

# 무선 센서 네트워크에서 최소연결지배집합 선출을 위한 다중시작 지역탐색 알고리즘

강승호\*, 정민아\*, 이성로<sup>o</sup>

## A Multi-Start Local Search Algorithm Finding Minimum Connected Dominating Set in Wireless Sensor Networks

Seung-Ho Kang\*, Min-A Jeong\*, Seong Ro Lee<sup>o</sup>

### 요 약

무선 센서 네트워크에서 네트워크의 확장성과 효율성을 높이기 위한 방법으로 네트워크 구조를 계층적으로 구성하는 방법에 관심이 높다. 무선 네트워크를 계층 구조로 구성하는 방법은 특정 노드들을 선별하여 이들을 백본 네트워크로 구성하는 방법을 중심으로 연구가 진행되었다. 백본을 구성하는 노드들은 연결되어 있어서 자신들 간에 통신이 직접적으로 가능해야하며, 백본에 속하지 않은 모든 노드들이 백본을 통해 통신이 가능해야한다. 이러한 조건을 만족하는 최소 크기의 노드 집합을 선출하는 문제를 최소연결지배집합선출 문제라 한다. 최소연결지배집합선출 문제는 복잡도가 NP-hard로 알려져 있으며, 현재 효율적인 알고리즘이 존재하지 않는다. 본 논문은 최소연결지배집합선출 문제를 해결하기 위한 다중시작 지역탐색 알고리즘을 제안한다. 제안 방법의 성능 측정을 위해 다양한 조건에서 실험하고 결과를 제시한다.

**Key Words** : wireless sensor networks, backbone network, minimum connected dominating set, multi-start local search algorithm

### ABSTRACT

As a method to increase the scalability and efficiency of wireless sensor networks, a scheme to construct networks hierarchically has received considerable attention among researchers. Researches on the methods to construct wireless networks hierarchically have been conducted focusing on how to select nodes such that they constitute a backbone network of wireless network. Nodes comprising the backbone network should be connected themselves and can cover other remaining nodes. A problem to find the minimum number of nodes which satisfy these conditions is known as the minimum connected dominating set (MCDS) problem. The MCDS problem is NP-hard, therefore there is no efficient algorithm which guarantee the optimal solutions for this problem at present. In this paper, we propose a novel multi-start local search algorithm to solve the MCDS problem efficiently. For the performance evaluation of the proposed method, we conduct extensive experiments and report the results.

※ 이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2014R1A1A4A01008799) 및 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2009-0093828)과 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 ICT 융합고급인력과정지원사업(IITP-2015-H8601-15-1006)의 연구결과로 수행되었음

♦ First Author : Department of Information Security Dongshin University, drminor@dsu.ac.kr, 정희원

° Corresponding Author : Mokpo National University, Department of Information and Electronics Engineering, srlee@mokpo.ac.kr, 정희원

\* Mokpo National University, Department of Computer Engineering, majung@mokpo.ac.kr, 정희원

논문번호 : KICS2015-04-089, Received April 2, 2015; Revised June 11, 2015; Accepted June 11, 2015

## I. 서 론

센서 네트워크를 구성하는 센서들은 빛, 소리, 온도, 이미지, 압력, 진동 등의 정보 감지 기능과 특정 목적에 맞게 가공하는 기능, 정보를 베이스 노드까지 전송하는 기능을 가지고 있다. 이러한 기능 덕분에 국방 영역을 포함해 환경 감시, 재해 예방, 의료 보건, 제조업 및 조선, 해양 등 다양한 영역으로 사용처가 확장되고 있다<sup>1-3)</sup>.

대부분의 센서들은 에너지의 제약 및 데이터 전송의 거리상의 한계를 가지고 있어서 이를 극복하고 효율적이며 안정적인 통신이 가능하도록 하는 라우팅 기술 개발에 관심이 집중되고 있다<sup>4-7)</sup>. 대상의 여러 지역을 커버하고 노드 실패로 인한 통신 두절 상태를 방지하기 위해 다수의 센서 노드들을 무작위로 배치하는 방식이 많이 사용되고 있다. 하지만 밀집형 무작위식 배치 방식(dense and randomly deployed wireless network)은 동일 지역에 소속된 여러 노드들로부터 유사한 데이터를 중복해서 보내는 문제를 야기한다. 특히 브로드캐스팅이나 멀티캐스팅인 경우 문제의 심각성은 더욱 커지는데 결국 여러 노드들이 동일한 데이터의 전송에 참가하게 되어 네트워크의 수명을 급격히 떨어뜨리게 된다<sup>8)</sup>. 인프라를 갖춘 전통적인 유선 네트워크에서는 이러한 중복성 문제를 해결하기 위해 특정 노드들을 백본 네트워크(backbone network)로 구성하고 지역적으로 수집된 정보는 백본 네트워크를 통해 전송되도록 하는 계층적(hierarchical) 방법을 사용하였다. 하지만 무선 센서 네트워크에서는 네트워크를 구성하는 센서들이 대체로 동일한 성능을 가진 노드들로 유선 네트워크에서 말하는 인프라라고 하는 노드들이 별도로 존재하지 않는다. 따라서 주어진 네트워크에서 특정 노드들을 선정하여 이들을 백본으로 사용하려는 시도들이 있다<sup>9-10)</sup>. 백본 네트워크를 구성하는 노드들은 1) 자신들 간의 통신이 가능해야하고 2) 백본에 속하지 않은 다른 모든 노드들과 직접적인 통신이 가능해야한다. 이러한 조건을 만족하는 최소 개수의 노드들을 선출하는 문제를 최소연결지배집합 문제(Minimum Connected Dominating Set Problem)로 정의할 수 있다<sup>8)</sup>. 최소연결지배집합 문제는 복잡도가 NP-hard로 알려져 있으며, 따라서 현재 다항시간에 최적해를 보장하는 효율적인 알고리즘이 존재하지 않는다. 문제 해결을 위해 다양한 방법들이 제시되고 있다<sup>11-13)</sup>.

본 논문은 무선 센서네트워크에서 백본 네트워크를 구성하는 노드 선발 문제를 최소연결지배집합 문제로

정의하고 최적해에 근사한 연결지배집합을 제공해 주는 다중시작 지역탐색 알고리즘을 제시한다. 다중시작 지역탐색 알고리즘은 잘 알려진 메타 휴리스틱 최적화 문제 해결 방식이지만 해의 표현 방식, 해의 평가 함수, 탐색 방법 등에 따라 효율성 및 해의 성능이 크게 영향을 받는다. 본 논문은 새로운 평가 함수 및 탐색 방법으로 구성된 다중시작 지역탐색 알고리즘을 제시하고, 알고리즘의 성능 및 센서 네트워크에서의 응용 가능성을 평가하기 위해 다양한 조건하에서 실험을 실시하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 본 논문이 대상으로 하는 네트워크 모델과 관련 용어 및 문제 등을 2장에서 정의한다. 3장에서는 다중시작 지역탐색 알고리즘을 제시하고 4장에서 성능 분석을 위해 실시한 실험 결과를 분석한다. 마지막으로 5장에서는 결론과 함께 향후 연구 방향을 제시한다.

## II. 네트워크 모델과 문제 정의

### 2.1 네트워크 모델

통신 가능한 거리에 있는 두 노드를 링크로 연결하고 네트워크를 그래프  $G(V, E)$ 로 표현한다. 여기서  $V$ 는 노드 집합을  $E$ 는 링크 집합을 나타낸다. 무선 애드혹 네트워크나 무선 센서 네트워크에 대한 모델은 단위 디스크 그래프(Unit disk graph: UDG) 모델, 디스크 그래프(Disk graph) 모델, 단위 구 (Unit ball graph) 모델, 안테나 모델 등이 제시되어 있는데<sup>14)</sup>, 본 논문에서는 단위 디스크 그래프 모델을 대상으로 한다. UDG 모델은 네트워크를 구성하는 모든 노드가 동일한 송수신 거리를 갖는다고 가정한다. 또한 무방향성(omnidirectional)의 안테나와 센서가 배치된 환경에 장애물이 없음을 가정한다. 이를 엄밀하게 정의하면 다음과 같다.

정의 1. 단위 디스크 그래프:

$V \subset R^2$ 를 2차원 평면상의 노드 집합이라 하고  $r$ 을 사전에 정의된 거리라 하자. 임의의 두 노드  $u, v \in V$ 에 대해  $\{u, v\} \in E \Leftrightarrow d(u, v) \leq r$ 가 성립하는 유클리디안 그래프  $G(V, E)$ 를 단위 디스크 그래프라 한다. 여기서  $d(u, v)$ 는 두 노드  $u, v$  사이의 유클리드 거리를 말한다.

그림 1, 2는 100m×100m 크기의 영역에 전송거리  $r$ 이 20m이고 60개의 노드가 무작위로 배치된 무선 센서 네트워크의 한 예를 표현한 것이다. 그림 1은 각 노드의 송수신 범위를, 그림 2는 단위 디스크 그래프

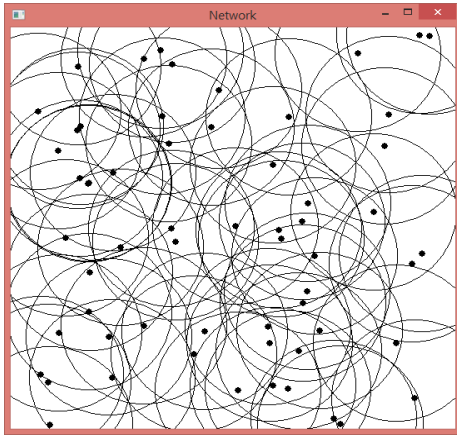


Fig. 1. 100m×100m wireless sensor network with transmission distance  $r$  of 20 m and 60 nodes randomly deployed

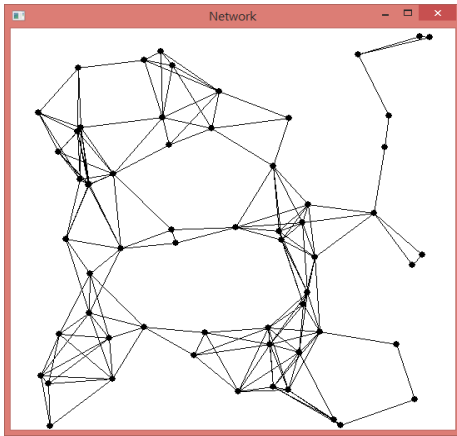


Fig. 2. Unit disk graph for 100m×100m wireless sensor network with transmission distance  $r$  of 20 m and 60 nodes randomly deployed

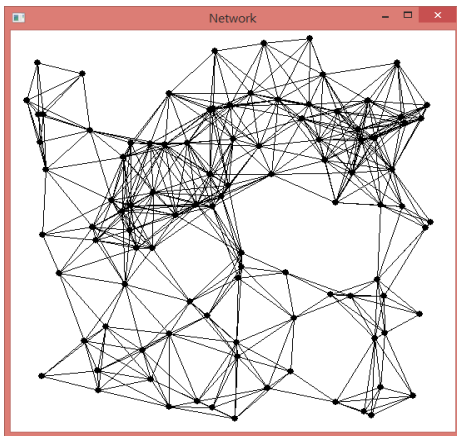


Fig. 3. Unit disk graph for 100m×100m wireless sensor network with transmission distance  $r$  of 20 m and 100 nodes randomly deployed

를 나타낸다. 그림 3은 동일한 조건하에서 노드 수가 100개인 경우의 단위 디스크 그래프 예이다.

## 2.2 문제 정의

### 정의 2. 최소연결지배집합 문제

그래프  $G$ 의 연결지배집합  $D$ 는 다음 두 가지 특성을 갖는다.

- $D$ 에 속한 임의의 두 노드 사이에  $D$ 에 속한 노드들 로만 구성된 경로를 통해 연결되어 있다.
- $G$ 에 속한 모든 노드는  $D$ 에 속하거나  $D$ 에 속한 노드와 이웃한다.

그래프  $G$ 에 대한 연결지배집합 중 노드 수 (cardinality)가 가장 작은 연결지배집합을 찾는 문제를 최소연결지배집합 문제로 한다.

앞에서 언급했지만 최소연결지배집합 문제는 NP-hard로 현재 다항시간을 보장하는 효율적 알고리즘이 존재하지 않는다.

## III. 다중시작 지역탐색 알고리즘

최적해에 가까운 해를 보장하는 다중시작 지역탐색 알고리즘을 설계한다. 다중시작 지역탐색 알고리즘은 최적화 문제를 해결하기 위한 대표적인 메타 휴리스틱 알고리즘으로 목적 함수, 탐색 방법의 설계에 성능이 크게 의존한다.

우선 해  $s$ 는 크기가  $n = |V|$ 인 이진 벡터  $\langle v_1, v_2, v_3, \dots, v_n \rangle$ 로 표현한다.  $v_i$ 는  $i$  번째 노드를 나타내며 지배집합에 속하면 1 값을 갖고 속하지 않으면 0 값을 갖는다. 따라서 해공간의 크기는  $2^n$ 임을 알 수 있고 이 중 연결지배집합 성격을 만족하면서 그 크기가 최소인 해를 찾는 것이다. 그리고 주어진 해에 대한 이웃 해는 해당 해와 1 비트 다른 값을 갖는 해들로 정의되고, 따라서 특정해에 대해  $n$ 개의 이웃해가 존재한다.

다음 목적 함수를 정의한다. 목적 함수는 탐색 중 대상 해의 좋음 정도를 측정하는 것으로 알고리즘의 핵심을 이룬다. 본 논문은 다음과 같은 목적 함수  $f(s)$ 를 제시한다.

$$f(s) = dc(s) + \frac{m+1-c}{n} + \frac{1}{n \times d}$$

여기서,  $dc(s)$ 는 주어진 해  $s$ 가 연결지배집합  $D$ 를 구성하는지에 따라 1과 0 값을 갖는 함수이다. 즉, 연결지배집합  $D$ 가 존재하면 1을 갖고 존재하지 않으면 0을 갖는다.  $m$ 은 지배집합  $s$ 와  $s'$ 에 의해 커버되는 노

드 수를 가리키고  $c$ 는 지배집합  $s$ 와 커버되는 노드들로 구성된 그래프의 연결 요소 수를 나타낸다. 만약  $m$ 이 노드 수  $n$ 과 같고 모든 노드가 연결되어 연결 요소의 수  $c$ 가 1이면 함수의 두 번째 항은 1을 갖고 그렇지 못하면 이보다 작은 값을 갖는다. 세 번째 항의  $d$ 는 주어진 해가 제시한 지배집합의 크기, 즉 1의 개수를 나타내며 작을수록 목적함수 값을 크게 하는 성질을 갖는다. 따라서 목적함수  $f(s)$ 는 주어진 해  $s$ 가 연결지배집합이면 2 이상인 값을 갖고 그렇지 않으면 2

Table 1. Pseudo code for multi-start local search algorithm

<p><b>Algorithm:</b> Multi-start local search algorithm  <b>Input:</b> A graph <math>G(V, E)</math>  <b>Output:</b> A minimum connected dominating set</p> <p><b>1. Algorithm</b>  <b>2. Begin</b>          3. <math>k \leftarrow 1</math>          4. <b>while</b>(<math>k \leq R</math>) {          5. build an initial random solution <math>s</math>          6. <math>ns \leftarrow \text{neigh}(s)</math>          7. <b>while</b>(<math>f(ns) &gt; f(s)</math>) {          8. <math>s \leftarrow ns</math>          9. <math>ns \leftarrow \text{neigh}(s)</math>          10. }          11. <math>bs \leftarrow s</math>          12. <math>k \leftarrow k + 1</math>          13. }          14. <b>return</b> <math>bs</math>  <b>15. End</b>          16.  <b>17. Function neigh(s)</b>  <b>18. Begin</b>          19. <b>if</b> (<math>f(s) \geq 2</math>) {          20. find a <math>v_i</math> in <math>s</math> with value 1 in increasing order in terms of degree          21. <math>v_i \leftarrow 0</math>          22. }          23. <b>else</b> {          24. find a <math>v_i</math> in <math>s</math> with value 0 in decreasing order in terms of degree          25. <math>v_i \leftarrow 1</math>          26. }          27. <b>return</b> <math>s</math>  <b>28. End</b></p>
--

보다 작은 값을 갖는다는 사실을 알 수 있다.

결국 해의 탐색은 이러한 목적함수 값을 가장 크게 하는 해를 찾는 과정이다. 탐색하기에 앞서 초기해를 설정해야 하는데 여기서는 무작위로 각 비트값을 부여한 해를 사용하였다. 초기해를 대상으로 목적함수를 계산하고 함수 값이 2보다 크거나 같으면 지배집합에 속한 노드 중 차수(degree)가 가장 작은 노드부터 큰 노드 순으로 노드를 제거해 가며 목적 함수를 개선하는 해를 다음 탐색 대상인 해로 한다. 만약 함수 값이 2보다 작으면 지배집합에 속하지 않은 해중 차수가 가장 큰 노드부터 지배집합에 포함시켜 개선이 있으면 다음 탐색 대상 해로 한다. 이렇게 구해진 이웃해를 대상으로 목적 함수를 계산하고 동일한 절차를 계속해서 반복한다. 만약 모든 이웃해를 대상으로 목적 함수를 계산 했으나 더 이상 개선할 수 없으면 이를 최종 해로 삼는다. 이러한 절차를 사전에 정의된 회수  $R$ 만큼 무작위로 선정된 초기해를 대상으로 실시하여 그 중 가장 목적함수가 큰 값을 갖는 해를 알고리즘의 최종 해로 한다.

표 1에 알고리즘의 의사 코드를 제시한다.

#### IV. 모의 실험과 결과 분석

100m×100m 공간에 센서 수를 60에서 100까지 10단위로 늘려가며 실험하였다. 각 센서의 위치는 무작위로 배치하였고 전송 거리는 20m, 25m, 30m를 각각 사용하였다. 전송 거리가 20m 이하인 경우 노드 수가 50이면 연결된 그래프를 구하기가 힘들어서 이들은 제외하였다. 연결 그래프를 얻기 위한 배치 공간으로

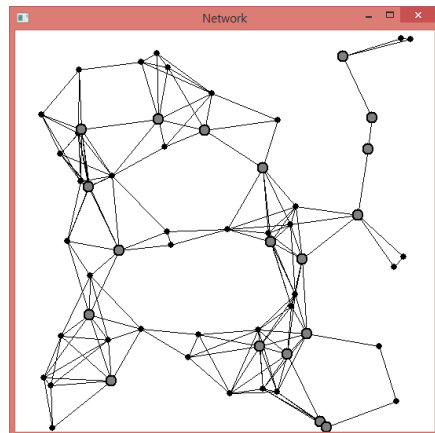


Fig. 4. Connected dominating set for 100m×100m wireless sensor network with transmission distance  $r$  of 20 m and 60 nodes randomly deployed

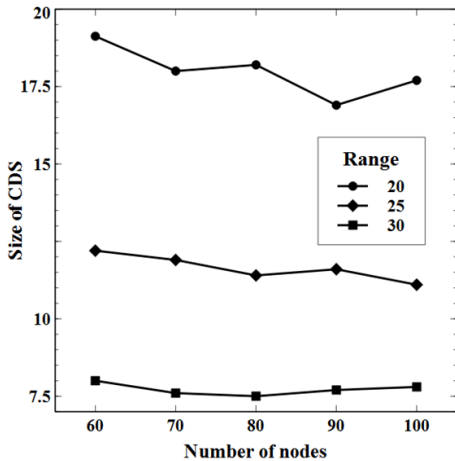


Fig. 5. The change of size of dominating set according to the number of nodes and transmission ranges

부터 연결 그래프를 얻기 위한 최소 센서 수에 대한 연구도 필요해 보인다.

아래 그림 4는 앞 장에서 예시한 네트워크, 즉 60 개의 노드로 구성하고 전송 거리가 20m인 경우 제안한 알고리즘이 찾아낸 연결지배집합을 나타낸 것이다. 그림에서 큰 회색 원이 연결지배집합에 속한 노드들을 가리킨다.

실험 결과는 그림 5에 표시하였다. 전송 범위가 커질수록 그래프의 링크가 증가하므로 그래프의 밀집도가 높아져 연결지배집합의 크기는 감소한다는 사실을 확인하였다. 전송 거리가 20m인 경우 약 17.5 개의 백본 노드가 필요한데 반해 25m, 30m인 경우엔 약 12개, 7.5개 정도가 필요함을 알 수 있다.

한편, 동일 공간에서의 노드 수의 증가는 연결지배집합의 크기에 큰 영향을 미치지 않는다는 사실은 노드 실패로 인한 노드의 소멸이나 새로운 노드의 도입에 따른 네트워크 확장에도 연결지배집합의 구성이나 크기에 큰 변화 필요 없을 수 있다는 중요한 사실을 제시하고 있다.

### V. 결 론

본 논문은 센서 네트워크를 계층적 구조로 사용하기 위해, 백본 네트워크를 구성할 노드 선정을 위한 방법을 제시하였다. 노드 선정 문제는 최소연결지배집합 문제로 정의하였고 문제 해결을 위해 새로운 다중 시작 지역탐색 알고리즘을 설계하였다. 제시한 알고리즘의 성능을 분석하기 위해 다양한 실험 환경에서 실험하였다.

실험 결과 동일한 크기의 공간에서 전송 거리가 클수록 네트워크의 밀집도가 커져 연결지배집합의 크기는 오히려 작아진다는 사실을 확인하였고 동일 공간, 동일 전송 거리의 조건하에서는 노드 수의 크기는 연결지배집합의 크기에 미치는 영향이 크지 않음을 확인 하였다. 이러한 결과는 실제 현장에서 센서 네트워크를 설치할 때 설계에 중요한 요소들 즉 센서의 수 및 전송 거리에 따른 센서의 선택 등에 있어 중요한 참고 자료로 쓰일 수 있을 것으로 기대된다.

실험 결과 분석에서도 언급하였지만 앞으로 많은 추가 실험 및 연구가 필요하다. 우선 다른 문제 해결 방법들과의 비교 연구도 있어야 하고 수천 개의 센서로 구성된 네트워크에서의 최소연결지배집합을 찾는 문제도 다루어야 할 주제이다.

### References

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer Netw.*, vol. 38, pp. 393-422, Mar. 2002.
- [2] I. F. Akyildiz and I. H. Kasimoglu, "Wireless sensor and actor networks: research challenges," *Ad Hoc Netw.*, vol. 2, pp. 351-367, 2004.
- [3] I. F. Akyildiz, T. Melodia, and K. R. Chowdhury, "A survey on wireless multimedia sensor networks," *Computer Netw.*, vol. 51, pp. 921-960, 2007.
- [4] K. Akkaya and M. Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor networks," *Ad Hoc Netw.*, vol. 3, pp. 325-349, May 2005.
- [5] S. W. Han, I. S. Jeong, and S. H. Kang, "Low latency and energy efficient routing tree for wireless sensor networks with multiple mobile sinks," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 36, pp. 156-166, 2013.
- [6] S. H. Kang, K. Y. Kim, W. Y. Lee, I. Song, M. A. Jung, and S. R. Lee, "A branch and bound algorithm to find a routing tree having minimum wiener index in sensor networks with high mobile base node," *J. KICS*, vol. 35, pp. 466-473, 2010.
- [7] S. H. Kang, M. S. Choi, M. A. Jung, and S.

R. Lee, "A pareto ant colony optimization algorithm for application specific routing in wireless sensor & actor networks," *J. KICS*, vol. 36, pp. 346-353, 2011.

[8] S. Ni, Y. C. Tseng, Y. S. Chen, and J. P. Sheu, "The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network," in *Proc. ACM/IEEE Int. Conf. Mob. Comput. Netw.*, vol. 8, no. 2-3, pp. 153-167, Mar. 2002.

[9] M. A. Labrador and P. M. Wightman, "Topology control in wireless sensor networks: with a companion simulation tool for teaching and research," *Springer Science+Business, Media B. V.*, 2009.

[10] S. Lee, D. Levin, V. Gopalakrishnan, and B. Bhattacharjee, "Backbone construction in selfish wireless networks," in *Proc. ACM SIGMETRICS '07*, pp. 121-132, 2007.

[11] S. Balaji, K. Kannan, and Y. B. Venkatakrishnan, "Total dominating set based algorithm for connected dominating set in Ad hoc wireless networks," *WSEAS Trans. Mathematics*, vol. 12, pp. 1164-1172, 2013.

[12] B. Das and V. Bharghavan, "Routing in ad-hoc networks using minimum connected dominating sets," *IEEE ICC '97*, vol. 1, pp. 376-380, Montreal, 1997.

[13] C. Zheng, L. Yin, and S. Sun, "Construction of d-hop connected dominating sets in wireless sensor networks," *Procedia Eng.*, vol 15, pp. 3416-3420, 2011.

[14] J. Yu, N. Wang, G. Wang, and D. Yu, "Connected dominating set in wireless as hoc and sensor networks - A comprehensive survey," *Computer Commun.*, vol. 36, pp. 121-134, 2013.

**강 승 호 (Seung-Ho Kang)**



1994년 8월 : 전남대학교 전산학과 졸업  
 2003년 2월 : 전남대학교 전산학과 석사  
 2009년 8월 : 전남대학교 전산학과 박사  
 2009년 12월 : 목포대학교 정보산업연구소 연구원

2010년 9월 : 국가수리과학연구소 연구원  
 2013년 9월~현재 : 동신대학교 정보보안학과 조교수  
 <관심분야> 센서 네트워크, 사물인터넷보안, 알고리즘

**정 민 아 (Min-A Jeong)**



1992년 2월 : 전남대학교 이학사  
 1994년 2월 : 전남대학교 이학석사  
 2002년 2월 : 전남대학교 이학박사  
 2002년 4월~2003년 2월 : 광주과학기술원 정보통신공학과 Post-Doc

2003년 4월~2005년 2월 : 전남대학교 전자통신기술연구소 Post-Doc  
 2011년 9월~2013년 2월 : Cleveland Clinic Research  
 2005년 3월~현재 : 목포대학교 컴퓨터공학과 부교수  
 <관심분야> 데이터베이스/데이터마이닝, 생체인식시스템, 무선통신응용분야, 임베디드시스템

**이 성 로 (Seong Ro Lee)**



1987년 2월 : 고려대학교 전자공학과 공학사  
 1990년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사  
 1996년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사  
 1997년 9월~현재 : 목포대학교

공과대학 정보전자공학과 교수  
 <관심분야> 디지털통신시스템, 이동 및 위성통신시스템, USN/텔레미틱스응용분야, 임베디드시스템