

# WPAN에서 QoS를 보장하는 분산적인 PNC 선출 방법

준회원 정 순 규\*, 정회원 유 상 조\*

## Distributed PNC Election Scheme with Guaranteeing QoS in WPANs

Soon-Gyu Jeong\* Associate Member, Sang-Jo Yoo\* Regular Member

### 요 약

WPAN은 비교적 좁은 영역에서 통신이 수행되고, PNC라 불리는 중앙 조정장치가 중심이 돼서 네트워크가 조직되고 운영된다. 그리고 주요 응용분야는 방법장치, 건강관리 장치 등이 있을 수 있다. 이런 네트워크는 실시간성을 보장하는 것이 중요한데, PNC가 더 이상 동작하지 못해서 통신이 끊어지면 심각한 문제가 발생할 수 있기 때문에 이런 상황에서 다음 PNC를 빠르게 선출하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 새로운 PNC를 선출할 때의 기준으로 QoS 보장가능정도와 주변 디바이스와의 연결성을 고려하여 기존의 PNC가 커버하던 영역을 최대한 보장하고 네트워크의 깨짐 및 분할 현상을 막고 QoS도 보장하는 분산적 PNC 선출방법을 제안한다. 저속 WPAN의 표준인 IEEE 802.15.4에 기반을 두는 시스템을 고려하였고, 모의실험결과 QoS와 주변 디바이스와의 연결성을 최대한 보장하면서 빠른 시간에 PNC를 선출할 수 있음을 알 수 있다.

**Key Words** : QoS, PNC, Leader election, WPAN, IEEE 802.15.4

### ABSTRACT

WPANs are formed in relatively small area and a PNC that serves as a central control device plays an important role in the operation and organization of a piconet. Typical applications of WPANs are security system and health monitoring system. In these type of systems, guaranteeing realtime service is very important, and communications cannot take place when the PNC malfunctions. Thus, in this situation, it is necessary to elect a new PNC as soon as possible. For this reason, we propose distributed PNC election scheme that considers not only QoS support but also network connectivity to avoid possible network partition. Simulation results show proposed mechanism can select PNC with guaranteeing QoS and connectivity for a limited period.

### I. 서 론

최근 홈네트워크 및 유비쿼터스 네트워크에 대한 관심이 높아지면서 태내 전자제품, 사무기기, 각종 정보기기를 별도의 배선 없이 무선으로 연결하여 사용할 수 있게 하는 기술이 주목 받고 있다. 근거리

무선 개인통신망 기술을 일컫는 WPAN(Wireless Personal Area Network)은 블루투스(Bluetooth), 지그비(ZigBee)<sup>[1]</sup>, 초광대역무선통신(Ultra Wide Band) 기술로 특징지어지는 비교적 좁은 영역인 피코넷(piconet)에서 이뤄지는 개인 휴대기기간의 근거리 통신을 말한다. 특히 지그비는 IEEE 802.15.4 표준<sup>[2]</sup>의

※본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(ITA-2006-C1090-0603-0019)

※본 연구는 2007학년도 학술 진흥재단의 지원에 의하여 연구됨 (KRF-2005-202-D00321)

\* 인하대학교 정보통신대학원 멀티미디어통신망 연구실 (na@sgyu.com, sjyoo@inha.ac.kr)

논문번호 : KICS2006-11-489, 접수일자 : 2006년 11월 13일, 최종논문접수일자 : 2007년 2월 26일

PHY/MAC 기술을 바탕으로 저속, 저가격, 저 전력 소모가 요구되는 응용을 주요 목표로 하여 산업 표준으로 사용되기 위한 표준화 작업이 활발하게 진행되고 있다.

근거리 통신에서의 응용 분야는 홈오토메이션(home automation), 게임, 화재 경보, 방범 디바이스, 건강관리장치 등이 있다<sup>3)</sup>. 특히 화재 경보, 방범 장치, 건강관리장치와 같은 응용에서는 일정시간이상 통신이 끊어지면 심각한 문제가 발생할 수 있기 때문에 끊임없이 통신이 가능하게 하는 것과 일정한 QoS를 제공하는 것은 매우 중요한 요소이다. 또한 서로 경쟁하며 통신을 수행하는 환경에서는 경쟁을 조정하고 네트워크를 효율적으로 사용하도록 조정하는 네트워크 조정장치(coordinator)의 역할이 중요하게 여겨진다.

WPAN에서 PNC(piconet coordinator)로 있던 디바이스가 자신이 더 이상 PNC 역할을 하지 못하는 상황이라고 감지하면 새로운 PNC를 선출하는 과정을 진행할 수 있다. 여기서 기존의 PNC가 새로운 PNC를 지정해주기 때문에 자연스럽게 PNC를 교체할 수 있지만 예상치 못한 이유로 PNC의 동작이 갑자기 멈춰버리는 경우에는 PNC를 새로이 선출하는 특별한 과정이 필요하다. 이런 경우에 새로운 PNC를 빠르게 선출하지 못하면 데이터 전송 지연 등이 발생해서 QoS 요구사항을 제대로 보장받지 못할 수 있다.

갑작스럽게 PNC의 동작이 멈추는 경우에 대처하기 위해 예비 PNC의 우선순위를 정해놓고 PNC가 일정한 주기마다 보내는 비콘(beacon)을 수신하지 못했을 때 정해진 우선순위대로 새로운 PNC가 될 수 있는 기회를 제공하는 방법이 제안되었다<sup>4)</sup>. 하지만 새로운 PNC와 다른 디바이스와의 연결성을 고려하지 않기 때문에 기존의 PNC가 커버하던 피코넷의 아주 작은 부분밖에 커버하지 못할 수 있다. 또한 기존의 PNC가 가지고 있던 정보를 모두 잃어버려서 IEEE 802.15.4 표준에서 QoS(Quality of Service) 보장을 위해 할당해서 사용하는 GTS(Guaranteed Time Slot) 서비스를 더 이상 제공하지 못하고, 또한 GTS를 재 할당해서 사용해야하기 때문에 실시간성을 잃어버리게 된다.

일반적으로 기존의 PNC와 가장 가까이 있던 디바이스를 새로운 PNC로 선택하면 기존의 PNC가 커버하던 영역을 최대한 커버할 수 있다. 하지만 각 디바이스사이의 거리를 측정할 때 UWB<sup>5)</sup>나 GPS<sup>6)</sup>와 같은 기술을 사용하지 않으면 측위의 오차는 수십m에

이르기 때문에 거리를 기준으로 PNC를 선출하는 것이 항상 올바른 결과를 보이는 것은 아니다. 거리를 정확히 측정할 수 있는 환경이라도 디바이스들이 균일하게 분포되어 있지 않고 특정영역에 치우쳐져 있는 경우라면 기존의 PNC와 가까이 있던 디바이스를 새로운 PNC로 선출하더라도 기존 피코넷의 영역에 있던 디바이스의 대부분을 커버하지 못할 수도 있다. 따라서 거리를 기준으로 PNC를 선출하는 것이 항상 좋은 선택이라고 할 수도 없기 때문에 PNC 선출 기준으로 다른 것이 필요하다.

PNC를 선출하는 기준은 여러 가지가 있을 수 있지만 실시간 응용과 같은 경우에는 끊이지 않는 서비스를 보장하는 것과 같이 QoS 보장이 제일 중요하다. 또한 기존의 PNC가 커버하던 영역을 최대한 유지할 수 있다면 네트워크가 깨지는 것을 최소한으로 줄일 수 있기 때문에 디바이스 사이의 연결성도 매우 중요한 요소이다.

따라서 본 논문에서는 IEEE 802.15.4에 기반을 두는 네트워크에서 급작스런 PNC의 멈춤에 대처하기 위해 새로운 PNC를 빠르게 선출하는 방법을 제안하며, 이때 PNC 선출의 기준으로 GTS 서비스 보장 정도, 주변디바이스와의 연결성을 이용한다. 또한 제안하는 방법은 몇 가지 기준만 만족하면 IEEE 802.15.4 기반의 네트워크뿐만 아니라 다른 네트워크에도 충분히 적용할 수 있는 유연한 방법이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 IEEE 802.15.4에서 QoS를 제공하는 방법에 대해서 설명하고, III장에서는 PNC를 선출하기위해 제안된 슈퍼프레임 구조와 4-way PNC 선출 메커니즘, 2-단계 백오프, 연결성 파악 절차를 설명한다. IV장에서는 모의실험의 실험을 결과를 보여 제안하는 방법의 성능을 분석한다. 그리고 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. IEEE 802.15.4에서 QoS 제공 방법

센서 네트워크 및 WPAN에 관련된 표준인 IEEE 802.15.4는 그림 1과 같이 통신이 가능한 구간(active)을 CAP(Contention Access Period)와 CFP(Contention Free Period)로 나눠서 사용한다. CAP 구간에서는 slotted CSMA/CA를 사용하여 각 디바이스간의 경쟁으로 해당 슬롯을 차지하는 디바이스가 통신을 수행할 수 있다. CFP 구간에서는 PNC에게서 GTS를 할당받은 디바이스만이 통신을 수행할 수 있고, 한 개 이상의 GTS도 할당 받아 사용할

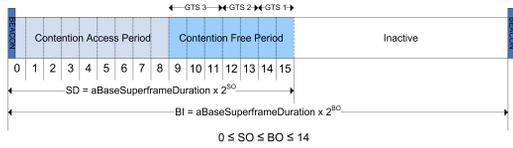


그림 1. IEEE 802.15.4 슈퍼프레임 구조

수 있다. GTS를 할당받은 디바이스는 할당을 해제하기 전까지 해당 시간구간(time slot)을 독점적으로 사용할 권한을 가지기 때문에 실시간성 보장과 같은 QoS를 제공할 수 있다. CFP 구간이 지나면 디바이스들은 다음 비콘 기간까지 휴면상태(sleep state)에 들어가서 전력소모를 줄일 수 있다. 여기서 CAP, CFP, inactive 구간의 길이에 관한 정보는 주기적으로 수신하는 비콘을 통해서 알 수 있고, GTS를 제공하는 것은 선택사항이며 PNC가 피코넷을 관장하는 스타 토폴로지에서만 적용이 가능하다<sup>[2]</sup>.

GTS는 PNC가 있는 환경에서만 사용할 수 있기 때문에 갑작스레 PNC가 동작하지 못하는 경우에는 GTS를 할당받아 사용하는 디바이스들이 PNC에게서 GTS 서비스를 제공받지 못해서 실시간 서비스와 같은 QoS를 보장받을 수 없다. 따라서 디바이스들이 비콘 프레임을 수신해야할 시점에 비콘 프레임을 수신하지 못해 PNC가 동작하지 못하는 상황을 인지하면 CAP 구간에서 새로운 PNC 선출을 마치고, CFP 구간에서는 새로운 PNC가 기존의 GTS 서비스를 제공해 줌으로써 QoS를 보장해줘야 한다.

### III. 새 PNC를 선출을 위한 n-step 선출 기간

PNC는 피코넷에 참여하려는 디바이스와의 제어 프레임 교환을 통해 피코넷을 구성하는데, IEEE 802.15.4 표준에서 제시하는 방법으로 피코넷을 구성하면 PNC와 각 디바이스 사이에 많은 제어 프레임이 교환되어야 하기 때문에 새로운 피코넷을 구성하는데 많은 시간이 소요된다<sup>[7,8]</sup>. 또한 PNC의 동작이 갑자기 멈춰서 잘 운영되던 피코넷이 깨지게 되면 피코넷을 조직하는 과정을 처음부터 다시 해야 하기 때문에 시간 지연이 발생하고 기존에 제공받았던 GTS도 다시 할당해서 사용해야하기 때문에 실시간 서비스와 같은 QoS를 보장받을 수 없게 된다.

디바이스들이 PNC가 주기적으로 브로드캐스팅하는 비콘 프레임을 수신하지 못하면 PNC에게 문제가 생겼다는 사실을 알 수 있다. IEEE 802.15.4 표준에 따르면 이런 상황이 4번 연속으로 발생하면 PNC가 동작하지 못하는 것으로 간주하는데<sup>[2]</sup>, BO(Beacon

Order)의 크기에 따라 비콘 프레임을 4번 수신하지 못하는 시간이 수분 이상이 될 수도 있다<sup>[7,8]</sup>. 이에 따라 통신이 끊어지는 시간이 길어져서 디바이스들이 서비스를 제공받을 수 없는 시간이 길어지기 때문에 본 논문에서는 비콘 프레임을 한번이라도 수신하지 못하면 PNC 선출과정을 진행하도록 해서 끊임없는 서비스 제공을 가능하게 한다.

본 논문에서는 QoS 보장정도와 주변 디바이스와의 연결성을 기준으로 가장 적합한 PNC를 빠르게 선출하는데 목적을 둔다. 이를 지원하기 위해 2-단계 백오프를 지원하는 새로운 슈퍼프레임 구조와 4-way PNC 선출 메커니즘을 제안해서 PNC 선출 과정이 효율적으로 진행되도록 한다. 또한 디바이스들이 주변 디바이스와의 연결성을 파악하는 것을 돕기 위해 별도의 연결성 파악기간을 둔다.

#### 3.1. PNC 선출기간의 슈퍼프레임 구조

IEEE 802.15.4 MAC 계층에서는 slotted CSMA/CA를 사용하고 하나의 슬롯을 한 디바이스만이 사용할 수 있게 하였기 때문에 슬롯을 차지하기 위해 경쟁하는 디바이스가 많아지면 충돌 발생 확률이 커지게 된다<sup>[7,8]</sup>. PNC가 동작하지 못해 기존의 피코넷에 참여하던 디바이스들 중에서 새로운 PNC를 선출해야할 때 표준에서 제공하는 슈퍼프레임 구조를 그대로 따르면 지속적인 충돌로 인해 PNC 선출에 소요되는 시간이 커질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 PNC 선출을 효율적으로 하기위한 새로운 슈퍼프레임 구조를 제안하며, 이는 중앙조정 없는 환경에서 디바이스들의 협력으로 PNC를 빠르게 선출하는 것을 지원한다.

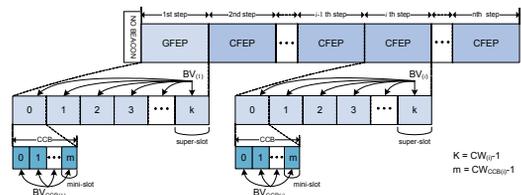


그림 2. 제안하는 PNC 선출 기간의 슈퍼프레임 구조

제안하는 슈퍼프레임 구조는 그림 2와 같이 한번의 GFEP (GTS First Election Period)와 한번 이상의 CFEP (Connectivity First Election Period)로 구성될 수 있다. GFEP와 CFEP는 동일한 구조를 가지며 2-단계 백오프(2-phase backoff)를 지원하기 위해 개의 미니슬롯(mini-slot)으로 나뉜 개의 슈퍼슬롯(super-slot)으로 구성되고, 미니슬롯은 한 개의 데이

터 프레임을 보낼 수 있는 크기로 정의한다. 본 논문에서는 기존의 PNC가 제공하던 GTS 서비스를 계속 제공할 수 있는 디바이스를 새로운 PNC로 선출하여 QoS를 보장하는 것을 최우선 목표로 하기 때문에 GTS를 우선기준으로 PNC를 선출하는 GFEP가 제일 처음에 실행된다. GFEP 동안에 PNC가 선출되지 않았을 경우에는 주변디바이스와의 연결성을 우선 기준으로 PNC를 선출하는 CFEP가 실행되며, CFEP는 PNC가 선출될 때 까지 계속 된다(n-step).

PNC 선출기간에 모든 디바이스는 자신이 가진 정보를 이용해서 0에서 k 사이의 슈퍼슬롯( $BV_{(i)}$ )과 0에서 m사이의 미니슬롯( $BV_{CCB(i)}$ )을 선택하여 백오프 지연시간을 결정한다. 이때 PNC 선출 기준에 적합할수록 작은 백오프 값을 선택하게 해서 기준에 부합하는 디바이스에게 PNC 선출시 더 높은 기회를 준다. 한 슈퍼슬롯 안에 미니슬롯들이 포함된 구조이기 때문에 가 보다 백오프 지연시간에 더 큰 영향을 준다. 따라서 PNC 선출시 제일 중요하게 여기는 기준으로 을 결정하고, 다음 우선순위의 기준으로 을 결정해서 백오프를 진행하면 선출 기준에 가장 적합한 디바이스를 PNC로 선출할 수 있다. 이렇듯 두 가지 기준으로 두 개의 백오프 값을 선택해서 백오프 지연시간을 결정하는 것을 '2-단계 백오프'라 하고, 이는 3.3절에서 자세하게 설명한다.

CCB 구간은 그림 3과 같이 각 미니슬롯이 EIFS(extended interframe spacing) 만큼 떨어져있고, EIFS는 IEEE 802.15.4의 SIFS(short interframe spacing)의 두 배 크기로 정의해서 사용한다. 여기서 SIFS는 18 바이트 이하의 짧은 프레임을 전송할 때 MAC 서브레이어(MAC sublayer)에서 해당 프레임을 처리하기 위해 필요한 최소 시간을 뜻한다<sup>2)</sup>.

PNC 선출기간에 모든 디바이스는 2-단계 백오프를 하여 자신의 백오프 지연시간을 결정한다. 이때 가장 작은 백오프 지연시간을 가진 디바이스가 해당 슬롯에서 CCB 프레임을 전송하면서 먼저 PNC가 되기 위해 시도하는데, CCB 프레임을 인식한 이웃 디바이스는 SIFS 이후에 CES 프레임을 전송함으로써 4-way PNC 선출 메커니즘이 시작한다는 것을 주변 디바이스에게 알린다. 따라서 CCB나 CES 프레임을

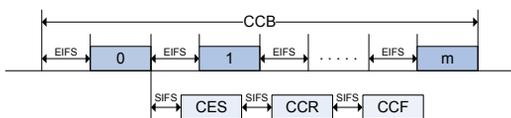


그림 3. CCB 구간에서 4-way PNC 선출 메커니즘 시작방법

표 1. 미니슬롯 용어 정의

Acronym	Meaning
CCB	Coordinator Candidate Broadcast
CES	Coordinator Election Start
CCR	Coordinator Collision Report
CCF	Coordinator ConFormation

감지한 디바이스들은 주변에 자신보다 PNC 선출 기준에 적합한 디바이스가 있다는 사실을 인지하여 PNC가 되는 것을 포기하고 PNC 선출과정만을 돕는다. PNC 선출과정은 다음절에서 자세하게 설명한다.

### 3.2. 4-way PNC 선출 메커니즘

디바이스들은 2-단계 백오프로 자신의 백오프 지연시간을 결정한 뒤 채널을 센싱하고 있다가 자신의 백오프 지연시간이 끝나기 전에 CCB 프레임을 감지하면 바로 백오프를 끝내고 SIFS 이후에 CES 프레임을 전송하면서 4-way PNC 선출 메커니즘이 시작한다. 자신의 백오프 지연시간이 끝날 때까지 다른 디바이스가 송신하는 CCB 프레임을 감지하지 못하면 스스로 CCB 프레임을 브로드캐스팅을 하면서 PNC가 되기 위한 시도를 한다.

타임 슬롯(time slot) 기반의 채널접근 방법을 사용할 때 한 슬롯에서 둘 이상의 프레임이 전송되면 프레임의 충돌로 인해 해당 프레임의 내용을 알 수가 없다. 이런 경우에 그림 3과 같이 슬롯에 특정 정보를 나타내도록 이름을 지어놓고 CCA(Clear Channel Assessment)<sup>11)</sup>로 채널의 에너지 레벨을 검사해서 프레임 전송 유무만을 판단해서 미리 약속한 정보를 인지할 수 있도록 한다. 여러 디바이스가 동시에 프레임을 송신할 가능성이 큰 CES와 CCR 구간에서는 충돌이 많이 발생할 수 있기 때문에 위와 같은 방법을 사용한다.

#### 3.2.1. 같은 백오프 지연시간을 가지는 디바이스의 경쟁으로 인해 충돌이 발생한 경우

가장 짧은 백오프 지연시간을 가지는 디바이스가 둘 이상 존재하면 해당 노드들이 CCB 프레임을 동시에 브로드캐스팅해서 CCB 프레임의 충돌이 발생한다. 이런 상황의 예를 그림 4에 나타내었고, 4-way PNC 선출 메커니즘은 다음의 과정으로 진행된다.

- 1) CCB: 백오프 지연시간이 가장 짧은 8, 9번 디바이스는 PNC가 되기 위해 CCB 구간의 해당 슬롯에서 CCB 프레임을 브로드캐스팅한다.

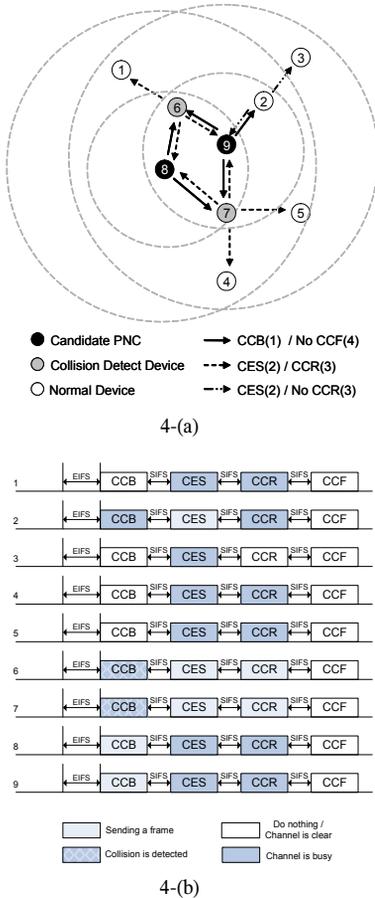


그림 4. PNC가 선출되지 않는 경우의 (a) 프레임 흐름과 (b) 채널상황

- 2) CES: CCB 프레임을 감지한 2, 6, 7번 디바이스는 CES 구간에서 CES 프레임을 송신하면서 4-way PNC 선출 메커니즘이 시작한다는 것을 주변 디바이스들에게 알린다. CCB 프레임을 감지한 모든 디바이스가 CES 프레임을 보내기 때문에 충돌이 발생할 수 있지만 주변 디바이스들은 CES 구간에서 프레임이 전송됐는지의 유무만을 감지해서 PNC 선출과정이 시작한다는 것을 알 수 있다. CCB 프레임을 감지하지 못하고 CES 프레임만을 감지한 1, 3, 4, 5번 디바이스는 2-홉 거리만큼 떨어져 있어서 PNC가 선출되더라도 새로운 PNC가 만드는 피코넷에 포함되지 못한다. 따라서 해당 디바이스들은 새로운 피코넷이 만들어지는 것을 방해하지 않도록 일정시간 휴면상태에 들어가도록 한다.
- 3) CCR: CCB 프레임의 충돌을 감지한 6, 7번 디바이스는 CCB 프레임을 송신한 디바이스들에게

PNC가 되기 위해 경쟁하는 디바이스가 있다는 것을 알리기 위해 CCR 구간에서 CCR 프레임을 송신한다. 8, 9번 디바이스는 CCR 구간에서 프레임을 감지해서 동일한 백오프 지연시간을 가지는 디바이스가 주변에 있다는 사실을 인지할 수 있다.

- 4) CCF: CCB를 브로드캐스팅한 디바이스가 충돌을 인지하지 못하면 CCF 구간에서 CCF 프레임을 브로드캐스팅하면서 자신이 새로운 PNC로 선출되었다는 것을 주변 디바이스에게 알린다. 하지만 8, 9번 디바이스는 CCR 구간에서 CCB 프레임의 충돌을 인지하였기 때문에 다음 PNC 선출과정을 진행하기 위해서 CCF 구간에서 아무런 동작도 하지 않는다.

### 3.2.2 PNC가 바르게 선출되는 경우

그림 5는 PNC가 선출될 때의 제어 프레임 흐름을 나타내고, 다음의 과정으로 진행한다.

- 1) CCB: 백오프 지연시간이 가장 짧은 한 디바이스는 PNC가 되기 위해 CCB 구간의 해당 슬롯에서 CCB 프레임을 브로드캐스팅한다.
- 2) CES: CCB 프레임을 수신한 디바이스들은 CES 프레임을 송신한다.
- 3) CCR: CCB 프레임의 충돌이 발생하지 않고, 디바이스들은 아무 동작도 하지 않는다.
- 4) CCF: CCB 프레임을 브로드캐스팅하고 충돌을 인지하지 못하였기 때문에 주변에 PNC가 되기 위해 경쟁하는 디바이스가 없다고 판단해서 CCF 프레임을 브로드캐스팅하고 새로운 PNC가 된다.

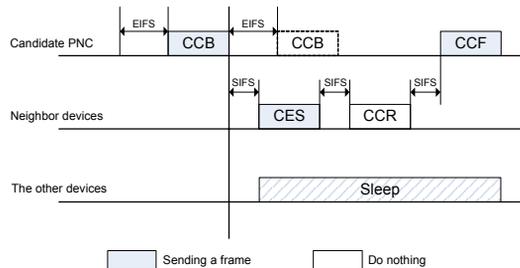


그림 5. PNC가 바르게 선출되는 경우의 프레임 흐름

PNC 선출기간에 각 디바이스는 해당 미니슬롯에서 제어 프레임의 흐름에 따라 표 2와 같이 동작하고, 한번의 PNC 선출기간이 지나면 디바이스는 각자 새로운 역할로 구분 지어진다.

표 2. 미니슬롯에서의 동작에 따른 디바이스 역할 구분

CCB	CES	CCR	CCF	After this period
B	n/a	ND	B	new PNC
B	n/a	D	n/a	candidate PNC
CD	B	B	n/a	neighbor device
D	B	n/a	ND	neighbor device
D	B	n/a	B	piconet member
ND	D	n/a	n/a	partitioned device

B: Broadcasting a frame  
 D: Frames are detected  
 CD: Collision is detected  
 ND: Frames are not detected

표 3. 파라미터 정의

$N_{devices}$	비콘 프레임으로 알 수 있는 전체 디바이스 개수
$CV_k$	디바이스 k의 주변 디바이스와의 연결성
$CV_{max(i)}$	i 번째 선출 기간에서 연결성 범위에 따라 조정된 연결성의 최댓값
$CA_{k(i)}$	i 번째 선출 기간에서 줄어드는 연결성 범위에 따라 조정된 연결성 정보
$L_{bound}$	이전 선출기간에서 해당 백오프 구간의 하한
$L_{bound}$	이전 선출기간에서 해당 백오프 구간의 상한

### 3.3 2-단계 백오프 메커니즘

PNC 선출의 기준으로 QoS 보장정도, 주변 디바이스와의 연결성, 배터리 잔량 등이 있을 수가 있는데, 해당 네트워크에서 중요하게 여기는 기준의 우선순위를 정해 PNC 선출에 이용하면 해당 네트워크에서 요구하는 기준에 가장 부합하는 디바이스를 PNC로 선출할 수 있다. 본 논문에서는 QoS 보장을 최우선으로 하기 때문에 GTS 보장정도를 첫 번째 우선순위의 기준으로 둔다. GTS 보장정도가 같을 때 기존의 PNC가 커버하던 영역을 최대한 보장해줄 수 있는 디바이스를 PNC로 선출하기 위해 주변 디바이스와의 연결성을 두 번째 우선순위의 기준으로 둔다. 그리고 백오프 시 고려하는 정보의 양에 따라 백오프를 세 번이상하는 상황도 가정할 수 있다.

GFEP에서의 첫 번째 우선순위의 기준은 QoS 보장정도이고, 두 번째 우선순위의 기준은 주변 디바이스와의 연결성이다. GFEP에서 백오프 지연시간이 같은 디바이스가 존재해서 서로 PNC가 되려고 경쟁하는 상황이라면 다음 선출기간으로 넘어가는데, 이때 PNC가 되기 위해 경쟁하는 디바이스의 QoS 보장정

도는 같기 때문에 QoS 보장정도는 더 이상 PNC 선출의 기준으로 사용할 수가 없고 CFEP에서는 PNC 선출의 기준으로 연결성만을 이용한다.

#### 3.3.1 GTS 보장정도 우선의 PNC 선출 기간(GFEP)

GFEP에서 백오프 값을 결정할 때 QoS 보장정도와 주변디바이스와의 연결성을 이용한다. 한번 할당된 GTS는 해제 요청을 하기 전까지 유효하기 때문에 비콘을 받지 못했을 경우에도 이전 비콘에서 얻은 GTS 할당정보를 그대로 사용할 수 있다. 또한 디바이스들은 연결성 파악 기간 동안에 주변 디바이스와의 연결성( $CV_k$ )을 파악할 수 있고, 이전 비콘에서의 GTS 할당 정보와 연결성 테이블을 이용하여 자신이 PNC로 선출되었을 때 ‘연결’가능한 GTS를 할당 받은 디바이스의 합( $GTS_{guarantee}$ )을 계산해서 QoS 보장정도를 알 수 있다.

2-단계 백오프의 첫 번째 백오프 슬롯 크기( $CW_{(1)}$ )는 피코넷에 할당된 GTS의 전체개수로 정의하고, 각 디바이스는 식 1과 같이  $CW_{(1)}$ 에서  $GTS_{guarantee}$ 를 빼서 첫 번째 백오프 값인  $BV_{(1)}$ 를 계산한다. GTS 서비스 보장정도가 좋을수록  $GTS_{guarantee}$ 가 커져서  $BV_{(1)}$ 가 작아지고 백오프 지연시간이 줄어들기 때문에 해당 디바이스가 PNC로 선출될 확률이 높아진다.

$$BV_{(1)} = CW_{(1)} - GTS_{guarantee} \quad (1)$$

GFEP에서 각 슈퍼슬롯의 CCB 구간은  $CW_{CCB(1)}$  크기만큼의 미니슬롯으로 이뤄져있고, 디바이스들은 이 범위 안에서 연결성을 기준으로 두 번째 백오프 값인  $BV_{CCB(1)}$ 를 결정한다. GTS는 최대 7개까지만 할당해서 사용할 수 있기 때문에<sup>[2]</sup>  $GTS_{guarantee}$ 는 7보다 커질 수 없지만 연결성은 값의 범위가 ( $N_{devices} - 1$ )까지 커질 수 있기 때문에  $BV_{(1)}$ 을 결정하는 것과 같은 방법으로 백오프 값을 결정하면 백오프 값이 가지는 범위가 넓어져서 백오프 지연시간이 커질 수 있다.

가능한 백오프 값의 범위가 디바이스 개수 까지 커지는 것을 막기 위해 본 논문에서는 연결성 범위를 CW(Contention Window) 크기만큼 나눠서 일정 범위안의 연결성 값을 가지는 디바이스는 같은 백오프 값을 가지도록 하는 방법을 제안한다.  $CW_{CCB(1)}$ 가 3일 때의 상황을 가정한 그림 6을 보면 같은 연결성 범위 안에 있는 4, 5, 6, 7번 디바이스는 동일하게 1을 백오프 값으로 선택하고, 1, 2번 디바이스는 2를 선택하는 것을 알 수 있다.

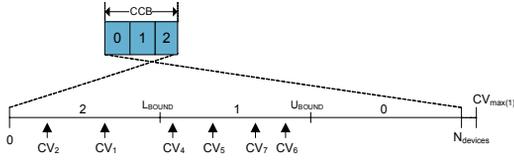


그림 7-b. RREP 전송 경로

그림 6.  $CW_{CCB(1)}$ 가 3일 때 연결성 기준으로 백오프 값 결정

2-단계 백오프의 두 번째 백오프 값인  $BV_{CCB(1)}$ 는 식 2로 계산할 수 있다.  $BV_{(1)}$ 가 같은 둘 이상의 디바이스가 같은  $BV_{CCB(1)}$ 를 선택하면 CCB 프레임의 충돌이 발생해서 PNC가 선출되지 못하기 때문에 다음 선출기간인 CFEP를 진행한다. 만약  $BV_{CCB(1)}$ 를 0으로 선택한 디바이스가 있으면 해당 디바이스가 새로운 PNC가 되고, PNC 선출과정은 마무리된다.

$$BV_{CCB(1)} = CW_{CCB(1)} - \frac{CV_k \times CW_{CCB(1)}}{CV_{max(1)}} - 1 \quad (2)$$

### 3.3.2 연결성 우선의 PNC 선출 기간 (CFEP)

본 논문에서는 PNC 선출의 기준으로 QoS 보장 정도와 연결성만을 고려하고 CFEP에서 PNC가 되기 위해 경쟁하는 디바이스들은 QoS 보장정도가 같기 때문에, 이번 선출 기간에서는 선출기준으로 연결성만을 이용한다.

일정범위 안에서 비슷한 연결성을 가진 디바이스들의 백오프 값은 동일하는데, 이때 연결성 범위는 그림 6과 같이 해당 구간의 상한( $U_{BOUND}$ )과 하한( $L_{BOUND}$ )으로 제한된다. 그리고 줄어든 연결성 범위를 이번 선출단계의 CW로 나누면 더욱 세밀하게 연결성 범위를 구분 지을 수 있기 때문에 디바이스들이 같은 백오프 값을 가질 확률을 줄일 수 있다. 상한과 하한을 구하는 식은 다음과 같고, 식에서  $(i-1)$ 은 이전 PNC 선출 단계를 의미한다.

$$L_{BOUND} = \frac{(CW_{(i-1)} - BV_{(i-1)} - 1) \times CV_{max(i-1)}}{CW_{(i-1)}} + \frac{(CW_{(i-1)} - 1)}{CW_{(i-1)}}, i > 1 \quad (3)$$

$$U_{BOUND} = \frac{(CW_{(i-1)} - BV_{(i-1)}) \times CV_{max(i-1)}}{CW_{(i-1)}}, i > \quad (4)$$

계산상의 편이를 위해, 줄어든 연결성 범위만큼 이번 선출 기간의 연결성 최댓값( $CV_{max(i)}$ )과 각 디바이스의 연결성( $CA_{k(i)}$ )을 조정하여 계산에 사용한다.

$$CV_{max(i)} = \begin{cases} N_{devices} + 1 & \text{if } i = 1, \\ U_{BOUND} - L_{BOUND} + 1 & \text{if } i > 1. \end{cases} \quad (5)$$

$$CA_{k(i)} = \begin{cases} CV_k & \text{if } i = 1, \\ (CA_{k(i-1)} - L_{BOUND}) & \text{if } i > 1. \end{cases} \quad (6)$$

그림 6에서 PNC가 되기 위해 경쟁하다 충돌이 발생한 4, 5, 6, 7 디바이스는 그림 7과 같이 줄어든 연결성 범위에서 CFEP의 CW로 연결성 범위를 구분 지어서 백오프 값을 결정한다. 그림 7에서 각 디바이스는 서로 다른 백오프 값을 선택했기 때문에, 두 번째 백오프 값에 관계없이 백오프 값이 가장 작은 6번 디바이스가 PNC로 선출될 수 있다.

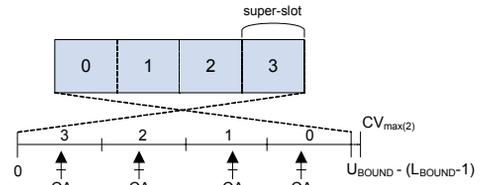


그림 7.  $CW_{(2)}$ 가 4일 때 줄어든 연결성 범위에 따라 조정된  $CV_{max(2)}$ ,  $CA_{k(2)}$

$$BV_{(i)} = CW_{(i)} - \frac{CA_{k(i)} \times CW_{(i)}}{CV_{max(i)}} - 1, i > 1 \quad (7)$$

연결성만을 기준으로 백오프 값을 결정하면 비슷한 연결성을 가지는 디바이스가 계속 같은 백오프 값을 선택해서 충돌이 지속적으로 발생하는 상황이 생길 수 있다. 이런 상황에 대처하기 위해 CFEP의 CCB구간에서 이뤄지는 두 번째 백오프는, 난수를 발생시켜 백오프 값을 결정하여 확률적으로 충돌을 줄이는 방법을 사용한다. CFEP에서의 2-단계 백오프 동안에도 PNC를 선출하지 못하면 CFEP를 다시 진행한다.

$$BV_{CCB(i)} = rand(0, CW_{CCB(i)} - 1) \quad (8)$$

### 3.4 연결성 파악기간

PNC를 선출하는 기준으로는 주변 디바이스와의 연결성, QoS 보장정도, 배터리 잔량 등이 있을 수 있다<sup>[9]</sup>. 여기서 배터리 잔량은 디바이스의 전압측정<sup>[12]</sup> 등을 통하여 쉽게 알아낼 수가 있지만 주변 디바이스와의 연결성이나 QoS 보장정도는 쉽게 얻을 수 있는 정보가 아니다. 따라서 PNC 선출의 기준으로 연결성을 사용하기 위해서는 연결성 정보를 획득하기

위한 별도의 과정이 필요하다. 이때 연결성을 파악하는데 소요되는 시간이 길어지면 상대적으로 일반적인 데이터 통신을 할 수 있는 시간이 줄어들게 되어 네트워크의 성능이 저하 된다. 따라서 네트워크 성능이 저하되는 것을 최소한으로 줄일 수 있는 빠른 연결성 파악 절차가 필요하다.

통신 채널이 양방향성을 가진다고 가정하면 A 디바이스가 송신한 프레임을 B 디바이스가 수신하였을 때 B 디바이스가 A 디바이스에게 프레임을 송신했을 때 A 디바이스가 해당 프레임을 수신할 수 있다<sup>[10]</sup>. 이때 두 디바이스는 서로 ‘연결’ 되어 있다고 정의하고, 연결성을 파악하는 시기는 PNC의 판단으로 일반적인 데이터 통신에 방해되지 않도록 정해진다. 제안하는 연결성 파악 절차는 다음의 과정으로 모든 디바이스의 연결성을 파악할 때 까지 진행된다.

- 1) 각 디바이스는 자신의 짧은 주소(short address)<sup>[2]</sup> 순서대로 데이터를 포함하지 않은 데이터 프레임 전송한다. 그림 8은 이의 예를 보여주는 것으로, 짧은 주소가 1번인 디바이스가 먼저 임의의 데이터 프레임을 전송하고 다음은 2번 디바이스가 데이터 프레임을 전송하는 과정으로 연결성 파악 절차가 진행된다.
- 2) 데이터 프레임을 수신한 디바이스는 자신의 CV(connectivity value)를 하나씩 증가시키고, PNC를 선출할 때 QoS 보장정도를 계산하기 위해 해당 디바이스의 주소를 연결성 주소 테이블에 저장한다.

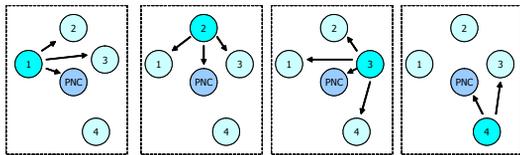


그림 8. 연결성 파악 절차

#### IV. 모의실험

제안하는 PNC 선출 방법의 성능을 평가하기 위해 자체 제작한 모의실험 도구로 모의실험을 수행하였다. 스타 토폴로지를 기반으로 각 디바이스는 일정 영역 안에서 무작위로 배치하였고, 모든 디바이스는 PNC가 될 수 있는 FFD(Full Function Device)라고 정하였다. 또한 스타 토폴로지에서 피코넷에 포함될 모든 디바이스는 PNC와 통신이 가능해야 하기 때문

표 4. 모의실험 환경요소

모의실험 영역	50m × 50m
전송 반경	50m
디바이스 개수	10, 50, 100, 150, 200, 250
GTS 할당 수	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

에 각 디바이스의 위치는 PNC의 전송 반경으로 제한된다. 표 4는 본 실험에서 사용한 환경요소를 나타내고  $CW_{(i)}$ 와  $CW_{CCB(i)}$  ( $i>1$ )는 3으로 고정해서 실험하였다.

요구하는 QoS를 만족시키기 위해서는 PNC 선출 과정이 CFP가 시작되기 전에 끝나야하고 기존에 서비스되던 GTS는 최대한 보장되어야 한다. 본 논문에서 제안하는 방법은 주변에 GTS가 할당된 디바이스가 많이 있는 디바이스 순서로 GFEP에서 백오프를 적게 하고 PNC가 되기 때문에 해당 피코넷에서 보장 가능한 GTS의 최대치를 보장 할 수 있다. 그림 9를 보면 GTS 할당된 디바이스가 한 개인 경우는 100% 다 보장 가능하지만 PNC 선출 시간에 참여하는 디바이스가 열개로 아주 적을 때 GTS가 일곱 개가 할당된 경우는 GTS 보장율이 77%정도로 떨어진다는 것을 알 수 있다.

이런 결과가 나타나는 이유는 GTS 할당을 받은 디바이스가 분산 배치되어 있으면 한 디바이스의 반경 안에 GTS 할당을 받은 디바이스가 모두 포함되지 않을 가능성이 크기 때문이다. 이런 상황은 PNC 선출에 참여하는 디바이스의 개수가 적을수록 심해지는데, 이는 참여하는 디바이스의 개수가 많은 경우보다 디바이스간의 평균거리가 길기 때문에 GTS 할당을 받은 디바이스가 전송반경 안에 있을 확률이 줄어 들기 때문이다.

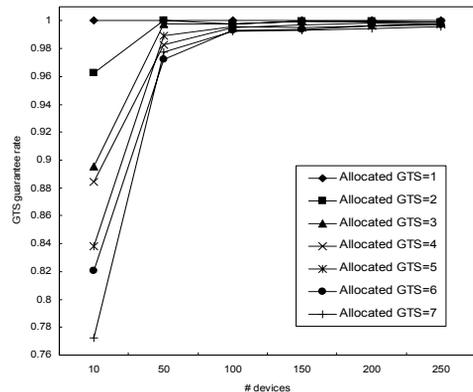


그림 9. 디바이스 개수에 따른 GTS 보장 율 비교

CAP 구간의 길이는 식 9와 같이 CAP 구간에서의 심벌(symbol) 개수( $CAP_{duration}$ )로 정의하고, 피코넷에서 정의하는 SO(Superframe Order)와 CAP 슬롯 개수에 따라서 그 길이가 결정된다. 여기서 심벌은 물리계층에서 신호전송의 단위이고, 본 논문에서는 2.4GHz 대역을 사용하는 시스템을 가정한다 (4bits/symbol, 62.5ksymbols/s).  $aBaseSlotDuration$ 은 IEEE 802.15.4 MAC에서 60으로 정의되어 있는 상수인데, SO가 0일 때의 슈퍼프레임 슬롯의 심벌 개수를 의미한다<sup>[2]</sup>.

$$CAP_{duration} = aBaseSlotDuration \times 2^{SO} \times \nu m CAPSlots \quad (9)$$

그림 10에서는 PNC 선출 시 소요되는 시간을 심벌단위로 나타내었다. PNC 선출 시에 소요되는 시간은 최악의 경우에도 1.9ms(1200 symbols)를 넘지 않는다. 또한 SO가 1이고 CAP 슬롯의 개수가 8개일 때(가능한 가장 작은 CAP 길이) CAP 구간의 길이는 960 심벌 이고, 이를 시간으로 환산하면 1.536ms 정도의 아주 짧은 시간이다. 최악의 경우에 0.4ms 정도의 서비스 지연시간이 발생하지만 이는 SO와 CAP 슬롯의 개수에 따라서 CAP 구간의 길이가 길어지면(SO=2일 때 3.072ms) 서비스 지연이 생기지 않을 수도 있고, 또한 GTS 할당 개수와 전체 디바이스 개수에 따라서도 서비스 지연시간이 전혀 발생하지 않을 수도 있다.

디바이스의 개수가 많을수록 비슷한 정보량을 가지는 디바이스가 많아져서 경쟁이 많이 발생하기 때문에 PNC 선출에 걸리는 시간이 많이 소요될 수 있다. 동일한 디바이스 개수일 때는 피코넷 할당된 GTS 개수가 많은 경우가 적은 경우에 비해서 PNC 선출에 더 많은 시간이 소요되는데, 이는 피코넷에 할당된 GTS가 많을 경우에 GTS가 여러 디바이스에 분산되어 있을 확률이 크기 때문에 해당 GTS를 보장해줄 수 있는 디바이스의 개수가 적을 가능성이 커지기 때문이다. 하지만 모든 경우에 디바이스 개수와 GTS 할당 개수에 상관없이 정해진 CAP 시간 안에 선출을 마칠 수 있다.

기존의 PNC 선출방법은 주변 디바이스와의 연결성이나 GTS 할당상황 같은 것을 고려하지 않았다<sup>[4]</sup>. 주변 디바이스와의 연결성과 GTS 보장 율 관점에서 보면 이 같은 경우는 임의의 디바이스를 PNC로 선출한 것과 같다고 볼 수 있다. 따라서 임의의 디바이스를 PNC로 선택하는 것과 제안하는 방법의 비교를 통해 성능지표를 나타낸다.

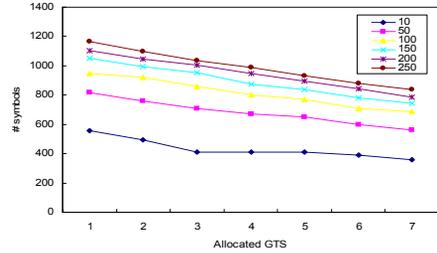


그림 10. GTS 할당 수에 따른 PNC 선출 지연시간

본 논문에서는 GTS 보장을 최우선에 두고 연결성은 두 번째 기준으로 생각해서 PNC를 선출한다. 또한 PNC 선출이 빠른 시간에 이루어질 수 있도록 하기 위해 CFEP CCB 구간에서 이뤄지는 두 번째 백오프에서는 확률적인 방법으로 충돌을 줄이는 방법을 사용한다. 이에 따라 그림 11과 같이 피코넷에서 주변 디바이스와의 연결성이 제일 좋은 디바이스를 PNC로 선출하지는 못하는데, 이는 QoS 보장을 우선시하기 때문에 발생하는 부작용이다.

또한 동일한 디바이스 개수일 때, 피코넷에 GTS 할당 개수가 많은 경우가 적은 경우에 비해서 해당 GTS를 보장해줄 수 있는 디바이스의 개수가 적을 확률이 커지게 된다. 따라서 GTS 할당 개수가 많으면 PNC가 되기 위해 경쟁하는 디바이스의 수가 줄어들어서 연결성이 좋지 않은 디바이스가 PNC가 될 확률이 낮아진다. 또한 주변 디바이스와의 연결성이 좋은 디바이스일수록 주변에 GTS가 할당된 디바이스가 있을 확률이 높아지기 때문에 GTS 할당 개수가 많을수록 PNC의 연결성은 좋아진다.

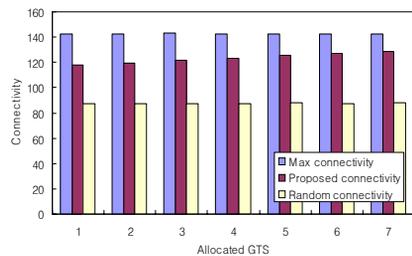


그림 11. GTS 할당개수에 따른 PNC의 연결성

## V. 결론

IEEE 802.15.4 표준에서는 GTS라 불리는 타임 슬롯을 디바이스에게 할당해서 QoS를 제공할 수 있다. PNC는 피코넷에 속해있는 디바이스가 GTS를 할당하면 정책에 따라서 디바이스에게 GTS를 할당하는데 이런 상황에서 PNC가 갑자기 동작하지 못하

는 경우에 제공받던 QoS를 더 이상 제공받지 못하게 된다. 또한 PNC가 사라진 경우에 중앙조정의 역할을 하는 디바이스가 더 이상 존재하지 않기 때문에 각 디바이스끼리의 자율적인 PNC 선출 방법이 필요하다. 이런 상황에 대처하기 위해 본 논문에서는 분산적인 PNC 선출이 되도록 하기 위해 4-way PNC 선출 메커니즘을 제안하였고, 최적의 PNC를 선출하기 위해 GTS 할당 정도와 연결성을 고려하여 백오프를 하는 2-단계 백오프도 제안하였다.

본 논문에서 제안하는 방법을 사용하면 PNC가 갑자기 동작하지 못하는 상황에 피코넷이 깨져서 재설정돼야하는 것을 막을 수 있고, 이전에 제공되던 QoS도 최대한 보장할 수 있다. 이런 특징은 실시간 서비스가 보장되어야하는 산발 감시 장치, 방법장치 등에 효율적으로 이용될 수 있다. 모의실험결과 기존의 PNC가 제공하던 GTS를 해당 피코넷에서 제공할 수 있는 최대한을 보장할 수 있었다. 또한 IEEE 802.15.4 표준에서의 CAP를 초과하지 않고 빠르게 새로운 PNC를 선출할 수 있기 때문에 CFP에서 제공되는 GTS를 보장할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Zigbee alliance. <http://www.zigbee.org>.  
 [2] IEEE 802 Working Group, "Standard for Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)", ANSI/IEEE 802.15.4, Oct. 2003.  
 [3] E.D. Callaway, et al. "Home Networking with IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks," IEEE Communication Magazine, Aug. 2002.  
 [4] Won Soo Kim, Il Whan Kim, Seung Eun Hong, and Chung Gu Kang, "A Seamless Coordinator Switching (SCS) Scheme for Wireless Personal Area Network," IEEE Trans. on Consumer Electronics, vol. 49, no. 3, pp.554-560, Aug. 2003.  
 [5] Joon-Yong Lee, and Robert A. Scholtz, "Ranging in a Dense Multipath Environment Using an UWB Radio Link," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 20, no. 9, Dec. 2002.  
 [6] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, Global Positioning System: Theory and Practice, 4th ed., Springer Verlag, 1997.  
 [7] Jianliang Zheng, and Myung J. Lee, "A Comprehensive Performance Study of IEEE

802.15.4," IEEE Press. Book, 2004.  
 [8] A. Koub?a, M. Alves, and E. Tovar, "A Comprehensive Simulation Study of Slotted CSMA/CA for IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks," in Proc. The 6th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS 2006), Jun. 2006.  
 [9] IEEE 802 Working Group, "Standard for Part 15.3: Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks(WPAN), ANSI/IEEE 802.15.3 2003.  
 [10] Lain-Jinn Hwang, Shiann-Tsong Sheu, Yun-Yen Shih, and Yen-Chieh Cheng, "Grouping Strategy for Solving Hidden Node Problem in IEEE 802.15.4 LR-WPAN," in Proc. The First International Conference on Wireless Internet (WICON'05), pp. 26-32, Jul. 2005.  
 [11] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler, "Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks," in Proc. ACM SenSys'04, pp. 95-107, Nov. 2004.  
 [12] Data Sheet for tmote Sky, available online at <http://www.moteiv.com/products/docs/tmote-sky-datasheet.pdf>.

정 순 규 (Soon-Gyu Jeong)

준회원



2005년 2월 인하대학교 컴퓨터공학과(공학사)  
 2007년 2월 인하대학교 정보통신대학원(공학석사)  
 2007년 3월~현재 : TSST Korea <관심분야> WSN, WPAN, RFID

유 상 조 (Sang-Jo Yoo)

정회원



1988년 2월 한양대학교 전자통신학과(공학사)  
 1990년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과(공학석사)  
 2000년 8월 한국과학기술원 전자전산학과(공학박사)  
 1990년 3월~2001년 2월 KT 연구개발본부

2001년 3월~현재 : 인하대학교 정보통신대학원 부교수 <관심분야> 인터넷 QoS, 초고속 통신망 구조, 멀티미디어 네트워킹, 트래픽 엔지니어링