

## 스마트그리드를 위한 지그비 기반의 라우팅 알고리즘에 관한 연구

강형석\*, 임송빈\*\*, 오영환\*

### A Study on ZigBee-Based Routing Algorithm

Hyung-Seok Kang\*, Song-Bin Im\*\*, Young-Hwan Oh\*

#### 요 약

본 논문에서는 스마트그리드 환경에서 적용되고 있는 ZigBee 무선 통신 환경의 주소 지정 방식과 라우팅 알고리즘의 성능을 향상시키기 위한 새로운 위치 기반 좌표 라우팅 알고리즘을 제안하였다. 기존 *ksp* 알고리즘을 이용한 분산 주소 할당 기법의 낭비되는 주소공간의 문제를 해결하기 위해 (x,y,z) 3개의 좌표 축을 제안하여 16bit 주소공간을 분할하여 사용한다. 그러나 좌표 라우팅은 채널 상태를 고려하지 않는다. 채널 상태를 고려하지 않는다면, 라우팅 테이블이 업데이트 될 때 채널 상태가 좋지 않은 노드가 테이블에 업데이트 되어 릴레이 노드로 선택 되어질 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 위치 기반 라우팅에서 채널 상태를 고려함으로 신뢰성 있는 데이터 전송을 보장하고 소비되는 에너지를 최소화 할 수 있는 위치 기반 좌표 라우팅 알고리즘 라우팅 방법을 제시하였다. 그리고 제안한 알고리즘의 평균 멀티 홉 수, 부하에 대한 패킷 전달률, 지연 시간, 에너지 소비를 ZigBee 위치 기반 라우팅의 안전 영역과 전이 영역에 대해 비교하였다. 성능 평가 결과 각 항목에 대해 각각 성능 향상을 보였다.

▶ Keywords : 스마트 그리드, 지그비, Cskip 알고리즘, 위치기반 알고리즘

#### Abstract

In this paper, we proposed the location-aware coordinate routing algorithm for improving the performance of routing algorithm by using ZigBee in Smart Grid environment. A distributed address allocation scheme used an existing algorithm that has wasted in address space. The x, y and z coordinate axes from divided address space of 16 bit to solve this problems. However, coordinate routing does not take account of wireless link condition. If wireless link condition is not considered, when the routing table is updated, the nodes with bad link conditions are updated in the routing table and can be chosen as the next hop. This brings out the retransmissions because of received packet's errors. Also, because of these retransmissions, additional power is consumed.

• 제1저자 : 강형석 • 교신저자 : 오영환

• 투고일 : 2012. 12. 18. 심사일 : 2012. 12. 23. 게재확정일 : 2012. 12. 26.

\*\* 광운대학교 전자통신공학과 박사과정

\* 광운대학교 전자통신공학과 교수

In this paper, we propose the location-aware coordinate routing algorithm considering wireless link condition, where reliable data transmission is made and the consumed energy is minimize. and we compared and connected region and transition region of ZigBee location based routing in the aspect of average number of multi hops, subordinate packet delivery ratio, delay time, and energy consumption of proposed algorithm. It turned out that there were improvements in performances of each items.

▶ Keywords : Smart Grid, ZigBee, Cskip Algorithm, Location aware routing Algorithm

## I. 서 론

현재 빠른 속도로 진행되고 있는 온난화 현상은 해수면 상승 등의 다양한 환경 문제를 야기하고 있다. 이와 같은 온난화 현상의 원인은 아직 명확하게 규명되지 않았으나 1985년 세계기상기구(WMO)와 국제연합환경계획은 이산화탄소를 온난화의 주요한 원인으로 공식적으로 선언하였으며 온난화로 인한 비정상적인 기후 변화 현상을 방지하기 위해 1997년 전 세계 주요 국가는 교토의정서를 결의하였다. 교토의정서는 의무 이행 대상 국가에 온실가스 발생량을 제한하며 그 이행을 위해서는 공동이행제도, 청정개발체제, 배출권 거래제도 등의 탄력 있는 제도를 제시하고 있어 한국과 같은 온실가스를 대량으로 배출하는 국가는 탄소 배출권을 구입하기 위해 많은 비용을 소비할 것으로 예상된다. 이러한 전망으로 인해 Smart Grid와 같은 온실가스 배출을 감소시키는 연구의 필요성이 증가하고 있다[1].

Smart Grid는 기존의 전력 산업에 정보 통신기술을 접목하여 에너지 소비를 관리하는 기술을 말한다[2]. 다가올 Smart Grid 기반의 전력망은 다양한 생산자의 전력 생산 시스템과 다양한 소비자의 시스템을 통합하고 실시간으로 대응하는 방향으로 발전할 것이다. 현재 전기 자동차 배터리, 가전제품, 신재생에너지, 스마트 미터등 다양한 분야에 접목시켜 에너지 효율 최적화에 중점을 두어 연구개발에 있다. 따라서 AMR(Auto Meter Reading)의 단순한 원격 검침 기능뿐만 아니라 생산자와 소비자 간의 양방향 정보 제공 및 연동의 기능을 가지는 AMI(Advanced Metering Infrastructure)와 같은 인프라가 Smart Grid에 있어 필수적인 요소가 될 것이다[3]. AMI란 다양한 정보통신 기술을 활용하여 전력, 가스, 물 등의 에너지생산/소비정보를 실시간으로 전달하여 에너지의 효율적인 활용을 지원하는 Smart

Grid 기술을 말한다. 현재 스마트 컨트롤러와 AMI를 연결하기 위한 네트워크 시스템으로는 다양한 네트워크 프로토콜이 제안되고 있다. 유선으로는 RS485 및 전력선 통신(Power Line Communication)등이 있고, 무선으로는 bluetooth, ZigBee, Z-Wave등이 거론되고 있다[4]. 지금까지는 Smart Grid 산업의 도입 단계로써 스마트 시티에 적합한 연구 개발이 활발한 가운데 각종 건물이나 빌딩 등 입체 공간 및 다양한 환경에 적합하도록 많은 연구가 진행되고 있다. 현재 가정이나 빌딩 등에서 주로 사용되고 있는 방식은 음성과 문자데이터, 영상 등을 전송하는 기술로써 별도의 배전공사 없이 가정에 이미 깔려있는 전력선을 사용해 홈 네트워킹을 구현하고 있다. 그러나 전력선을 공통으로 사용함에 따라 발생하는 낮은 전송 속도와 표준화 결여로 인해 기기간 폭넓은 호환성 확보에 어려움이 따른다. 때문에 활발한 스마트산업의 발전에 따라 HA(Home Automation) 시스템을 구현하기 위해 ZigBee 무선 통신이 많이 고려되고 있다. ZigBee는 저 전력, 저 가격, 사용의 용이성을 가진 근거리 무선 센서 네트워크의 대표적 기술 중의 하나로써 물리 계층과 MAC층을 기반으로 상위 계층인 네트워크 계층, APL 계층으로 ZigBee 표준에 정의되어 있다. 이러한 ZigBee 통신규격은 유럽 868MHz, 미국 915MHz를 사용하며 전 세계적으로 2.4GHz 주파수 대역을 사용하고 있다. ZigBee 네트워크 계층에 관련하여 라우팅 경로를 줄이기 위한 방법으로 노드가 가진 이웃네이블을 이용한 다양한 라우팅 방법이 연구되고 있다[6-7]. ZigBee 네트워크는 코디네이터, 라우터, 센서 노드로 구성되며 이러한 많은 노드들이 하나의 네트워크를 구성하며 센서 네트워크에서 주소 범위를 할당하는 방식으로 *kip* 알고리즘을 사용한다. 분산 주소 할당 방식 중의 하나인  $C_{skip}$  알고리즘을 쓰기 위해 3가지의 고정된 파라미터를 알아야 한다. 이 3가지 파라미터는 라우터나 코디네이터가 가질 수 있는 지식노드의 최대 개수, 지식노드가 라우터로 될 수

있는 최대 개수, 네트워크의 최대 깊이이다. 그러나 이렇게 논리적으로 형성된 네트워크는 실제적으로 센서를 배치하게 되면 낭비되는 주소 공간이 증가할 수 있다는 치명적인 약점이 존재한다. 본 논문에서는 노드가 데이터 전송 시 기존 ZigBee 분산 주소 할당 기법보다 더 나은 멀티 홉을 가지며 낭비되는 주소 공간을 해결하고자 (x, y, z) 3개의 좌표 값을 이용하고, 신뢰성 있는 전송을 위해 채널 상태를 고려한 위치 기반 알고리즘은 제안한다. 본 논문의 세부 구성은 다음과 같다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 관련 연구를 기술하였고, III장에서는 제안내용을 설명하였다. IV장에서는 실험 및 고찰에 대하여 설명하고, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 기존 연구

### 1. ZigBee Network

ZigBee 네트워크를 구성하는 노드는 라우팅 기능을 갖는 코디네이터, 라우터와 라우팅 기능을 갖지 않는 종단 장치로 구분된다. 코디네이터는 라우팅 기능 뿐만 아니라 네트워크를 시작하는 역할을 한다. 라우터는 라우팅 기능을 가지고 있기 때문에 중간 노드로서의 역할을 수행하며 하위 자식노드를 소유할 수 있다. 반면 종단 장치는 라우팅 기능을 가지지 않기 때문에 하위에 자식노드를 가질 수 없고 sleep 모드를 이용하여 에너지 소모를 감소시키는 기능을 갖는다. ZigBee 표준에서 제정되어 있는 라우팅 알고리즘으로써 IEEE 802.15.4 MAC이 beacon-enable node일 경우 트리 라우팅 기법을 이용하고, non-beacon node일 경우에는 메쉬 라우팅 기법을 사용하도록 권장하고 있다. ZigBee 트리 라우팅 네트워크는 부모-자식 관계를 통해 트리 구조로 구성된다. 가장 먼저 코디네이터가 상위 부모 노드로 지정되고 나머지 하위 노드들이 방사형으로 코디네이터에 가까운 자식노드부터 위치하게 된다.

기본적으로 트리 라우팅 기법은 분산 주소 할당 기법에 의해 동작한다. 코디네이터와 라우터는 네트워크에 참여하기 위해 자신에게 접속을 요청하는 새로운 노드에게 16bit 주소를 할당하며  $2^{16} = 65536$ 개의 노드를 할당할 수 있다. 이 주소는 네트워크 내에서 라우팅을 위한 유일한 주소가 된다. 자식 노드에게 주소 할당이 가능한 코디네이터나 라우터는 자신의 네트워크 깊이에 따라 할당 가능한 주소범위를 갖게 되는데 이는 *skip* 알고리즘을 통해 계산하게 된다.

$$kip(d) = \begin{cases} 1 + C \times (L_m - d - 1) & , \text{if } R_m = 1 \\ 1 + C_m - R_m - C_m \times R_m^{-d-1} & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서 나타내는 변수 값들은 아래 표 1과 같다. 깊이가 결정되어 있고, 최대 자식의 개수와 노드가 가질 수 있는 최대 라우터의 개수가 정해져 있을 때 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 주소를 분산적으로 할당할 수 있다.

표 1. 식(1)에 대한 변수 정리  
Table 1. Variables for Equation (1)

변수	의미
<i>kip(d)</i>	해당 노드가 할당할 수 있는 주소 블록 범위
<i>C</i>	각 노드가 가질 수 있는 최대 자식 개수
<i>L<sub>m</sub></i>	네트워크 최대 깊이
<i>R<sub>m</sub></i>	자식으로 가질 수 있는 최대 라우터 개수
<i>d</i>	자신의 네트워크 깊이

*kip* 알고리즘을 통해 해당 노드가 할당할 수 있는 노드의 주소 블록 범위를 구하게 되며 새로운 노드의 접속을 수락한 부모노드는 식 (2)에 따라서 주소를 할당한다.

$$A = A_{parent} + Cskip(d) \times m + 1 \quad (2)$$

식 (2)에 대한 변수를 정리하면 표 2와 같다.

표 2. 식(2)에 대한 변수 정리  
Table 2. Variables for Equation (2)

변수	의미
<i>A<sub>n</sub></i>	새로운 노드에 부여할 주소
<i>A<sub>parent</sub></i>	주소를 할당하는 부모의 주소
<i>m</i>	현재 부모 노드가 가지고 있는 라우터 개수

트리 라우팅 알고리즘은 별도의 라우팅 테이블 없이 분산 주소 할당 기법과 간단한 계산식을 통해 데이터를 전송하는 방식이다. 오로지 부모 노드나 자식 노드로만 데이터를 전송하는 약점을 지니고 있다. 식 (2)를 통해 주소를 할당한 후 어느 한 라우터가 자식노드로부터 통신하고자 하는 목적지 주소를 받았을 때 식 (3)이 성립을 하면 자신의 다른 자식들에게 이 데이터를 전송하고 성립하지 않으면 이 값을 부모 노드에게 전송한다.[8] 이 데이터를 받은 부모 노드는 이 같은 작

업을 반복하며 트리 라우팅이 이루어진다.

$$D < A_r + Cskip(d-1) \tag{3}$$

여기서  $A_r$ 은 라우터 자신의 주소이며  $D$ 는 목적지 주소를 의미한다. 그림 2와 표 3은 각 노드가 가질 수 있는 최대 자식 노드의 개수가 4이고, 자식으로 가질 수 있는 최대 라우터의 개수가 4이며, 네트워크의 최대 깊이가 3일 때의 주소 할당 예를 보여 주고 있다. 이 예제에서 볼 때 현재의 깊이  $d$ 가 0일 때  $Cskip(0)$ 의 값이 식 (1)에 의해서 21이 된다. 코디네이터는 0번으로 주소가 할당되어 자식 노드의 주소를 할당할 때 첫 번째 자식 노드의 주소를 자신의 주소에 1을 더해서 주소 값을 1로 할당을 한다. 두 번째 자식의 주소 값을  $Cskip(0)$  값인 21에 자신의 주소인 1을 더해서 22를 할당하는 방식으로 첫 번째 깊이의 주소 값을 할당한다. 이와 같은 방식으로 두 번째 깊이의 주소 값을 할당할 경우도 마찬가지로  $Cskip(1)$  값을 이용하여 첫 번째 깊이에 있는 노드의 주소를 할당할 때와 같은 방식으로 할당한다. 하지만 각 21개씩의 주소 범위를 할당 하였음에도 불구하고 그림 2에서처럼 하나의 라우터가 가지는 자식 센서 노드 개수가 주소 블록 범위만큼 할당되지 않는다면 그만큼의 주소 공간의 낭비를 초래하게 된다. 때문에 이러한 주소 공간 낭비의 해결을 위한 새로운 주소 할당 방식이 제안 되고 있다.

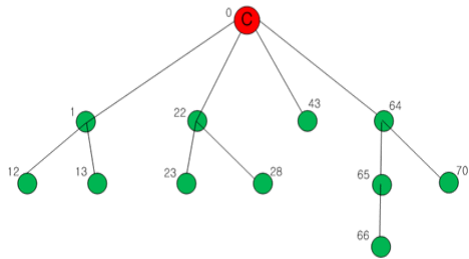


그림 2.  $C_m = R_m = 4, L_m = 3$  일 때의 주소 할당  
 Fig. 2. Address allocation when  $C_m = R_m = 4$  and  $L_m = 3$

표 3.  $C_m = R_m = 4, L_m = 3$  일 때의  $Cskip(d)$   
 Table 3.  $Cskip(d)$  when  $C_m = R_m = 4, L_m = 3$

D	$Cskip(d)$
0	21
1	5
2	1
3	0

## 2. (x,y,z) 좌표 기법

### 2.1 (x,y,z) 좌표 프레임 구조

기존 ZigBee 네트워크에서 사용하는 네트워크 계층의 프레임은 그림 3과 같고, 네트워크에서 사용하는 주소 필드는 총 4바이트가 할당되며 목적지 주소와 송신지 주소에 각각 2바이트 씩 할당하여 사용한다. 따라서 그림 3에서와 같이 목적지, 송신지 노드는 각 16비트씩 할당 가능한 주소 범위를 가지며 총 65536개의 노드를 할당할 수 있다. 하지만 무선 통신 환경에서 공간에 대한 성분을 충분히 고려해야 하며 65536개의 할당된 노드가 충족되지 않는다면 주소 공간의 낭비를 가져온다.

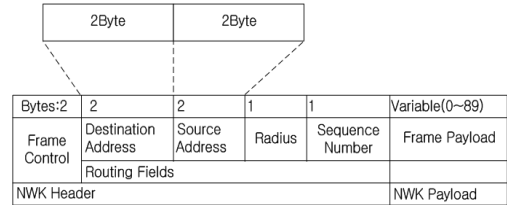


그림 3. 네트워크 계층의 프레임 형식  
 Fig. 3. The network layer frame format

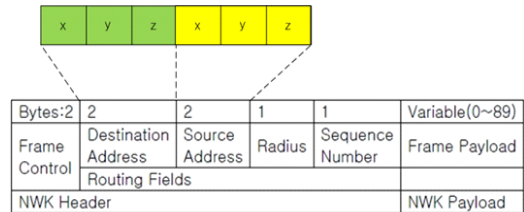


그림 4. 제안하는 네트워크 계층의 프레임 형식  
 Fig. 4. The network layer frame format of the proposed

이러한 문제점을 해결하기 위해 (x,y,z) 좌표 라우팅에서는 그림 4에서와 같이 16비트의 주소공간을 (x, y) 또는 (x, y, z) 좌표 값을 유동적으로 주소 공간을 할당하여 사용한다.

### 2.2 (x,y,z) 좌표 라우팅

ZigBee 센서 네트워크는 계층적인 구조로 되어 있으므로 통신 경로를 설정해 주어야 한다. 그러기 위해서는 관리자가 임의로 일정한 노드에 라우팅 기능과 센싱 기능을 동시에 하는 디바이스인 FFD(Full Function Device)를 두고 나머지 노드에는 센싱 기능만을 하는 RFD(Reduced Function Device)를 둔다. x, y, z) 좌표 라우팅 알고리즘은 일반적인

건물인 2차원 평면에서의 거리 벡터 알고리즘과 각 층에 상가나 기타 사무실 등이 많이 층당 다수의 미터기가 설치되어야 하는 3차원 공간에서의 위치 기반 주소할당 방법이다. 그림 5는 (x, y, z) 좌표평면상의 거리벡터와 경로벡터를 예로 들고 있다.

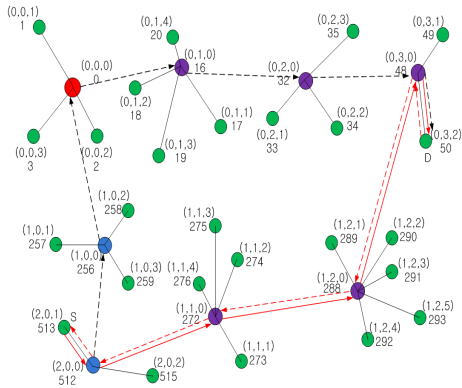


그림 5. (x, y, z) 좌표상의 위치 기반 경로벡터  
Fig. 5. (x, y, z) coordinates on a location-based path vector

그림 5에서 적용한 좌표 값을 위치 기반상의 경로 벡터로 적용하였을 경우를 예로 들고 있다. 먼저 그림 8에서 설명한 거리 벡터 관점의 예를 들어 관찰하면, 그림 5의 (2, 0, 1)에서 (0, 3, 2)로 보낼 경우 축 값을 따라 7홉에 걸쳐가게 된다. 하지만 경로 벡터는 FFD 노드 스스로 자신에게 가까운 또 다른 FFD 노드를 검색하여 주소를 저장하고 있기 때문에 총 5홉으로 좀 더 효율적인 단축 경로를 설정할 수 있다. 때문에 거리 벡터에서보다 경로 벡터를 적용하였을 때 2홉이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

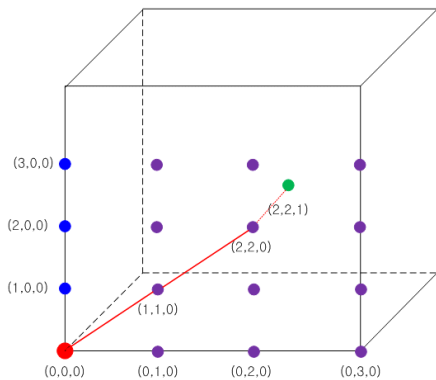


그림 6. (x, y, z) 좌표상의 위치 기반 경로벡터  
Fig. 6. (x, y, z) coordinates on a location-based path vector

그림 6은 평면상의 라우팅을 4층짜리 건물이나 빌딩 등에 경로 벡터를 적용한 경우를 예로 들었다. 거리 벡터 기반을 하였을 경우 x축으로 2홉, y축으로 2홉, z축으로 1홉을 거치게 되므로 모두 7홉을 거치게 되지만 초기 설정과정에서 위치를 인식하는 노드들이 경로 벡터를 사용하여 근접 테이블에서 라우팅 주소를 검색하여 최소한의 홉을 가지는 경로를 설정할 수 있다. 따라서 그림 6과 같이 경로 벡터를 사용할 경우 3홉에 도달할 수 있게 된다. 그러나 센서 노드들은 채널 상태가 좋지 않은 나쁜 환경에 분포 될 수도 있다. 이러한 환경과 더불어 송신 노드에서 목적지 노드인 노드까지의 거리가 멀어져 목적지까지의 홉 수(hop count)가 증가하게 되면 보내고자 하는 데이터가 목적지까지 도달 할 가능성은 점점 더 낮아지게 된다. 따라서 위치 기반 라우팅을 사용할 경우 노드의 위치 뿐만 아니라 채널 상태까지 고려되어야 한다. 만일 채널 상태가 고려되지 않는다면 전송시 채널 상태가 좋지 않은 노드가 다음 홉으로 선택되어 보내고자 하는 데이터가 목적지에 제대로 전달되지 못할 수 있을 뿐 아니라 재전송으로 인해 추가의 에너지가 소비되게 된다.

### III. 제안하는 방식

#### 1. 위치 기반 라우팅

위치 기반 라우팅에서 만일 목적지 노드가 전송 노드의 전송 범위 내에 존재한다면 전송 노드는 패킷을 목적지 노드에 바로 보내고, 목적지 노드가 전송 노드의 전송 범위 밖에 존재할 때에는 자신보다 목적지에 가까이 위치한 노드 중에서 최적 노드를 릴레이 노드로 선택한다. 그림 7에서처럼 노드의 전송거리 범위 내에는 연결 영역(Connected Region), 전이 영역(Transitional Region), 비연결 영역(Disconnected Region)의 영역 3가지 구별되는 영역이 존재한다. 자신의 전송 범위내의 모든 노드는 자신의 이웃노드이다. 이 중 연결 영역 내에 있는 노드는 수신단에서 거의 모든 패킷을 완벽하게 수신할 수 있다. 반면 비연결 영역에서는 거의 모든 패킷이 에러를 가지고 수신된다. 여기서 가장 고려해야 할 영역은 전이영역이다. 전이 영역에서의 패킷은 에러를 가지고 수신될 수도 있고, 에러 없이 수신 될 수도 있다.

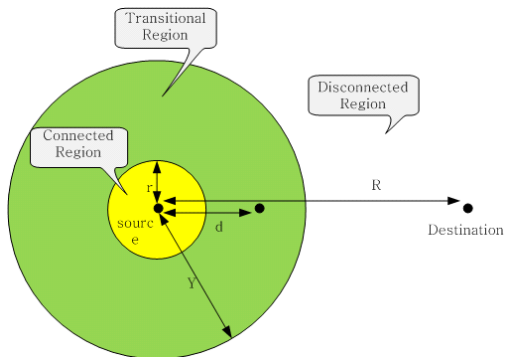


그림 7. 노드 간의 전송 영역  
Fig. 7. Transmission regions between source node and destination node

### 2. 위치 기반 라우팅의 문제점

전송 노드 S와 목적지 노드 D가 주어질 경우, 이웃노드 X의 순방향은 S와 D의 거리에서 X와 D의 거리를 뺀 값으로 정의 된다. 위치 기반 라우팅에서 루프(loop)가 발생되지 않기 위해서는 순방향을 가지는 이웃 노드가 릴레이 노드로 선택 되어져야 한다. void 노드는 자신의 전송거리 범위 내에서 자신보다 목적지에 가까이 위치하는 노드가 존재하지 않는 노드로서, 만일 보이드 노드가 존재하면 역방향을 가지는 노드가 릴레이 노드로 선택되어질 수 있기 때문에 루프가 발생할 수 있다. 루프가 발생하지 않으면서 보이드 노드를 해결할 수 있는 방법은 크게 right hand 법칙과 back pressure 법칙 두 가지로 분류된다.

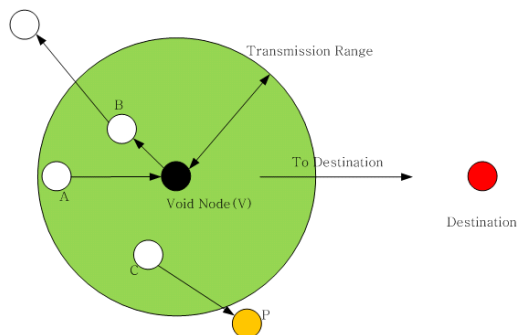


그림 8. Right hand 법칙  
Fig. 8. Right hand rule

그림 8에서 right hand 법칙은 보이드 노드(V)는 각 방법들에서 다르게 설정되는 기준선을 중심으로 시계 반대 방향으로 회전 시키면서 처음으로 만나게 되는 노드(B)로 패킷을

전송하게 된다. 그림 2에서 보이드 노드(V)는 C 노드를 경유하여 P 노드로 패킷을 보낼 경우 루프가 발생되지 않으면서 보이드 문제를 해결할 수 있다. 그러나 패킷을 B로 보내게 되면 문제가 발생한다. 그림 9에서 back pressure 법칙은 void 노드는 비컨 메시지를 보내게 되고, 패킷을 전송하기 위하여 보이드 노드를 필요로 하는 갠신 노드는 비컨 메시지를 이용하여 보이드 노드로 패킷을 전송하는 것을 중단하고 목적지 방향으로 다른 노드를 찾으려고 시도하게 된다. 또한 이러한 방법은 혼잡 회피를 위해서도 사용될 수 있다. 그러나 보이드 노드가 패킷을 어떻게 전송해야 하는 지는 언급하지 않고 있다.

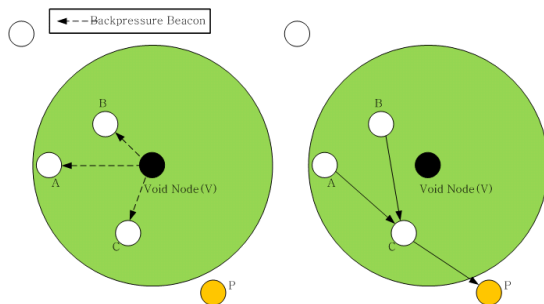


그림 9. Back pressure 법칙  
Fig. 9. Back pressure rule

### 3. 노드간 전송 거리

임의의 실수  $\epsilon$ 에 대해 샘플 평균과 모평균의 차이가  $\epsilon$ 보다 클 확률은 샘플 크기  $n$ 이 커지면서 점점 작아진다는 것을 의미하는 대수의 약법칙(Weak Law of Large Number)에 의해 PRR(Packet Reception Rate)는 패킷을 성공적으로 받을 확률  $p$ 에 의해 근사화 될 수 있다[19]. 이때 송신 노드에서 거리  $d$ 만큼 떨어진 노드에서 패킷을 성공적으로 수신할 확률  $p$ 는 아래와 같이 표현 될 수 있다.

$$p = \left(1 - \frac{1}{2} \exp^{-r(d)}\right)^f \quad (1)$$

여기서,  $f$ 는 프레임 크기,  $r(d)$ 는 거리  $d$ 에서의 SNR(Signal to Noise Ratio)이다. 식 (1)로부터  $r(d)$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$r(d) = 10 \log_{10} \left( -1.28 \ln \left( 2(1 - p)^{\frac{1}{sf}} \right) \right) \quad (2)$$

$r(d)$ 는 [19]로부터 아래와 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$(d) = 10 \log_{10} \frac{10^{P_t - PL(d)}}{10^{10}} = 10 \log_{10} 10^{\frac{(P_t - PL(d) - P_n)}{10}} \quad (3)$$

여기서,  $P_t$ 는 전송전력(transmitting power)(dBm)이고,  $PL(d)$ 는 거리  $d$ 에서 path loss(dB)이고,  $P_n$ 은 noise floor(dBm)이다.  $PL(d)$ 는 [19]로부터 아래와 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$L(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (4)$$

여기서,  $d$ 는 송수신 노드 간 거리이고,  $d_0$ 는 reference distance이고,  $n$ 은 path loss exponent,  $X_\sigma$ 는 zero-mean Gaussian RV with standard deviation이다.

$$P_n = (F+1)kT_0B \quad (5)$$

여기서,  $F$ 는 noise figure이고,  $k$ 는 Boltzmann's constant이고,  $T_0$ 는 ambient temperature,  $B$ 는 equivalent bandwidth이다. 식 (3)에 식 (4)를 이용하여  $PL(d)$ 를 대입하고 식 (2)와 비교하여 거리  $d$ 를 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$d = \left( 10^{\frac{-PL(d_0) - P_n}{10} \log_{10}(-1.28 \ln(2(1 - P^{sf})))} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

#### 4. 제안하는 위치 기반 라우팅 알고리즘

본 논문에서 가장 고려하는 영역은 전이 영역이다. 전이 영역에서의 패킷은 에러를 가지고 수신 될 수도 있고, 에러 없이 수신 될 수도 있다. 전이 영역이 시작되는 거리  $r$ 범위 내에서는 재전송 없이 신뢰성 있는 데이터 전송이 가능하다. 그러나 목적지 방향으로 나아가는 평균 원 홉 전송거리(Average One Hop Forwarding Distance)는 다음 홉이 거리  $r$  이상에서 선택 되어지는 경우보다 짧아지게 된다. 또한 목적지 방향으로 나아가는 평균 원 홉 전송 거리가  $r$ 보다 커지게 되면 재전송은 증가하지만 홉 수가 줄어들게 된다. 그러므로 본 논문에서는 제안된 라우팅 방법에서, 에너지 소비

를 최소화하기 위해 선택되어진 노드와의 거리( $d_0$ )에 대한 최적의 전송 확률 ( $p$ )를 결정하기 위해서는 재전송과 목적지 방향으로 나아가는 평균 원 홉 전송 거리와의 관계가 고려 되어져야 한다. 이 둘 사이의 관계는 아래와 같다.

$$-\left(\frac{R}{r} - \frac{R}{d}\right)P_W + \frac{R}{d}\left(\frac{1}{p} - 1\right)P_W < 0 \quad (7)$$

여기서,  $R$ 은 송신 노드에서 목적지 노드까지의 거리이고,  $r$ 은 전이 영역이 시작되는 거리이다. 또한  $p$ 는 패킷을 성공적으로 받을 확률이고,  $P_W$ 는 원 홉 전송시 소비되는 평균 에너지이다.  $P_W$ 는 [19]에서 정의된 충돌 확률  $P_C$ 를 이용함으로써  $\sum_{N=1}^X (1 - P_C)(P_C)^{N-1} N \times P_w$ 의 형태로 정의 될 수 있고, 이때  $N$ 은 전송 횟수이고,  $P_W$ 는 한번 전송시 소비되는 에너지이다. 식 (7)의  $\left(\frac{R}{r} - \frac{R}{d}\right)P_W$ 에서  $\left(\frac{R}{r} - \frac{R}{d}\right)$ 은  $r$ 보다 큰 거리  $d$ 에서 제안된 알고리즘을 적용하여 릴레이 노드를 선택할 경우 줄어드는 홉 수이므로  $\left(\frac{R}{r} - \frac{R}{d}\right)P_W$ 는 줄어드는 홉 수로 인한 에너지 이득을 의미한다. 식 (7)의  $\frac{R}{d}\left(\frac{1}{p} - 1\right)P_W$ 에서  $\left(\frac{1}{p} - 1\right)$ 은  $r$ 보다 큰 거리  $d$ 에서 제안된 알고리즘을 적용하여 릴레이 노드를 선택할 경우 재전송으로 인한 증가한 전송 횟수이고,  $\frac{R}{d}\left(\frac{1}{p} - 1\right)P_W$ 는 증가하는 전송 횟수로 인한 에너지 손실을 의미한다. 결국 식 (7)은  $r$ 보다 큰 거리  $d$ 에서 가장 가까운 노드를 릴레이 노드로 선택할 경우, 줄어드는 홉 수로 인한 에너지 이득이 재전송으로 인한 에너지 손실보다 커야한다는 것을 의미한다. 식 (7)은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$-\frac{1}{r} + \frac{1}{d} \frac{1}{p} < 0 \quad (8)$$

식 (3-6)과 식 (3-8)로부터 다음 식 (3-9)을 구할 수 있다.

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{10^{\frac{-L(d) - P_n}{10} \log_{10}(-1.28 \ln(2(1 - P^{sf})))} \frac{1}{4}} \frac{1}{p} < 0 \quad (9)$$

식 (3-9)를 최소화 하는 확률  $p$ 를  $p_0$ 라 하면 최적의 전

송거리  $d_{OP}$ 는 식 (3-10)과 같다.

$$P \left( 10^{-\frac{PL(d) - P_n \log_{10}(-1.28 \ln(2(1 - P^{1/8})))}{4}} \right) \quad (10)$$

그림 10에서 최적의 전송 거리  $d_{OP}$ 는 노드 간 거리가 전이 영역에 위치할 때, 원 홉 전송거리가 늘어남에 따른 에너지 이득과 재전송으로 인한 에너지 손실의 차이가 나는 거리이며, 송신 노드는 노드 A, B, C, D 중 가장  $d_{OP}$ 에 가까운 위치에 있는 노드 C를 다음 전송 노드로 전송하여 에너지 손실을 최소화 할 수 있다.

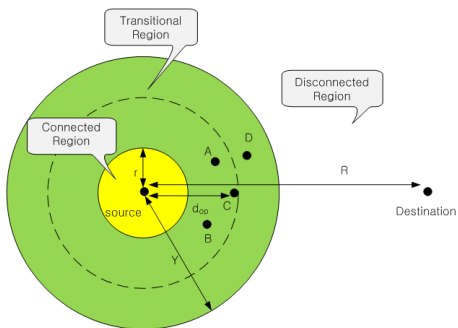


그림 10. 정보 전송을 위한 최적의 거리  
Fig. 10. Optimal distance for data transmission

예를 들면 그림 11에서 노드 A는 설정 되어지는  $d_{OP}$ 에 따라 B 또는 C 노드를 릴레이 노드로 선택하게 된다. 또한 B와 V 노드는 이웃 노드들 중에서 보이드 노드인 A를 제외하고 목적지 노드에 가장 가까운 노드인 C 노드로 릴레이 노드로 선택하게 된다. 이웃 노드로 송신되었고, 그림 10에서처럼 보이드 노드가 아니라면 최적 전송 거리  $d_{OP}$ 에 위치한 노드 C로 전송하여 목적지에 전달하게 된다. 만일 이웃 노드가 보이드 노드라면 이웃 노드의 이웃 노드 중에 보이드 노드가 아닌 노드가 존재 한다면 바로 뒤에 설명할 가상 노드에게 전송 후 최적 전송 거리  $d_{OP}$ 에 위치한 노드에게 전송하고, 이웃 노드의 이웃 노드들이 모두 보이드 노드라면 right hand 법칙에 따라 다음 홉으로 전송한다. 이러한 방법은 right hand 법칙과 back pressure 법칙의 단점을 보완하면서 back pressure 법칙과 유사하게 동작한다.

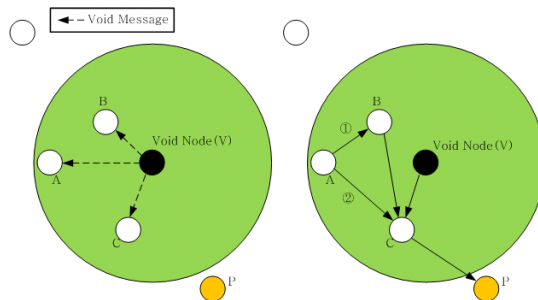


그림 11. 제안 보이드 방법  
Fig. 11. Proposed void method

실제로 보이드 노드는 아니지만 릴레이 노드 선택 시 보이드 메시지를 전송한 노드를 제외함으로써 마치 자신보다 목적지에 가까이 위치하는 노드가 존재하지 않는 것처럼 보이게 가장 보이드 노드라 할 때, 그림 12에서 만일 P 노드가 존재하지 않는다면 A, B, C 노드들은 가상 보이드 노드가 된다. 이렇게 됨으로서 V 노드와 이웃 노드들은 보이드 노드가 되어 패킷을 전송할 수 없게 된다. 이러한 현상을 확장 보이드 문제라 할 때, 이러한 현상은 back pressure 법칙에서도 동일하게 발생된다. 그러나 확장 보이드는 right hand 법칙에 의해 해결될 수 있다.

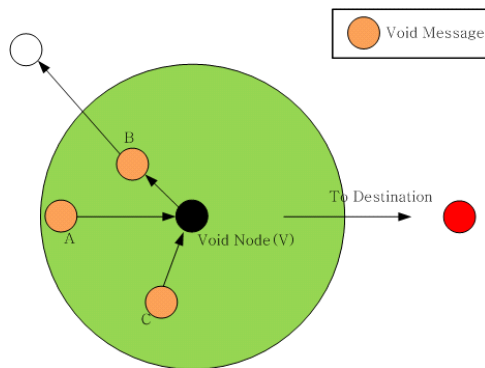


그림 12. 확장된 보이드 방법  
Fig. 12. Proposed extended void method

그림 13은 제안하는 채널 환경을 고려한 위치 기반 알고리즘 흐름도이다.

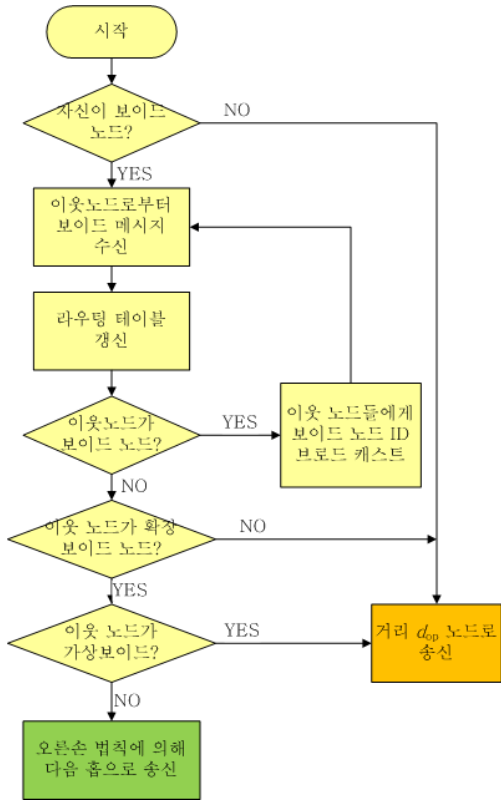


그림 13. 채널 환경을 고려한 위치 기반 라우팅 알고리즘  
Fig. 13. Flow chart of the location-based routing algorithm considering a channel condition

### IV. 성능평가

#### 1. 성능 평가 환경

물리 계층과 채널 상태에 대한 변수 값은 표 4 값을 사용하였으며, 데이터 전송률은 1Mbps, 버퍼크기는 256kbits, 재전송 횟수는 10으로 설정하고 패킷 생성율은 0.05에서 1.95 packet(s)/sec/node 까지 0.1 packet(s)/sec/node 씩 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. 각각의 패킷 생성율에 대해서 시뮬레이션은 1000sec 동안 수행되었고, 라우팅 테이블은 50sec마다 업데이트 되었다.

표 4. 성능 평가에 사용한 시뮬레이션 파라미터  
Table 4. Parameters of simulation for performance evaluation

변 수	값
r / Y	10m / 30m
PL(dO) / X	55dB / 0
Pt / Pn	0dBm / -115dBm
f	50 bytes
n	4

성능평가를 위해서 본 논문에서 제안된 방법과 다른 라우팅 방법 (1), (2)들을 비교하였다. 목적지 노드 D가 송신노드 S의 전송범위 밖에 있을 경우, 송신노드 S는 자신보다 목적지 노드에 가까운 노드 중에서,

- (1) 전송 노드 S는 연결 영역 (connected region)에서 목적지에 가까운 노드를 다음 홉으로 선택한다.
- (2) 전송 노드 S는 자신의 전송 범위 내에서 목적지에 가까운 노드를 다음 홉으로 선택한다. 이후 전이 영역이라 한다.

성능 평가를 위해 아래 3가지 변수를 택하였다.

- 패킷 전달률(pack delivery ratio) : {(각 노드에서 생성된 총 패킷 수)-(손실된 패킷 수)}/(각 노드에서 생성된 총 패킷 수)
- 지연(delay)/(sec)(scaled as log function) : 목적지 노드에서 가장 멀리 떨어진 노드로부터 생성된 패킷이 목적지 노드에 도착하기까지 걸린 평균 시간
- 에너지 소비 (power consumption)(J) : 각 노드에서 소비된 에너지의 총 합

#### 2. 성능 평가 결과

라우팅 테이블이 업데이트 될 때 채널 상태가 좋지 않은 노드가 라우팅 테이블에 업데이트 되어 릴레이 노드로 선택 되어질 수 있다. 이러한 경우 재전송 횟수를 초과하여 패킷이 버려지는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 이유 때문에 그림 14에서처럼 우리는 전이 영역이 패킷 전달률에 있어 좋지 않은 성능을 보임을 알 수 있다. 게다가, 패킷이 재전송 횟수를 초과하여 버려지지 않도록 재전송 제한 값을 증가시키게 되면 에너지와 지연 특성은 더욱 더 나빠지게 된다. 센서 네트워크에서 모든 노드가 목적지 노드에 멀티 홉으로 패킷을 전송하게 된다. 이러한 이유 때문에 패킷 전달률은 목적지 노드에

인접한 노드에 의해 결정된다. 부하(load) 값들 중에서 패킷 전달률을 보장하는 최대 값을 최대 부하(max load)라 할 때 최대 부하 값은 간섭이 증가함에 따라 감소하게 된다. 또한, 동일한 전송 전력하에서 연결 영역이 최적의 전송거리  $d_{op}$  보다 더 짧은 원 홉 전송 거리를 가지게 된다. 이러한 이유 때문에 연결 영역의 경우 더 많은 중계 패킷(relay packets)을 가지게 된다. 중계 패킷이 증가함에 따라 간섭이 증가하고 결과적으로 최대 부하 값은 감소하게 된다. 그러므로  $d_{op}$ 가 연결 영역보다 패킷 전달률에 있어 평균 6.3%, 전이 영역보다는 18.3% 더 좋은 성능을 보이게 된다.

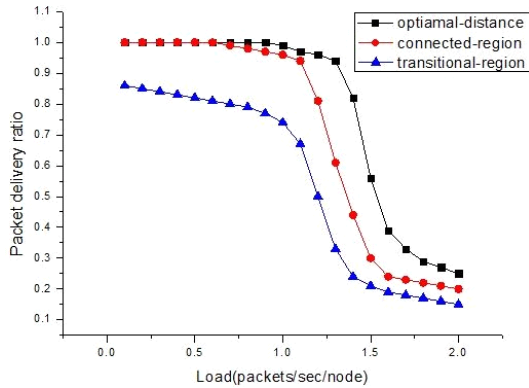


그림 14. 부하에 대한 패킷 전달률  
Fig. 14. Packet delivery ratio according to load

각 홉에서의 지연이 갑자기 증가하지 않는 안정 영역에서는 패킷 손실이 발생하지 않는다. 또한 802.11의 일반적인 특성으로 최대 부하 값 이후에는 패킷 손실이 발생하면서 지연이 갑자기 증가하기 시작한다. 이러한 증가량은 간섭에 의해 결정되게 된다. 전이 영역의 경우 안정 영역에서도 패킷 손실은 발생하게 되는데 이것은 간섭의 증가에 의해서가 아니라 채널 상태가 좋지 않은 노드로 릴레이 노드가 선택되어 발생되게 되기 때문에 안정 영역에서 갑자기 증가하지 않는다. 한편 원 홉 전송 거리가 증가함에 따라 중계되는 홉 수 (relayed hop counts)가 감소하기 때문에 지연은 원 홉 전송 거리가 증가함에 따라 지연은 감소하게 된다. 이러한 사실이 그림 15로부터 안정 영역에서 가장 좋은 성능을 보임을 알 수 있다. 그러나 패킷 전달률을 보장하지 못한다는 점에서 큰 의미를 가지지 못한다.

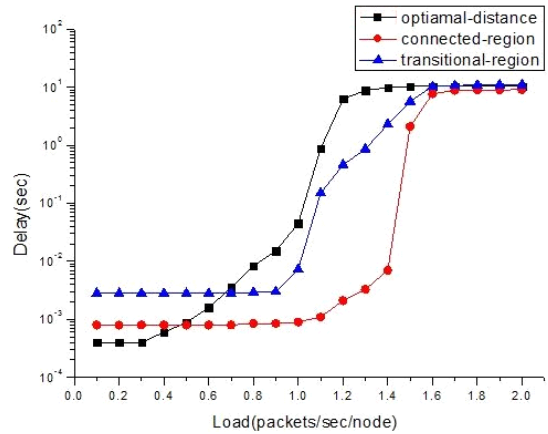


그림 15. 부하에 대한 지연  
Fig. 15. Delay according to load

그림 16에서 연결 영역의 경우에는 홉 수의 증가로 인한 에너지 증가가 재전송의 감소로 인해 줄어드는 에너지 소비보다 크기 때문에  $d_{op}$ 의 경우보다 에너지 소비가 증가함을 알 수 있다. 또한 전이 영역의 경우에는 재전송으로 인해 증가하는 에너지 소비가 홉 수의 감소로 인한 에너지 감소보다 크기 때문에  $d_{op}$ 의 경우보다 에너지 소비가 증가함을 알 수 있다. 따라서 안전 영역과 전이 영역에 대해 약 45%와 70% 정도의 감소함을 확인 할 수 있다.

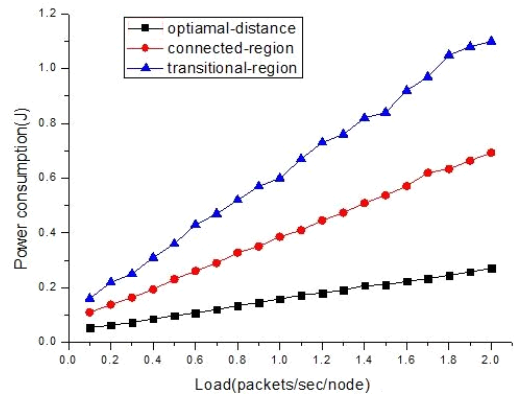


그림 16. 부하에 대한 에너지 소비  
Fig. 16. Power consumption according to load

## V. 결론

본 논문에서는 스마트그리드 환경의 ZigBee 무선 통신 주 소지정 할당 방식과 라우팅 알고리즘의 성능을 향상시키기 위

해 채널 상태를 고려한 좌표 값 위치 기반 라우팅 알고리즘을 제안하였다. 기존 ZigBee 무선 통신의 프레임 구조에서는 source address와 destination address를 각 16비트씩 할당하는데 반해, 본 논문에서는 16비트의 주소 공간을 각각 (x, y) 좌표, 또는 (x, y, z) 축으로 분할하여 할당한다. 그리고 일반적인 위치 기반 알고리즘을 사용하는 것이 아니라 채널 상태를 고려한 위치 기반 라우팅 알고리즘을 제시하였다.. 제안한 알고리즘이 할당 된 좌표 값의 비트에 따라 배치한 노드의 개수가 증가하면서 기존 알고리즘보다 확연한 멀티 홉 감소를 보였다. 센서 네트워크에서 홉 수가 줄어든다는 것은 그만큼 연산량이 줄어 더 빠른 전송속도가 효율적인 에너지 소모를 의미한다. 또한 채널 상태를 고려하지 않는 전형적인 위치 기반 라우팅에서와는 달리 채널 상태를 고려한 위치 기반 라우팅 방법을 제안함으로써 신뢰성 있는 데이터 전송과 더불어 네트워크에서 소비되는 에너지를 최소화 하였다.

현재 Smart Grid 산업이 대두되고 있는 가운데 국내의 경우 2010~2030년까지의 추진 계획이 세워져 있다. 향후 각종 빌딩이나 아파트 등 여러 환경의 건물 등에 적용하였을 경우 홉 수와 전송속도, 에너지 측면에서 효율적으로 적용될 수 있을 것이라 사료된다.

## 참고문헌

- [1] IEEE Smart Grid, <http://smartgrid.ieee.org/>
- [2] National Institute of Standards and Technology, <http://www.nist.gov/smartgrid/>
- [3] ZigBee Alliance Document "ZigBee-2007 Specification: ZigBee Document 053474r17," January 2008.
- [4] Electric power Research Institute(EPRI), "Report to NIST on the Smart Grid Interoperability Standards Roadmap," June 2009.
- [5] Sonoma innovation Draft 1.1 Document, "Smart Grid Communication Architectural Framework - Smart Grid Interoperability Standards IP Protocol and Wireless/AMI," August 2009.
- [6] National Energy Technology Laboratory for the U.S. Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, "Advanced Metering Infrastructure," February 2008.
- [7] T. Kim, D. Kim, "Shortcut Tree routing in ZigBee Networks," International Symposium on Wireless Pervasive Computing, February 2007.
- [8] D. Seo, D. Yun, and S. Cho, "A Network Performance Improvement for One-to-one and Many-to-one Communication Environment in ZigBee," Internet Magazine ElectroScope, November 2007.
- [9] K. Khamforoosh, H. Kamforroush, "A New routing Algorithm for Energy Reduction in Wireless Sensor Networks," International Conference on Signal Processing Systems, pp. 505-509, May 2009.
- [10] A. Wheeler, "Commercial applications of wireless sensor networks using ZigBee," IEEE Communications Magazine, Vol. 45, No. 4, pp. 70-77, April 2007.
- [11] G. Bhatti and G. Yue, "A structured addressing scheme for wireless multi-hop networks," Tech Report Mitsubishi Electric Research Laboratories, 2005.
- [12] M. J. Lee, "Emerging Standards For Wireless Mesh Technology," IEEE Wireless Communications, Vol. 13, No. 2, pp. 56-63, April 2006.
- [13] X. Li, K. Fang, and J. Gu, "An Improved ZigBee Routing Strategy for Monitoring System," The 1st International Workshop Intelligent Networks and Intelligent Systems, pp. 255-258, November 2008.
- [14] D. Braginsky, D. Estrin, "Rumor Routing Algorithm for Sensor Networks," ACM WSNA, pp. 22-31, September 2002.
- [15] K. Seada, A. Helmy, R. Govindan, "On the effect of Localization Error on Geographic Face Routing in Sensor Networks," IPSN pp. 71-80, 2004.
- [16] S. Doshi, S. Bhandare, and T. X. Brown, "An on-demand minimum energy routing protocol for a wireless ad hoc network," ACM Mobile Computing and Communications, Vol. 6, No. 3, pp. 50-66, October 2002.
- [17] T. Melodia, D. Pompili, and I. F. Akyildiz, "Optimal local topology knowledge for

energy efficient geographic routing in sensor networks,"The twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, pp. 1705-1716, March 2004.

- [18] Y. Yang, J. C. Hou, and L. C. Kung, "Modeling the effect of transmit power and physical carrier sense in multi-hop wireless networks," IEEE International Conference on Computer Communications, May, 2007.
- [19] M. Zuniga, B. Krishnamachari, "Analyzing the Transitional Region in Low Power Wireless Links," IEEE Communications Society Conference, October 2004.
- [20] ITU-T technical page, "Series G for Smart Grid Applications," June 2010.

## 저 자 소 개



**강 형 석**  
 2011: 백석대학교  
 소프트웨어학과 공학사  
 현 재: 광운대학교  
 전자통신공학과 석사과정  
 관심분야: SmartGrid, Zigbee  
 Security  
 Email : khsrowaa@naver.com



**임 승 빈**  
 2004: 광운대학교  
 전자통신공학과 공학석사.  
 2009: 광운대학교  
 전자통신공학과 공학박사수료  
 현 재: 신홍대학  
 전자통신공학과 겸임교수  
 관심분야: SmartGrid, Zigbee  
 Security  
 Email : songbine@hotmail..com



**오 영 환**  
 1993: 인하대학교  
 전자공학과 공학박사  
 현 재: 광운대학교  
 전자통신공학과 정교수  
 Email : 11980002@kw.ac.kr