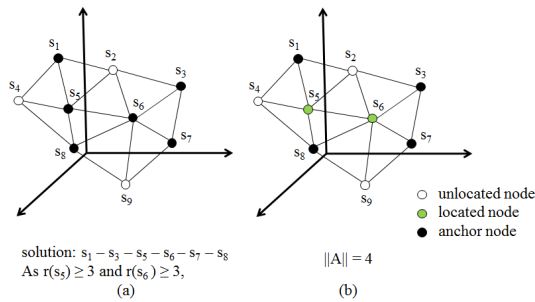


Fig. 2 Initialization

그림 2는 초기화 동작을 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 최초 앵커 노드를 결정한 상태를 나타내며, 그림 2(b)는 앵커 노드들 중 위치가 결정된 비앵커 노드를 결정하는 그림이다. 제안된 타부 서치 알고리즘에서 사용되는 현재해는 앵커 노드와 위치가 결정된 비앵커 노드를 포함

한다. 이것은 다음 단계인 인접해 생성과정에서 불가능해(infeasible solution)를 줄이기 위한 방법이다. 따라서 현재해는 그림 2(b)에 나타난 해를 이용하여 인접해를 생성한다.

4.3. 인접해 생성

타부 서치에서 가장 중요한 단계는 현재해에서 새로운 해를 생성하기 위해 인접해로 이동하는 방법을 정의하는 것이다. 제안된 타부 서치 알고리즘의 이동방법은 현재해의 모든 요소에 대하여 순차적으로 적용된다. 제안된 타부 서치 알고리즘에서는 두 가지의 이동방식을 사용한다. 첫 번째 방식은 현재 앵커 노드를 인접한 센서 노드로 앵커를 바꾸는 교환 이동이고, 다른 한 가지 방식은 현재 앵커 노드를 삭제하는 삭제 이동이다. 먼저 교환 이동은 현재 앵커 노드가 인접한 노드 중 앵커가 아닌 노드로 교환하는 것이다. 그림 3은 교환 이동을 나타낸 것으로 그림 2에서 초기화된 해에서  $s_1$ 을 인접 노드인  $s_2$ 로 교환한 예이다. 이 경우에는  $s_1$ 과  $s_4$ 가 위치 결정을 할 수가 없다. 따라서 제안된 알고리즘에서는 이러한 경우에는 복구 함수를 수행한다. 복구 함수는 위치 결정이 되지 않는 노드가 발생할 경우 이 노드들에 대해서만 다시 초기화 과정을 적용하여 위치가 결정될 수 있도록 만드는 과정이다. 그림 3(a)에서  $s_1$ 이나  $s_4$  중 하나만 앵커가 되어도 두 노드는 위치 결정을 할 수 있다. 따라서 랜덤으로 하나를 선택하여 모든 노드가 위치를 결정할 수 있도록 만든다. 그림에서  $s_1$ 을 앵커로 선택하고 그림 3(b)처럼 앵커 노드들에 대해서 인접 노드를 검사하여 위치가 결정된 비앵커 노드로 변경한다. 두 번째로 삭제이동은 현재 앵커 노드를 삭제하는 것이다.

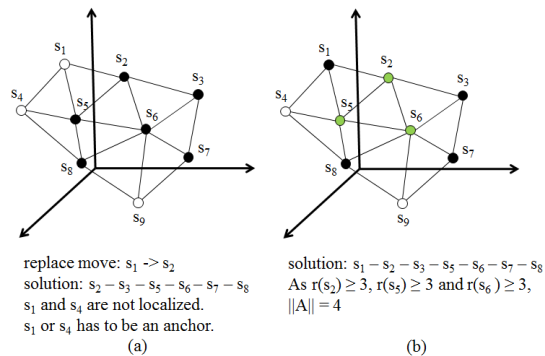


Fig. 3 Replace move

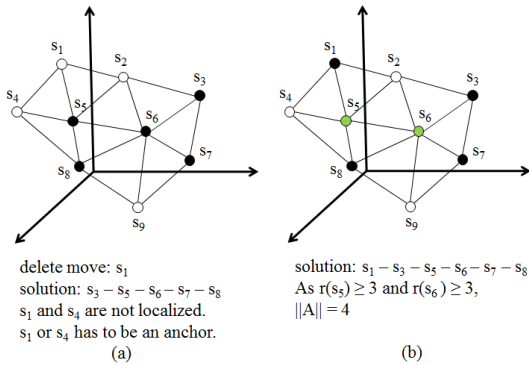


Fig. 4 Delete move

그림 4는 삭제 이동을 나타낸 것으로 그림 2에서 초기화된 해에서  $s_1$ 을 삭제한 예이다. 이 경우에도  $s_1$ 과  $s_4$ 가 위치 결정을 할 수가 없다. 따라서 복귀 함수를 적용하여 위치가 결정될 수 있도록 만든다. 그림 4(a)에서  $s_1$ 이나  $s_4$  중  $s_1$ 을 앵커로 선택하고 그림 4(b)처럼 앵커 노드들에 대해서 인접 노드를 검사하여 위치가 결정된 비앵커 노드로 변경한다.

#### 4.4. 타부리스트

타부리스트는 반복되는 해를 방지하고 탐색되지 않은 수많은 해의 영역을 검색할 수 있도록 해 주는 메커니즘 중 하나이다. 특히 동적 크기의 타부리스트는 NP-hard 문제에 대하여 더 좋은 결과의 해를 검색하는데 중요한 역할을 한다[12]. 제안된 알고리즘에서는  $N$ 개의 센서 노드에 대하여 타부리스트의 크기를 매 20번 주기마다  $N/10$ 과  $N/5$ 사이의 값으로 변화시킨다. 이 값은 실험적으로 가장 적절한 값으로 선택되었다. 타부리스트가 가득 찰 경우, 가장 오래된 해를 삭제하고 새로운 해를 추가한다.

#### 4.5. 정지 기준

제안된 타부 서치 알고리즘의 정지 기준은 미리 정해진 진행 횟수에 의해 결정된다. 즉 현재해에 대하여 제안된 이동방식을 진행한 후 새로운 임시 최적해가 연속적으로 발생되지 않는 횟수가 정해진 횟수만큼 진행되면 제안된 알고리즘은 멈춘다.

## V. 성능평가

본 논문에서는 수중 센서 네트워크에서의 최소 비용 위치 결정 문제에 대한 제안된 타부 서치 알고리즘의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 평가하였다. 모든 실험은 Windows OS 기반의 4GB 메모리와 2.67GHz Intel processor로 구성된 PC상에서 수행되었으며, 각 알고리즘은 C++ 언어를 이용하여 구현되었다. 제안된 알고리즘의 성능을 비교평가하기 위해 앵커 노드의 수와 알고리즘 실행시간 관점에서 기존에 제안된 탐욕 알고리즘(greedy algorithm)[2]과 유전 알고리즘(genetic algorithm)[4]을 제안된 타부 서치 알고리즘과 비교하였다. 성능평가를 위해 노드의 전송범위(m)는 20, 25, 30으로 정하고, 다양한 노드 밀도를 가진 네트워크 구성을 위해 노드의 개수는 100에서 1000까지로 구성하였다. 네트워크의 크기는  $100 \times 100m^2$ 로 설정하여 노드를 랜덤하게 배치하였다. 각 알고리즘은 10번씩 시도하여 평균값으로 결과로 나타내었다.

그림 5는 노드의 전송 반경이 20, 25, 30일 때 노드의 수가 변화에 따라 최소의 앵커 노드의 수를 비교한 것이다. 그림에서 제안된 알고리즘이 기존의 유전 알고리즘과 탐욕 알고리즘에 비해 성능이 5-10% 우수함을 볼 수 있다. 같은 유형의 메타 휴리스틱 알고리즘인 유전 알고리즘도 탐욕 알고리즘에 비해 성능이 우수함을 볼 수 있다. 이것은 일반적으로 NP-hard 문제에서 메타 휴리스틱 방식이 일반적인 탐욕 알고리즘보다 성능이 우수함을 나타내는 것이다. 또한 같은 메타 휴리스틱 방식인 유전 알고리즘보다 제안된 타부 서치 알고리즘이 성능이 우수한 이유는 기존의 검색 방식은 지역 최적해에 빨리 수렴한 반면에 제안된 알고리즘은 보다 향상된 결과를 가진 해에서 수렴하기 때문이다. 즉, 제안된 타부 서치 알고리즘의 이웃해 생성방식인 교환 이동과 삭제 이동이 효과적으로 동작하고 있음을 나타낸다.

그림 6은 그림 5에서와 같은 조건에서 알고리즘의 평균 실행시간을 비교한 것이다. 메타 휴리스틱 방식인 타부 서치와 유전 알고리즘은 실행시간이 탐욕 알고리즘에 비해 많이 소모됨을 알 수 있다. 특히 노드의 수가 커짐에 따라 이웃해 생성을 하지 않는 탐욕 알고리즘이 가장 빠르고 제안된 타부 서치 알고리즘이 유전 알고리즘보다 실행속도가 빠름을 알 수 있다. 유전 알고리즘은 노드의 수가 증가함에 따라 같은 비율로 교배와 돌

연변이 동작을 수행하지만 제안된 타부 서치는 교환 이동과 삭제 이동에 의한 이웃해 생성방식으로 해에 빠르게 접근함으로써 실행시간을 줄이고 있다. 결론적으로 성능평가 결과에서 제안된 알고리즘이 NP-hard 문제인 최소 비용 위치 결정 문제를 적정한 실행시간 내에 좋은 결과를 얻을 수 있으며 최소 비용 위치 결정 문제를 효과적으로 해결할 수 있음을 알 수 있었다.

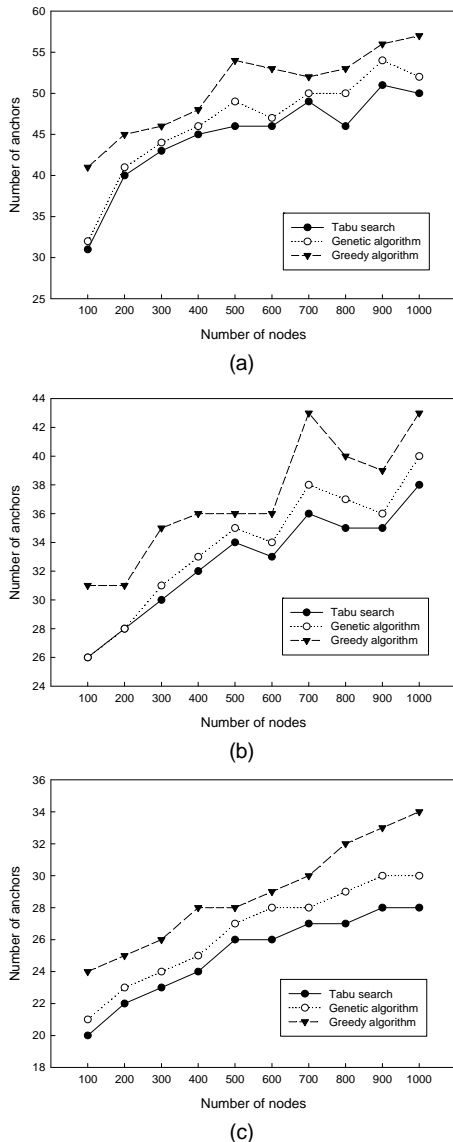


Fig. 5 Number of anchor nodes (a)  $r = 20$  (b)  $r = 25$  (c)  $r = 30$

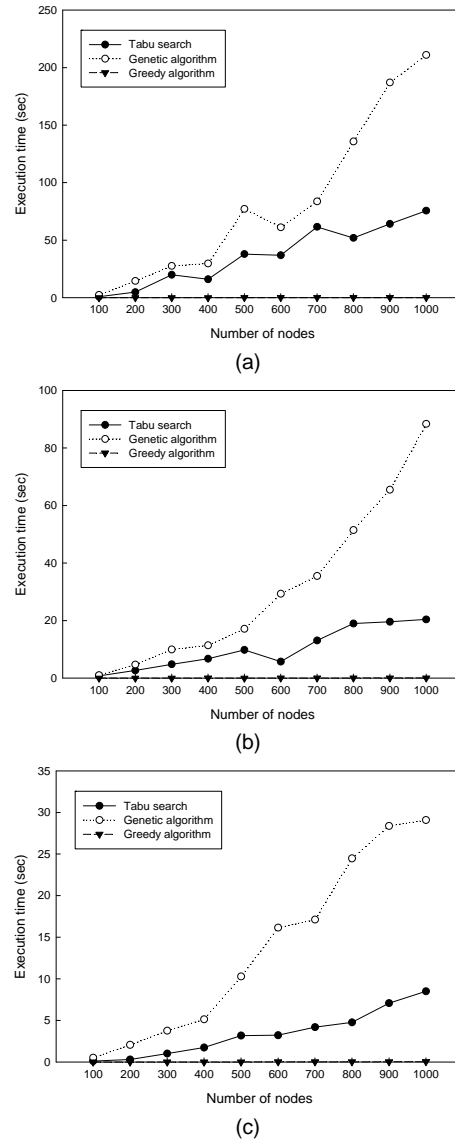


Fig. 6 Average execution time (a)  $r = 20$  (b)  $r = 25$  (c)  $r = 30$

## VI. 결론

본 논문은 수중 센서 네트워크에서 모든 노드의 위치를 결정하기 위해 필요한 앵커 노드의 수를 최소화하는 최소 비용 위치 결정 문제의 타부 서치 알고리즘을 제안하였다. 효과적인 알고리즘을 설계하기 위해 최소 비

용 위치 결정 문제에 적합한 인코딩과 초기해 생성, 인접해 검색을 위한 두 가지의 이웃해 생성방식을 제안하였다. 제안된 알고리즘을 평가하기 위해 앵커 노드의 수와 알고리즘 실행시간 관점에서 기존의 방식과 비교 평가하였다.

비교결과에서 제안된 알고리즘이 기존의 방식보다 더 우수함을 볼 수 있었으며, 또한 수중 센서 네트워크에서 최소 비용 위치 결정 문제를 효과적으로 해결할 수 있음을 볼 수 있었다. 또한 제안된 알고리즘은 중앙 집중식 방식으로 동작이 되므로 이를 제어하기 위해 수중 센서 네트워크를 관리하는 기지국에서 제안된 알고리즘을 이용하여 위치를 결정할 수 있다.

## REFERENCES

- [ 1 ] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393-422, 2002.
- [ 2 ] M. Huang, I. Chen, and Y. Wang, "Minimum cost localization problem in wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 9, no. 3, pp. 387-399, May 2011.
- [ 3 ] M. Erol-Kantarci, H. Moutfah, and S. Oktug, "A survey of architectures and localization techniques for underwater acoustic sensor networks," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 13, no. 3, pp. 487-502, 2011.
- [ 4 ] A. F. Assis, L. M. Veeira, M. R. Rodrigues, and G. L. Pappa, "A genetic algorithm for the minimum cost localization problem in wireless sensor networks," in *Proceeding of IEEE Congress on Evolutionary Computation*, pp. 797-804, 2013.
- [ 5 ] D. K. Goldenberg, P. Bihler, M. Cao, J. Fang, B. D. O. Anderson, A. Stephen Morse, and Y. Richard Yang, "Localization in sparse networks using sweeps," in *Proceeding of ACM MobiCom*, 2006.
- [ 6 ] Z. Yang, Y. Liu, and X. Y. Li, "Beyond trilateration: On the localizability of wireless ad-hoc networks," in *Proceeding of IEEE INFOCOM*, 2009.
- [ 7 ] J. Aspnes, T. Eren, D. K. Goldenberg, A. S. Morse, W. Whiteley, Y. R. Yang, B. D. O. Anderson, and P. N. Belhumeur, "A theory of network localization," *IEEE Transaction Mobile Computer*, vol. 5, no. 12, pp. 1663-1678, 2006.
- [ 8 ] F. Glover, "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence," *Computers and Op. Res.*, vol. 5, pp. 533-549, 1986.
- [ 9 ] C. H. Wu, W. Sheng, and Y. Zhang, "Mobile sensor networks self localization based on multi-dimensional scaling," in *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4038-4043, April 2007.
- [ 10 ] M. Azim, Z. Aung, W. Xiao, and V. Khadkikar, "Localization in wireless sensor networks by cross entropy method," in *Proceeding of International Conference on Ad Hoc Networks*, pp. 103-118, 2012.
- [ 11 ] A. Savvides, H. Park, and M. B. Srivastava, "The bits and flops of the n-hop multilateration primitive for node localization problems," in *Proceeding of ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks & Applications*, 2002.
- [ 12 ] S. Kultuel-Konak, A. E. Norman, and D. W. Coit, "Efficiently solving the redundancy allocation problem using Tabu search," *IIE Transactions*, vol. 35, pp. 515-526, 2003.



장길웅(Kil-woong Jang)

1997년 2월 : 경북대학교 컴퓨터공학과 학사  
 1999년 2월 : 경북대학교 컴퓨터공학과 석사  
 2002년 8월 : 경북대학교 컴퓨터공학과 박사  
 2003년 3월 ~ 현재 : 한국해양대학교 데이터정보학과 교수  
 ※ 관심분야 : 네트워크 프로토콜, 네트워크 최적화