

# Zigbee MAC 프로토콜기반 인체 응용을 위한 나노 네트워크의 슈퍼 프레임 설계

이경환<sup>†</sup>, 김성운<sup>\*\*</sup>

## Zigbee MAC Protocol based Super frame Design for In-body Nano-Network Applications

Kyung-Hwan Lee<sup>†</sup>, Sung-Un Kim<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

In a beacon-enabled Zigbee network, the slotted CSMA/CA mechanism based on the super frame structure fairly provides communication chance for each node and makes a reasonable usage of the available energy. In the case of wireless nano sensors that are implanted into the target human body area for detecting disease symptoms or virus, such a nano-network requires a similar type of channel sharing and transmission of short length event-driven data. In this paper, for nano-network's in-body applications, we aim to design conceptually a new super frame derived from the existing beacon-enabled Zigbee MAC protocol. And we analyze the efficiency of the proposed super frame in the aspect of practical deployment.

**Key words:** IoNT, IoBNT, Nano-Network, Zigbee, Slotted CSMA/CA, Beacon-enabled Zigbee MAC, Super frame

### 1. 서 론

현재 인터넷을 활용한 사물통신은 IoT(Internet of Things) 개념에서 점차 IoNT(Internet of Nano-Things) 개념으로 확장되어가고 있다[1]. 현재 IoNT는 나노 단위의 디바이스와 테라헤르츠-EM(terahertz-ElectroMagnetic) 통신기술의 발달로 그 적용이 확대되고 있다. 특히 그래핀(graphene) 기반의 나노 안테나와 밀리미터 크기의 무선 센서가 결합된 나노 센서(nano sensor)들의 개발로 Gbps 속도의 대량 데이터 전송도 가능하다[2]. 그럼에도 불구하고

신체의 특정 장기에 나노 센서들이 이식된 경우 통신을 위해 공유된 무선 채널에서 충돌 방지와 센서들이 가진 제한된 전력의 효율적인 활용을 위해서는 간단하고 유연한 MAC 프로토콜 동작이 요구된다[3].

다른 한편으로 개인 무선 통신망(PAN: Personal Area Network) 기술들 중에서 IEEE 802.15.4의 표준으로 개발된 지그비는 저 전력으로 넓은 범위의 통신 응용에 적합하다[4,5]. 즉 낮은 수준의 전송 속도(250 kbps, 2.4GHz 경우)로 긴 배터리 수명과 보안성을 요구하는 주기적 또는 간헐적인 데이터 전송이나 센서 및 입력 장치 등의 단순 신호 전달을 위한 데이터

\* Corresponding Author : Sung-Un Kim, Address: (608-737) Pukyong National University Daeyeon Campus 45, Yongso-ro, Nam-Gu, Korea, TEL : +82-51-629-6235, FAX : +82-51-629-6235, E-mail : kimsu@pknu.ac.kr  
Receipt date : May 23, 2016, Revision date : July 1, 2016  
Approval date : July 26, 2016

<sup>†</sup> Department of Information and Communications Engineering, College of Engineering, Pukyong National University (E-mail : ruaehdehddk@naver.com)

<sup>\*\*</sup> Department of Information and Communications Engineering, College of Engineering, Pukyong National University

\* This work was supported by the Research Grant of Pukyong National University(2015)

전송 응용 분야에 적합하다. 특히 비컨 가용 모드 (beacon-enable mode)에서는 비컨 프레임을 이용한 슈퍼 프레임(super frame)을 구성하여 해당 네트워크의 노드간 데이터 전송을 수행하는데, 간헐적 짧은 길이의 데이터 전송에 기반 한 저 전력유지 응용에 적합한 방법이다.

나노 센서들을 목적된 신체 특정부분에 배치해 바이러스나 감염여부를 감지하는 나노 네트워크 인체 응용의 경우, 간헐적인 사건중심 및 적은 양의 데이터 전송 등이 지그비의 비컨 가용 모드에서 비컨 프레임을 활용한 슈퍼 프레임 구성 및 동작과 흡사한 형태를 보인다. 본 논문에서는 인체 응용을 위한 나노 네트워크 MAC에 활용하기 위해 지그비의 슬롯 기반 슈퍼 프레임을 응용한 개념적 설계를 달성한다. 본 연구는 처음 수행된 관계로 논문의 4장에서 제안된 슈퍼 프레임의 활용성 측면에서의 효율성 분석을 수행하였다.

본 논문의 2장에서는 인체 응용을 위한 나노 네트워크 개념과 지그비에서 사용되는 슈퍼 프레임의 동작을 분석하고, 이를 기반으로 3장에서는 나노 네트워크의 인체 응용을 위한 네트워크 모델 제시 및 해당 슈퍼 프레임 설계를 설명하며, 4장에서는 성능 분석과 그리고 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 나노 네트워크와 지그비

### 2.1 나노 네트워크

선행 연구에 따르면 그래핀 기반의 나노 패치안테나가 장착된 나노 센서들은 나노 단위 EM 통신이 가능하다[2]. 일반적으로 이러한 센서의 EM통신 전달 속도는 금속안테나에 비해 낮으나 THz 주파수 대역에서 EM 파형 방사형식으로 Gbps단위까지의 채널 용량이 가능하다[2]. 그러나 본 논문에서 제시한 인체 응용을 위해서는 그 정도의 채널 용량을 요구하지 않는다. 왜냐하면 신체의 특정 장기에 흡여져 심어진 나노 센서들의 역할은 단지 질병의 증후 혹은 바이러스 등을 포착하여 그것의 유무만 전송하면 되므로 이미 연구된 용량으로도 충분하다. 이러한 환경에서 물리계층 전달은 펨토초(femtosecond:  $10^{-15}$ 초, Thz) 펄스 기반에서 TS-OOK(Time-Spread On - Off Keying) 변조기술로 구현 가능성이 이미 연구되었다[6,7].

나노 네트워크에 대한 응용연구는 인체 내 장기의 기능 감지, 인체에 해로운 오염에 관계된 제어, 그리고 군사작전과 정밀한 기계소재 제작에 관련된 품질 제어 등의 응용에서 다양하게 진행되고 있다[8]. 특히 나노 센서와 나노-EM 송수신 기술과 결합된 나노 노드들을 활용하여 수 밀리미터 크기까지의 망들을 구성해 이러한 응용이 가능함을 보여준다[2]. 다음 Fig. 1은 이미 연구된 그래핀 기반의 나노 센서 및 패치 안테나가 융합된 나노 센서 노드의 예이다 [6].

결과적으로 본 논문에서는 인체 응용을 위한 나노 네트워크 설계에 있어, MAC에서 해당 동작과정이 지그비의 응용 동작과 유사함에 착안하여 전송속도를 Gbps로 확장하고, 지그비의 비컨 가용 모드에서의 비컨 프레임을 이용한 슈퍼 프레임 구성과정을 응용하여 새로운 형태의 슈퍼 프레임 설계가 그 목표이다.

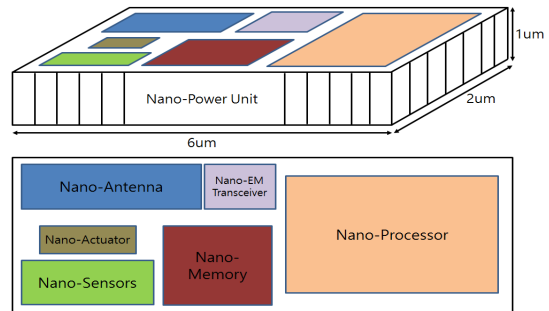


Fig. 1. Nano-sensor node.

### 2.2 지그비 MAC 프로토콜

지그비의 MAC 프로토콜은 두 가지 모드로 동작하는데, 먼저 비컨 가용 모드에서는 비컨 프레임을 이용해 슈퍼 프레임을 구성하여 해당 네트워크의 노드들이 공유채널을 경쟁하여 데이터 전송을 수행한다. 또한 슈퍼 프레임 설정과정에서 활성 구간(active period)과 비활성 구간(inactive period)을 조정함으로써 적절한 활용률(duty cycle)을 구성하여 에너지 절약이 가능하다. 이 과정에서 무선 채널 접근은 해당 슬롯별로 CSMA/CA(Slotted Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) 기능을 활용한다. 또한 시간 보장 슬롯(GTS: Guaranteed Time Slot) 사용으로 비경쟁방식의 채널접근도 가능

하다[4].

다른 한편으로 비컨 비가용 모드(non-beacon enable-mode)는 비컨을 사용하지 않고, 또한 슬롯 개념을 적용하지 않는 비동기 방식 기반의 CSMA/CA 개념으로만 단순히 채널에 접근한다. 이 방식에서는 해당 네트워크의 코디네이터(coordinator)들이 항상 깨어 수신 대기상태로 있어야하므로 비컨 가용 모드에 비해 구조는 간단하지만 에너지 낭비가 크다.

아래 Fig. 2는 비컨 가용 모드에서 사용하는 슈퍼 프레임 구조이다[4]. 슈퍼 프레임은 코디네이터가 비컨 프레임을 해당 개인 무선 통신망에 소속된 노드들에게 동시에 날려 보내면서 시작된다. 크게 활성 구간과 비활성 구간으로 나뉘며, 활성 구간은 16개의 슬롯으로 구성된 슬롯 구간(SlotD: Slot Duration)이다. 이 구간으로 세부적으로 경쟁 구간(CAP: Contention Access Period)과 비경쟁 구간(CFP: Contention-Free Period)으로 나누어지는데, 첫 번째 슬롯은 동기화 및 슈퍼 프레임의 상세 구성 내용을 전달하는데 활용된다. 경쟁 구간은 CSMA/CA 기능으로 동작하는 구간이며, 비경쟁 구간은 시간 보장 슬롯에 의한 비경쟁 방식의 채널접근 구간이다. 한편 비활성 구간은 깨어있지 않는 구간으로 두 구간(활성 구간 그리고 비활성 구간)의 비율정의로 해당 응용에 따라 더욱더 효과적인 에너지 절약이 가능하다.

Fig. 2의 슈퍼 프레임 구조에서 사용되는 용어들과 그들의 시간 구간정의는 IEEE 802.15.4 표준을 참조한다[4]. 슈퍼 프레임 구간(SD: Super frame Duration)과 비컨 간격(BI: Beacon Interval)을 정할 때 사용되는 SO(Super frame Order)와 BO(Beacon Order)는 아래와 같은 범위를 가지며 SO와 BO가 모두 15일 경우 비컨 비가용 모드로 동작한다.

$$0 \leq SO \leq BO \leq 14 \quad (1)$$

다음 식들은 지그비가 2.4GHz로 동작할 때 표준에서 정의한 세부적인 시간 구간이다.

$$\begin{aligned} SlotD &= aBaseSlotDuration \times 2^{SO} [symbols] \\ &= 60 \times 2^{SO} [symbols] = 0.96 \times 2^{SO} [ms] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} SD &= aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} [symbols] \\ &= 960 \times 2^{SO} [symbols] = 15.36 \times 2^{SO} [ms] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} BI &= aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} [symbols] \\ &= 960 \times 2^{SO} [symbols] = 15.36 \times 2^{SO} [ms] \end{aligned} \quad (4)$$

$aBaseSlotDuration$ 은 SO가 0일 때 슬롯 구간 길이 그리고  $aBaseSuperframeDuration$ 은 SO가 0일 때 슈퍼 프레임 구간의 길이를 나타낸다.

지그비 MAC 계층은 다양한 응용과 네트워크 형태를 위해 유연한 구조를 가지며 데이터 서비스와 MAC 관리 서비스를 지원한다. MAC 관리 서비스에는 결합, 분리, 비컨, PIB(PAN Information Base) 정보수신, 시간 보장 슬롯 관리, 오펜 통보, MAC 리셋, 채널 스캔, 통신상태, 슈퍼 프레임 갱신, 동기 등의 기능을 제공한다[4].

### 3. 나노 네트워크 MAC 설계

#### 3.1 나노 네트워크 응용모델

Fig. 3은 본 논문에서 제시한 인체 응용을 위한 나노 네트워크 모델이다. 응용모델의 동작과정은 다음과 같다. 먼저 특정한 인체장기에 이식된 나노 센서 노드들이 바이러스나 박테리아 행동습성이나 분자의 특정신호[9]들을 활용하여 특별한 질병징후를 발견해 MAC 프로토콜에 의해 나노 코디네이터로 해당 데이터를 전송한다. 나노 코디네이터에 모여진 정보는 나노-마이크로 인터페이스를 통해 게이트웨

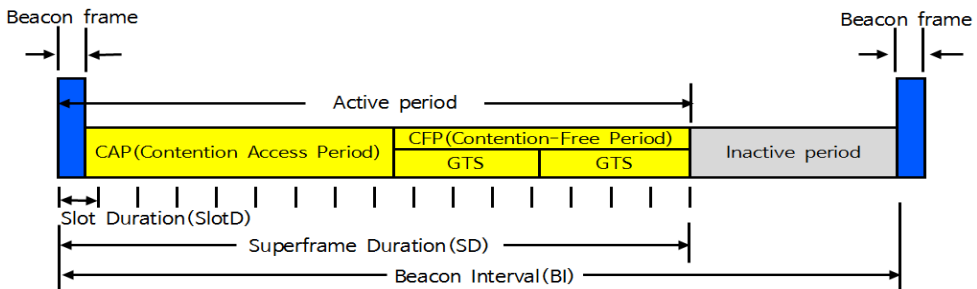


Fig. 2. super frame structure.

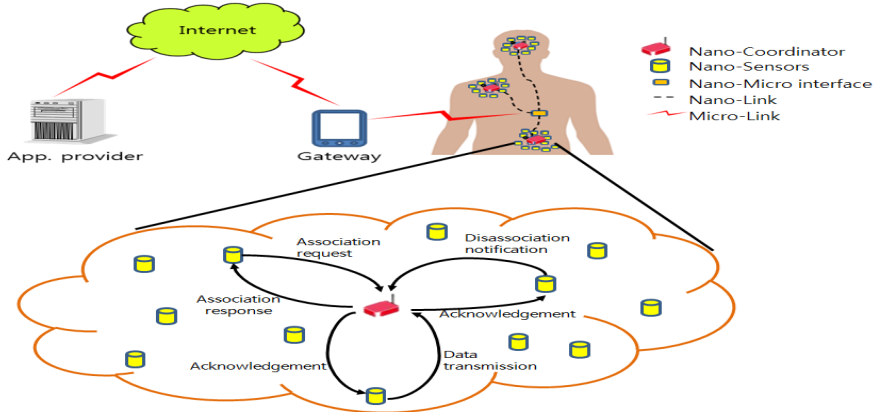


Fig. 3. Nano-network application model.

이로 전달된 후 이는 인터넷을 통해 해당 IoBNT (Internet of BioNano-Things)를 달성하게 된다[9]. 여기서 나노 센서들은 주기적으로 깨어나 활동할 필요는 없으며 간헐적으로 사건 중심으로 깨어나 그 임무를 수행하면 된다. 일반적으로 이식된 센서 노드 디바이스들은 배터리의 교체가 힘들고 또한 장기간 사용되어야 하며, 간헐적인 사건 중심 데이터 전송 등의 특징이 지그비의 비컨 가용 모드의 활용을 통한 효율적인 슈퍼 프레임 설정과 동작이 유사하다. 또한 활성 구간과 비활성 구간을 잘 조정함으로써 적절한 활용률을 적용하여 에너지 절약도 가능하다.

또한 주어진 인체 응용의 나노 네트워크에서의 MAC 프로토콜 동작은 지그비의 슈퍼 프레임 개념에 기초한 슬롯 기반 CSMA/CA 비컨 가용 모드를 적용하며, 여기서 경쟁 구간은 CSMA/CA 기능으로 동작하는 구간이며 비경쟁 구간은 본 논문에서 제시한 응용에서는 필요하지 않아 모두 경쟁 구간의 채널로 할당하여 사용한다. 한편 비활성 구간은 깨어있지 않는 구간으로 두 구간(활성 구간 그리고 비활성 구간)의 비율정의로 해당 응용에 따라 더욱더 효과적인 설계를 달성한다[8].

### 3.2 나노 네트워크 MAC 프로토콜 슈퍼 프레임 설계

#### 3.2.1 슈퍼 프레임 동작 설계

Fig. 3에서 인체 응용에 활용된 나노 네트워크의 MAC 비컨 가용 모드의 슈퍼 프레임 동작은 Fig. 4와 같다. 일반적으로 지그비의 MAC에서 사용하는 슈퍼 프레임을 위한 프로토콜 기능은 복잡한 과정으로

구성되나, 인체 응용을 위한 나노 네트워크 환경에서 적용하기 위해 기능을 간략화 하였다. 즉 나노 코디네이터와 나노 센서 노드들 간의 결합 과정으로 망을 구성하고 데이터 전송 과정 그리고 분리 과정만을 활용하여 간단한 MAC 프로토콜을 설계한다. 그 이유는 신체의 특정 장기에 나노 센서들이 이식된 경우 통신을 위해 공유된 무선 채널에서 충돌 방지와 센서들이 가진 제한된 전력의 효율적인 활용을 위해서는 간단하고 유연한 MAC 프로토콜 동작이 요구되기 때문이다.

기본적인 MAC 동작과정을 간략화한 메시지 시퀀스 차트로 표현하면 다음 Fig. 4와 같다.

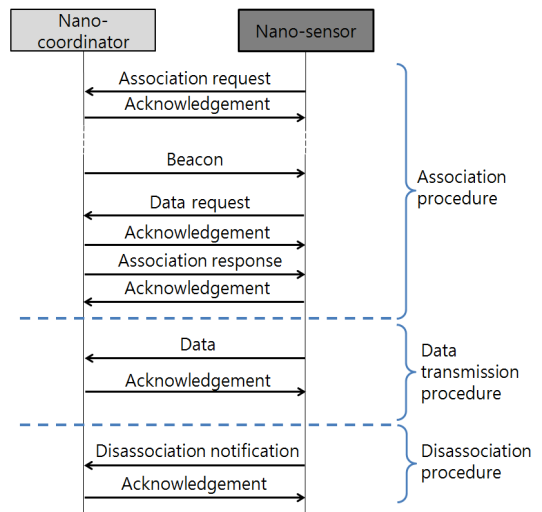


Fig. 4. MAC operation procedure.

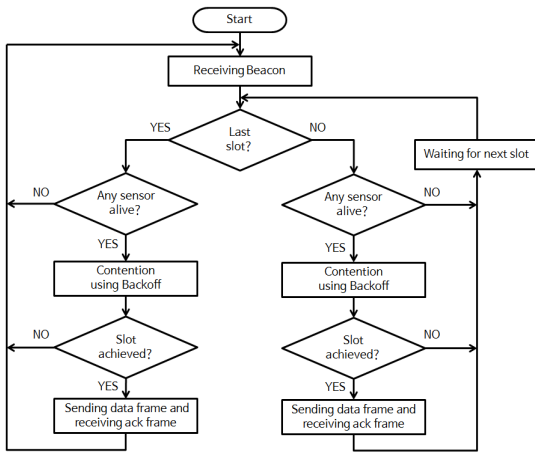


Fig. 5. Slot allocation mechanism for suggested slot-based-CSMA/CA super frame.

3.2.2 슈퍼 프레임 설계

나노 네트워크에서는 2.4THz의 주파수 대역에서 TS-OOK 변조 방식으로 2.4Gbps 속도( $2.4 \times 10^{-9}$ 초, 2.4ns)로 데이터 전송이 가능하다[2]. 본 연구에서는 이를 기반으로 지그비에서 활용한 방법으로 슈퍼 프레임 설계하기 위해 심벌 전송률을 TS-OOK 변조로 2.4Gsym/s로 한다[4].

인체 응용 질병발생 감지를 위해 본 논문에서는 나노 센서들이 사건발생 중심으로 동작하므로 슈퍼 프레임 설계 과정에서 각 슬롯의 크기를 가장 큰 크기로 전송되는 프레임을 기준으로 고정하였다. 즉 앞에서 제시한 식 (2)와 식 (3)을 적용하여 슬롯 구간과 슈퍼 프레임 구간을 정하였고 구체적으로 해당 슬롯의 소유를 위한 경쟁 과정은 다음과 같다. 먼저 슬롯 기반 CSMA/CA 방식을 활용하여 각 슬롯 사용

에 관계된 충돌을 피하기 위해 경쟁중인 나노 센서들은 각자에게 주어진 백오프 기간(backoff period)을 기다린다. 그 기간 동안 해당 슬롯에 대한 사용 요구가 없으면, 제일 먼저 백오프 기간이 지난 나노 센서가 슬롯을 소유하여 데이터 전송을 시작하고 이에 대한 응답 프레임 수신한다. 그 동안에 백오프 기간이 종료된 나노 센서들은 다음 슬롯에서 위의 과정을 되풀이하여 슬롯 소유 경쟁이 다시 시작된다. 단 마지막 슬롯에서 경쟁에 밀려난 나노 센서들은 다음 슈퍼 프레임까지 기다리며 새로운 경쟁을 시작한다. 다음 Fig. 5는 위에 설명한 내용을 도식화한 그림이다.

Fig. 6에서 슈퍼 프레임의 슬롯 구간은 1.15us를 적용하였는데(이때 SO=3으로 적용) 이는 전송과정 중 길이가 가장 긴 결합과정의 데이터 요청에 근거하여 설계하였다. 즉 지그비 표준에 따라 “백오프 기간 + 데이터 요청 프레임 + 응답 시간(Ack time) + 응답 프레임 + 프레임 간격(IFS: Inter-Frame Space)”에 해당하는 “{(20심벌×3회 + (32심벌×8) + 32심벌 + (11심벌×8) + 40심벌)”에 2.4ns(단위 심벌시간)를 곱한 1.14us보다 크지만 가장 근접한 단위시간으로 정하였다.

아래 Fig. 6에 설계된 슈퍼 프레임에서 기존에 있던 비경쟁 구간은 본 연구의 응용 특성상 필요하지 않아 제거(비컨 프레임에서 시간 보장 슬롯 관리 부분 기능도 없앴)하고 16비트 주소방식을 적용하였다.

4. 성능 분석

제시한 인체 응용 나노 네트워크에서 설계된 슈퍼 프레임의 효율성 분석을 3가지로 수행하였다. 먼저

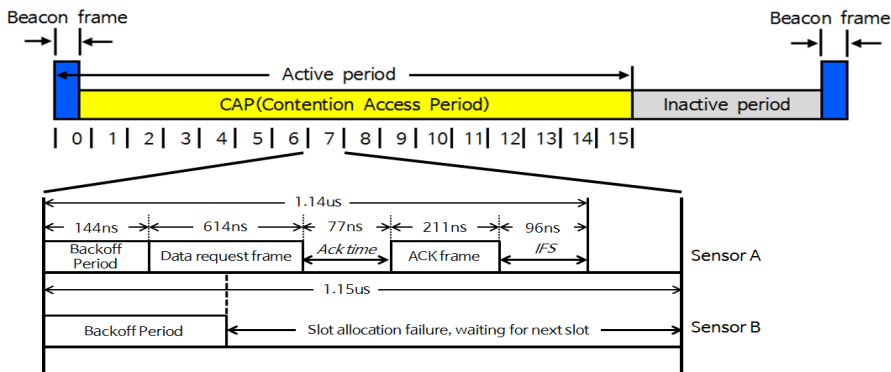


Fig. 6. Super frame design.

슈퍼 프레임내의 슬롯 활용률 분석을 위해 Fig. 2에서 비컨 간격 대비 슈퍼 프레임 구간(즉 슬롯활용구간)의 비율을 식 (5)와 같이 정의하고 슈퍼 프레임 활용률로 명명하였다. 이는 지그비 표준에 따라 BO와 SO에 의해 결정된다[4].

$$Duty\ cycle = \frac{SD}{BI} = 2^{BO-SO}(\%) \quad (5)$$

Fig. 7은 식 (5)로부터 도출되었다. 여기서 BO와 SO간의 수치 적용으로 분석해보면, BO와 SO값의 차이의 값이 크게 되면 상대적으로 비활성 구간이 길어져 슈퍼 프레임의 활용률을 1%이하로 적용하여 효과적인 에너지 절약 달성이 가능하다. 하지만 슈퍼 프레임간의 활성화된 시간 간격이 벌어져 여러 개의 사건이 동시 발생하여 경쟁상태가 되면 전송지연이 발생하게 된다. 그러나 본 논문에서 적용하는 인체 응용에는 많은 수의 센서노드들이 실시간적으로 동시에 전송요구를 하지 않는 환경으로 응용에 가장 적합한 SO와 BO 설정이 필요하다.

둘째로 슬롯 할당이 요구될 경우 시간 보장 슬롯

의 사용유무에 따른 대상 나노 센서 당 슬롯할당가능성에 대한 비율이다. 일반적으로 지그비 표준에서는 시간 보장 슬롯은 최대 7개까지 가능한데, 아래 Fig. 8은 시간 보장 슬롯을 사용했을 때와 그렇지 않았을 때의 슬롯 할당 가능성을 나타낸 그래프로 시간 보장 슬롯의 수가 증가함에 따라 해당 수치가 낮아진다. 그러므로 본 논문과 같이 사건발생 중심적 동작으로 인체 응용 질병발생 감지를 위한 인체 응용에서는 시간 보장 슬롯 기능을 없애 경쟁에 소모되는 시간과 에너지를 절약할 가능하게 한다.

마지막으로 공유 채널 획득을 위한 경쟁에 있어 효율적 활용도에 대한 평가를 위해, 일반적인 할당방식인 라운드 로빈(round robin)방법과 본 논문에서 제시한 슬롯 기반 CSMA/CA 방식을 비교 분석한다. 일반적으로 슬롯 경쟁 과정에서 충돌을 피하기 위해 라운드 로빈 방식은 경쟁 없이 정해진 순서에 따라 채널을 할당하므로 충돌이 없어 전송 지연에 의한 에너지 손실이 없다. 하지만 보낼 데이터가 있음에도 불구하고 슬롯을 할당받지 못하면 요구될 때 적합한

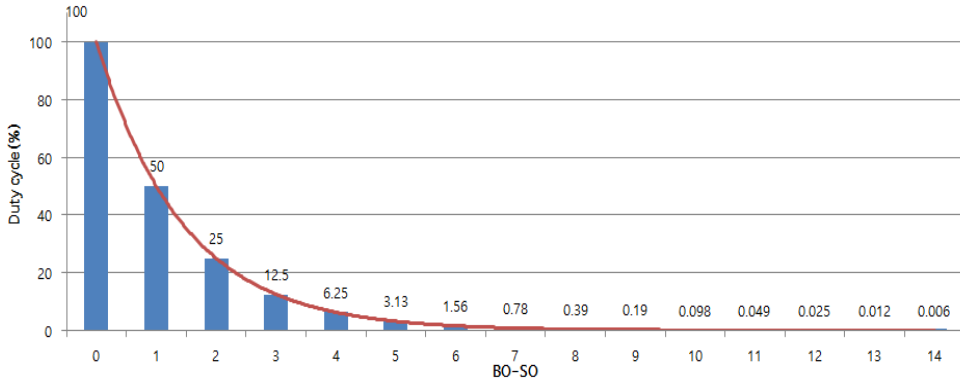


Fig. 7. Super frame duty cycle.

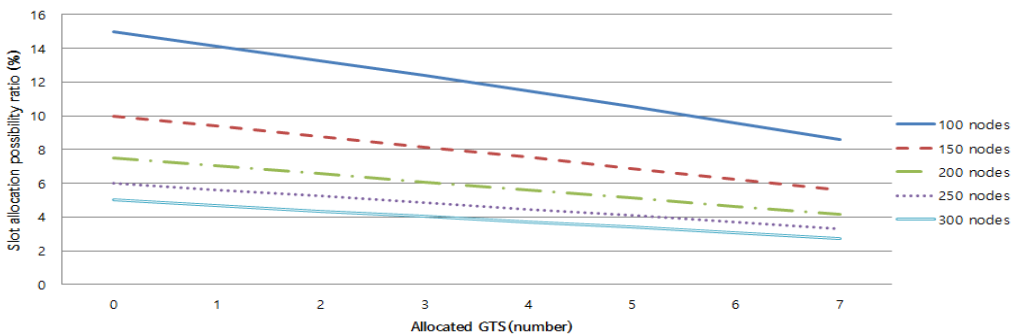


Fig. 8. Slot allocation possibility ratio related to GTS slot numbers.

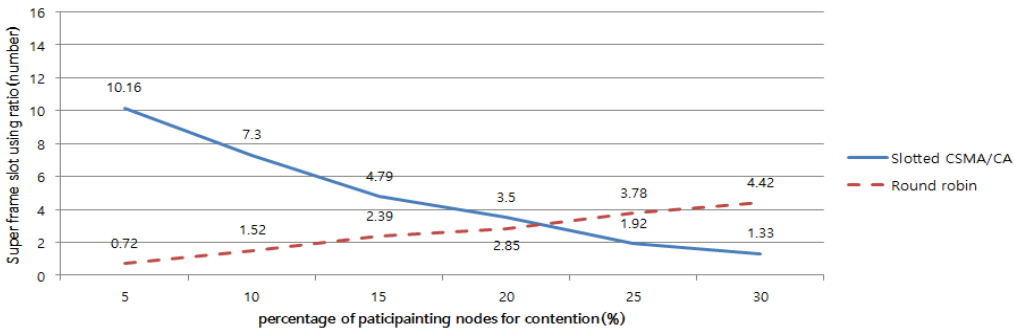


Fig. 9. Super frame slot using ratio in slotted-CSMA/CA and round robin.

시간에 데이터 전송이 어렵다. 또한 토폴로지 변화에 따른 오버헤드도 문제이다.

Fig. 9는 100개 노드로 구성된 나노 네트워크(어느 주어진 순간 센서들 중 평균적으로 5%에서 30%까지 점차적으로 슬롯할당을 요구하는 환경에서 100회 시행)에서 위에 설명한 두 방식별로 슈퍼 프레임 당 유효 슬롯할당 개수이다. 결론적으로 20% 미만의 나노 센서들이 슬롯 할당 요구를 간헐적으로 할 경우 슬롯 기반 CSMA/CA 방식이 훨씬 유리함을 볼 수 있다. 즉 인체 응용에 적용되는 바이러스 탐지 같은 경우는 사건 발생 중심적 탐지 시에만 간헐적인 데이터 전송 요구를 기반으로 하므로 라운드 로빈 방식은 효율이 떨어지고 오히려 원활한 실시간 응용에 문제가 있음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

나노 센서들을 목적된 신체 특정부분에 배치해 바이러스나 감염여부를 감지하는 나노 네트워크 인체 응용의 경우, 간헐적인 사건중심 및 적은 양의 데이터 전송 등이 지그비의 비컨 가용 모드에서 비컨 프레임을 활용한 슈퍼 프레임 구성 및 동작과 흡사한 형태를 보인다. 그럼에도 불구하고 신체의 특정 장기에 나노 센서들이 이식된 경우 통신을 위해 공유된 무선 채널에서 충돌 방지와 센서들이 가진 제한된 전력의 효율적인 활용을 위해서는 간단하고 유연한 MAC 프로토콜 동작이 요구되므로, 본 논문에서는 인체 응용을 위한 나노 네트워크 MAC에 활용하기 위해 지그비의 슬롯 기반 슈퍼 프레임을 응용한 개념적인 설계를 달성하였다. 성능 분석을 위한 시뮬레이션에서 슈퍼 프레임 활용률 측면과 시간 보장 슬롯 할당 수에 따른 노드개수 별 슬롯 할당 가능성 비율

및 슈퍼 프레임 당 유효 슬롯 할당 개수 등에서 제안된 방식이 좋은 결과를 보인다. 향후 실질적인 환경에서의 나노 센서 노드 및 해당 나노 센서 네트워크의 구성과 이에 대한 응용 구현 연구가 필요하다.

### REFERENCE

- [ 1 ] S. Balasubramaniam and J. Kangasharju, "Realizing the Internet of Nano Things: Challenges, Solutions, and Applications," *Computer*, Vol. 46, No. 2, pp. 62-68, 2013.
- [ 2 ] I.F. Akyildiz and J.M. Jornet, "Electromagnetic Wireless Nanosensor Networks," *Nano Communication Networks*, Vol. 1, Issue 1, pp. 3-19, 2010.
- [ 3 ] F. Dressler and S. Fischer, "Connecting In-body Nano Communication with Body Area Networks: Challenges and Opportunities of the Internet of Nano Things," *Nano Communication Networks*, Vol. 6, Issue 2, pp. 29-38, 2015.
- [ 4 ] The Open, Global Standard for the Internet of Things(ZigBee 3.0, 2014). <http://www.zigbee.org/zigbee-fordevelopers/zigbee3-0/> (accessed May, 23, 2016)
- [ 5 ] T.P. Ngoc, Q. Victoria and W.J. Hwang, "Compact Software Design and Implementation of IEEE802.15.4 and ZigBee," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 11, No. 6, pp. 835-844, 2008.
- [ 6 ] P. Wang, J.M. Jornet, M.G.A. Malik, N. Akkari, and I.F. Akyildiz, "Energy and Spectrum-

aware MAC Protocol for Perpetual Wireless Nanosensor Networks in the Terahertz Band," *Ad Hoc Networks*, No. 11, pp. 2541-2555, 2013.

- [7] J.M. Jornet and I.F. Akyildiz, "Information Capacity of Pulse-based Wireless Nanosensor Networks," *Proceedings of the 8th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, pp. 80-88, 2011.
- [8] S.J. Lee, C. Jung, K. Choi, and S. Kim, "Design of Wireless Nanosensor Networks for Intra-body Application," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 2015, pp. 1-12, 2015.
- [9] I.F. Akyildiz, S. Balasubramaniam, and M. Pierobon, "The Internet of Bio-Nanthings," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 53, Issue 3, pp. 32-40, 2015.



이 경 환

2009년~현재 부경대학교 정보통신공학과  
 관심분야: 무선네트워크 보안기술, PAN, 센서네트워크, 센서 노드 이동성 지원 기술, USN, DWDM, RWA 알고리즘



김 성 운

1982년~1985년 한국전자정보통신연구소 연구원  
 1985년~1995년 한국통신연구개발원 선임연구원 실장  
 1989년~1993년 프랑스 파리 7대학 석·박사

1995년~현재 부경대학교 정보통신공학과 교수  
 관심분야: 무선네트워크 보안기술, 열차제어신호 전송 기술, 센서네트워크, 수중 센서네트워크, 센서 노드 이동성 지원 기술, USN, DWDM, RWA 알고리즘