

# 커버리지와 네트워크 연결성 향상을 위한 3차원 공간 노드 배치 및 망 구성 방법

김 용 현\*, 김 이 형\*, 안 미 립\*\*, 정 광 수°

## 3D Node Deployment and Network Configuration Methods for Improvement of Node Coverage and Network Connectivity

Yong-Hyun Kim\*, Lee-Hyeong Kim\*, Mirim Ahn\*\*, Kwangsue Chung°

### 요 약

무선 센서네트워크에서 사용하는 센서는 PIR, 이미지, 전자파 센서와 같은 지향성 센서와 진동, 음향, 자기센서와 같은 비지향성 센서로 구분할 수 있다. 지향성 센서의 성능을 보장하기 위해서는 센서의 설치위치는 가시선이 보장되는 곳에 설치가 되어야 하므로 노드 설치 위치는 지표면보다 높은 곳에 설치가 된다. 비지향성 센서 중 진동센서의 경우 센서 특성상 지표면에 설치가 되어야 한다. 이로 인해 지표면에 설치되는 비지향성 센서는 통신 장애로 인하여 네트워크 연결성 문제가 발생한다. 본 논문에서는 센서 고유특성을 살려서 커버리지를 최대화하고, 센서노드의 설치높이를 고려한 토폴로지 구성을 통해 네트워크 연결성을 최대화할 수 있는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 비지향성 센서는 지표면에 배치하고, 지향성 센서는 나무나 폴대와 같은 물체를 이용하여 지상에 설치하여 센서 커버리지를 최대화 한다. 그리고 설치높이가 낮은 센서노드는 설치높이가 높은 센서노드에 우선 연결하고, 설치높이가 높은 센서노드는 설치높이가 높은 센서노드와 연결하는 토폴로지를 구성하여 네트워크 연결성을 최대화하는 것이다. 시뮬레이션을 통해 제안방법을 검증하였으며, 커버리지와 네트워크 연결성에서 성능이 향상됨을 확인하였다.

**Key Words** : Sensor Network, Coverage, Connectivity, Deployment

### ABSTRACT

Sensors that are used on wireless sensor networks can be divided into two types: directional sensors, such as PIR, image, and electromagnetic sensors; and non-directional sensors, such as seismic, acoustic and magnetic sensors. In order to guarantee the line-of-sight of a directional sensor, the installation location of the sensor must be higher than ground level. Among non-directional sensors, seismic sensors should be installed on the ground in order to ensure the maximal performance. As a result, seismic sensors may have network connectivity problems due to communication failure. In this paper, we propose a 3D node deployment method to maximize the coverage and the network connectivity considering the sensor-specific properties. The proposed method is for non-directional sensors to be placed on the ground, while the directional sensor is installed above the ground, using trees or poles, to maximize the coverage. As a result, through the topology that the detection data from non-directional sensors are transmitted to the directional sensor, we can maximize the network connectivity. Simulation results show that our strategy improves sensor coverage and network connectivity.

※ 본 연구는 민군겸용기술사업(Dual Use Technology Program) 지원을 받아 수행되었습니다.

◆ 주저자 : 국방과학연구소, yonghyun@add.re.kr, 정회원

° 교신저자 : 광운대학교 전자통신공학과, kchung@kw.ac.kr, 종신회원

\* 국방과학연구소, lhkim@add.re.kr

\*\* 국방과학연구소, mirimahn@hanmail.net

논문번호 : KICS2012-06-274, 접수일자 : 2012년 6월 6일, 최종논문접수일자 : 2012년 8월 30일

## I. 서론

무선 센서네트워크(Wireless Sensor Network)는 산림감시, 재해관리, 공장자동화, 시설보안, 국경감시, 전장감시 등 다양한 응용에 사용되고 있다. 센서노드는 온도, 습도, 진동, 음향과 같은 환경정보를 수집하고, 중계노드는 센서노드가 수집한 정보를 베이스스테이션이나 다른 노드로 전달한다<sup>[1]</sup>. 무선 센서네트워크를 구성하는 센서노드와 중계노드는 제한된 탐지거리와 전송거리 뿐만 아니라 제한된 배터리 용량을 가지고 있다. 이러한 제한조건으로 인해 커버리지, 네트워크 연결성, 네트워크 지속시간, 스케줄링, 데이터 수집 등과 관련된 기술적 이슈가 발생한다. 커버리지와 연결성 문제는 노드의 제한된 탐지거리와 전송거리로 인해 발생한다. 커버리지 문제는 감시되어야 하는 지점을 센서로 커버하는 것을 보장하는 것과 관련된다. 커버리지를 최대화하는 것은 센서를 서로 너무 가깝게 배치하지 않게 하여 네트워크의 탐지능력을 충분히 이용하는 동시에 센서를 서로 너무 멀리 배치하지 않게 하여 커버리지 공백(coverage hole)이 발생하는 것을 피하는 것이 유일한 해결책이다<sup>[2]</sup>. 센서노드와 중계노드는 네트워크 연결성을 보장하기 위해서 주변 노드의 통신 범위 내에 배치해야 한다.

노드 배치는 매우 어려운 문제로 다양한 방법이 연구되어 왔다. 하지만 지금까지 제안된 노드 배치 방법은 실제 네트워크가 3차원 공간에서 동작함에도 불구하고 대부분 2차원 공간에서의 설계를 기본으로 한다. 심지어 이미지, 비디오 센서 배치와 같은 응용의 경우도 2차원 공간에서의 커버리지와 데이터 획득을 다루고 있다<sup>[3]</sup>. 따라서 본 논문에서는 감시정찰 센서네트워크에서 사용하는 센서의 특성을 고려한 3차원 공간 노드 배치 방법을 제안하고자 한다.

감시정찰 센서네트워크는 가장 많이 알려진 무선 센서네트워크의 응용중 하나이다. 감시정찰 센서네트워크는 센서필드에 침입하는 적을 탐지하기 위해 다양한 센서를 사용한다. 감시정찰 센서네트워크에서 사용하는 센서는 PIR(Passive Infra-Red), 이미지, 전자파 센서와 같은 지향성 센서와 진동, 음향, 자기센서와 같은 비지향성 센서로 구분할 수 있다<sup>[4]</sup>. 지향성 센서는 성능 보장을 위해서 가시선(LOS; Line Of Sight)이 보장되는 곳에 설치가 되어야 한다. 따라서 노드는 지표면보다 높은 곳에 설치가 되

어야 한다. 비지향성 센서 중 진동센서의 경우 센서 특성상 지표면에 설치가 되어야 한다. 이로 인해 지표면에 설치되는 비지향성 센서는 통신장애로 인하여 네트워크 연결성 문제가 발생한다. 본 논문에서는 센서 고유특성을 살려서 커버리지를 최대화하고, 센서노드의 설치높이를 고려한 토폴로지 구성을 통해 네트워크 연결성을 최대화할 수 있는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 진동센서와 같은 비지향성 센서는 지표면에 배치하고, PIR 센서와 같은 지향성 센서는 나무나 폴대와 같은 물체를 이용하여 지표면 보다 높은 위치에 설치하여 센서 커버리지를 최대화 한다. 그리고 설치높이가 낮은 센서노드는 설치높이가 높은 센서노드로 탐지된 정보를 전송하는 토폴로지를 구성하여 네트워크 연결성을 최대화하는 것이다.

본 논문의 구성은 II장에서 관련 연구를 살펴보고, III장에서 제안하는 3차원 노드 배치 및 토폴로지 구성 방법을 소개한다. IV장에서는 제안하는 방법의 성능을 검증할 시뮬레이션 결과를 제시하고, V장에서 결론을 맺는다.

## II. 관련 연구

### 2.1. 감시정찰 센서네트워크 시스템

감시정찰 센서네트워크 시스템은 경계지역에 일정 간격으로 수집에서 수천 개의 센서노드를 배치시킨 후 경계지역 내에 침입하는 표적을 실시간으로 탐지 또는 추적하는 무인감시시스템이다. 감시정찰 센서네트워크 시스템은 사람이 갈 수 없는 장소에 눈, 귀 등과 같은 감지력이 있는 센서를 배치함으로써 전장을 이해하는 새로운 수단을 제공한다<sup>[1]</sup>.

감시정찰 센서네트워크 시스템은 EO/IR(Electro-Optical/InfraRed), SAR(Synthetic Aperture Radar)와 같은 기존 정찰시스템이 임무시간, 임무지역에 제한을 받는 것과 달리 24시간 지속적으로 운용가능하며, 기상 또는 지형의 영향을 덜 받고, 원하는 지역에 대한 정보 획득이 가능하다. 또한 기존 감시정찰 시스템이 획득 및 운영하는데 비용이 많이 소요되는 것에 비해 감시정찰 센서네트워크 시스템은 저비용으로 획득 및 운영이 가능하다<sup>[4]</sup>.

감시정찰 센서네트워크 시스템은 그림 1과 같이 센서노드, 중계노드, C2(Command and Control)단 말기로 구성된다<sup>[1]</sup>. 센서노드는 자기, 진동, 소리, 빛, 열을 감지할 수 있는 센서를 가지고 있으며 적 지역을 포함한 비우호 지역에서 네트워크를 구성할

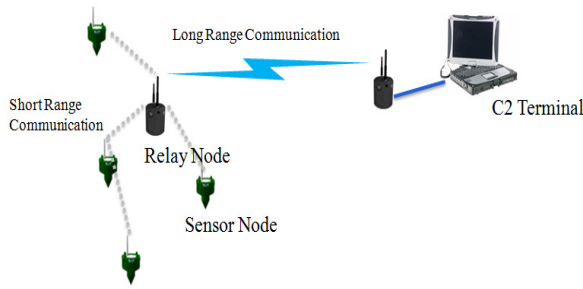


그림 1. 감시정찰 센서네트워크 시스템 구성도  
Fig. 1. Configuration diagram of SRSNs

수 있는 자기구성(self-configuration) 능력을 가지고 있다. 또한 센서 파괴 및 고장에 대비한 자기복구(self-healing) 능력이 있다. 중계노드는 센서노드로부터 탐지된 데이터를 수신하여 모니터링 장소로 원거리 전송하는 역할을 담당한다. 휴대용과 지휘소용으로 구분되는 C2단말기는 모니터링 장소에 설치하여 센서필드에서 탐지한 정보를 상황에 도시하고 센서필드를 제어한다.

감시정찰 센서네트워크 시스템은 센서필드에 침입하는 적을 탐지하기 위해 다양한 센서를 사용한다. 감시정찰 센서네트워크에서 사용하는 센서는 PIR, 이미지, 전자파 센서와 같은 지향성 센서와 진동, 음향, 자기센서와 같은 비지향성 센서가 있다. 탐지하려는 표적종류, 센서 설치지역 특성에 따라 적절한 센서를 선택하여 사용한다.

## 2.2. 노드 배치 전략

노드 배치 문제는 매우 어려워 대부분 NP-hard인 것으로 알려져 있으며 여러 연구들이 최적에 가까운 결과를 얻기 위해 발견적 접근(heuristic approach)을 사용하였다<sup>[3,5]</sup>. 노드 배치 전략은 최적화가 노드를 설치한 시점에 수행되느냐, 네트워크가 동작하는 동안에 수행되느냐에 따라 정적배치(static positioning)와 동적배치(dynamic positioning)로 분류한다. 더 나아가 공개된 기술을 배치 방법, 배치 최적화 목표, 노드 역할에 따라 세부 분류할 수 있으며 각 분야에서 많은 연구가 진행되어 왔다<sup>[3]</sup>.

센서노드 배치는 센싱 커버리지와 네트워크 연결성을 최대화하는데 목적이 있다. 커버리지 종류는 영역 커버리지(area coverage), 포인트 커버리지(point coverage), 경계 커버리지(barrier coverage)가 있으며, 대부분의 소개된 논문은 영역 커버리지에 대해 다루고 있다<sup>[2]</sup>. [6]은 hexagonal, ring, star 등 규칙적인 노드 배치 토폴로지를 검토하였고, 정상적일 때와 부분적인 실패가 있을 때 커버리지와 네트

워크 연결성을 연구하였다. [7]은 커버리지를 최대화하기 위해서 이전에 배치된 센서 노드의 정보를 기반으로 센서를 하나씩 배치시키면서 커버리지를 확장하는 방법을 제안하였다. [8]은 정해진 센서 개수에 따라 탐지 영역을 최대화하기 위해서 인력과 척력의 개념을 사용하는 VFA(Virtual Force Algorithm)을 제안하였다. [9]는 커버리지를 유지하기 위해서 센서들이 이벤트가 발생한 지역으로 이동하도록 하는 연구를 하였다. 이 방법은 탐지 대상의 이동 경로 부근에 센서를 재배치함으로써 탐지율을 최대화할 수 있는 장점이 있지만 이벤트가 발생할 때마다 센서를 이동시킴으로써 에너지 소비가 커지는 단점이 있다. [10]은 탐지 영역을 그리드(grid)로 만들어 고밀도 그리드에서 저밀도 그리드로 여분의 센서들을 이동시켜 더 나은 형평성을 추구하도록 하는 센서 재배치에 대한 연구를 하였다. 이 방법은 전체 센서네트워크의 잔여 에너지량을 최소화하도록 에너지 소비량을 조절하여 이동 센서를 재배치시키는 최적의 스케줄을 제공할 수 있음을 보였다. [11]과 [12]는 센서노드를 배치하는데 있어서 센서의 밀도 및 분포의 균일성 외에도 노드 배치에 영향을 주는 요소를 고려하였다.

중계노드의 배치는 네트워크 연결성과 시스템 운용시간을 최대화하는데 목적이 있다. [13]은 센서노드와 AFN(agggregation-and-forwarding)노드로 구성된 2계층 센서네트워크를 제안하였고, [14]는 중계노드가 센서노드 보다 긴 전송거리를 갖는 모델 일반화에 대하여 다루었다. [12]에서는 센서네트워크를 설치하는 절차를 수립하고 중계노드의 전송거리에 영향을 주는 요소를 고려한 배치방법을 제시하였다.

지금까지 제안된 노드 배치 방법은 실제 네트워크가 3차원 공간에서 동작함에도 불구하고 대부분 2차원 공간에서의 설계를 기본으로 한다. 심지어 이미지, 비디오 센서 배치와 같은 응용의 경우도 2차원 공간에서의 커버리지와 데이터 획득을 다루고 있다<sup>[3]</sup>. [15]는 커버리지와 네트워크 연결성을 3차원 관점에서 연구하였지만 실제 3차원 셀(cell) 모양을 어떻게 구성할 것인가에 대한 연구이다.

## Ⅲ. 3차원 노드 배치 및 토폴로지 구성 방법

기존에는 그림 2와 같이 임무종류와 임무지역 특성에 맞춰 노드를 배치하고 2차원 공간에서 노드간 토폴로지를 구성하였다. 2차원 공간에서 토폴로지

구성은 센서의 종류에 상관없이 주변에 있는 노드 중 수신감도가 가장 좋은 노드와 네트워크를 형성한다. 이럴 경우 노드간 네트워크는 전송거리가 짧은 노드의 RF 전송거리에 맞춰 형성된다. 그림 2에서 진동센서노드와 PIR센서노드간 네트워크 형성은 진동센서노드 RF 전송거리가 PIR센서노드의 RF 전송거리보다 짧기 때문에 진동센서노드의 RF 전송거리에 맞춰 네트워크가 형성된다. 이는 노드 설치높이가 높은 PIR센서노드의 RF 전송거리를 충분히 이용하지 못하는 것이며 주어진 노드수량으로 커버할 수 있는 영역을 제약하게 된다. 이렇듯 지금까지 제안된 노드 배치 방법은 실제 네트워크가 3차원 공간에서 동작함에도 불구하고 대부분 2차원 공간에서의 설계를 기본으로 하였다.

본 논문에서는 센서 고유특성을 살려서 커버리지를 최대화하고, 센서 특성에 맞게 배치된 노드의 네트워크 연결성을 최대화할 수 있는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 그림 3과 같이 진동센서와 같은 비방향성 센서는 지표면에 배치하고, 가지선이 보장되어야 하는 PIR센서와 같은 방향성 센서는 나무나 폴대 등을 이용하여 지상에 설치하여 센서 커버리지를 최대화한다. 또한 센서 설치높이에 따라 RF 전송거리의 차이가 있는 특성을 이용하여 토폴로지를 구성한다. 지표면에 설치되는 센서노드는 전송거리를 최대화하기 위해 설치높이가 높은 센서노

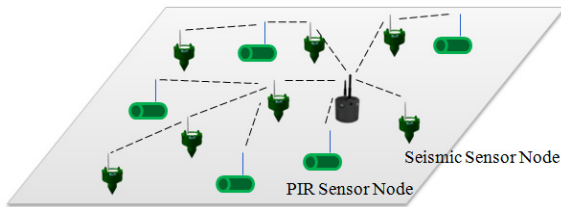


그림 2. 기존의 노드 배치 방법  
Fig. 2. Conventional 2-D node deployment method

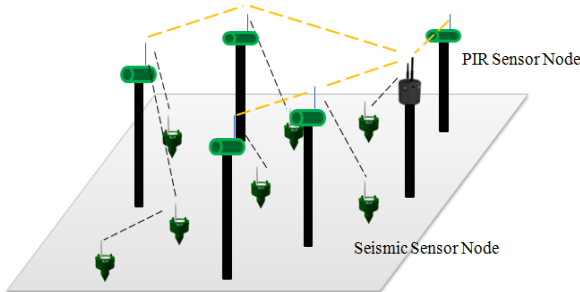


그림 3. 제안하는 3차원 공간 노드 배치 방법  
Fig. 3. Proposed 3-D node deployment method

드에 우선 연결하고, 설치높이가 높은 센서노드는 설치높이가 높은 센서노드로 연결하여 토폴로지를 구성함으로써 네트워크 연결성을 최대화한다. 이 방법을 적용할 경우 동일수량의 센서노드로 기존방법보다 더 넓은 영역을 감시할 수 있다.

센서노드의 배치에서 가장 중요한 센싱 커버리지와 네트워크 연결성은 각각 센서 탐지거리와 RF 전송거리와 관련이 있다. 센서의 탐지거리  $r_s$ 는 지형, 식생, 기상, 노드 배치 형태의 가중치를 반영하여 식(1)과 같이 구할 수 있다<sup>12)</sup>.

$$r_s = w_{st}w_{sv}w_{sc}w_{sd}R_S \quad (1)$$

여기서  $w_{st}$ ,  $w_{sv}$ ,  $w_{sc}$ ,  $w_{sd}$ 는 각각 지형, 식생, 기상, 노드 배치형태가 탐지거리에 미치는 가중치를 나타낸다. 탐지거리  $r_s$ 의 최대값은  $R_S$ 이며, 각각의 가중치의 범위는 0.0~1.0이다.

RF 전송거리  $r_c$  또한 지형, 식생, 기상의 가중치를 반영하여 식(2)를 이용하여 구할 수 있다<sup>12)</sup>.

$$r_c = w_{rt}w_{rv}w_{rc}R_C \quad (2)$$

여기서  $w_{rt}$ ,  $w_{rv}$ ,  $w_{rc}$ 는 각각 지형, 식생, 기상에 의한 전송거리 가중치를 나타낸다. 전송거리  $r_c$ 의 최대값은  $R_C$ 이며, 각각의 가중치의 범위는 0.0~1.0이다.

제안하는 3차원 공간 배치방법은 식(1)과 식(2)의 가중치에 노드의 설치높이  $h$ 를 고려하는 것이다. 노드의 설치높이를 고려한 센서 탐지거리  $r_s$ 는 식(3)과 같다.

$$r_s = w_{st}(h)w_{sv}(h)w_{sc}(h)w_{sd}(h)R_S \quad (3)$$

식(3)에서 알 수 있듯이 센서종류별 탐지거리  $r_s$ 는  $h$ 값에 따라 차이가 있다. 비방향성 센서 중 진동센서의 경우  $h$ 값이 낮을수록  $r_s$ 값이 커지므로  $h$ 가 0인 지표면에 설치한다. 반대로 방향성 센서중 대표적인 PIR센서의 경우  $h$ 값이 높을수록 가중치  $w_{st}$ 와  $w_{sv}$ 가 커짐으로써  $r_s$ 값은 증가한다. 따라서 PIR센서는  $h$ 값이 높은 곳에 설치한다.

선택한 센서종류에 따라 센서노드의 설치높이  $h$ 가 결정이 되면 이 값을 통해 RF 전송거리  $r_c$ 가 결정된다. 설치높이  $h$ 를 반영하여 RF 전송거리  $r_c$ 를 표현하면 식(4)와 같다.

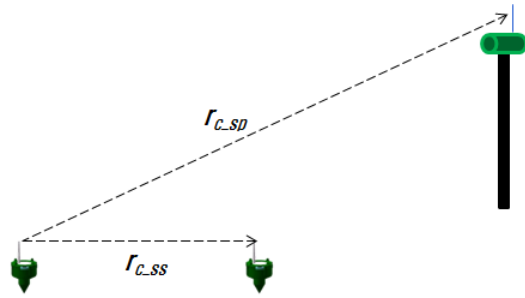


그림 4. 설치높이에 따른 전송거리 비교  
Fig. 4. RF transmission range between different sensors

$$r_c = w_{rt}(h)w_{rv}(h)w_{rc}(h)R_C \quad (4)$$

식(4)에서 알 수 있듯이, 설치높이  $h$ 가 높아질수록 통신 가지선이 증가하여 가중치  $w_{rt}$ 와  $w_{rv}$ 가 커지고  $r_c$ 는 커진다. 따라서 PIR 센서노드의  $r_c$ 값이 진동센서노드의  $r_c$ 값보다 크다. 또한  $h$ 가 0인 진동센서노드간 전송거리보다  $h$ 가 높은 PIR 센서노드와 통신할 경우가 가중치  $w_{rt}$ 가 커지기 때문에 전송거리가 길다. 즉, 그림 4에서 알 수 있듯이  $r_{c.sp}$ 가  $r_{c.ss}$ 가 더 길다.

센서 설치높이에 따라 RF 전송거리의 차이가 있는 특성을 이용하여 노드간 네트워크 토폴로지를 구성하면 네트워크 연결성을 증가시킬 수 있다. 그림 5와 같이  $h$ 가 낮은 센서노드( $SN_L$ )와  $h$ 값이 높은 센서노드( $SN_H$ )의 통신을 분리하는 2계층(2-tier)으로 토폴로지를 구성한다. 1계층은  $h$ 가 낮은 센서노드를  $h$ 가 높은 센서노드와 우선 연결하고 2계층은  $h$ 가 높은 센서노드간의 망을 구성하여 중계노드(RN)와 연결한다. 이때  $SN_L$ 이  $SN_H$ 와 연결할 수 없을 경우에는 주변에 통신이 가능한  $SN_L$ 와 직접 연결한다.

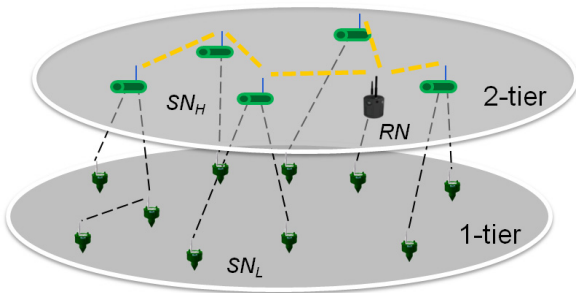


그림 5. 2계층 토폴로지 구성 방법  
Fig. 5. Network connectivity increment by 2-tier topology configuration

센서노드간 망을 물리적으로 구성할 때는 설치높이에 따라 센서노드의 ID를 구분하고 망 구성단계에서 센서노드의 ID를 이용한다. 즉, 설치높이가 낮은 센서노드는 주변 센서노드의 ID를 읽어서 설치높이가 높은 센서노드가 있을 경우에는 설치높이가 높은 센서노드와 연결을 하고, 설치높이가 높은 센서노드가 없을 경우에는 설치높이가 낮은 센서노드와 연결한다. 설치높이가 높은 센서노드는 주변 센서노드의 ID를 읽어서 설치높이가 높은 센서노드와 연결한다. 2계층 토폴로지를 운용함으로써 발생한 노드간 간섭은 1계층과 2계층에 채널이나 RF를 달리 적용하여 줄일 수 있다.

#### IV. 성능 평가

제안한 방법의 성능 검증은 먼저 PIR 센서의 높이별 커버리지 변화를 측정한다. PIR 센서의 높이별 커버리지는 Global Mapper Version 9.03과 실제 지형자료를 이용하여 시뮬레이션을 수행한다. 시뮬레이션에 사용한 실험지역의 고도 자료는 그림 6과 같이 27.7km×15.7km 영역으로 16.5m/pixel이다. 그림 6의 실험지역은 최소고도 217m에서 최대고도 306m로 분포해 있다. 센서노드의 최대 탐지거리는 30m이므로 실험에 사용한 지형자료를 이용하여 커버리지와 네트워크 연결성을 분석하는데 한계가 있다. 따라서 실험에서는 센서노드의 최대 탐지거리를 700m로 가정해서 시뮬레이션을 수행한다. 이는 지도의 해상도를 0.7m/pixel로 조정된 것과 같은 효과를 갖게 된다.

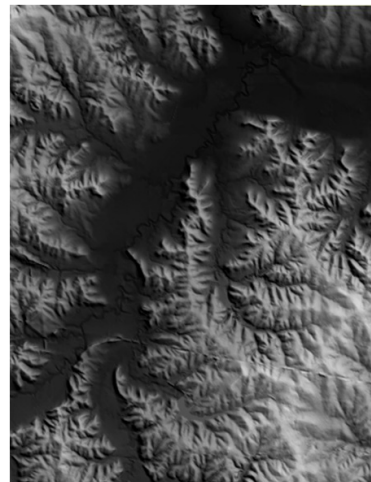


그림 6. 실험지역 고도자료  
Fig. 6. DTED in experimented area

시뮬레이션 결과분석을 쉽게 하기 위해 가시선 관점에서 커버리지를 분석할 수 있는 PIR 센서를 사용하고, PIR 센서는 360° 탐지가 가능하다고 가정한다. 실험은 센서노드를 지표면으로부터 0m, 0.5m, 1m, 1.5m, 2m 높이에 설치하고 각각의 높이에서 PIR 센서의 커버리지를 구하였다. 실험지역에서 센서노드 설치지역은 고도차가 많이 나는 우측하단을 선정하였으며 해당지역을 4×4 그리드 셀로 나누고 각 셀의 중앙에 센서노드를 설치하였다. 그림 7은 센서노드 설치높이에 따른 커버리지를 나타낸 것으로 그림 7(a)는 설치높이가 0m일 때를 나타내고, 그림 7(b)는 설치높이가 2m일 때를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 설치높이가 2m 일 때가 커버리지가 높다.

그림 8은 설치높이별로 4×4 그리드로 배치된 PIR 센서노드의 커버리지를 평균하여 나타낸 것이다. PIR 센서노드의 설치높이가 높을수록 센서 커버리지가 증가함을 확인할 수 있다. PIR 센서노드의 설치

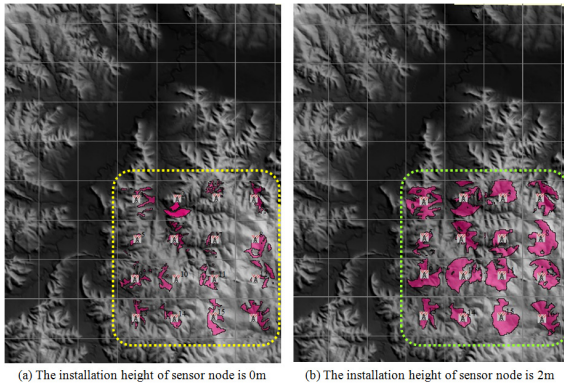


그림 7. 설치높이에 따른 센서노드의 커버리지  
Fig. 7. Coverage for different installation heights of sensor nodes

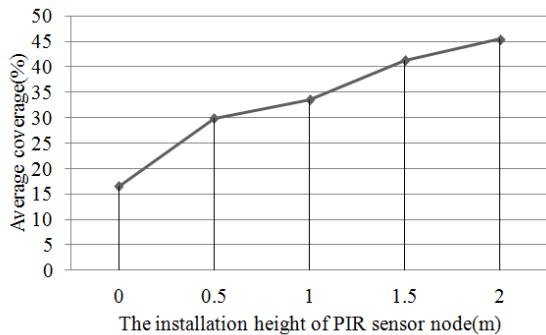



그림 8. 설치높이에 따른 PIR 센서노드의 평균 커버리지  
Fig. 8. Average coverage of PIR sensor node versus installation height

표 1. 노드 형상 및 제원

Table 1. Specification of the sensor node for experiment

Figure	Specification
 Sensor node	Size(mm)/Weight(kg): 110×110×90/1.5 MCU : MSP430 RF : CC1101 Battery : 3.7V/12Ah Sensor : magnetic, PIR, image

높이가 0m일 때 평균 커버리지는 16.5%이며 설치높이가 2m일 때 평균 커버리지는 45.4%로 설치높이 0m일 때보다 커버리지는 175% 향상된다.

센서노드의 설치 높이에 따른 RF 전송거리는 국방과학연구소에서 개발하고 있는 센서노드를 이용하여 측정하였다. 실험에 사용한 센서노드의 사양은 표 1과 같다. 센서노드는 MCU로 MSP430을 사용하고, RF칩은 433MHz 대역의 CC1101을 사용한다. 실험에 사용한 센서노드는 자기, PIR, 이미지 센서를 내장하고 있다.

실험 구성도는 그림 9와 같이 센서노드 2대를 가시선 환경에서 이격시키고 한쪽 센서노드와 노트북을 유선으로 연결한다. 센서노드는 지표면과 삼각대를 이용하여 지표면으로부터 1m 높이에 설치하여 높이에 따른 최대 전송거리를 측정하였다. 센서노드 간에 무선으로 망을 구성한 후 노트북에서 수신노드를 통해 송신노드에 전송할 패킷 수, 전송 간격을 설정하고 수신노드에서 총 수신 패킷 및 수신 감도를 측정하였다. 설정한 값은 100ms 간격으로 1,000개 패킷을 연속으로 전송하였으며, 수신하는 센서노드는 패킷을 수신하고 RSSI (Received Signal Strength Indication)값을 계산하여 모니터링 장비에 저장하였다. 실험에서 사용한 네트워크 프로토콜은 국방과학연구소에서 개발하고 있는 duty cycle 기반의 ADD\_MAC으로 전송속도는 100kbps, RF wakeup 구간을 50%로 설정하였다. 사용한 주파수 대역은 400MHz 대역이며, RF 송신출력은 10dBm이다. 실험에 사용한 송·수신노드의 실제 전송전력은 표 2와 같다.

센서노드의 설치높이에 따른 전송거리 실험결과를 그림 10에 나타냈다. 1,000개 패킷을 모두 수신했을 경우에 대해서만 통신 가능거리로 나타냈다. 그림 10에서 알 수 있듯이 지표면에 노드를 설치한 경우는 최대 전송거리가 평균 150m이고, 지표면으로부터 1m 높이에 설치한 노드의 최대 전송거리는 평균 195m이다. 노드를 지표면에서 1m 이격 시 수신 감도가 7 ~ 10dBm 정도 증가하고, 전송거리

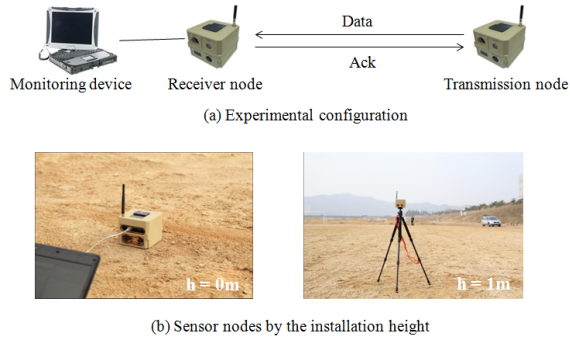


그림 9. 실험구성도 및 실험장면  
Fig. 9. Experimental configuration and picture

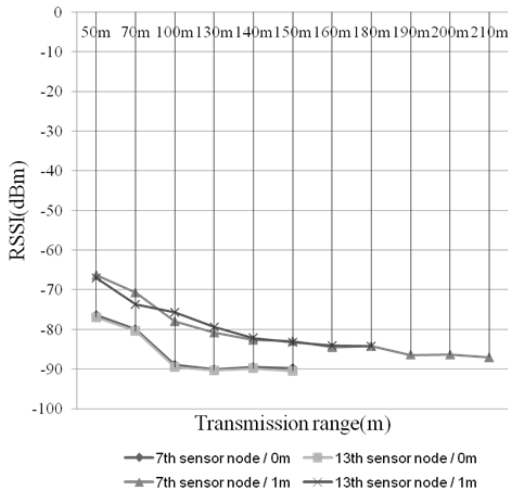


그림 10. 가시선 환경에서 이격높이에 따른 전송거리 실험 결과  
Fig. 10. Maximal transmission range by installation height in the LOS area

표 2. 실험대상 센서노드 전송출력  
Table 2. Transmission power of experimental sensor nodes

	Power value
Setting power	+10dBm
Transmission power of receiver node	Node ID 5: +9.05dBm
Transmission power of transmission node	Node ID 7: +9.6dBm Node ID 13: +9.8dBm

30% 증가함을 알 수 있다.

다음은 그림 11과 같이 노드 설치높이를 높여도 가시선이 확보가 되지 않는 비가시선(non-LOS) 지역에서 최대 전송거리 실험을 수행하였다. 실험지역은 그림 11에서와 같이 수목이 우거진 산악지역으로 능선을 사이에 두고 수신노드는 왼쪽에 설치하고, 송신노드는 오른쪽에 설치하였다. 수신노드는

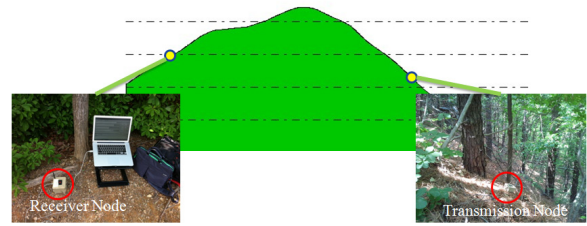


그림 11. 비가시선 지역에서의 실험장면  
Fig. 11. Experiments in the area of Non-LOS

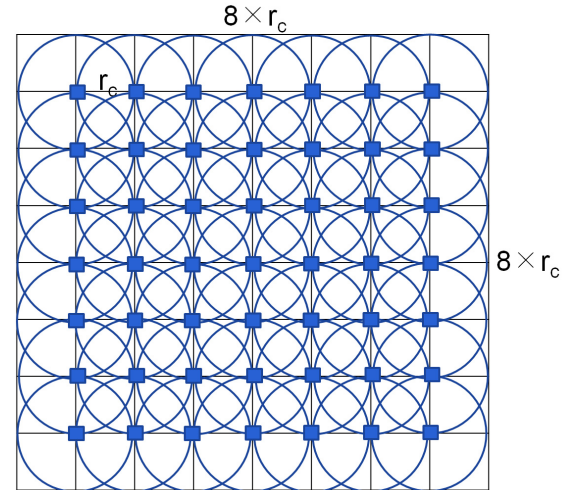


그림 12. 센서노드의 그리드 배치 및 네트워크 연결도  
Fig. 12. Grid deployment of sensor nodes and network connection

고정을 하고, 수신노드와 송신노드의 거리를 늘려가면서 전송성공율과 RSSI값을 측정하여 전송거리를 산정하였다.

실험결과, 전송 성공율이 100%인 최대 전송거리는 100m이며 가시선 환경보다 RSSI값은 4~5dBm 낮았다. 센서노드간 거리 110m 지점에서 송신노드 설치위치를 1.5m 높이로 올려서 측정하였는데 지표면에 놓았을 때는 통신접속이 안되는 것에 비해 통신접속이 가능하였다. 하지만 RSSI값이 -94.33dBm 이고, 전송 성공율이 34%로 가시선 환경에서 설치높이를 조절 한 것과 같은 효과는 얻지 못했다.

이는 수신노드와 송신노드가 능선 반대편에 위치하고, 노드 설치높이를 조절하여도 능선의 높이보다 작기 때문에 설치높이 조절의 효과가 적은 것으로 판단된다.

다음은 그림 12와 같이 7x7 그리드(grid)에 센서노드를 배치하여 센서노드가 커버할 수 있는 영역을 산출하였다. 시뮬레이션은 배치한 센서노드의 RF 전송거리를 동일하다고 가정하였으며 전송거리

를 기준으로 사각형 격자 그리드(square grid)를 형성하였다. 기존의 2차원 배치에서의 전송거리를  $r_c$ 라고 하면 3차원 배치의 전송거리는  $1.3 \times r_c$ 이다. 따라서 2차원 배치를 통해 커버할 수 있는 영역은  $64 \times r_c^2$ 이 되고, 3차원 배치를 통해 커버할 수 있는 영역은  $108.16 \times r_c^2$ 이 되어 커버할 수 있는 영역이 69% 늘어남을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 센서 고유특성을 살려서 커버리지를 최대화하고, 센서노드의 설치높이를 고려한 토폴로지 구성을 통해 네트워크 연결성을 최대화할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 진동센서와 같은 비방향성 센서는 지표면에 배치하고, 지향성 센서는 나무나 풀대 등을 이용하여 지상에 설치하여 센서 커버리지를 최대화 하였다. 그리고 설치높이가 낮은 센서노드는 설치높이가 높은 센서노드에 우선 연결하고, 설치높이가 높은 센서노드는 설치높이가 높은 센서노드와 연결하는 토폴로지를 구성하여 네트워크 연결성을 최대화하였다. 제안한 방법에 대한 시뮬레이션과 실험을 통해 성능을 검증하였다. PIR 센서는 설치높이를 증가시킴에 따라 가시선이 더 확보되어 커버리지가 증가함을 확인할 수 있었다. 센서노드의 RF 전송거리는 지표면 보다 1m 설치높이에서 30% 증가하였다. 그러나 노드의 설치높이를 조정했는데도 노드간 가시선이 확보가 안 될 경우에는 RSSI값이나 전송 성공율은 크게 향상되지 않았다. 센서노드의 설치높이를 고려하여 토폴로지를 구성할 경우 설치높이를 고려하지 않은 경우보다 RF 커버영역이 69% 증가하였다. 향후 본 논문에서 제안하는 방법은 다양한 환경조건에서 실험을 통해 검증을 하고, 제안 방법을 C2단말기의 임무계획 기능에 포함하여 노드 배치를 자동화할 계획이다.

## References

[1] Yonghyun Kim and Nohbok Lee, "Technical Trends of Wireless Sensor Network," *New Defense Technology Trends*, Vol. 24, pp. 100-110, 2011.

[2] Nor Azlina Ab. Aziz, Kamarulzaman Ab. Aziz, and Wan Zakiah Wan Ismail, "Coverage

Strategies for Wireless Sensor Networks," *World Academy of Science, Engineering and Technology* 50, 2009.

- [3] Mohamed Younis and Kemal Akkaya, "Strategies and Techniques for Node Placement in Wireless Sensor Networks: A Survey," *Ad Hoc Networks*, Vol.6, pp.621-655, 2008.
- [4] Yonghyun Kim and Kwangsue Chung, "Effective intruder detection method using seismic sensor," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 14, No. 6, pp. 1129-1137, December 2011.
- [5] John B. Mckitterick, "Sensor Deployment Planning for Unattended Ground Sensor Networks," *Proc. of SPIE*, Vol. 5417, 2004.
- [6] E.S. Biagioni and G. Sasaki, "Wireless Sensor Placement for Reliable and Efficient Data Collection," *HICSS*, 2003.
- [7] A. Howard, M. J. Mataric, and G.S. Sukhatme, "An Incremental Self-deployment Algorithm for Mobile Sensor Networks," *Autonomous Robots, Special Issue on Intelligent Embedded Systems*, Vol.13, No.2, pp.113-126, 2002. 9.
- [8] Y. Zou and K. Chakrabarty, "Sensor Deployment and Target Localization based on Virtual Force," *IEEE INFOCOM*, pp.1293-1303, 2003. 3.
- [9] Z. Butler and D. Rus, "Event-based Motion Control for Mobile-sensor Networks," *IEEE Pervasive Computing*, Vol.2, No.4, pp.34-42, 2003.
- [10] G. Wang, G. Cao, T.L. Porta, and W. Zhang, "Sensor Relocation in Mobile Sensor Networks," *IEEE INFOCOM*, pp.2302-2312, 2005.
- [11] D. Kim, H. Choi, J. Lee et al., "A Sensor Node Deployment Method Based Environmental Factors Influencing Sensor Capabilities," *The Journal of Korea Information and Communication Society*, Vol. 33, No. 10, pp. 894-903, October 2008.
- [12] Yonghyun Kim, Myungho Yeo, Daesik Kim, and Kwangsue Chung, "A Node Deployment Strategy Considering Environmental Factors and the Number of Nodes in Surveillance and



Reconnaissance Sensor Networks,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2012, Article ID 385282, 11 pages, 2012. doi:10.1155/2012/385282

- [13] Y.T. Hou, Y. Shi, and H.D. Sherali, “On Energy Provisioning and Relay Node Placement for Wireless Sensor Network,” *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, Vol.4, No.5, pp.2579-2590, 2005.
- [14] E.L. Lloyd and G. Xue, “Relay Node Placement in Wireless Sensor Networks,” *IEEE Trans. on Computer*, Vol.56, No.1, pp.134-138, 2007.
- [15] S. M. Nazrul Alam and Zygmunt J. Haas, “Coverage and Connectivity in Three-Dimensional Networks,” *MobiCom*, 2006. 9.

**김 용 현 (Yong-Hyun Kim)**



1993년 2월 광운대학교 전자공학과 졸업  
 1995년 2월 광운대학교 전자공학과 석사  
 2009년 3월~현재 광운대학교 전자통신공학과 박사과정  
 1995년 1월~현재 국방과학연

구소 선임연구원

<관심분야> 센서네트워크, 센서신호처리, UGS

**김 이 형 (Lee-Hyeong Kim)**



1994년 2월 광운대학교 컴퓨터공학과 졸업  
 1996년 2월 광운대학교 컴퓨터공학과 석사  
 1996년 1월~현재 국방과학연 구소 선임연구원

<관심분야> 센서네트워크, 센

서신호처리

**안 미 림 (Mirim Ahn)**



1985년 5월 조지메이슨 대학교 전산과학과 졸업  
 1996년 8월 고려대학교 전산과학과 석사  
 1998년 8월 고려대학교 전산과학과 박사과정 수료  
 1986년 3월~현재 국방과학연

구소 책임연구원

<관심분야> 망 관리, 센서네트워크, 컴퓨터 보안

**정 광 수 (Kwangsue Chung)**



1981년 2월 한양대학교 전자공학과 학사  
 1983년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사  
 1991년 2월 University of Florida 전기공학과 박사  
 1983년 3월~1993년 2월 한국

전자통신연구원 선임연구원

1993년 3월~현재 광운대학교 전자통신공학과 교수  
 <관심분야> 인터넷 QoS, 유·무선 비디오 스트리밍, 센서네트워크