

## 무선 센서 네트워크에서 부하 균형 연결 지배 집합을 구성하기 위한 타부서치 알고리즘

장길웅\*

### Tabu Search Algorithm for Constructing Load-balanced Connected Dominating Sets in Wireless Sensor Networks

Kil-Woong Jang\*

\*Professor, Division of Electronics Electrical and Information, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112 Korea

#### 요 약

무선 센서 네트워크는 효과적인 라우팅과 브로드캐스팅을 위하여 가상 백본을 구성할 수 있는 연결 지배 집합 개념을 사용한다. 본 논문에서는 노드의 부하를 균형있게 분산하여 네트워크 수명을 늘리고 효과적인 라우팅을 수행하기 위하여 연결 지배 집합을 구성하는 최적화 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안한 최적화 알고리즘은 메타휴리스틱방식인 타부 서치 알고리즘을 사용하였으며, 구성되는 연결 지배 집합에서 각 지배자에 피지배자의 수를 균형있게 배치되도록 설계하였다. 제안된 알고리즘으로 부하 균형 연결 지배 집합을 구축함으로써 지배자의 부하를 균형있게 분산시킴으로써 네트워크 수명을 연장할 수 있게 하였다. 제안된 타부서치 알고리즘의 성능평가는 무선 센서 네트워크상에서 부하 균형과 관련된 항목들을 평가하였으며, 성능평가 결과에서 기존에 제안된 방식보다 우수한 성능을 확인할 수 있었다.

#### ABSTRACT

Wireless sensor networks use the concept of connected dominating sets that can form virtual backbones for effective routing and broadcasting. In this paper, we propose an optimization algorithm that configures a connected dominating sets in order to balance the load of nodes to increase network lifetime and to perform effective routing. The proposed optimization algorithm in this paper uses the metaheuristic method of tabu search algorithm, and is designed to balance the number of dominatees in each dominator in the constituted linked dominance set. By constructing load-balanced connected dominating sets with the proposed algorithm, it is possible to extend the network lifetime by balancing the load of the dominators. The performance of the proposed tabu search algorithm was evaluated the items related to load balancing on the wireless sensor network, and it was confirmed in the performance evaluation result that the performance was superior to the previously proposed method.

**키워드** : 무선 센서 네트워크, 부하 균형, 연결 지배 집합, 타부서치

**Key word** : Wireless sensor networks, load balancing, connected dominating sets, tabu search

Received 28 February 2022, Revised 13 March 2022, Accepted 29 March 2022

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

Professor, Division of Electronics Electrical and Information, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2022.26.4.571>

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

무선 센서 네트워크는 사람이 직접 제어하기 힘든 환경에서 주변을 감시 및 데이터를 제어하기 위해 사용된다. 따라서 무선 센서 네트워크는 전장 감시, 의료, 환경 및 서식지 감시, 교통 통제와 같은 많은 군사 또는 민간 애플리케이션에서 널리 사용되고 있다[1]. 무선 센서 네트워크는 물리적인 백본 인프라가 구축되어 있지 않기 때문에 플러딩 방식을 사용하는 무선 센서 네트워크의 라우팅 프로토콜은 심각한 브로드캐스팅 폭풍(broadcasting storm)을 일으키게 된다. 무선 센서 네트워크에서 연결 지배 집합(connected dominating set: CDS)은 브로드캐스팅 폭풍을 완화하여 네트워크 성능을 개선하고, 라우팅 프로토콜의 효율성을 높이기 위한 가상 백본(virtual backbone)을 구성하는 접근 방식으로 사용된다[2].

지배 집합(dominating set)은 네트워크의 노드가 하나의 집합에 소속되거나 그 집합에 소속된 노드들에 인접한 노드들의 하위 집합으로 정의된다. 지배 집합의 노드에 의해 만들어진 그래프가 연결되면 이 지배 집합을 연결 지배 집합이라고 한다. 연결 지배 집합 내의 노드를 지배자(dominator)라고 하며, 그렇지 않으면 피지배자(dominatee)라고 한다. 연결 지배 집합을 가상 백본으로 사용하는 무선 센서 네트워크에서 지배자는 데이터를 이웃하는 지배자에게만 전달할 수 있다. 연결 지배 집합을 이용함으로써 무선 센서 네트워크는 평균 메시지 전송 부담을 줄일 수 있으며, 라우팅 처리가 쉬워짐으로써 네트워크 토폴로지의 변화에 빠르게 적응할 수 있다는 장점을 가진다[3, 4]. 또한 지배자를 전달 노드로 사용하면 에너지 소비를 효율적으로 줄일 수 있으며, 라우팅 프로토콜 외에도 연결 지배 집합은 토폴로지 제어, 적용 범위, 데이터 수집 및 데이터 집계 등 무선 센서 네트워크에서 다양한 분야에 적용된다. 연결 지배 집합은 연결 지배 집합의 노드 수를 더 작게 만듦으로써 장점을 확대할 수 있다. 일반적으로 연결 지배 집합이 작을수록 통신 및 스토리지 오버헤드가 적게 발생한다. 따라서 최소 크기 연결 지배 집합(minimum-sized connected dominating set)을 구축하는 것이 네트워크 성능을 높이는 데 중요한 역할을 할 수 있으며, 이전 연구에서도 최소 크기 연결 지배 집합 문제를 해결하기 위한 알고리즘이 제안되었다[5]. 하지만 이전 연구에서는 연결 지배 집합을 구성할 때 노드에 걸리는 부하의 균형 요소는 고려하지 않

았다. 연결 지배 집합의 각 지배자 대한 부하가 균형을 이루지 않으면 부하가 많이 걸리는 지배자는 에너지를 빠르게 소모하게 된다. 그렇게 되면 특정 노드의 소실로 인해 전체 네트워크의 연결이 끊어질 수 있다. 따라서 직관적으로 최소 크기 연결 지배 집합을 구축함과 동시에 부하 균형 연결 지배 집합(load-balanced connected dominating set: LBCDS) 구축을 고려해야 한다.

네트워크에서 부하 균형 연결 지배 집합 문제는 NP-hard 문제로 알려져 있다[2]. 부하 균형 연결 지배 집합의 작업 부하 불균형 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 부하 균형 연결 지배 집합을 구성하는 방법과 동시에 피지배자를 지배자에게 부하 균형적으로 할당하는 방법을 제안한다. 부하 균형 연결 지배 집합 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 타부서치(tabu search)를 이용한 최적화 알고리즘을 제안한다. 타부서치[6]는 지역 탐색 기법에 속하는 수학적 최적화 방법으로 메모리 구조를 사용하여 로컬 검색 방법의 성능을 향상시킨다. 최초 랜덤한 하나의 해로부터 인접한 해를 검색하여 최적에 가까운 해에 접근하는 방식이다. 제안된 타부서치 알고리즘은 무선 센서 네트워크에서 지배자의 부하를 균형 있게 분산 할당함으로써 네트워크 수명을 연장할 수 있게 한다. 이에 대한 성능평가는 다양한 조건에서 부하 균형과 관련된 항목 관점에서 기존의 알고리즘과 성능을 비교한다.

## II. 관련 연구

He *et al.*[7]은 메타휴리스틱 알고리즘인 유전 알고리즘을 사용하여 부하 균형 연결 지배 집합을 구축하는 방식을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 연결 지배 집합을 구축하는 동안 부하 균형을 잡는 방식으로 지배자에게 피지배자를 할당하는 방식을 사용하였다. Tran *et al.*[8]은 이동 애드혹 네트워크에서 노드의 이동에 따른 토폴로지 제어를 효율적으로 처리할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 패킷 지연률, 제어 오버헤드, 에너지 소비를 높일 수 있는 동적 채널 선택을 사용하여 효율적인 연결 지배 집합 클러스터링 기반 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 제안된 프로토콜은 다중 채널 인지 무선 접근 방식에서 클러스터링 및 라우팅 단계로 구성되도록 제안되었다. Fu *et al.*[9]은 무선 네트워크에서 최

소 크기 연결 지배 집합을 구축하기 위한 중앙 집중식 그리디 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 중복 연결 지배 집합 개념을 적용하였으며, 노드의 상태를 3가지로 구분하여 적용하였다. 상태에 따라 노드의 역할을 구분하였으며, 시간 복잡도를 줄이는데 중점을 두었다. Bai *et al.*[10]는 3차원 형태의 무선 애드혹 네트워크에서 최소 크기 연결 지배 집합을 해결하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 2단계로 구성되었으며, 첫 번째 단계는 최대 독립 집합을 구성하고, 두 번째 단계는 각 집합에 있는 노드들을 연결하는 단계이다. 3차원 형태의 네트워크에서 각 노드의 전송 범위가 다른 형태로 이루어진 상태에서 알고리즘을 제안하였다.

### III. 문제 정식화

이번 장에서는 무선 센서 네트워크에서 부하 균형 연결 지배 집합을 구성하는 문제에 대하여 네트워크 모델과 문제에 따른 가정과 정의를 기술한다. 본 논문에서는 부하 균형 연결 지배 집합 문제를 정식화하기 위해 다음과 같은 기호를 사용한다.

$V$	set of nodes
$E$	set of links
$n$	the number of nodes
$m$	the number of dominators
$\delta_i$	the degree of dominator $i$
$\omega$	the mean degree of graph
$\pi_i$	the valid degree of dominator $i$
$\epsilon$	the expected allocated dominatees of each dominator := $(n - m) / m$
$r$	the maximum transmission range of nodes

무선 센서 네트워크에서 부하 균형 연결 지배 집합 문제를 최적화하기 위한 네트워크 모델은 다음과 같다. 본 논문에서 사용된 네트워크 모델은 비방향성 그래프  $G=(V, E)$ 로 나타낼 수 있으며,  $V$ 는  $n$ 개의 노드를 가진 집합을 나타내며,  $E$ 는 노드 간의 연결을 나타내는 링크 집합을 의미한다. 링크  $(u, v)$ 는 노드  $u$ 와  $v$  사이의 링크를 나타낸다. 본 논문에서는 네트워크에서 모든 노드는 고정된 위치에 있으며, 모두 같은 전송 범위를 가진다고

가정한다.

제안된 타부서치 알고리즘은 무선 센서 네트워크에서 노드의 부하를 균형 있게 분산하기 위한 최적화 방안을 제시한다. 본 논문에서는 연결 지배 집합에서 부하 균형을 측정하는 방법으로  $p$ -norm을 사용한다.  $p$ -norm의 정의는 다음과 같다.

정의 1: 벡터  $X=(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 의  $p$ -norm은

$$\|X\|_p = \left(\sum_{i=1}^m |x_i|^p\right)^{1/p}, \quad p \geq 1 \text{인 실수} \quad (1)$$

$p$ -norm은  $p$ 의 값에 따라 다양한 속성을 나타낸다.  $p$ 가 1에 가까우면 정보 경로는 소스에서 싱크까지의 기하학적 최단 경로와 유사하며,  $p=2$ 의 경우 정보 경로는 노드 간의 부하 균형을 측정하는 데 사용할 수 있는 속성을 가진다. 따라서  $p$ -norm 값이 작을수록 벡터  $X$ 가 더 많은 부하 균형을 이룬다고 알려져 있다. 부하 균형을 측정하기 위해 식 (1)에서 특정 벡터  $X$ 는  $\delta$ 로 표시된 노드 차수를 사용한다. 각 노드의 차수는 트래픽 부하의 잠재적 지표이기 때문이다. 따라서 연결 지배 집합에서의 부하 균형을 측정하기 위한  $p$ -norm인  $\|C\|_p$ 의 정의는 다음과 같다.

정의 2:  $G=(V, E)$ 와 CDS인 집합  $C = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 로 구성된 무선 센서 네트워크에서 벡터  $D = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m)$ 의  $p$ -norm은

$$\|C\|_p = \left(\sum_{i=1}^m |\delta_i - \omega|^p\right)^{1/p} \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 지배자의 수를 나타내며,  $d_i$ 와  $\omega$ 는 각 지배자의 노드 차수와 그래프 전체의 평균 차수를 각각 나타낸다. 또한 서로 다른 피지배자의 균형 부하 분산을 측정하기 위해 각 지배자의 유효한 차수를 측정한다. 연결 지배 집합에서 각 지배자의 유효한 차수를 나타내는  $p$ -norm인  $\|D\|_p$ 는 다음과 같이 정의한다.

정의 3:  $G=(V, E)$ 와 CDS인 집합  $C = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ , 지배자에 할당된 피지배자의 집합  $D = \{D(v_i) | \forall v_i \in C, 1 \leq i \leq m\}$ 로 구성된 무선 센서 네트워크에서 각 지배자의 차수를 나타내는 벡터의  $p$ -norm은

$$\|D\|_p = \left(\sum_{i=1}^m |\pi_i - \epsilon|^p\right)^{1/p} \quad (3)$$

여기서  $\pi$ 는 각 지배자에 의해 전송을 받는 피지배자

의 수를 나타내고,  $\varepsilon = (n - m) / m$ 는 각 지배자의 예상 할당 피지배자 수를 나타낸다.

주어진 네트워크 모델에서 부하 균형 연결 지배 집합 문제를 최적화하기 위하여 앞서 정의한  $\|C\|_p$ 와  $\|D\|_p$ 를 최소화하고, 최소 크기 연결 지배 집합을 구성하기 위해 지배자 수  $m$ 을 최소로 하는 목적함수를 만들 수 있다. 따라서 무선 센서 네트워크에서 부하 균형을 이루는 연결 지배 집합 문제는 다음과 같은 목적함수를 최대화하는 조합 최적화 문제로 정식화할 수 있다.

max

$$V_\alpha = \frac{n - m}{\alpha \|C\|_p + \beta \|D\|_p} \quad (4)$$

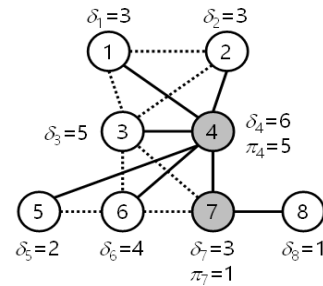
관하여

$$\alpha + \beta = 1, \quad 0 < \alpha, \beta < 1 \quad (5)$$

식 (4)는 무선 센서 네트워크에서 부하 균형 연결 지배 집합 문제를 최대화하는 목적함수를 나타낸다. 분자에 있는  $\|C\|_p$ 와  $\|D\|_p$ 의 값은 작은 값을 가질수록 부하 균형이 잘 이루어진 상태가 되며, 분모에 있는  $m$  값이 작을수록 최소 연결 지배 집합을 형성하므로 목적함수는 최대값을 나타낼 때 부하 균형이 최대인 네트워크를 형성하게 된다.

앞서 정의한 내용을 바탕으로 무선 센서 네트워크에서 부하 균형 연결 지배 집합을 구성하는 문제에 관하여 자세히 기술한다. 부하 균형 연결 지배 집합에 대한 예는 그림 1과 같다. 여기서 지배자는 회색 노드로 표시되고 흰색 노드는 피지배자를 나타낸다. 실선은 피지배자가 인접 지배자에 할당되었음을 나타내고 점선은 원래 네트워크 토폴로지 그래프의 통신 링크를 나타낸다. 그림 1(a)는 8개의 노드 중에 노드 4와 7이 지배자로 선정된 최소 크기 연결 지배 집합을 구성한 형태이다. 이 형태에서는 노드 4는 노드 1, 2, 3, 5, 6을 피지배자로 가지고, 노드 7은 노드 8을 피지배자로 가진다. 따라서 노드 4는 다른 노드에 비해 집중적으로 트래픽이 전송될 수 있으며, 그에 따라 에너지 소모가 많아질 수 있다. 앞서 정의한 방식에 따라 계산하면  $\|C\|_2 = 2.65$ ,  $\|D\|_2 = 2$ 를 가지며 가중치를 달리 했을 때의 목적함수  $V$ 값을 확인할 수 있다. 그림 1(b)는 부하 균형을 높이기 위해 지배자의 수를 다르게 선택한 형태이다. 지배자로 노드 3, 6, 7이 선택되었으며, 노드 3의 피지배자는 노드 1, 2, 4로 3개가 선택되었다. 또한, 노드 6의 피지배자는 노드 5, 노드

7의 피지배자는 노드 8로서 각각 1개의 피지배자가 선택되었다. 지배자의 수는 이전보다 1개 증가하여 최소 크기 연결 지배 집합을 이루지는 못하지만, 특정 노드에 쏠리는 트래픽 부하를 해소할 수 있다. 이 네트워크 형태에서 나타나는  $p$ -norm은  $\|C\|_2 = 1.78$ ,  $\|D\|_2 = 1.63$ 으로 그림 1(a)보다 낮은 값을 가지며,  $V$ 값도 더 높은 값을 가진다. 이는 부하 균형이 이전보다 잘 이루어짐으로 나타내는 것이다. 그림 1(c)는 그림 1(b)와 같은 지배자가 선택되었지만, 지배자에 대한 피지배자를 변경한 상태이다. 즉 노드 3의 피지배자는 노드 1, 2로 변경되고, 노드 6의 피지배자는 노드 4, 5로 변경되었다. 변경된 형태에서  $p$ -norm은  $\|C\|_2 = 1.78$ ,  $\|D\|_2 = 0.82$ 로 그림 1(b)보다 낮은 값을 가지며,  $V$ 값도 더 높은 값을 가진다. 따라서 같은 노드를 지배자로 선택하더라도 피지배자를 어떻게 배치하느냐에 따라 부하 균형은 다르게 나타날 수 있다는 것을 알 수 있다.

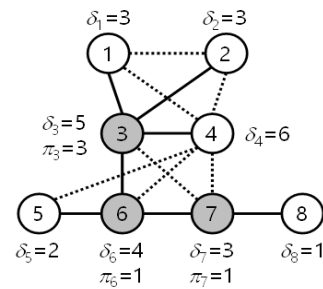


$$\|C\|_2 = \sqrt{(6 - 27/8)^2 + (3 - 27/8)^2} = 2.65$$

$$\|D\|_2 = \sqrt{(5 - 3)^2 + (3 - 3)^2} = 2$$

$$V_{0.5} = (8 - 2) / (0.5 \times 2.65 + 0.5 \times 2) = 2.58$$

(a)

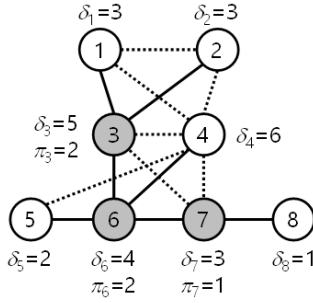


$$\|C\|_2 = \sqrt{(5 - 27/8)^2 + (4 - 27/8)^2 + (3 - 27/8)^2} = 1.78$$

$$\|D\|_2 = \sqrt{(3 - 5/3)^2 + (1 - 5/3)^2 + (1 - 5/3)^2} = 1.63$$

$$V_{0.5} = (8 - 3) / (0.5 \times 1.78 + 0.5 \times 1.63) = 2.93$$

(b)



$$\|C\|_2 = \sqrt{(5 - 27/8)^2 + (4 - 27/8)^2 + (3 - 27/8)^2} = 1.78$$

$$\|D\|_2 = \sqrt{(2 - 5/3)^2 + (1 - 5/3)^2 + (2 - 5/3)^2} = 0.82$$

$$V_{0.5} = (8 - 3) / (0.5 \times 1.78 + 0.5 \times 0.82) = 3.85$$

(c)

Fig. 1 Examples of LBCDS

#### IV. 제안된 타부서치 알고리즘

본 장에서는 부하 균형을 위한 연결 지배 집합을 구성하기 위한 타부서치 알고리즘을 기술한다. 아래 알고리즘은 제안된 타부서치 알고리즘을 의사코드로 나타낸 것이다.

**Algorithm:** LBCDS\_TABU(G)

**Input:** G

**Output:**  $S_{best}$

conduct an initial solution( $S_0$ )

$S_{best} \leftarrow S_0$  // best solution:  $S_{best}$

$S_c \leftarrow S_0$  // current solution:  $S_c$

insert  $S_0$  in the Tabulist

**while**  $count < K_{max}$  **do** // maximum iteration:  $K_{max}$

$S_{add} \leftarrow addMove(S_c)$

$S_{del} \leftarrow deleteMove(S_c)$

$S_{rep} \leftarrow replaceMove(S_c)$

$S_b \leftarrow selBestSolution(S_{add}, S_{del}, S_{rep})$

**while** isTabulist( $S_b$ ) **do**

$S_b \leftarrow selNext(S_{add}, S_{del}, S_{rep})$

**end while**

**if** val( $S_{best}$ ) < val( $S_b$ ) **then**

$S_{best} \leftarrow S_b, count \leftarrow 0$

**else**

$count \leftarrow count + 1$

**end if**

insert  $S_b$  in the Tabulist

$S_c \leftarrow S_b$

**end while**

**return**  $S_{best}$

제안된 타부서치 알고리즘은 다음과 같다. 제안된 타부서치는 주어진 문제의 제약 조건에 따라 한 개의 초기해를 생성한다. 초기해는 제약 조건을 만족하는 상태에서 무작위로 지배자를 선택하는 방식으로 해를 생성한다. 최ছ 초기해는 임시최적해이면서 현재해로 저장한다. 또한 초기해를 타부리스트에 저장한다. 이웃해를 생성하기 위해 현재해를 이용하여 제안된 3가지 이웃해 생성방식에 의해 인접해를 생성한다. 여기서 생성된 인접해 중에서 가장 성능이 우수한 해를 선택하고, 그 해를 타부리스트에 저장된 해들과 비교한다. 비교 결과에서 선택된 가장 성능이 우수한 해가 타부리스트에 이미 저장되어 있다면 생성된 해 중에서 다음으로 성능이 우수한 해를 다시 선택한다. 이 절차를 반복하여 이전에 사용되지 않은 새로운 해가 나올 때까지 진행한다. 선택된 해는 임시최적해와 비교하여 성능이 우수할 경우 선택된 해를 임시최적해로 저장하고, 새로운 이웃해를 생성하기 위해 현재해로 저장한다. 제안된 타부서치 알고리즘은 이웃해 생성과 성능이 우수한 해 선택, 임시최적해의 비교를 반복한다. 이러한 동작으로 최적해에 가까운 해에 도달하며, 미리 정해진 종료 기준에 따라 알고리즘이 종료된다.

##### 4.1. 해의 인코딩

알고리즘을 수행하기 위해 문제의 조건과 입력에 따라 먼저 해의 인코딩을 설계한다. 부하 균형을 위한 연결 지배 집합을 구성하기 위한 타부서치 알고리즘의 해는 그림 2와 같은 구조를 가진다. 각 노드에 대하여 지배자로 선택된 경우에는 1로, 피지배자로 선택된 경우에는 0으로 설정한다. 또한, 지배자와 연결된 피지배자를 관리하기 위해 별도의 메모리를 사용하여 관리한다.

1	2	3	4	...	n
1	0	0	1	...	0

1: Dominator  
0: Dominatee

Fig. 2 Solution encoding

### 4.2. 초기해 생성

타부서치 알고리즘에서 가장 먼저 수행되는 절차는 앞서 기술한 해의 인코딩 구조를 사용하여 제약 조건에 맞게 초기해를 한 개 생성하는 것이다. 초기해 생성은 다음 절차에 따라 수행된다.

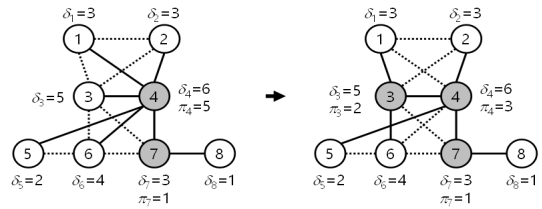
- (a) 모든 노드 중에서 무작위로 아직 결정되지 않은 노드를 지배자로 선택한다.
- (b) 선택된 지배자와 인접한 노드 중 아직 결정되지 않은 노드를 그 지배자의 피지배자로 저장한다.
- (c) 모든 노드가 지배자 또는 피지배자로 결정될 때까지 (a), (b)를 반복한다.

### 4.3. 이웃해 생성

앞서 기술된 방식으로 생성된 하나의 초기해를 이용하여 다양한 이웃해를 생성한다. 타부서치 알고리즘은 하나의 초기해를 이용하여 이웃해 생성방식을 사용하여 다양한 이웃해를 생성하고, 그 이웃해들 중에서 가장 우수한 해를 선택하여 다시 반복적으로 이웃해를 생성함으로써 최적해를 찾아낸다. 본 논문에서는 타부서치 알고리즘에서 사용되는 이웃해 생성방식을 3가지 제안하며, 본 논문에서는 제안된 이웃해 생성방식을 추가이동(add move)과 삭제이동(delete move), 교환이동(replace move)으로 칭한다.

먼저 추가이동은 현재의 상태에서 새로운 지배자를 추가하는 방식이다. 추가이동으로 지배자의 수는 증가하고, 각 지배자에 할당되는 피지배자를 분산시킨다. 그림 3은 추가이동을 나타낸 것이다. 이전해는 노드 4와 7이 지배자인 형태로 구성되어 있으며, 여기에 노드 3을 새로운 지배자로 추가하여 이웃해를 생성하였다. 이전해와 새로 생성된 이웃해를 비교했을 때 이웃해의  $\|C\|_2$ 의 값은 증가,  $\|D\|_2$ 의 값은 감소하였다. 또한 이웃해의 목적함수의 값은 이전해보다 감소했음을 알 수 있다. 이는 추가이동으로 인해 생성된 이웃해가 이전해보다 부하 균형이 감소되었음을 나타낸다. 이 예에서는 추가이동으로 부하 균형이 감소되었지만 최적해 도달을 위한

과정에서 필요한 이웃해 생성방식이 될 수 있다.



<이전해>

$$\|C\|_2 = \sqrt{(6 - 27/8)^2 + (3 - 27/8)^2} = 2.65$$

$$\|D\|_2 = \sqrt{(5 - 3)^2 + (3 - 3)^2} = 2$$

$$V_{0.5} = (8 - 2) / (0.5 \times 2.65 + 0.5 \times 2) = 2.58$$

<이웃해>

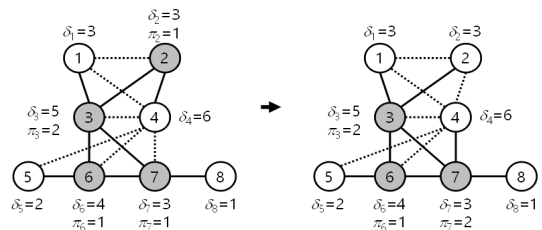
$$\|C\|_2 = \sqrt{(5 - 27/8)^2 + (6 - 27/8)^2 + (3 - 27/8)^2} = 3.11$$

$$\|D\|_2 = \sqrt{(2 - 5/3)^2 + (3 - 5/3)^2 + (1 - 5/3)^2} = 1.53$$

$$V_{0.5} = (8 - 3) / (0.5 \times 3.11 + 0.5 \times 1.53) = 2.16$$

Fig. 3 Add move

다음은 삭제이동으로 이전해에서 지배자로 지정된 노드를 삭제하여 피지배자로 바꾸는 방식이다. 삭제된 지배자에 할당된 피지배자는 인접한 지배자로 재배치된다. 그림 4는 삭제이동을 나타낸 것이다. 이전해는 노드 2, 3, 6, 7이 지배자인 형태에서, 노드 2를 피지배자로 변경하여 새로운 이웃해를 생성한다. 이때 이전해에 비해 이웃해의  $\|C\|_2$ 의 값은 감소하고  $\|D\|_2$ 의 값도 감소하였다. 또한 이웃해의 목적함수의 값은 이전해보다 증가하였음을 알 수 있다. 따라서 이 예에서 삭제이동을 수행함으로써 이전해보다 성능이 우수한 새로운 결과를 도출하였다.



<이전해>

$$\|C\|_2 = \sqrt{(3 - 27/8)^2 + (5 - 27/8)^2 + (4 - 27/8)^2 + (3 - 27/8)^2} = 1.82$$

$$\|D\|_2 = \sqrt{(1 - 1)^2 + (2 - 1)^2 + (1 - 1)^2 + (1 - 1)^2} = 1$$

$$V_{0.5} = (8 - 4) / (0.5 \times 1.82 + 0.5 \times 1) = 2.84$$

<이웃해>

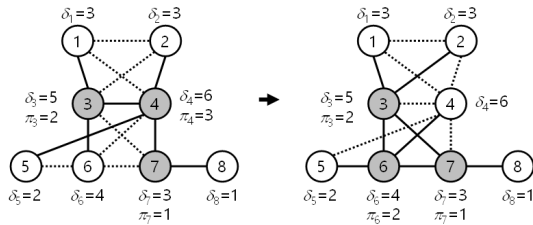
$$\|C\|_2 = \sqrt{(5 - 27/8)^2 + (4 - 27/8)^2 + (3 - 27/8)^2} = 1.78$$

$$\|D\|_2 = \sqrt{(2 - 5/3)^2 + (1 - 5/3)^2 + (2 - 5/3)^2} = 0.82$$

$$V_{0.5} = (8 - 3) / (0.5 \times 1.78 + 0.5 \times 0.82) = 3.85$$

Fig. 4 Delete move

마지막으로 교환이동은 이전해에서 지배자로 지정된 노드 중 하나를 선택하여 삭제하고 피지배자중 하나를 선택하여 지배자로 바꾸는 방식이다. 교환이동으로 인해 지배자의 수는 변화가 없으며, 새로운 형태를 구성하게 된다. 그림 5는 교환이동을 나타낸 것이다. 이전해는 노드 3, 4, 7이 지배자인 상태에서, 노드 4를 피지배자로 변경하고, 노드 6을 지배자로 지정하여 새로운 이웃해를 생성한 형태이다. 이때 이전해에 비해 이웃해의  $\|C\|_2$ 의 값은 감소하고  $\|D\|_2$ 의 값도 감소하였다. 또한 이웃해의 목적함수의 값은 이전해보다 증가하였음을 알 수 있다. 따라서 이 예에서도 교환이동을 수행함으로써 이전해보다 성능이 우수한 새로운 결과를 도출하였다.



<이전해>

$$\|C\|_2 = \sqrt{(5 - 27/8)^2 + (6 - 27/8)^2 + (3 - 27/8)^2} = 3.11$$

$$\|D\|_2 = \sqrt{(2 - 5/3)^2 + (3 - 5/3)^2 + (1 - 5/3)^2} = 1.53$$

$$V_{0.5} = (8 - 3) / (0.5 \times 3.11 + 0.5 \times 1.53) = 2.16$$

<이웃해>

$$\|C\|_2 = \sqrt{(5 - 27/8)^2 + (4 - 27/8)^2 + (3 - 27/8)^2} = 1.78$$

$$\|D\|_2 = \sqrt{(2 - 5/3)^2 + (1 - 5/3)^2 + (2 - 5/3)^2} = 0.82$$

$$V_{0.5} = (8 - 3) / (0.5 \times 1.78 + 0.5 \times 0.82) = 3.85$$

Fig. 5 Replace move

앞서 기술한 3가지 이웃해 생성방식을 사용하여 새로운 이웃해를 생성하고 이 중에서 가장 성능이 좋은 해를 선택하여 다음 세대의 초기해로 선정하여 반복적으로 이웃해를 생성하여 최적해에 도달한다.

#### 4.4. 타부리스트

타부서치 알고리즘에서 최적해를 찾기 위해 이웃해를 생성하고, 그 중 가장 좋은 해를 선택하여 다음 세대의 초기해로 사용한다. 이때 이웃해 생성방식을 이용해서 반복적으로 이웃해를 생성할 경우 똑같은 해가 가장 좋은 해로 선택될 수 있다. 이전에 선택된 해를 사용하여 이웃해를 생성하면 같은 동작을 반복하게 된다. 즉 지역해에 빠지게 되는 오류가 발생하게 된다. 이러한 지역해 오류를 해소하기 위한 방법은 이전에 초기해로 사용된 해는 다시 사용하지 않는 것이다. 그러기 위해 이전에 사용된 적이 있는 해를 메모리를 사용하여 저장한다. 타부서치에서는 이를 타부리스트라 한다. 타부리스트는 이웃해를 생성하는 때 세대에서 가장 좋은 해로 선택된 해를 저장한다. 그러나 매 세대에서 생성된 이웃해 중에서 가장 좋은 해를 선택할 경우에는 타부리스트를 우선 검색하여 타부리스트에 등록되지 않은 해 중에서 가장 좋은 해를 선택하게 된다. 따라서 타부리스트는 최적해를 찾는 과정에서 지역해에 빠지는 오류를 방지함과 동시에 검색되지 않은 영역을 탐색할 수 있도록 검색영역을 확장하는 기능을 가진다. 타부리스트는 큐 구조로 만들어지며, 유한 크기의 메모리를 사용하기 때문에 메모리가 가득 찰 경우 가장 오래된 해부터 삭제하여 새로운 해를 저장하게 된다.

#### 4.5. 알고리즘 종료

타부서치 알고리즘에서는 정해진 반복횟수를 이용하여 알고리즘을 종료한다. 이웃해 생성방식에 따라 생성된 이웃해 중에 가장 좋은 해가 임시최적해와 비교하여 더 좋은 성능이 연속적으로 발생하지 않는 횟수가 정해진 반복횟수보다 클 경우 알고리즘이 종료된다.

### V. 성능평가

본 논문에서는 부하 균형을 위한 연결 지배 집합을 구성하기 위한 타부서치 알고리즘에 대하여 성능평가를 수행하였다. 알고리즘 성능평가는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 수행되었으며, 컴퓨터 시뮬레이션은 윈도우 10 환경의 3.6GHz CPU와 8GB RAM으로 구성된 컴퓨터에서 수행되었으며, C++ 언어로 구현되었다. 본 논문에서 사용된 성능평가항목은 정의 2와 3에서 언급된 백

터  $p$ -norm인  $\|C\|$ 와  $\|D\|$ , 그리고 목적함수를 평가하였으며, 각 항목에 대하여 메타휴리스틱 알고리즘인 시뮬레이티드 어닐링(simulated annealing) 및 유전 알고리즘(genetic algorithm)과 비교 평가하였다.

성능평가에서 사용된 네트워크 환경은  $1000 \times 1000$  크기의 네트워크에서 무작위로 노드를 배치하였으며, 다양한 네트워크 구조를 구성하기 위해 노드의 개수를 200에서 1000까지 200단위로 적용하였다. 각 노드의 전송 범위는 150, 200, 250으로 설정하여 성능평가를 수행하였다. 본 논문에서 수행한 알고리즘의 성능평가는 알고리즘 당 10번씩 수행하여 평균값과 표준편차로 결과를 비교 평가하였다.

첫 번째 성능평가항목으로 그래프  $G$ 와 지배자 집합으로 구성된 무선 센서 네트워크에서  $p$ -norm을 비교하였다. 그림 6은 다양한 노드 수를 가진 네트워크에서 노드의 전송 범위를 다르게 했을 때, 제안된 타부서치 알고리즘과 같은 메타휴리스틱 알고리즘인 시뮬레이티드 어닐링과 유전 알고리즘을 비교한 것이다. 성능평가 결과에서 제안된 타부서치 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 더 적은 수의 값을 나타내고 있다. 즉 다른 알고리즘에 비해 제안된 알고리즘이 부하 분산을 균형적으로 구성하고 있음을 알 수 있다. 다른 알고리즘보다 성능이 우수한 이유는 제안된 알고리즘의 이웃해 생성이 효과적으로 동작함으로써 최적에 가까운 해에 도달하기 때문이다. 즉 제안된 이웃해 생성방식인 추가, 삭제, 교환방식이 지역해에 빠지지 않고 효과적으로 검색영역을 탐색함을 알 수 있다.

두 번째 성능평가항목은 그래프  $G$ 와 지배자 집합, 지배자에 할당된 피지배자의 집합으로 구성된 무선 센서 네트워크에서 각 지배자의 차수를 나타내는 벡터의  $p$ -norm을 측정하였다. 그림 7은 그 결과를 비교한 것이다. 그림 6에서와 마찬가지로 제안된 타부서치 알고리즘이 다른 메타휴리스틱 알고리즘에 비해 결과가 우수한 것을 볼 수 있다. 즉 제안된 타부서치 알고리즘이 효율적으로 피지배자를 지배자에 배치하고 있음을 알 수 있다.

세 번째 성능평가항목으로 2가지의  $p$ -norm을 이용한 목적함수를 비교 평가하였다. 그림 8은 목적함수를 비교평가한 결과로서 제안된 타부서치 알고리즘이 다른 메타휴리스틱 알고리즘보다 높은 값을 가지고 있음을 볼 수 있다. 앞서 나타난  $p$ -norm에서 제안된 타부서치가

다른 알고리즘보다 낮은 값을 나타냄으로써 목적함수는 더 높은 값을 나타냄을 알 수 있다.

그림 9는 같은 조건에서 각 알고리즘의 평균 실행시간을 비교한 것이다. 그림에서 제안된 타부서치 알고리즘이 같은 메타휴리스틱인 시뮬레이티드 어닐링과 유전 알고리즘에 비해 더 빠른 실행시간을 보이고 있다. 일반적으로 노드의 수가 많아짐에 따라 계산양도 증가한다. 그림에서 노드 수의 증가에 따라 각 알고리즘도 지수적으로 실행시간이 증가하고 있다. 전체적으로 제안된 타부서치가 제안된 이웃해 생성방식에 따라 최적해에 빠르게 접근함으로써 실행시간을 줄이고 있다.

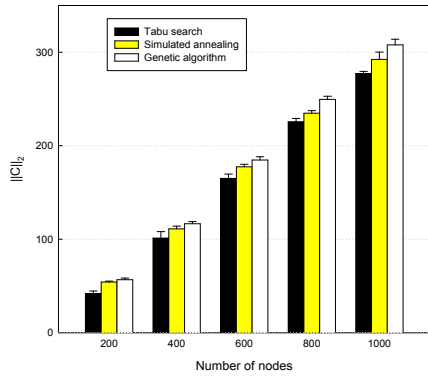
결론적으로 메타휴리스틱 방식인 제안된 타부서치가 같은 메타휴리스틱 알고리즘인 시뮬레이티드 어닐링과 유전 알고리즘에 비해 더 우수한 성능을 확인할 수 있었다. 즉 타부서치 알고리즘은 다양한 이웃해 검색 방식에 의하여 다른 메타휴리스틱 방식보다 더 효율적으로 인접해를 검색함으로써 더 우수한 최적해에 접근을 할 수 있었다. 따라서 무선 센서 네트워크에서 제안된 타부서치 알고리즘은 부하를 균형적으로 배분하는 연결 지배 집합을 효율적으로 구성하고 있음을 알 수 있다.

## VI. 결 론

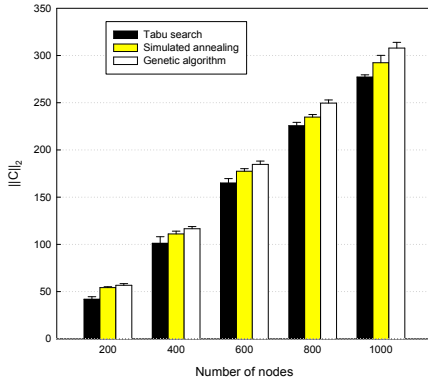
본 논문은 노드의 부하를 균형있게 분산하여 네트워크 수명을 늘리고 효과적인 라우팅을 수행하기 위하여 연결 지배 집합을 구성하는 최적화 알고리즘을 제안하였다. 제안된 최적화 알고리즘은 타부서치 알고리즘을 사용하였으며, 노드의 부하를 균형있게 배치하도록 설계하였다. 제안된 타부서치 알고리즘은 노드를 지배자와 피지배자로 구분하도록 해의 구조를 설계하였으며, 제약조건에 맞게 하나의 초기해를 생성하였다. 초기해를 사용하여 3가지 이웃해 생성방식을 제안하였다. 최적에 가까운 해를 효율적으로 탐색하고, 지역해에 빠지지 않기 위하여 타부서치를 사용하여 최적해에 접근하였다. 제안된 타부서치 알고리즘은 부하 균형을 측정하기 위해 지배자와 피지배자의  $p$ -norm을 적용하여 시뮬레이티드 어닐링 및 유전 알고리즘과 비교 평가하였다. 성능평가에서 제안된 타부서치 알고리즘이 다른 알고리즘에 비해 부하 균형이 효과적으로 이루어짐을 알 수 있었다. 결론적으로 제안된 타부서치 알고리즘이 부



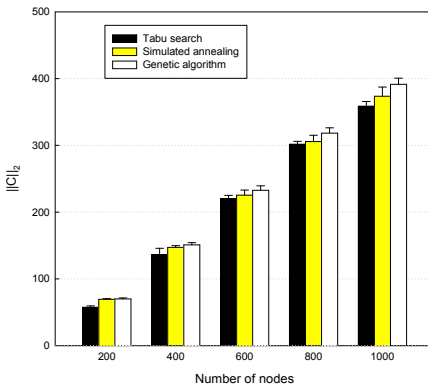
하 균형을 위한 연결 지배 집합을 효과적으로 구성하고 있음을 알 수 있었다. 향후 계획으로 제안된 최적화 알고리즘을 바탕으로 필드에서의 실효성을 검증하고자 한다.



(a)

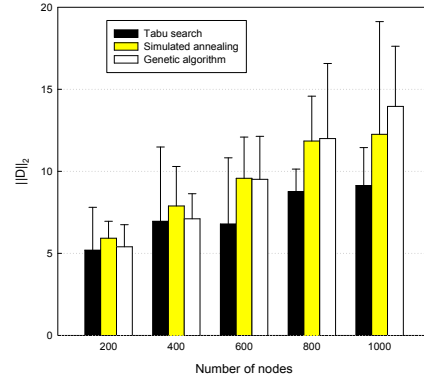


(b)

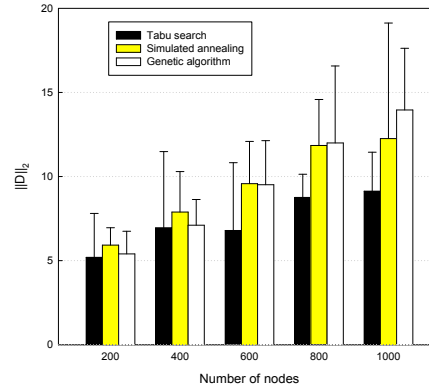


(c)

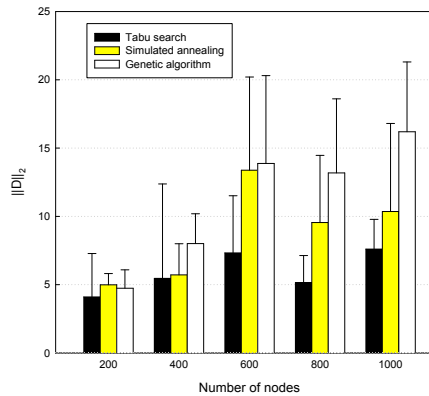
Fig. 6  $\|C\|_2$  (a)  $r = 150$  (b)  $r = 200$  (c)  $r = 250$



(a)

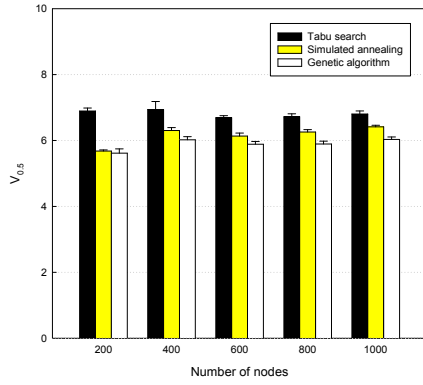


(b)

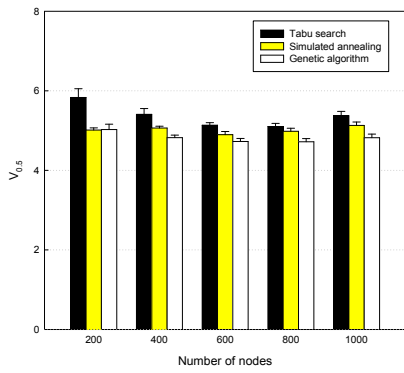


(c)

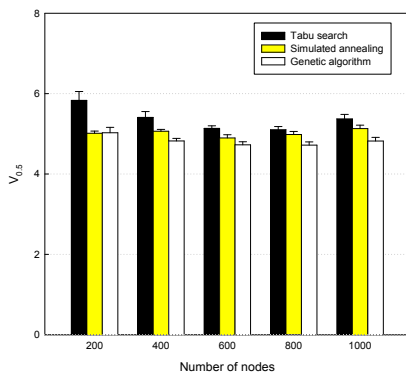
Fig. 7  $\|D\|_2$  (a)  $r = 150$  (b)  $r = 200$  (c)  $r = 250$



(a)

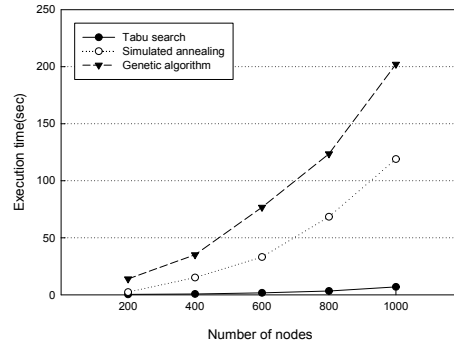


(b)

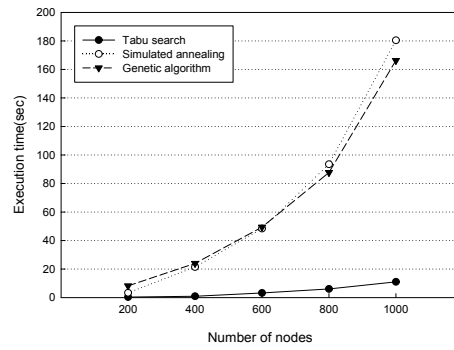


(c)

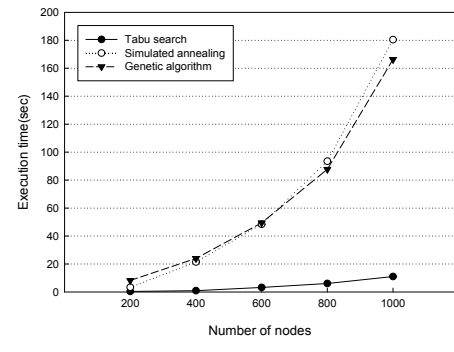
Fig. 8  $V_{0.5}$  (a)  $r = 150$  (b)  $r = 200$  (c)  $r = 250$



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Execution time (a)  $r = 150$  (b)  $r = 200$  (c)  $r = 250$

## REFERENCES

- [ 1 ] S. Shukry, "Stable routing and energy-conserved data transmission over wireless sensor networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 19, pp. 35-63, Feb. 2021.
- [ 2 ] V. R. Kavitha and M. Moorthi, "A quality of service load balanced connected dominating set-stochastic diffusion search (CDS-SDS) network backbone for MANET," *Computer Networks*, vol. 151, pp. 124-131, Mar. 2019.
- [ 3 ] H. T. Evcimen, V. K. Akram, and O. Dagdeviren, "Performance evaluation of distributed self-stabilizing dominating set algorithms in wireless sensor networks," in *International Conference on Electrical and Electronic Engineering*, Istanbul, Turkey, pp. 428-432, May. 2018.
- [ 4 ] M. Tosum and O. Dagdeviren, "New heuristic methods for balanced clustering problem in wireless sensor networks," in *International Conference on Computer Science and Engineering*, Samsun, Turkey, pp. 1-5, Nov. 2019.
- [ 5 ] X. Sun, Y. Yang, and M. Ma, "Minimum connected dominating set algorithms for ad hoc sensor networks," *Sensor*, vol. 19, no. 8, pp. 1-16, Apr. 2019.
- [ 6 ] F. Glover, "Tabu search," *ORSA Journal on Computing*, vol. 1, no. 3, pp. 190-206, Aug. 1989.
- [ 7 ] J. He, S. Ji, M. Yan, Y. Pan, and Y. Li, "Load-balanced CDS construction in wireless sensor networks via genetic algorithm," *International Journal of Sensor Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 166-178, Apr. 2012.
- [ 8 ] T. N. Tran, T. V. Nguyen, and B. An, "An efficient connected dominating set clustering based routing protocol with dynamic channel selection in cognitive mobile ad hoc networks," *Electronics*, vol. 8, no. 11, pp. 1-26, Nov. 2019.
- [ 9 ] D. Fu, L. Han, Z. Yang, and S. T. Jhang, "A greedy algorithm on constructing the minimum connected dominating set in wireless network," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 12, no. 7, pp. 1-6, Jul. 2016.
- [ 10 ] X. Bai, D. Zhao, S. Bai, Q. Wang, W. Li, and D. Mu, "Minimum connected dominating sets in heterogeneous 3D wireless Ad Hoc networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 97, pp. 1-11, Feb. 2020.



장길웅(Kil-woong Jang)

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