

# IEEE 802.15.4에서 대역폭 사용 효율 향상을 위한 적응적 GTS 할당 기법

박희동<sup>†</sup>, 김도현<sup>\*\*</sup>, 박 현<sup>\*\*\*</sup>

## 요 약

저속 WPAN을 위한 국제 표준인 IEEE 802.15.4의 슈퍼프레임 구조는 경쟁 기반의 액세스 구간인 CAP (Contention access period)와 QoS를 지원하기 위해 경쟁 없이 일정 대역폭을 할당하는 CFP (Contention free period) 구간으로 나누어진다. 그 중 CFP를 구성하는 GTS (Guaranteed time slot)는 최대 7개까지만 할당할 수 있어 QoS를 지원할 수 있는 장치의 개수도 제한될 수밖에 없다. 또한 슬롯 단위로 대역폭을 할당하므로, BO (Beacon order) 또는 SO (Superframe order) 값이 증가하여 각 타임 슬롯의 크기가 커질 경우 정밀한 대역폭 할당이 어려워지므로 대역폭 사용 효율이 떨어지는 문제점이 발생한다. 본 논문에서 제안한 방안은 BO 또는 SO 값이 증가할수록 CFP 구간의 타임 슬롯 크기를 줄임으로써 CFP 구간에서의 대역폭 낭비를 최소화하고, 기존 프로토콜을 수정하여 최대 127개의 GTS 할당이 가능하도록 하였다. 성능분석 결과 제안 방안이 기존 IEEE 802.15.4 표준 규격에 비해 CFP 구간에서의 대역폭 사용 효율을 크게 증가시킬 수 있었다.

## An Adaptive GTS Allocation Scheme to Increase Bandwidth Utilization in IEEE 802.15.4

Hee-Dong Park<sup>†</sup>, Do-Hyeon Kim<sup>\*\*</sup>, Hyeon Park<sup>\*\*\*</sup>

## ABSTRACT

The superframe structure of IEEE 802.15.4, an international standard for low rate WPAN, is composed of CAP (Contention access period) and CFP (Contention free period). CAP is the contention-based access period, while CFP is contention-free access period for supporting QoS by allocating fixed bandwidth. The standard can support QoS for only a few devices, because the maximum number of GTSs is 7. Furthermore, as the value of BO (Beacon order) or SO (Superframe order) increases, the size of a time slot increases. This makes it difficult to precisely allocate bandwidth for any device, because the bandwidth is allocated by the unit of GTS. The proposed scheme of this paper can reduce the waste of BW in CFP by adaptively reducing the size of a time slot in CFP as the value of BO or SO increases and increase the number of GTSs to 127 by modifying the standard. The performance analysis shows that the proposed scheme can dramatically increase the bandwidth utilization during the CFP when comparing with IEEE 802.15.4.

**Key words:** Superframe(슈퍼프레임), IEEE 802.15.4, CFP, GTS, Bandwidth Utilization(대역폭 사용 효율)

※ 교신저자(Corresponding Author): 김도현, 주소: 제주도 제주시 아라1동 1번지(690-756), 전화: 064)754-3658, FAX: 064)755-3620, E-mail: kimdh@cheju.ac.kr  
접수일: 2010년 4월 9일, 수정일: 2010년 10월 4일  
완료일: 2010년 12월 6일

<sup>†</sup> 정회원, 나사렛대학교 정보통신학과  
(E-mail: hdpark@kornu.ac.kr)

<sup>\*\*</sup> 종신회원, 제주대학교 통신컴퓨터공학부

<sup>\*\*\*</sup> 정회원, 한국전자통신연구원  
(E-mail: hpark@etri.re.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업 [10033915, 대규모 다중 센서 기반 지능형 무인 감시를 위한 적응적 융합처리 기술] 및 2010년도 나사렛대학교 학술연구비 지원사업의 일환으로 수행하였음.

### 1. 서 론

최근 무선 센서 네트워크 및 다양한 지그비(Zigbee) 응용 기술이 강조되면서, 저속·저비용 통신을 위한 LR-WPAN(Low-Rate WPAN) 표준 기술인 IEEE 802.15.4의 중요성이 커지고 있다[1-3]. IEEE 802.15.4 표준에서는 PHY 및 MAC 계층에 대하여 정의하고 있으며, 2.4 GHz ISM 및 868/915 MHz 듀얼 대역을 이용하여 전송속도 20~250kbps를 지원한다[4].

IEEE 802.15.4 MAC 계층에서는 선택적으로 슈퍼프레임(Superframe) 구조를 사용하여 채널 액세스를 제어할 수 있는데, 슈퍼프레임의 구조와 크기는 네트워크 코디네이터(Coordinator)가 전송하는 비컨(Beacon)에 의해 결정되며 데이터를 전송할 수 있는 활성(Active) 구간과 전력 소비를 줄이기 위한 비활성(Inactive) 구간으로 나눌 수 있다. 활성 구간은 총 16개의 타임 슬롯으로 이루어지며, Slotted CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance)로 동작하는 경쟁 기반의 CAP (Collision Avoidance Period) 구간과 경쟁 없이 QoS를 지원하기 위한 CFP (Collision Free Period) 구간으로 나뉘어진다. 특히, CFP 구간은 실시간 통신이나 특정 대역폭을 요구하는 장치를 위해 할당되는 GTS (Guaranteed Time Slot)로 구성되는데, 최대 7개의 GTS를 가질 수 있다[1]. 따라서 IEEE 802.15.4 표준 슈퍼프레임 구조에서 QoS를 지원할 수 있는 장치의 수는 불과 몇 개 이내로 제한될 수밖에 없다. 또한, 슬롯 단위로 대역폭을 할당하므로 BO(Beacon Order) 또는 SO(Superframe Order) 값이 커져 각

슬롯이 차지하는 대역폭이 커질수록 정밀한 대역폭 할당이 어려워져 대역폭 사용 효율이 떨어지는 문제점이 발생할 수 있다[5,6].

따라서, 본 논문에서는 IEEE 802.15.4의 표준 슈퍼프레임 구조를 수정하여 BO 또는 SO 값이 커질수록 CFP 구간의 슬롯 크기를 표준에 비해 작게 설정함으로써 보다 정밀한 대역폭 할당이 가능한 방안을 제안한다. 또한, 표준 MAC 프레임 형식을 수정하여 최대 127개의 GTS를 할당할 수 있도록 새로운 MAC 프레임 설계를 하였다.

본 논문의 구성은 서론에 이어, II장에서 IEEE 802.15.4 표준 슈퍼프레임 구조를 설명하고, III장에서 제안된 GTS 할당 기법 및 슈퍼프레임 구조를 설명한 후, IV장에서 제안 방안의 성능을 분석하고 평가한다. 그리고 마지막 V장에서 결론을 맺는다.

### 2. IEEE 802.15.4 슈퍼프레임 구조

먼저 IEEE 802.15.4 매체접근제어와 슈퍼프레임에 대해 살펴보고자 한다. IEEE 802.15.4 표준 매체접근제어 프로토콜은 비컨 사용모드 및 비컨 해제모드 두 가지 형태로 사용될 수 있다. 특히, 비컨 사용모드의 경우 슈퍼프레임 구조를 사용하여 노드들의 채널 액세스를 제어한다. 옵션 슈퍼프레임 구조는 비컨, 경쟁 구간(CAP), 비경쟁 구간(CFP), 비활성화 구간(inactive portion)으로 구분된다. 그림 1은 옵션 슈퍼프레임 구조를 보여준다.

한 슈퍼프레임은 BO 값과 SO 값에 의해 각각 SD (Superframe Duration) 구간과 BI (Beacon Interval) 구간으로 나누어진다. SD 구간, 즉 활성 (Active) 구

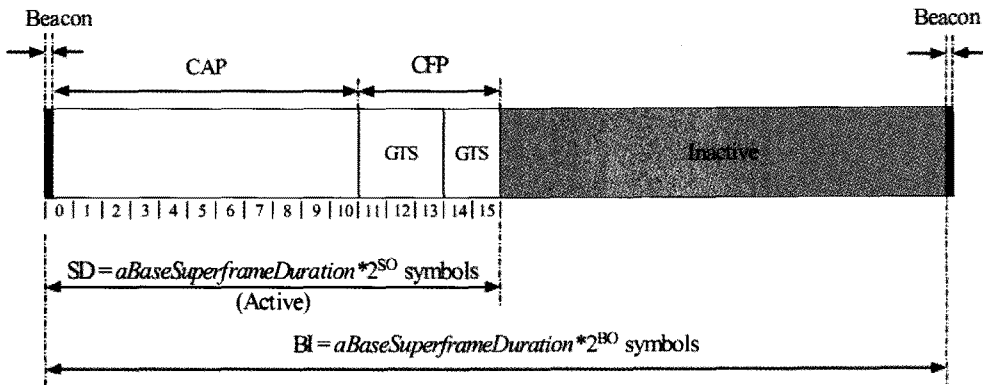


그림 1. IEEE 802.15.4 슈퍼프레임 구조

간은 BI 값과 상관없이 항상 16개의 슬롯으로 나누어지며, 이 구간은 다시 CAP와 CFP 구간으로 나뉘어진다. CAP와 CFP의 경계 및 CFP에서의 GTS 할당 정보는 각 비컨마다 업데이트 되어서 브로드캐스트되며, CFP 구간은 최대 7개의 GTS를 할당할 수 있으며 각 GTS는 하나 이상의 슬롯으로 구성된다.

위 그림에서 SD는 활성 구간의 심볼 수를, BI는 활성 및 비활성 구간을 더한 전체 심볼 수를 각각 나타낸다. 한 슬롯의 길이인 SlotD (Slot Duration)는 (식 1)에서와 같이 나타낼 수 있다. 여기에서  $aBaseSlotDuration$ 은 SO 값이 0일 때 한 슬롯을 구성하는 심볼 수로서 IEEE 802.15.4 표준에서는 그 값을 60으로 정하고 있다.

그리고  $aBaseSuperframeDuration$ 은 SO 값이 0일 때의 SD값을 의미하는데 (식 2)와 같이 나타낼 수 있다. 표준에서  $aNumSuperFrameSlots$ 는 16으로 정해져 있다.

$$SlotD = aBaseSlotDuration \times 2^{SO} \text{ [symbols]} \quad (\text{식 1})$$

$$aBaseSuperframeDuration = aBaseSlotDuration \times aNumSuperframeSlots \times 2^{SO} \text{ [symbols]} \quad (\text{식 2})$$

센서 네트워크에서 발생하는 트래픽은 크게 주기적 트래픽과 비주기적 트래픽으로 나눌 수 있다. 주기적 트래픽은 매 주기마다 데이터를 샘플링하고 이를 송신하는 센서로부터 발생한다. 비주기적 트래픽에는 제어 메시지 교환 또는 필요할 때 발생하는 이벤트 기반 메시지들이 포함된다. 일반적으로 비주기적 트래픽은 발생량이 예측되지 않으므로 예약된 대

역폭을 요구하지 않는다. 이러한 비주기적 제어 명령어의 전달에는 IEEE 802.15.4 슈퍼프레임 구조에서 경쟁기반 액세스인 CAP가 사용될 수 있다. 반면에 적은 지연시간을 요구하는 응용이나 특수한 대역폭을 요청하는 응용에 대해서는 코디네이터가 활성 슈퍼프레임 내에서 GTS를 할당하여 QoS를 지원할 수 있다. 그러나, IEEE 802.15.4에서 정의하고 있는 GTS는 한 슈퍼프레임 내에 최대 7개까지만 사용될 수 있으므로 확장성이 떨어진다. 따라서 센서 네트워크 내에서 다양한 QoS를 요구하는 다수의 노드들을 지원하기 위해서는 GTS의 수를 확장하는 것이 필수적이다.

또한, IEEE 802.15.4의 슈퍼프레임 구조는 BO 및 SO 값을 사용하여 BI 및 SD 구간의 길이를 결정하는데, SD 구간은 BO 및 SO 값과 상관없이 항상 16개의 동일한 타임 슬롯으로 나뉘게 된다. 따라서 SO 값이 증가할수록 슬롯 당 제공할 수 있는 대역폭도 지수적으로 증가하게 된다. 이는 슬롯 단위로 대역폭을 할당하는 IEEE 802.15.4 표준 슈퍼프레임 구조에서, SO 값이 클 경우 GTS에 의한 정밀한 대역폭 할당이 어려워짐을 의미한다. 즉, SO 값이 커질수록 특정 노드가 요구하는 대역폭 이상으로 자원을 할당할 가능성이 높아져서 대역폭의 낭비가 증가될 수 있다.

그림 2는 IEEE 802.15.4의 OQPSK 250kbps 시스템에서 SO 값이 7일 경우, 각각 2000 바이트 (4000 심볼) 및 4000 바이트 (8000 심볼)의 데이터를 주기적으로 전송하는 두 노드 A 및 B에게 각각 GTS1

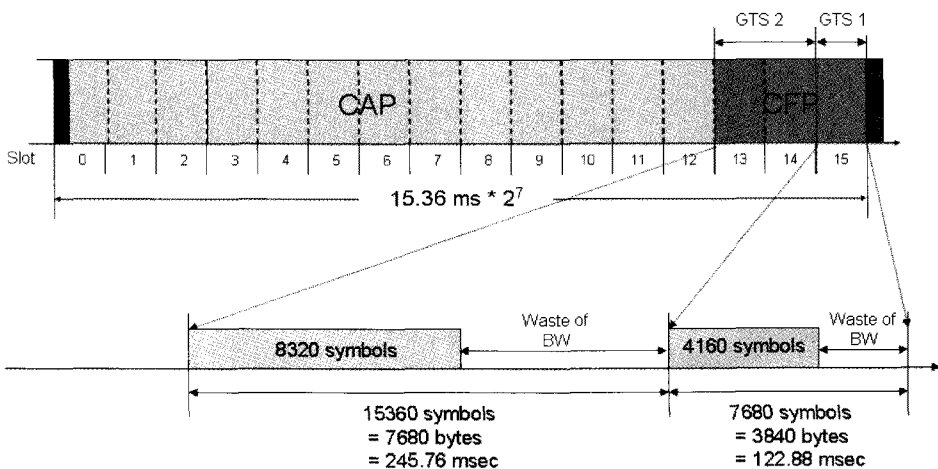


그림 2. IEEE 802.15.4에서 GTS 할당의 예

및 GTS2를 할당한 예이다. 물리계층에서 전송 가능한 최대 심볼 수 (*phyMaxFrameDuration*)는 1064이므로 노드 A의 데이터는 4개의 LIFS (Long Inter-frame Spacing)에 의해 4개의 프레임으로 분리된다. LIFS 구간의 최소 심볼 수 (*macMinLIFSPeriod*) 값 40을 고려할 경우 노드 A가 차지하는 총 심볼 수는 4160이 된다. 단, 여기에서 확인응답 (Acknowledgment)은 사용하지 않는 것으로 가정하였다. 이와 마찬가지로 노드 B는 8개의 LIFS가 필요하므로 총 8320개의 심볼을 차지한다.

(식 1)에 의해 슈퍼프레임 한 개의 슬롯 동안 7680개의 심볼을 전송할 수 있는데, 이는 OQPSK 250 kbps 시스템에서 122.88 msec 동안 3840 바이트의 데이터를 전송할 수 있음을 의미한다. 따라서 노드로부터 GTS 할당 요청을 받은 PAN 코디네이터는 GTS1에는 한 개의 슬롯을, GTS2에는 두 개의 슬롯을 각각 할당하게 된다. 그러나 이로 인해 GTS1에서는 3520개의 심볼 수만큼, GTS2에는 7040개의 심볼에 해당하는 대역폭 손실이 발생함을 알 수 있다. 이러한 대역폭 낭비는 SO 값이 클수록 더욱 증가하게 된다. 이론적으로 하나의 GTS 슬롯에서 낭비될 수 있는 자원은 0에서  $SlotD-1$  사이의 심볼 개수만큼 될 수 있다. 따라서 GTS를 구성하는 심볼의  $SlotD$  값이 클수록 대역폭 낭비가 증가될 수 있다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 현재의 IEEE 802.15.4 슈퍼프레임 구조는 QoS를 보장하기 위해 할당할 수 있는 GTS의 개수가 7개로 제한되어 있을 뿐만 아니라, SO 값이 증가하면  $SlotD$  값도 지수적으로 증가하여 노드의 요구 이상으로 자원을 예약하게 될 확률이 높아짐으로써 대역폭의 낭비가 발생하는 문제점을 가지고 있다.

### 3. 제안된 GTS 할당 기법 및 슈퍼프레임 구조

#### 3.1 제안된 GTS 할당 방안

센서 네트워크 내에서 QoS를 지원하기 위한 GTS

의 수를 늘리고, SO 값이 증가하더라도 정밀한 자원 예약을 통해 대역폭의 낭비를 최소화할 수 있도록 새로운 슈퍼프레임 설계 방안을 제안한다. 제안된 방안은 SO 값에 따라 CFP 구간에서의  $SlotD$  값을 줄임으로써 적응적으로 대역폭을 할당할 수 있도록 설계되었다.

제안 방안은 표 1에서와 같이 SO 값을 5개 범위로 나누어 해당 범위에 따라 CFP 내의  $SlotD$  값을 변화시킨다. 만약 SO 값이 0~2 사이의 값일 경우에는 기존 IEEE 802.15.4와 동일하게 동작한다. 그러나 SO 값이 3 이상일 경우에는 SO 값의 증가에 따라 CFP 내의  $SlotD$  값을 줄임으로써, CFP 내의 슬롯 수 및 GTS 개수를 확대할 수 있으며 좀 더 정밀한 대역폭 할당이 가능하다. 표 1에서 *FinalCAPSlot*는 CAP 구간의 마지막 슬롯번호를 나타낸다.

제안 방안에서  $SlotD$  값의 감소에 따른 슬롯 수의 증가는 CFP 구간에만 한정하며 CAP 구간의  $SlotD$ 는 변화시키지 않는다. 물론, 필요에 따라 CAP 구간의  $SlotD$  값도 동일한 방법으로 줄일 수 있다. 그리고 CFP 구간의 시작 슬롯 번호는 0부터 새로 시작한다. 그림 3은 제안 방안에서 SO 값이 4일 경우 CFP 구간의 슬롯 수 변화와 슬롯 번호를 나타낸 것이다. IEEE 802.15.4 표준 기술에 의하면 11번에서부터 15번까지 5개의 슬롯에 해당하는 CFP 구간을, 제안방안에서는 SO 값이 4이므로  $SlotD$ 를 1/2로 줄임으로써 0부터 9번까지 총 10개의 슬롯으로 나눌 수 있다. CFP의 시작 슬롯 번호가 0부터 시작하더라도 PAN 코디네

표 1. 제안 방안에서  $SlotD$  및 슬롯 수의 변화

구 분	SO 값	$SlotD_{CFP} / SlotD_{CAP}$	CFP 내의 최대 가능 슬롯 수
범위 1	0~2	1	15-FinalCAPSlot
범위 2	3~5	1/2	2×(15-FinalCAPSlot)
범위 3	6~8	1/4	4×(15-FinalCAPSlot)
범위 4	9~11	1/8	8×(15-FinalCAPSlot)
범위 5	12~14	1/16	16×(15-FinalCAPSlot)

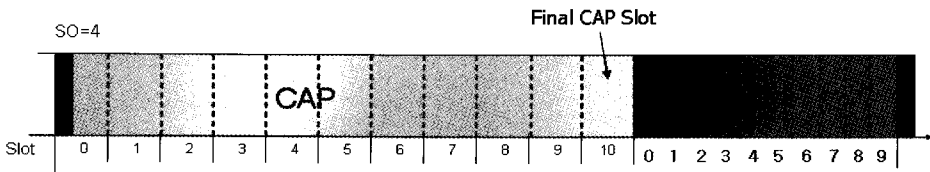


그림 3. 제안 방안에서 CFP 구간의 슬롯 번호 (SO=4)

IEEE 802.15.4	Bits: 0-3	4-7	8-11	12	13	14	15
	Beacon Order	Superframe Order	Final CAP Slot	Battery Life Extension (BLE)	Reserved	PAN Coordinator	Association Permit

↓

Proposed	Bits: 0-3	4-7	8-11	12	13	14	15
	Beacon Order	Superframe Order	Final CAP Slot	Battery Life Extension (BLE)	<b>CFP extension</b>	PAN Coordinator	Association Permit

그림 4. 슈퍼프레임 명세 필드 수정

이터와 노드는 비컨 프레임의 마지막 CAP 슬롯 (Final CAP Slot) 필드 정보를 이용하여 CFP 내의 각 슬롯의 위치를 알 수 있다.

CFP 구간의 슬롯 수가 2배로 늘어남에 따라 좀 더 많은 수의 GTS 할당이 가능하며, 동시에 SlotD 값이 1/2로 작아지므로 슬롯에서의 대역폭 낭비도 평균 1/2로 줄일 수 있다. 절약되는 자원은 CAP 구간으로 활용할 수 있으며, 만약 절약되는 심볼 수가 SlotD\_CAP의 정수배 이상이라면 그 만큼 Final-CAPSlot 값이 커지게 된다.

### 3.2 제안된 MAC 프레임 형식

제안 방안이 동작하기 위해서는 기존 IEEE 802.15.4의 비컨 프레임과 MAC 명령 프레임(MAC command frame) 중 GTS 요청 명령(GTS request command) 프레임의 일부 필드를 수정할 필요가 있다. 먼저 비컨 프레임의 필드 중 수정이 필요한 필드는 슈퍼프레임 명세 필드(Superframe Specification field), GTS 명세 필드(GTS Specification field), GTS 방향 필드(GTS Direction field), 및 GTS 목록 필드(GTS List field)이다.

첫째, 기존 IEEE 802.15.4 표준과의 호환을 위해, 그림 4에서와 같이 기존 슈퍼프레임 명세 필드의 13번 예약(Reserved) 부필드를 ‘CFP 확장(CFP Extension)’ 부필드로 변경한다. ‘CFP 확장’ 비트가 1이면 제안 방안대로 동작하고, 0이면 기존 기술대로 동작한다.

둘째, 그림 5에서와 같이 GTS 명세 필드의 예약 (Reserved) 부필드를 없애고, 그 길이만큼 GTS 디스크립터 카운트 (GTS Descriptor Count) 부필드 길이를 확장함으로써 최대 127개의 GTS 할당이 가능하도록 하였다.

셋째, GTS의 개수가 최대 127개까지 가능하므로

그에 따라 GTS 방향 필드의 GTS 방향 마스크 부필드도 최대 127 비트까지 확장될 수 있어야 한다. 그림 6에서와 같이 기본 1 바이트(8 비트)의 GTS 방향 필드는 GTS 명세 필드의 GTS 디스크립터 카운트 정보에 따라 최대 16 바이트 (128 비트)까지 바이트 단위로 확장 가능하도록 설계하였다.

마지막으로, 제안 방안에서 CFP 구간의 슬롯 수는 최대 127개까지 확장 가능하므로 GTS 목록 필드의 GTS 시작 슬롯(GTS Starting Slot)과 GTS 길이 (GTS length) 값 역시 127 이상 표현할 수 있도록 해당비트 수를 각각 8 비트로 확장하였다. 그림 7은 수정된 GTS 목록 필드를 보여 준다.

앞서 설명한 바와 같이 비컨 프레임의 수정과 아울러 MAC 명령어 프레임 중 GTS 요청 명령 프레임의 일부 필드도 수정할 필요가 있다. 그림 8에서와 같이 GTS 특성 필드(GTS Characteristics field)의

IEEE 802.15.4	Bits: 0-2	3-6	7
	GTS Descriptor Count	Reserved	GTS Permit

↓

Proposed	Bits: 0-6	7
	GTS Descriptor Count	GTS Permit

그림 5. GTS 명세 필드 수정

IEEE 802.15.4	Bits: 0-6	7
	GTS Directions Mask	Reserved

↓

Proposed	Bits: 0-6/14/.../126	7/15/.../127
	GTS Directions Mask	Reserved

그림 6. GTS 방향 필드 수정

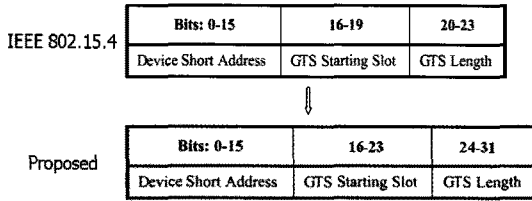


그림 7. GTS 목록 필드 수정

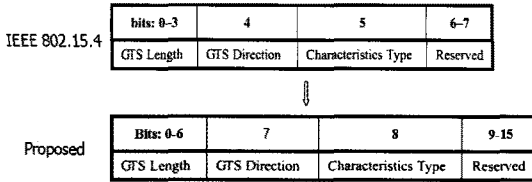


그림 8. GTS 요청 명령 프레임의 GTS 특성 필드 수정

GTS 길이 부필드를 256까지 나타낼 수 있도록 8 비트로 확장해야 한다.

지금까지 살펴 본 바와 같이, 제안 방안을 위해서는 표준 MAC 프레임 형식의 수정이 필요하며 일부 필드의 길이를 확장할 필요가 있으나, 전체 프레임 길이에 비해 추가되는 헤더의 길이는 그리 크지 않다.

표 2. IEEE 802.15.4 및 제안 방안의 GTS 할당 비교 (예)

구 분	GTS1			GTS2		
	요구자원 (심볼)	할당자원 (심볼)	낭비자원 (심볼)	요구자원 (심볼)	할당자원 (심볼)	낭비자원 (심볼)
IEEE 802.15.4	4,160	7,680	3,520	8,320	15,360	7,040
제안 방안	4,160	5,760	1,600	8,320	9,600	1,280

표 3. 성능 분석 파라미터 표기

Notations	Descriptions
$t_i$	Time for device $n_i$ to transmit data in its GTS
$r_i$	Average data generation rate at device $n_i$
$BI$	Time duration of a beacon interval
$C$	Data rate of a PAN
$N_i$	Number of standard time slots in each GTS of IEEE 802.15.4
$N'_i$	Number of new time slots in each GTS of the proposed scheme
$N$	Total number of standard time slots in GTSS
$N'$	Total number of new time slots in GTSS
$m$	Number of devices being allocated a GTS each
$T_s$	Time duration of one standard time slot
$T'_s$	Time duration of a new time slot of the proposed scheme

### 3.3 IEEE 802.15.4 및 제안 방안의 적용 예

제안 방안을 II장에서 사용한 예에 적용하여 보면 기존 IEEE 802.15.4에 비해 훨씬 더 효율적인 자원 할당이 가능함을 확인할 수 있다. 표 2는 위의 예에서 IEEE 802.15.4 및 제안 방안이 두 개의 GTS를 위해 할당하는 자원을 비교한다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 제안 방안이 기존 IEEE 802.15.4에 비해 훨씬 더 효율적인 자원 예약이 가능하고, 할당할 수 있는 GTS의 개수도 최대 127개 까지 가능하므로 IEEE 802.15.4의 확장성 문제를 해결할 수 있다.

## 4. 성능 분석 및 평가

제안 방안과 IEEE 802.15.4 표준 프로토콜의 성능을 비교하기 위하여 CFP 구간에서의 대역폭 이용률 (Bandwidth utilization)을 분석하였다[5-10]. 성능 분석을 위해 사용된 파라미터는 표 3에서와 같다.

디바이스  $n_i$ 가 코디네이터로부터 할당 받은 GTS를 통해 데이터를 전송하는 시간  $t_i$ 는 (식 3)과 같이

나타낼 수 있다.

$$t_i = \frac{r_i BI}{C} \quad (식 3)$$

여기에서  $r_i$ 는 디바이스  $n_i$ 의 평균 데이터 생성률을,  $C$ 는 네트워크의 데이터 전송률을 각각 의미한다.  $BI$ 는 비컨의 시간 간격을 의미하는데,

$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO} \quad (식 4)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 그리고 IEEE 802.15.4 표준 슈퍼프레임 구조에서 한 타임 슬롯의 시간 길이  $T_s$ 는 SlotD를 의미하는데,  $SD(SerframeDuration)$ 의 1/16에 해당하므로

$$T_s = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO-4} \quad (식 5)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

$N_i$ 는 표준 슈퍼프레임 구조에서  $t_i$ 를 지원하기 위해 GTS에 포함된 타임 슬롯의 개수로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_i = \left\lceil \frac{t_i}{T_s} \right\rceil \quad (식 6)$$

즉,  $t_i$ 는 다음 조건을 만족해야 한다.

$$(N_i - 1)T_s < t_i \leq N_i T_s \quad (식 7)$$

따라서, 디바이스  $n_i$ 가 할당 받은 GTS에서의 대역폭 이용률은

$$U_{n_i} = \frac{t_i}{N_i T_s} \quad (식 8)$$

와 같다. 이를 바탕으로 IEEE 802.15.4 표준 슈퍼프레임 구조에서 CFP 구간 전체의 평균 대역폭 이용률은 (식 9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{CFP} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{\sum_{i=1}^m N_i T_s} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{T_s \sum_{i=1}^m N_i} \quad (식 9)$$

이를 (식 3), (식 4), 및 (식 5)을 이용하여 다시 나타내면 다음과 같다.

$$U_{CFP} = \frac{2^{BO-SO+4} \sum_{i=1}^m r_i}{C \sum_{i=1}^m N_i} \quad (식 10)$$

제안된 슈퍼프레임 구조에서 한 타임 슬롯의 길이  $T_s$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_s = \alpha T_s, \quad \text{where } \alpha = \begin{cases} 1, & 0 \leq SO \leq 2 \\ 1/2, & 3 \leq SO \leq 5 \\ 1/4, & 6 \leq SO \leq 8 \\ 1/8, & 9 \leq SO \leq 11 \\ 1/16, & 12 \leq SO \leq 14 \end{cases} \quad (식 11)$$

여기에서  $\alpha$ 는 제안 방안의 타임 슬롯 길이와 표준 타임 슬롯 길이의 비로서, 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 SO값에 따라 달라진다.

제안 방안에서 각 GTS에 할당된 새로운 타임 슬롯의 수 및 전체 GTS에 할당된 총 타임 슬롯의 수는 각각 (식 12) 및 (식 13)으로 나타낼 수 있다.

$$N'_i = \left\lceil \frac{t_i}{T_s} \right\rceil \quad (식 12)$$

$$N' = \sum_{i=1}^m N'_i = \sum_{i=1}^m \left\lceil \frac{t_i}{T_s} \right\rceil \quad (식 13)$$

그러므로 각 디바이스가 할당 받은 GTS에서의 대역폭 이용률은

$$U'_{n_i} = \frac{t_i}{N'_i T_s} \quad (식 14)$$

과 같다. 그리고 제안된 슈퍼프레임 구조에서 CFP 구간 전체의 평균 대역폭 이용률은 (식 15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U'_{CFP} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{N' T_s} \quad (식 15)$$

이를 (식 3), (식 4), (식 5), (식 12), 및 (식 13)을 이용하여 다시 정리하면 (식 16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U'_{CFP} = \frac{2^{BO-SO+4} \sum_{i=1}^m r_i}{\alpha C \sum_{i=1}^m \left\lceil \frac{2^{BO-SO+4} r_i}{\alpha C} \right\rceil} \quad (식 16)$$

예를 들어 SO 및 BO 값이 모두 4이고,  $C$ 가 250 kbps이며,  $r_1$  및  $r_2$ 가 각각 16 kbps 및 32 kbps일 경우, IEEE 802.15.6 표준과 제안된 슈퍼프레임 구조에서 CFP 구간의 평균 대역폭 이용률을 구하면 다음과 같다.

먼저 IEEE 802.15.4 표준 슈퍼프레임 구조에서는  $r_1$  및  $r_2$ 를 위한 GTS들이 (식 7)에 의해 각각 2개 및 3개의 타임 슬롯을 포함한다. 즉, 총 5개의 표준 타임 슬롯이 필요하므로 (식 10)을 이용하여 CFP 구간의 평균 대역폭 이용률을 계산하면 0.6144가 된다.

한편, 제안 방안에서는 SO 값이 4일 경우  $\alpha$ 가 1/2이므로,  $r_1$  및  $r_2$ 를 위한 GTS들이 요구하는 새로운 타임 슬롯의 길이는 각각 3개 및 5개가 된다. 총 8개의 새로운 타임 슬롯은 4개의 표준 타임 슬롯에 해당하므로 표준 슈퍼프레임 구조에 비해 대역폭 자원을 절약할 수 있음을 알 수 있다. (식 16)을 이용하여 제안 방안의 CFP 평균 대역폭 이용률을 구하면 0.768이므로, IEEE 802.15.4 표준에 비해 CFP 구간의 평균 대역폭 이용률이 25% 향상되었음을 확인할 수 있다.

제안 방안에서 절약된 대역폭 자원은 CAP 구간으로 활용하는 것이 가능한데, 제안 방안의 *Final-CAPSlot* 값은 다음과 같이 조정될 수 있다.

$$newFinalCAPSlot = FinalCAPSlot + N - \lceil \alpha N \rceil \quad (식 17)$$

그림 9는 한 디바이스의 트래픽이 15.625 kbps에서 46.875 kbps까지 변화할 때, IEEE 802.15.4 및 제안 방안의 CFP 구간 대역폭 이용률을 비교하고 있다. 그림 9에서 대역폭 이용률이 1로 올라갔다가 다시 떨어져서 톱니모양을 나타내는 이유는 CFP 구간에서 QoS를 지원하기 위하여 예약하는 대역폭의 크기가 GTS 내의 슬롯 단위로 이루어지기 때문이다. 즉, 디바이스의 요구 대역폭이 한 슬롯 당 제공할 수 있는 대역폭의 정수배가 될 경우에는 대역폭 이용률이 정확히 1이 되지만, 그렇지 않을 경우에는 할당 대역폭이 요구 대역폭보다 크기 때문에 1보다 작아지게 된다. 따라서 제안 방안의 경우 슬롯 당 제공하는 대역폭의 크기가 표준보다 작으므로 대역폭 낭비가 줄어들게 된다. 그림 9를 통해 제안 방안이 IEEE 802.15.4 표준에 비해 높은 대역폭 이용률을 가지며,

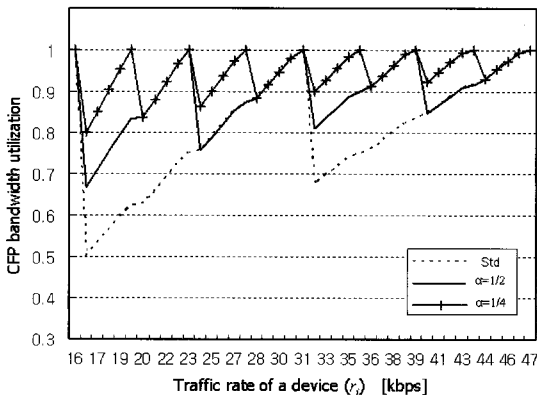


그림 9. CFP 구간의 대역폭 이용률

제안 방안의  $\alpha$  값이 감소할수록 (즉, SO 값이 증가할수록) 대역폭 이용률이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 SO 값이 증가할수록 GTS에 속한 타임 슬롯의 크기를 표준의 타임 슬롯에 비해 크게 줄임으로써 훨씬 더 정밀한 대역폭 할당이 가능하기 때문이다.

지금까지 살펴 본 바와 같이, 제안된 슈퍼프레임 구조는 SO 값이 증가할수록 디바이스가 요구하는 대역폭에 좀 더 근접한 타임 슬롯을 할당함으로써 기존 IEEE 802.15.4 표준에 비해 높은 CFP 구간 대역폭 이용률을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

### 5. 결 론

본 논문은 IEEE 802.15.4 표준 매체접근제어의 슈퍼프레임 구조를 확장하여, QoS 지원 장치의 개수 및 CFP 구간에서의 대역폭 사용 효율을 크게 향상시킬 수 있는 방안을 제안하였다. 표준 슈퍼프레임 구조에서는 총 슬롯의 개수가 16개로 고정되어 있고 슬롯 단위로 대역폭을 할당하므로 BO 또는 SO 값이 증가할수록 대역폭 사용효율이 급격히 떨어지며 QoS를 지원하기 위해 할당하는 GTS의 개수도 최대 7개로 제한되는 문제점이 있다.

그러나 제안 방안은 BO 또는 SO 값이 증가할수록 단위 슬롯의 길이를 표준보다 줄여나감으로써 좀 더 정밀한 대역폭 할당이 가능할 뿐만 아니라 할당 가능한 GTS의 개수도 최대 127개까지 확장할 수 있다. 다만, 제안 방안을 지원하기 위해 표준 MAC 프레임 형식에서 일부 필드를 수정할 필요가 있다. 성능 분석 결과, 제안 방안이 BO 또는 SO 값이 증가할수록 기존 방안에 비해 CFP 구간에서의 대역폭 사용 효율을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

[1] A. Wheeler, "Commercial Applications of Wireless Sensor Networks using Zigbee," IEEE Communication Magazine, Vol.45, No.4, pp. 70-77, 2007.

[2] PHAM Ngoc Thai, Victoria Que and Won-Joo Hwang, "Compact Software Design and Implementation of IEEE 802.15.4 and Zigbee,"



*Journal of Korea Multimedia Society*, Vol.11, No.6, pp. 835-844, 2008.

[3] Yu-Kai Huang, Ai-Chun Pang, and Hui-Nien Hung, "An Adaptive GTS Allocation Scheme for IEEE 802.15.4," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol.19, No. 5, pp. 641-651, 2008.

[4] IEEE Computer Society, "IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)," IEEE Std 802.15.4-2006, 2006.

[5] Anis Koubaa, Mario Alves, and Eduardo Tovar, "GTS Allocation Analysis in IEEE 802.15.4 for Real-Time Wireless Sensor Networks," in Proc. of the 14th International Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems (WPDRTS), 2006.

[6] Liang Cheng, Anu G. Bourgeois, and Xin Zhang, "A New GTS Allocation Scheme IEEE 802.15.4 Networks with Improved Bandwidth Utilization," in 7th Symposium on Communication and Information Technologies (ISCIT), 2007.

[7] Anis Koubaa, Mario Alves, and Eduardo Tovar, "i-GAME: An Implicit GTS Allocation Mechanism in IEEE 802.15.4 for Time-Sensitive Wireless Sensor Networks," in Proc. of 18th Euromicro Conference on Real-Time Systems, 2006.

[8] Yu-Kai Huang, Ai-Chun Pang, and Hui-Nien Hung, "A Comprehensive Analysis of Low-Power Operation for Beacon-Enabled IEEE 802.15.4 Wireless Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.8, No. 11, 2009.

[9] Liang Cheng, Anu G. Bourgeois, and Xin Zhang, "A Performance Comparison Study of

GTS Allocation Schemes in IEEE 802.15.4," in Proc. of FGCN 2007, 2007.

[10] B. Shrestha, E. Hossain, S. Camorlinga, R. Krishnamoorthy, and D. Niyato, "Optimization-Based GTS Allocation Scheme for IEEE 802.15.4 MAC with Application to Wireless Body-Area Sensor Networks," in Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC) 2010, 2010.



**박희동**

1993년 경북대학교 전자공학과 공학사  
 1998년 경북대학교 전자공학과 공학석사  
 2005년 경북대학교 전자공학과 공학박사

1998년~2007년 포항대학 컴퓨터응용계열 조교수  
 2007년~현재 나사렛대학교 정보통신학과 조교수  
 관심분야: 센서네트워크, WPAN/WBAN, 모바일컴퓨팅



**김도현**

1988년 경북대학교 전자공학과 공학사  
 1990년 경북대학교 전자공학과 공학석사  
 2000년 경북대학교 전자공학과 공학박사

1990년~1995년 국방과학연구소 연구원  
 1999년~2004년 천안대학교 정보통신학부 조교수  
 2004년~현재 제주대학교 통신컴퓨터학부 부교수  
 관심분야: 센서네트워크, WBAN, WPAN, 텔레메틱스



**박현**

1985년 전남대학교 전산통계학과 이학사  
 1987년 서울대학교 계산통계학과 이학석사  
 2005년 충남대학교 컴퓨터과학과 이학박사

1988년~현재 한국전자통신연구원 책임연구원  
 관심분야: 센서네트워크, 6LowPAN, Zigbee, USN미들웨어