

---

# 신뢰모델기반의 ZigBee 네트워크 구성 및 신뢰성 측정

황재우\* · 박호현\*\*

ZigBee Network Formation based on Trust Model and Trustworthiness Measurement

Jae Woo Hwang\* · Ho-Hyun Park\*\*

---

이 논문은 2009년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임

---

## 요 약

USN을 구성 하는 중요 기술로 평가 받고 있는 ZigBee는 근거리 통신을 지원하는 IEEE 802.15.4 표준 가운데 하나로, 라우팅 방식으로 주소 할당 방식을 바탕으로 한 계층적 라우팅과 라우팅 테이블에 기반을 둔 요구형 경로 탐색 방식을 지원한다. 계층적 라우팅은 라우팅 테이블을 사용하지 않고, 자식 노드 또는 부모 노드를 중간 노드로 선택하여 데이터를 전달하기 때문에 네트워크 토폴로지가 전체적인 네트워크 성능을 좌우하게 된다. 본 논문에서는 ZigBee 네트워크 구성 시 깊이와 편차가 큰 LQI 값을 이용하여 부모 노드를 선택하는 방식에서 신뢰 모델을 추가하여 좀 더 신뢰성 있는 네트워크 토폴로지를 구성하는 알고리즘과 신뢰 모델을 활용하여 전체적인 네트워크의 신뢰도를 측정하는 방법을 제안하였고 NS-2를 이용한 네트워크 시뮬레이션과 MG2400 ZigBee 보드로 구현하여 성능을 검증하였다.

## ABSTRACT

The ZigBee is one of the most important technologies for composing USN. It is one of the IEEE 802.15.4 standards to support personal area networks. It uses a hierarchical routing or an on-demand route discovery strategy as an address allocation method. A hierarchical routing doesn't use a routing table but only uses a child node or a parent node as an intermediate node for data delivery. Therefore, the ZigBee network's topology greatly affects the overall network performance. In this paper, we propose a more trustworthy algorithm than only using the depth and widely variable LQI during network formation, and moreover we propose an algorithm to measure network's trustworthiness. We simulate our algorithm using the NS-2 and implement our network using the MG2400 ZigBee module for verifying performance.

## 키워드

신뢰 모델, USN, 자그비 네트워크

## Key word

Trust model, USN, ZigBee network

---

\* 중앙대학교 전자전기공학부  
\*\* 중앙대학교 (교신저자, hohyun@cau.ac.kr)

접수일자 : 2010. 03. 13  
심사완료일자 : 2010. 03. 28

## I. 서 론

ZigBee의 라우팅 방식은 주소 할당 방식을 바탕으로 한 계층적 라우팅과 라우팅 테이블에 기반한 요구형 경로 탐색(On-demand Route Discovery) 방식을 지원한다 [1]. 계층적 라우팅은 라우팅 테이블을 사용하지 않고, 목적지 노드의 주소만을 이용하여 해당 노드의 자식 노드 또는 부모 노드를 중간 노드로 선택하여 데이터를 전달하기 때문에 최소한의 자원을 사용하고 추가적인 라우팅 트래픽이 발생하지 않는다. 또한 라우팅 테이블을 지원하지 않는 RFD (Reduced Function Device)들도 라우팅을 가능하게 해준다는 장점이 있다. 그러나 자식노드나 부모 노드 만을 라우팅 노드로 사용하므로 네트워크 토폴로지가 전체적인 네트워크 성능을 좌우하게 된다.

따라서 본 논문에서는 ZigBee 네트워크 구성 시 LQI와 깊이(depth) 값을 이용하여 부모 노드를 선택하는 방식에서 신뢰(trust) 값을 추가하여 좀더 신뢰성 있는 네트워크 토폴로지를 구성하는 알고리즘을 제안하였고, 추가적으로 신뢰 값을 활용하여 전체적인 네트워크의 신뢰도를 측정하는 방법을 제안하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성 되었다. 2절에서는 IEEE 802.15.4와 ZigBee에 대해 살펴보고 3절에서는 신뢰 모델을 정의하고 신뢰도 측정 방법과 새로운 네트워크 구성 방식을 제안하고, 4절에서는 새로운 신뢰 기반으로 생성된 네트워크의 성능을 NS-2 시뮬레이터로 시뮬레이션 하고 5절에서는 MG2400 ZigBee 보드로 구현하여 성능을 평가하였다. 그리고 6절에서 결론을 맺는다.

## II. 관련 연구

본 절에서는 PHY, MAC 계층을 정의한 IEEE 802.15.4의 특징과 상위 계층을 정의한 ZigBee의 특징, 연관(association) 절차 등에 대해서 알아본다.

### 2.1 IEEE 802.15.4 [2]

IEEE 802.15.4는 국제적으로 사용상 제약이 없는 ISM 2.4GHz 주파수 대역에서 16개, 915MHz 주파수

대역에서 10개, 868MHz 주파수 대역에서 1개의 채널을 제공하며, 각각의 주파수 대역에 대해서 250 kb/s, 40 kb/s, 20 kb/s의 데이터 전송률을 가진다. 하나의 네트워크는 약 64000개까지의 디바이스를 지원하며, 각 디바이스는 64bit 확장 주소(extended address) 또는 16bit 단축 주소(short address)를 가진다. 실시간 데이터 전송을 보장하기 위해 Guaranteed Time Slots(GTS)를 할당할 수 있으며, Carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA-CA)의 채널 액세스를 사용한다. 또한 에너지 감지(Energy Detection), 링크 품질 표시(Link Quality Indication)를 정의한다. 디바이스는 Full Function Device (FFD)와 Reduce Function Device(RFD)로 나뉘며 FFD는 IEEE 802.15.4에서 정의한 모든 기능을 수행할 수 있으며 RFD는 일부 기능만을 수행한다.

### 2.2 ZigBee [3]

ZigBee 얼라이언스는 저전력, 저비용의 무선 네트워크 기술의 구체적인 활용과 응용을 목적으로 모토로라, Freescale, 필립스, 삼성전자 등 14개의 프로모터 및 200여 개의 참여 회원사로 결성된 비영리 단체 지그비 얼라이언스에서 정의한 ZigBee 프로토콜은 IEEE 802.15.4에서 정의된 PHY 계층과 MAC 계층의 상위 계층을 정의한다. 다른 계층간의 상호 통신을 위한 인터페이스, 프레임 핸들링, 경로탐색 및 유지보수, 네트워크 관리 및 주소 할당 등의 기능을 수행 한다.

ZigBee 네트워크에서는 Coordinator와 Router, End device 세가지 장치 유형이 존재한다. Coordinator는 전체 네트워크의 중심부로서 네트워크의 설정, 유지 및 관리와 네트워크 주소의 할당과 같은 기능들을 맡고 네트워크 내에서 하나의 Coordinator가 존재 해야 하며 FFD만이 수행할 수 있다. Router는 네트워크상에서 라우터로 동작하며 FFD만이 이 역할을 수행할 수 있다. End device는 네트워크의 말단을 이루며 FFD, RFD 어떤 것이든 역할을 수행할 수 있다.

### 2.3 ZigBee 주소 할당 및 계층적 라우팅

부모 노드에 조인한 자식 노드는 네트워크상에서 유일한 16비트의 네트워크 주소를 할당 받게 된다. 또한 할당 받은 네트워크 주소 및 자신의 트리 레벨을 이용하여, 자신의 자식 노드에게 할당할 수 있는 주소 공간을 계산

할 수 있다. 각 레벨의 노드들에게 주어진 주소 공간의 크기인  $Cskip(d)$ 는  $nwmaxChildren(Cm)$ ,  $nwkMaxDepth(Lm)$ 과  $nwmaxRouter(Rm)$ 을 이용하여 계산할 수 있으며, 그 식은 아래와 같다.  $d$ 는 네트워크 깊이(depth)를 나타내며  $Cm$ 은 노드가 가질 수 있는 자식 노드의 수,  $Lm$ 은 네트워크 최대 Depth,  $Rm$ 은 노드가 가질 수 있는 Router의 수이다.

$$Cskip(d) = \begin{cases} 1 + Cm(Lm - d - 1), & \text{if } Rm = 1 \\ \frac{1 + Cm - Rm - Cm * Rm^{Lm - d - 1}}{1 - Rm}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

네트워크에 참가한 자식 노드는 디바이스 종류에 따라 다른 주소 할당 방식으로 16비트 주소를 부여 받는다.  $k$ 번째로 조인한 자식 노드가 Router 일 때 아래 식의 방식으로 주소를 할당 받는다.

$$A_k = A_{parent} + Cskip(d) \cdot (k-1) + 1 \quad (1 \leq k \leq Rm)$$

$n$ 번째로 조인한 End device는 아래 식의 방식으로 주소를 할당 받는다.

$$A_n = A_{parent} + Cskip(d) \cdot Rm + n \quad (1 \leq n \leq Cm - Rm)$$

그림1은  $nwkMaxChildren=8$ ,  $nwkMaxRouters=4$ ,  $nwkMaxDepth=3$  일 때 할당된 주소의 예이다.

이렇게 할당된 ZigBee 어드레스를 이용하여 계층적인 라우팅을 하게 된다. 각 노드의 목적지가 자신의 자식 노드 중에 존재하는지 확인할 수 있다. 네트워크 주소  $A$ 를 가지는 노드가  $D$  노드로 패킷을 전송할 때  $D$  노드가 아래 식을 만족한다면  $A$ 노드의 자식 노드 중에  $D$  노드가 존재하게 된다. 따라서 자식 노드로 패킷을 전송하게 된다. 만족하지 않는다면 자신의 자식노드 중에  $D$ 노드가 존재 하지 않으므로 부모 노드로 패킷을 전송하게 된다. 부모 노드는 위와 같은 방법으로 패킷을 전달하게 된다.

$$A < D < A + Cskip(d - 1)$$

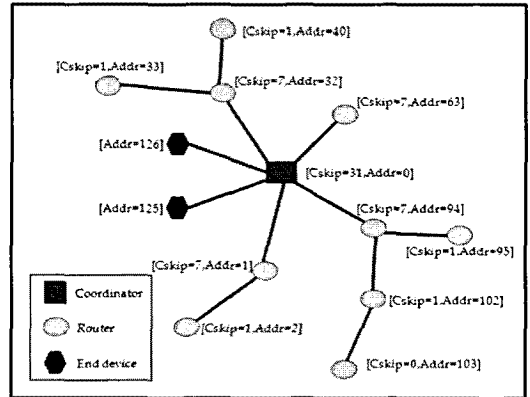


그림 1. ZigBee 주소할당 예제  
Fig. 1 ZigBee address assignment example

### 2.4 ZigBee 조인 절차

네트워크 조인을 위해 NLME-NETWORK DISCOVERY.request 프리미티브를 발생시켜 채널 스캔을 하면서 비콘 신호로 응답한 부모 후보 노드들 중 가장 적합한 노드를 선택한 후 NLME JOIN.request 프리미티브로 네트워크에 조인하게 된다. 그림 2는 자식 노드가 네트워크 조인 시에 자식 노드와 부모 노드간의 패킷 흐름과 자식 노드에서 발생하는 계층 간 Service Primitive 흐름을 나타낸다.

## III. 제안 알고리즘

### 3.1 기존 조인 방법의 문제점

ZigBee는 트리 토폴로지 네트워크 구성 시에 네트워크 조인을 위해 NLME-NETWORK-DISCOVERY.Request 프리미티브를 발생시켜 채널 스캔을 하면서 비콘 신호로 응답한 부모 후보 노드들의 정보를 인접 테이블(neighbor table)에 저장한다. 그리고 가장 적합한 부모 노드를 선택하여 조인과정을 거치게 된다. 가장 적합한 부모 노드를 선택하기 위해서 PANID, 디바이스 타입과 Link Cost를 검사하게 된다. Link Cost는 0에서 7사이의 정수 값을 가지며 값이 3을 넘지 않는 노드를 부모 노드로 선택하게 된다. 조건을 충족시키는 노드가 한 개 이상일 경우 Coordinator 부터 깊이(depth)가 가장 작은 노드를 선택한다.

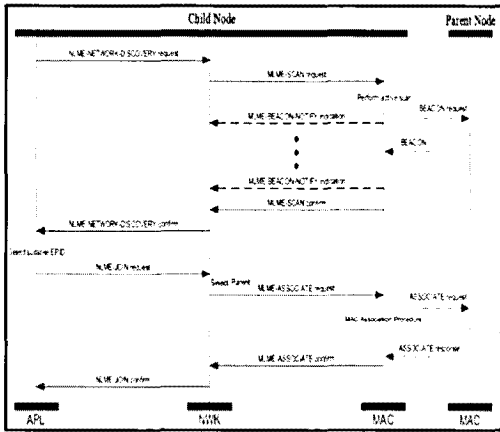


그림 2. ZigBee 조인 시 계층 간 Service Primitive  
Fig. 2 Service primitives b/w layers at the ZigBee join

이마저도 한 개 이상일 경우에는 어떤 것이나 선택 될 수 있다. Link Cost를 구하는 식은 아래와 같다.

$$C = \{l\} \begin{cases} 7, \\ \min\left(7, \text{round}\left(\frac{1}{P_1}\right)\right) \end{cases}$$

$P_1$ 은 두 노드 링크간 데이터가 전달될 수 있는 확률이 다. 일반적으로  $P_1$ 은 MAC 레이어와 PHY 레이어에서 제공하는 LQI(Link quality indicator) 값으로 구해진다. LQI는 수신기의 ED(Energy Detection)측정, SNR(Signal-to-noise ratio)측정, 또는 이 두 가지 방법을 모두 이용하여 구한다. 하지만 무선 링크는 멀티 경로, 페이딩, 간섭으로 인해 불안정성과 비예측성을 가지며, 또한 IEEE 802.15.4의 LQI 값은 여러 패킷의 평균값은 안정된 값을 가지지만 각각의 패킷 전송 시에 측정된 LQI값은 변화 폭이 크다[4].

따라서 채널 스캔 시 인접한 노드들은 한번씩의 비콘을 송신 하므로 조인을 원하는 노드가 계산한 Link Cost는 신뢰성이 떨어지고 이 값을 이용하여 구성된 트리 토폴로지 또한 전체적으로 신뢰성이 떨어진다고 볼 수 있다.

또한 센서 네트워크 프로토콜은 노드들간 통신을 할 때 각각의 노드들이 이상 동작 없이 작동 할 것이라 가정 하지만 실제적으로는 그러하지 못하다. 간섭, 기능 불량, 노드 독단적인 행동 등과 같이 예측 할 수 없는 이유로

각각의 노드나 전체 네트워크가 공급자나 사용자가 기대 했던 동작을 원활하게 수행 할 수 없을 수도 있다. 따라서 노드들간 통신을 하기 전에 각각의 노드들에 신뢰 레벨을 부여할 필요성이 제기 된다. 신뢰도가 낮은 노드와의 통신은 시간, 에너지, 대역폭등의 자원을 낭비한다 [5]. 따라서 노드들에 신뢰도 값을 부여하고 네트워크 조인 시에 추가적으로 이 값을 이용함으로써 네트워크의 신뢰도를 높이고 기대했던 동작을 좀 더 원활하게 수행 할 수 있다. 좀 더 신뢰성 있는 토폴로지 구성을 위하여 본 논문에서는 새로운 토폴로지 구성 알고리즘을 제안 한다.

### 3.2 신뢰 모델

부모 노드 조건을 모두 충족시키고 깊이도 동일한 부모 후보 노드가 다수 있을 때 다른 조건의 비교 없이 부모 노드가 결정 된다. 그림 3에서 트리 토폴로지 구성 시 노드 3은 노드 1 보다는 노드 2로 조인하는 것이 코디네이턴 0번 노드와의 거리 상 효율적이지만 노드 1로 조인할 가능성도 크다. 이와 반대로 노드 1로 조인하는 것이 유리 할 수도 있다. 예를 들어 노드 1은 배터리 전원을 사용하고 노드 2는 유선 전원을 사용한다면 노드 2로 조인하는 것이 효율적이다.

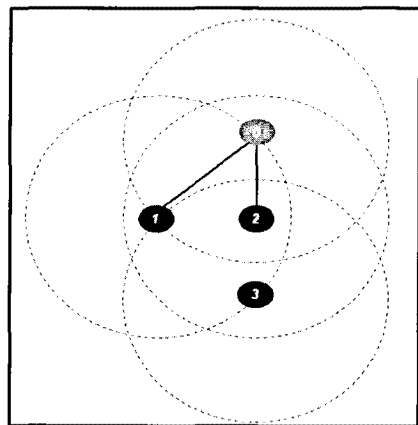


그림 3. 토폴로지 구성  
Fig. 3 Topology configuration

모든 노드는 초기에 각각의 신뢰도 값을 알고 있다고 가정한다. 신뢰도 값을 결정하기 위해서는 많은 요소를 고려 할 수 있다. 크게 두 가지로 구분한다면 센서 노드

가 설치될 위치와 센서 노드의 디자인에 따라 신뢰도 값에 차등을 줄 수 있다. 설치될 위치의 예를 들면 빌딩 내부에 있는 노드들이 외부에 설치된 노드들보다 물리적으로 보호 되어 있다[6]. 또한 콘크리트 벽 같이 무선 신호의 감쇄를 가져오는 장애물이 막고 있는 곳과 그렇지 않은 곳, 무선 채널 간섭이 심한 위치와 그렇지 않은 곳에 차등을 줄 수 있다.

센서 노드의 디자인으로는 배터리를 사용하는 노드의 전압 불안정으로 인한 오작동 확률이 유선 전력을 사용하는 노드보다 크므로 신뢰도의 차등을 줄 수 있다. 또한 메모리 용량, 프로세서 처리 능력 등 노드의 데이터 처리 능력에 따라 차등을 줄 수 있다.

신뢰도를 수치화하기 위해 단순하게 한 가지 값만을 사용하기 보다는 좀 더 현실적인 환경에 맞게 하기 위해 새롭게 Opinion을 정의하고  $\omega$ 로 표시 한다.

$\omega = \{t, d, u\}$ . 여기서 t는 trust, d는 distrust, u는 uncertainty를 나타낸다.  $t+d+u = 1$ ,  $\{t, d, u\} \in [0, 1]^3$ 을 만족해야 한다.

그리고 Subjective Logic을 사용하여 센서 노드 또는 라우팅 노드에서 수집된 신뢰도를 바탕으로 네트워크의 신뢰도를 평가한다[7,8].

### 3.3 신뢰모델을 사용한 네트워크 조인절차

자식 노드는 조인을 하기 전에 Beacon.request 메시지를 발생시킨다. 이때 주위의 부모 대상 노드들은 Beacon 신호에 자신의  $\omega$  값을 포함하여 전송 한다. 이때  $\omega$  값은 능동적으로 상황에 맞게 조절 될 수도 있지만 본 논문에서는 모든 센서 노드의  $\omega$  값은 미리 결정 되어 있다고 가정한다. Beacon 신호를 수신한 자식 노드는 3 이하의 Link Cost를 가진 노드 중에서 깊이가 가장 작은 노드를 선택 한 다음,  $\omega$  값 중 신뢰도가 가장 높은 노드를 부모 노드로 선택하고 조인 프로시저를 수행한다. Link Cost, Depth,  $\omega$  에 각각 가중치를 부여하여 부모 노드를 선택하는 방법이 좀 더 신뢰성을 높일 수 있지만 본 논문에서는 ZigBee 프로토콜을 최소한으로 수정 하여 신뢰도를 높이는 방법을 사용하기 위하여 위의 방식으로 한다.

### 3.4 네트워크 신뢰도 측정

Subjective Logic은  $\omega$ 을 조합할 수 있는 몇 가지 논리적인 연산자를 정의하고 있으며 본 논문에서는 센서 네트

워크의 신뢰도를 측정하기 위해 Recommendation 연산자를 사용한다.

Recommendation operator  $\otimes$  :

상태 P 일 때 노드 B의 신뢰도  $\omega$ 를  $\omega_p^B = \{t_p^B, d_p^B, u_p^B\}$ 로 정의한다. 그리고 전체 네트워크상에서 각각의 노드가 가지고 있는 신뢰도  $\omega$ 가 아닌 노드 A, B 간의 신뢰도  $\omega$ 를  $\omega_B^A = \{t_B^A, d_B^A, u_B^A\}$ 로 정의한다.

이때 노드 B가 A로 보내는 데이터의 신뢰도  $\omega_p^{AB}$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\omega_p^{AB} = \omega_B^A \otimes \omega_p^B = \{t_p^{AB}, d_p^{AB}, u_p^{AB}\}$$

여기서

$$t_p^{AB} = t_B^A t_p^B$$

$$d_p^{AB} = t_B^A d_p^B$$

$$u_p^{AB} = d_B^A + u_B^A + t_B^A u_p^B \text{ 이다.}$$

네트워크 전체의 신뢰도는 각각의 노드가 코디네이터를 향해 거쳐 가는 라우터들과의 Recommendation 연산 결과의 평균으로 구해진다.

그림 4와 그림 5의 두 토폴로지를 비교해 보자. 그림 4는 일반적인 ZigBee 네트워크 형성시 생성되기 쉬운 토폴로지이다. 그림 5는 네모 박스 안의 노드들은 외부로부터 보호 받는다고 가정 하여 높은 신뢰도를 부여 하고 신뢰도를 고려하여 구성한 토폴로지이다. 이때 두 토폴로지의 모든 노드들은 동일한 깊이를 가진다.

각각의 네트워크 신뢰도는 다음과 같이 계산 될 수 있다.

$$\omega_p^{N1} = \left( \omega_p^{12} + \omega_p^{126} + \omega_p^{1267} + \omega_p^{125} + \omega_p^{13} + \omega_p^{134} + \omega_p^{1348} + \omega_p^{13489} \right) / 8$$

여기서

$$\omega_p^{12} = \omega_2^1 \otimes \omega_p^2$$

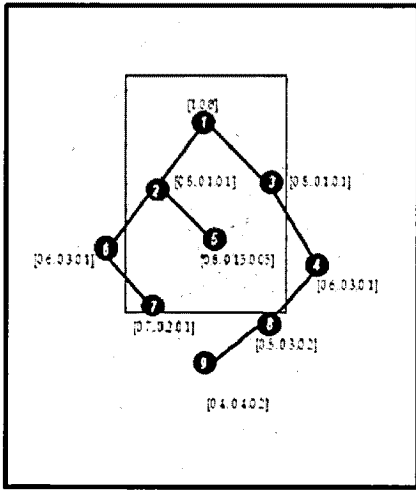


그림 4. 기본 토폴로지  
Fig. 4 Basic topology

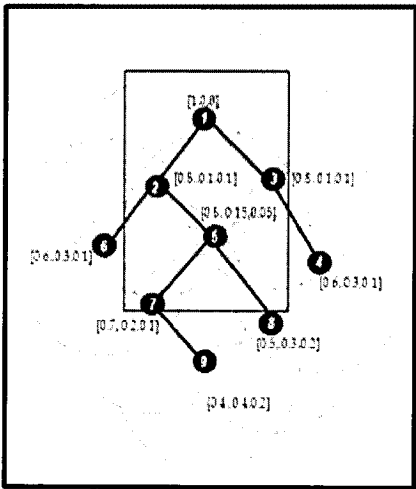


그림 5. 신뢰도 기반 토폴로지  
Fig. 5 Trust based topology

$$\begin{aligned} \omega_p^{126} &= \omega_2^1 \otimes \omega_6^2 \otimes \omega_p^6 \\ \omega_p^{125} &= \omega_2^1 \otimes \omega_5^2 \otimes \omega_p^5 \\ \omega_p^{1267} &= \omega_2^1 \otimes \omega_6^2 \otimes \omega_7^6 \otimes \omega_p^7 \\ \omega_p^{13} &= \omega_2^1 \otimes \omega_p^3 \\ \omega_p^{134} &= \omega_3^1 \otimes \omega_4^3 \otimes \omega_p^4 \\ \omega_p^{1348} &= \omega_3^1 \otimes \omega_4^3 \otimes \omega_8^4 \otimes \omega_p^8 \\ \omega_p^{13489} &= \omega_3^1 \otimes \omega_4^3 \otimes \omega_8^4 \otimes \omega_9^8 \otimes \omega_p^9 \text{ 이다.} \end{aligned}$$

이와 같은 방식으로 그림 5의 네트워크 신뢰도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_p^{N2} = \left( \omega_p^{12} + \omega_p^{126} + \omega_p^{125} + \omega_p^{1257} + \omega_p^{12579} + \omega_p^{1258} + \omega_p^{13} + \omega_p^{134} \right) / 8$$

여기서

$$\begin{aligned} \omega_p^{12} &= \omega_2^1 \otimes \omega_p^2 \\ \omega_p^{126} &= \omega_2^1 \otimes \omega_6^2 \otimes \omega_p^6 \\ \omega_p^{125} &= \omega_2^1 \otimes \omega_5^2 \otimes \omega_p^5 \\ \omega_p^{1257} &= \omega_2^1 \otimes \omega_5^2 \otimes \omega_7^5 \otimes \omega_p^7 \\ \omega_p^{12579} &= \omega_2^1 \otimes \omega_5^2 \otimes \omega_7^5 \otimes \omega_9^7 \otimes \omega_p^9 \\ \omega_p^{1258} &= \omega_2^1 \otimes \omega_5^2 \otimes \omega_8^5 \otimes \omega_p^8 \\ \omega_p^{13} &= \omega_2^1 \otimes \omega_p^3 \\ \omega_p^{134} &= \omega_3^1 \otimes \omega_4^3 \otimes \omega_p^4 \text{ 이다.} \end{aligned}$$

위의 식대로 두 토폴로지의 네트워크 신뢰도를 구해 보면 아래와 같다. 여기서 각 노드간의  $\omega_B^A$ 는 부모 노드의 신뢰도가 높으면 두 노드 간의 신뢰도 또한 높다고 가정하고 표 1과 같이 3단계로 단순화 하였다. 두 토폴로지의 네트워크 신뢰도 계산 결과는 표 2와 표 3과 같다. 계산된 값을 비교해 보면 신뢰도를 적용하여 형성한 네트워크의 전체적인 신뢰도가 높음을 알 수 있다.

표 1. 노드간 신뢰도  
Table. 1 Inter node trust values

$\omega_p^A$	$t \geq 0.7$	$0.7 > t \geq 0.5$	$0.5 > t$
$\omega_B^A$	$\{0.9, 0.05, \}$ $\{0.05\}$	$\{0.6, 0.2, \}$ $\{0.2\}$	$\{0.4, 0.3, \}$ $\{0.3\}$

#### IV. 시뮬레이션

본 절에서는 NS2(Network Simulator version 2) 시뮬레이터[9]를 이용하여 신뢰 기반으로 형성한 네트워크 토폴로지의 성능을 평가한다.

4.1 시뮬레이션 환경

그림 6은 기존의 프로토콜을 이용하여 구성된 네트워크 토폴로지이다. NS-2 시뮬레이터는 조건을 만족하는 부모노드 후보가 다수일 때 부모노드를 선택하는 방식으로 가장 먼저 수신된 노드 선택, 가장 마지막에 수신된 노드 선택, 랜덤 선택 방식이 존재하는데 이론적으로 가장 근접한 노드에서 가장 먼저 패킷이 수신되므로 가장 먼저 수신된 노드를 선택하는 방식으로 하였다.

표 2. 기본 토폴로지의 신뢰도 계산  
Table. 2 Trust calculation of the basic topology

기본 토폴로지				
	T	D	U	S
$\omega_p^{12}$	0.720	0.090	0.190	1
$\omega_p^{126}$	0.486	0.243	0.271	1
$\omega_p^{125}$	0.648	0.121	0.231	1
$\omega_p^{13}$	0.720	0.090	0.190	1
$\omega_p^{134}$	0.486	0.243	0.271	1
$\omega_p^{1348}$	0.117	0.117	0.766	1
$\omega_p^{13489}$	0.340	0.097	0.563	1
$\omega_p^{1267}$	0.340	0.097	0.563	1
$\omega_p^{N1}$	0.470	0.143	0.387	1

T = trust, D = distrust, U = uncertainty,  
S = T+D+U

표 3. 신뢰도 기반 토폴로지의 신뢰도 계산  
Table. 3 Trust calculation of the trust based topology

신뢰도 기반 토폴로지				
	T	D	U	S
$\omega_p^{12}$	0.720	0.090	0.190	1
$\omega_p^{126}$	0.486	0.243	0.271	1
$\omega_p^{125}$	0.648	0.121	0.231	1
$\omega_p^{13}$	0.720	0.090	0.190	1
$\omega_p^{134}$	0.486	0.243	0.271	1
$\omega_p^{1258}$	0.365	0.218	0.417	1
$\omega_p^{12579}$	0.175	0.175	0.650	1
$\omega_p^{1257}$	0.510	0.146	0.344	1
$\omega_p^{N2}$	0.514	0.166	0.320	1

T = trust, D = distrust, U = uncertainty,  
S = T+D+U

그림 7은 조건을 만족하는 부모 노드 후보가 다수일 때 신뢰 값이 높은 노드를 선택하는 방식으로 구성된 네트워크 토폴로지이다. 6번과 4번 노드는 외부 채널에 노출되기 쉽다고 가정하고 신뢰도를 낮게 부여하고 주위에 동일한 채널을 사용하는 네트워크를 구성하였다. 각각의 토폴로지에서도 7번과 8번 노드가 코디네이터인 1번 노드로 Non Acknowledgment, Non Beacon 모드로 패킷을 전송한다. 시뮬레이션 파라미터는 표 4와 같다.

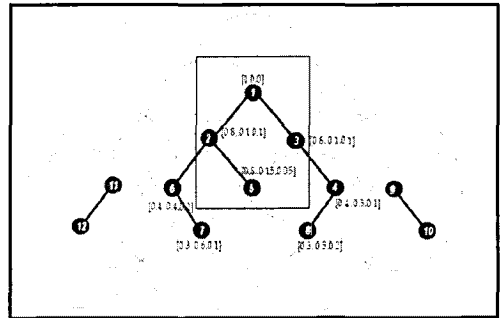


그림 6. 시뮬레이션을 위한 기본 ZigBee 토폴로지  
Fig. 6 The basic ZigBee topology for simulation

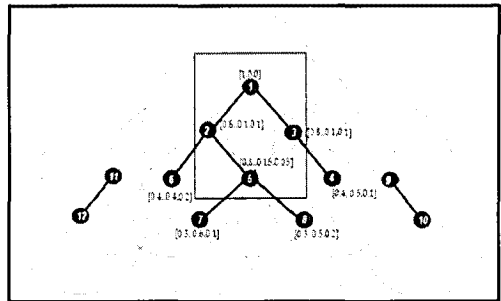


그림 7. 시뮬레이션을 위한 신뢰도 기반 ZigBee 토폴로지  
Fig. 7 The trust based ZigBee topology for simulation

표 4. 시뮬레이션 파라미터  
Table. 4 Simulation parameters

Item	Value
Pkts/sec	1,5,10,20
Transmission Data size	100 Bytes
Transmission Range	15m
Pan Coordinator	3
Number of nodes	12
Routing protocol	Hierarchical
Acknowledgment	off
Beacon mode	off
Simulation time	200 second

4.2 시뮬레이션 결과

그림 8을 보면 신뢰 기반으로 토폴로지를 구성한 네트워크가 초당 1개의 패킷을 전송하는 경우를 제외하고는 성능이 떨어짐을 볼 수 있다.

4번과 6번 노드에 아무런 간섭이 없고 7번과 8번 노드가 5번 노드를 거쳐 데이터를 전송하기 때문에 많은 충돌이 발생하기 때문이다. 하지만 그림 9~그림 11에서와 같이 4번과 6번 노드에 간섭이 많아질수록 신뢰도를 기반으로 형성된 네트워크의 성능이 좋음을 알 수 있다.

많은 ZigBee 응용 환경에서 패킷의 발생빈도가 상당히 적고 대용량의 데이터전송이 가능한 무선 랜이나 블루투스 같은 동일한 대역을 사용하는 무선규격의 간섭 확률은 큰 편이라는 것을 고려했을 때 신뢰 기반으로 형성된 네트워크의 토폴로지가 좀 더 좋은 성능을 보일 것이라는 것을 알 수 있다.

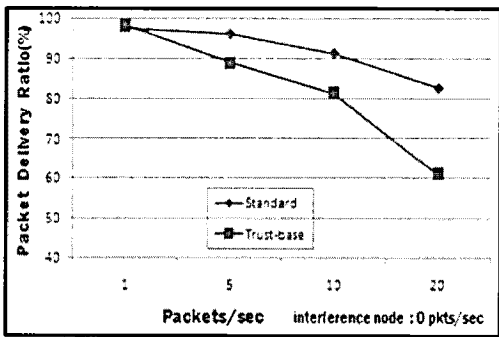


그림 8. 시뮬레이션 결과 (간섭노드 0pks/sec)  
Fig. 8 Simulation result (Interference node 0pks/sec)

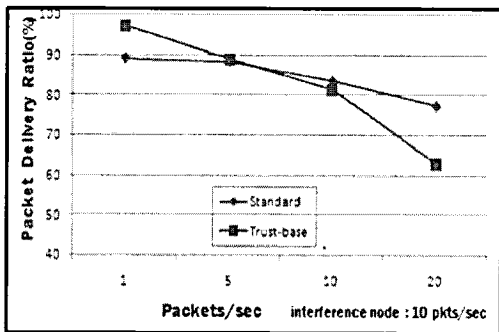


그림 9. 시뮬레이션 결과 (간섭노드 10pks/sec)  
Fig. 9 Simulation result (Interference node 10pks/sec)

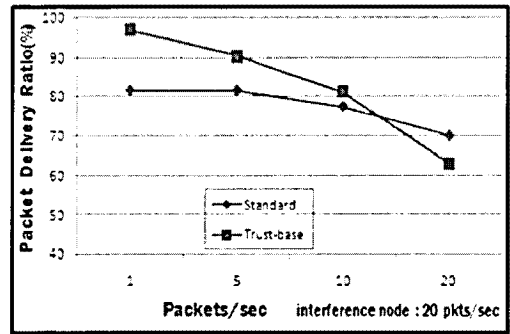


그림 10. 시뮬레이션 결과 (간섭노드 20pks/sec)  
Fig. 10 Simulation result (Interference node 20pks/sec)

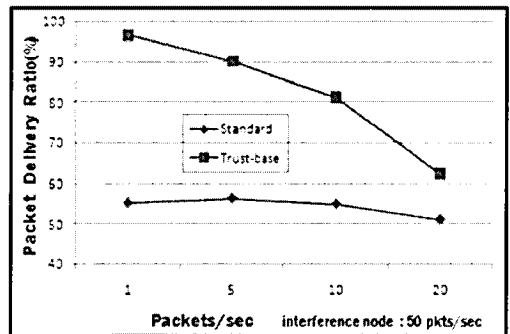


그림 11. 시뮬레이션 결과 (간섭노드 50pks/sec)  
Fig. 11 Simulation result (Interference node 50pks/sec)

V. 구현 및 성능평가

본 절에서는 MG2400-F48 ZigBee 모듈을 사용하여 신뢰 기반으로 구성된 토폴로지와 일반적으로 구성된 토폴로지의 성능을 비교해 본다.

5.1 실험 환경

RadioPulse 사에서 출시된 MG2400-F48는 RF, Modem, MAC, 8051 MCU를 단일 칩에 내장하고 있는 저전력 고집적 ZigBee 단일 칩 솔루션이다. 사양은 표 5와 같고 실험 파라미터는 표 6과 같다.



표 5. MG2400-F48 사양  
Table. 5 MG2400-F48 specifications

구분	사양
MCU	8051
Operating Voltage (Core)	Selective 1.5V and 1.8V
Sensitivity	99dBm @ 5dBm 101dBm @ 7dBm
TX Power	+5dBm @ 1.5V +7dBm @ 1.8V
Current Consumption (Active)	26mA @ Rx 32mA @ Tx(5dBm)
Data Rate	250Kbps / 500Kbps / 1Mbps

표 6. 실험 파라미터  
Table. 6 Experimental parameters

Item	Value
Pkts/sec	1,5,10,20
Transmission Data size	100 Bytes
Transmission Power	-17dBm
Pan Coordinator	1
Number of nodes	6
Routing protocol	Hierarchical
Beacon mode	off
Acknowledgment	off

## 5.2 실험 및 결과

### 5.2.1 장애물 유무에 따른 신뢰 레벨 부여

그림 12와 13같이 ZigBee 토폴로지를 구성한다. 그림 12는 일반적인 프로토콜로 구성된 토폴로지이고 그림 13은 신뢰도를 이용하여 구성된 토폴로지이다. 네모 박스는 두께 약 30cm의 콘크리트 벽이다. 실내에 존재하는 노드들은 높은 신뢰도를 부여 하였고 벽 외부에 존재하는 노드들은 낮은 신뢰도를 부여하였다. 실내의 노드와 개방된문으로 통신이 가능한 4번 노드에게는 벽으로 가린 노드들 보다는 높은 신뢰도 값을 주었다. 이와 같이 토폴로지를 구성한 후 6번 노드가 코디네이터인 1번 노드로 패킷을 전송 한다. TX power는 -17dBm으로 테스트 결과 오차가 상당히 크지만 평균적으로 약 10m의 전송 거리를 가진다. 실험 역시 Beacon 모드를 사용하지 않고 Non Acknowledgment 모드이다. 따라서 패킷 전송이 실패 하더라도 패킷 재전송은 일어나지 않는다. 패킷은 초당 1개, 5개, 10개, 20개씩 전송하여 패킷 수신율을 측

정하였다. 모든 실험 결과 값은 3회 평균으로 구하였다.

그림 14는 실험결과를 나타낸다. 콘크리트 벽에 의해 많은 패킷이 손실되기 때문에 신뢰도를 이용하여 네트워크를 구성한 쪽이 성능이 좋게 나온다. 그 차이는 초당 전송횟수가 높을수록 커지다 패킷 전송률이 초당 20개에 가까워지면서 작아진다. 이것은 ZigBee 모듈이 송신 시간에 수신을 동시에 할 수 없기 때문이다. 초당 10개의 패킷 전송 까지는 수신 시간에 여유가 있으나 20개일 때는 수신 시간의 여유가 부족하게 된다. 따라서 부모 노드가 송신을 할 때 자식노드가 패킷을 송신할 확률이 커지고, ZigBee 모듈 자체에 패킷 전송률이 떨어지게 된다.

### 5.2.2 전원 소스에 따른 신뢰 레벨 부여

그림 15과 16같이 토폴로지를 구성한다. 여기서 2번 노드는 AA 건전지 두 개로 작동하는 노드이다. 신뢰도를 이용하여 구성 하지 않을 경우 4번 노드는 2번 노드 3번 노드 중 어느 노드나 조인이 가능하기 때문에 2번 노드로 강제적으로 접속하게 하였다.

그림 17은 실험결과를 나타낸다. 두 네트워크간 성능에서 많은 차이를 보이지는 않지만 중간 라우팅 노드에 배터리를 사용하는 노드가 있는 네트워크가 약간의 성능저하를 보이며 신뢰도를 이용하여 형성된 네트워크가 좀 더 성능이 좋음을 보여준다. 이 실험 역시 패킷 전송률이 초당 20개인 경우 ZigBee 모듈 자체에 급격한 성능 저하를 보이며 두 네트워크간 성능 차가 거의 없게 된다.

## VI. 결론

본 논문에서는 ZigBee 네트워크 구성 시 LQI와 깊이 값만을 이용하여 부모 노드를 선택하는 방식에서 신뢰 값을 추가하여 신뢰성 있는 네트워크 토폴로지를 구성하는 알고리즘과 신뢰 값을 활용하여 전체적인 네트워크의 신뢰도를 측정하는 방법을 제안하였다. 시뮬레이션에서는 무선 채널이 안정적인 노드와 그렇지 못한 노드에 신뢰 값의 차등을 주어 성능을 검증하였고, MG2400 모듈을 이용한 실험에서는 콘크리트 벽과 배터리 사용유무에 따라 신뢰도의 차등을 주어 성능을 검증하여 전체적인 네트워크의 성능이 향상됨을 보였다.

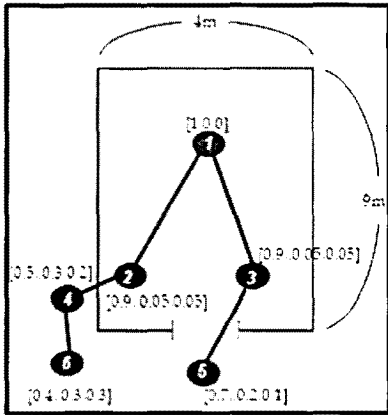


그림 12 기본 토폴로지  
Fig. 12 Basic topology

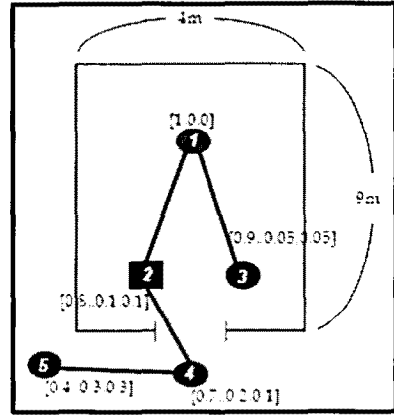


그림 15. 기본 토폴로지  
Fig. 15 Basic topology

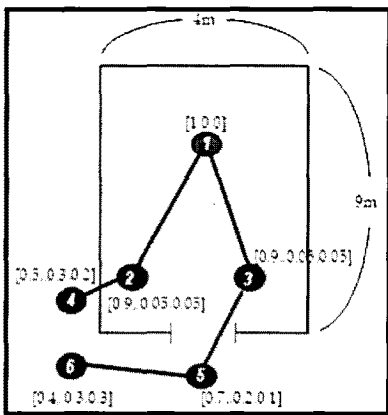


그림 13. 신뢰도 기반 토폴로지  
Fig. 13 Trust based topology

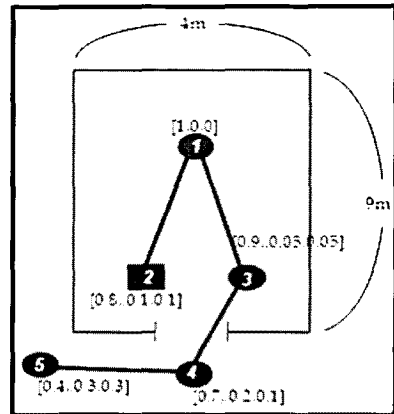


그림 16. 신뢰도 기반 토폴로지  
Fig. 16 Trust based topology

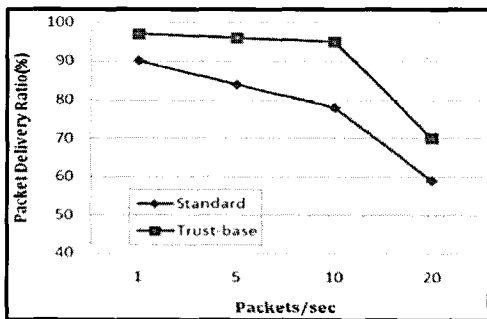


그림 14. 실험 결과 - 장애물 유무  
Fig. 14 Result - Obstruction

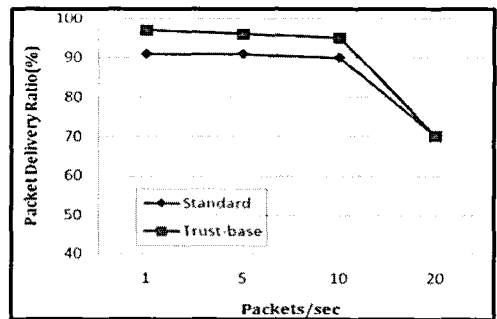


그림 17. 실험 결과 - 전원 소스  
Fig. 17 Result - Power source

실질적인 ZigBee 네트워크 구성 시에 생성된 토폴로지 형태는 상당히 랜덤 하기 때문에 시뮬레이션이나 실험에서 신뢰 기반으로 형성된 토폴로지와 동일한 토폴로지도 형성될 수 있다. 하지만 그 경우는 상당히 많은 경우의 수 중에서 한 가지 일뿐이므로 신뢰 값을 부여하여 최대한 신뢰도가 높은 쪽으로 토폴로지를 형성하는 것이 전체적인 네트워크의 신뢰도를 높여 주게 될 것이다. 향후 실제 환경 상황을 고려한 신뢰 모델을 정립 한다면 ZigBee 뿐만 아니라 여러 가지 USN 환경에 적용할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

[1] Zigbee 관련 기술 및 시장동향. EIC 2008.12.

[2] Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE Std 802.15.4.-2006.

[3] ZigBee Alliance "ZIGBEE SPECIFICATION" January 2008.

[4] A. Woo, T. Tong and D. Culler, "Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks," Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp. 14-27, 2003.

[5] Abdelmounaam Rezgui and Mohamed Eltoweissy, "TARP: A Trust-Aware Routing Protocol for Sensor-Actuator Networks," IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, pp. 1-9, 2007.

[6] Vladimir Oleshchuk and Vladimir Zadorozhny, "Trust-Aware Query Processing in Data Intensive Sensor Networks," Proceedings of the 2007 International Conference on Sensor Technologies and Applications, pp. 176-180, 2007.

[7] A. Jøsang, "An Algebra for Assessing Trust in Certification Chains". Proceedings of the Networks and Distributed Systems Security (NDSS'99), 1999.

[8] A. Jøsang, "A Logic of Uncertain Probabilities", International Journal of Uncertainty, Fuzziness and

Knowledge-Based Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 279-311, June 2001.

[9] The Network Simulator ns2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns>

### 저자 소개

황재우 (Jae Woo Hwang)



2007년 8월 중앙대학교  
전자전기공학부 (공학사)  
2009년 8월 중앙대학교  
전자전기공학부 (공학석사)

※ 관심분야: 유비쿼터스

박호현 (Ho-Hyun Park)



1987년 2월 서울대학교  
계산통계학과 (이학사)  
1995년 8월 한국과학기술원  
정보통신공학과 (공학석사)

2001년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 (공학박사)  
1987년 1월 ~ 2003년 2월 삼성전자 (수석연구원)  
2003년 3월 ~ 현재 중앙대학교 전자전기공학부  
(부교수)

※ 관심분야: 멀티미디어, 유비쿼터스