

논문 2007-44CI-3-8

# IEEE 802.15.4 무선센서네트워크의 실시간 트래픽 처리를 위한 프레임/슬롯 할당방법

(Frame/Slot Allocation Method for Real-time Traffic in IEEE 802.15.4  
Wireless Sensor Networks)

김 형 석\*

(Hyung Seok Kim)

## 요 약

IEEE 802.15.4 저속 무선 개인 통신망(low rate wireless personal area network)은 유비쿼터스 센서네트워크를 구성하는데 적합한 프로토콜이다. 그러므로, 최근에 다양한 응용네트워크에서 IEEE 802.15.4 프로토콜에 대한 관심이 증대하고 있다. 본 논문에서는 실시간 트래픽 처리를 위하여 보장 시간 슬롯(Guaranteed time slots, GTS)을 할당하며, 이러한 할당방식을 적용시에 IEEE 802.15.4 프레임 및 부프레임과 관련된 최적의 파라미터들을 획득하는 방법을 제안한다. 네트워크에 있는 각 노드에 할당된 대역폭과 주기값에 대한 요구사항들이 주어질 때, 이들 요구사항들을 만족시키는 비콘 주기(beacon period)와 활성/비활성 부프레임 시간들의 후보들을 선택하고, 이들 중 가장 낮은 듀티 사이클(duty cycle)을 낼 수 있는 파라미터를 선택한다. 이들 최적 파라미터를 기반으로 하여 본 논문의 분석 결과는 소모전력 절약을 포함한 네트워크 자원을 효율적으로 이용할 수 있는 방식을 제공한다.

## Abstract

The IEEE 802.15.4 low rate wireless personal area network is a protocol suitable for wireless sensor networks. Thus there has been growing interest in the IEEE 802.15.4 protocol in the home automation networks. This paper proposes a scheduling scheme obtaining optimal parameters regarding the IEEE 802.15.4 frame and subframes in the home automation networks. Guaranteed time slots (GTS) are exploited for the delivery of real-time traffic. Given a set of the requirements for bandwidths and periods assigned to nodes in the network, the beacon interval and the active/inactive subframe duration satisfying the requirements are selected considering the low duty cycle by the proposed scheme. Based on these parameters, analytic results provide the way to efficient use of network resources including energy.

**Keywords :** 802.15.4, real-time traffic, scheduling, GTS, duty cycle

## I. 서 론

저전력 무선센서네트워크는 최근에 홈오트메이션과 산업 공정, 환경 감시 등 다양한 응용에서 주목을 받는 기술<sup>[1-3]</sup>로서, 차세대 유비쿼터스 네트워크를 구성하는 핵심 요소이다. 이를 구성하는 저렴한 가격의 센서노드

들은 낮은 듀티 사이클을 가지고 하나의 배터리로 약 2년 동안 지속가능해야 한다. 무선센서노드들은 센서들을 유선으로 연결하는 설치 방식을 적용하기 불가능한 지역에 사용하기 적합하다. 선 연결이 힘들거나 휴대용 기기처럼 이동할 때 연결선이 꼬이는 환경에서의 사용이 무선센서네트워크의 가장 적절한 응용예라고 할 수 있다.

센서네트워크의 응용예 중의 하나인 보안 시스템은 보통 입장자를 탐지하는 센서, 입장자가 허가된 사람인지를 판단하는 제어장치, 그리고 경보장치를 호출하는 구동장치 등으로 구성되어 있다. 이러한 요소들을 갖춘

\* 정희원, 세종대학교 정보통신공학과  
(Department of Information and Communication  
Engineering, Sejong University)

※ This work was supported by a faculty research  
fund from Sejong University in 2006.  
접수일자: 2007년4월2일, 수정완료일: 2007년5월4일

네트워크를 사용하는 시스템은 조명제어, 가정용 로봇, PC 주변기기, 보안망, 각종 기기의 모니터링 및 제어, 문개폐제어, 냉난방장치 등이 있다. 이들 시스템을 구성하는 네트워크에서의 트래픽은 크게 주기적 트래픽과 비주기적 트래픽으로 나눌 수 있다. 주기적 트래픽은 매 주기마다 데이터를 샘플링하고 이를 송신하는 센서로부터 발생한다. 제어기는 이 트래픽을 수신하고 계산을 마친 후 구동기로 전송한다. 비주기적 트래픽에는 제어 메시지 교환 또는 필요할 때 발생하는 이벤트 기반 메시지들이 포함된다. 일반적으로 비주기적 트래픽은 발생량이 예측되지 않으므로 예약된 대역폭을 요구하지 않는다.

IEEE 802.15.4 저속 무선개인통신망(LR-WPAN, low rate wireless personal area network)은 무선 센서 네트워크에 가장 적합한 프로토콜 중의 하나이다. ZigBee<sup>[4]</sup>는 IEEE 802.15.4의 MAC/PHY계층을 지니고 있으며, MICAz<sup>[5]</sup>, TelosB 등 잘 알려진 센서 노드의 프로토콜이기도 하다. ZigBee의 가장 잘 알려진 장점은 저전력 소모, 긴 배터리 수명, 낮은 생산비용, 개방된 표준이라는 특성들이다. ZigBee의 mesh 네트워킹 특성 또한 IEEE 802.15.4를 센서 네트워크 응용에 적용하기에 유리하도록 한다.

다양한 응용에 대한 요구사항을 만족시키기 위하여, IEEE 802.15.4는 시간 제약 동작을 보장해야 하고, 노드들 또는 패킷들에 우선순위를 제공할 수 있는 기능도 갖추어야 한다. 이들 요구사항을 만족하는 데에 있어 매체제어를 위한 충돌메커니즘, 비콘 프레임(beacon frame) 주기, sleep/wake 기간 조정 등이 긴밀히 관련되어 있다. IEEE 802.15.4 표준에서는 이 파라미터를 어떻게 세팅하는지에 대하여 서술되어 있지는 않다.

무선 센서 네트워크에서의 시간제약 통신에 관련한 연구로 확산(dissemination) 트리 구조가 [6]에서 제안되었다. 시간 제약 뿐 아니라 소모에너지 절약도 고려하였으나, 이 연구는 IEEE 802.15.4 프로토콜을 다루고 있지는 않다. IEEE 802.15.4의 보장시간슬롯(이후 GTS)의 분석을 다룬 몇 가지 연구가 있다<sup>[7][8]</sup>. 연구 [7]은 듀티 사이클이 1일 때 즉 수면 상태가 없을 때, 프레임의 최대 쓰루풋 성능과 지연을 평가하였다. 연구 [8]에서는 여러 플로우 사이에 같은 GTS를 공유하는 방식이 제안되었다. 그러나 이들 연구들은 전력절약 및 쓰루풋 두 가지에 대한 프레임/부프레임의 최적 파라미터들을 고려한 연구들이 아니다. 또한, 이들은 스케줄링 또는 슬롯할당방식에 대한 연구를 포함하고 있지 않다.

본 논문은 저전력 소모와 함께 실시간 제약을 보장하는 기법을 제안하며, 이로 인한 부가적인 오버헤드 또는 규격의 수정을 요구하지 않는다. 시간 슬롯을 노드들에게 어떻게 할당하는가와 프레임 기간과 활성/비활성 슬롯을 어떻게 설계하는지를 IEEE 802.15.4 센서네트워크의 저전력소모 관점에서 제시한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장은 IEEE 802.15.4 규격에 대해서 설명하며, III장은 프레임/부프레임을 설계하는 세부 방법과 실시간 트래픽을 보장하기 위한 패킷스케줄링 방식을 제안한다. 성능 결과는 IV장에서 보여지고 V장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. IEEE 802.15.4

IEEE 802.15.4 LR-WPAN은 제한된 전력과 낮은 스루풋 요구사항을 지닌 응용과의 연결을 제공하는데 적합한 저비용 통신망이다. 주요 장점으로 설치용이, 신뢰성 있는 데이터 전송, 근거리 영역에서의 동작, 매우 낮은 비용, 적절히 긴 배터리 수명 등을 들 수 있다.

이 프로토콜의 몇 가지 특징은 다음과 같다.

- 250 kb/s, 40 kb/s, 20 kb/s의 무선전송속도
- 스타형, 점대점 토폴로지
- 16 비트 또는 64비트확장 어드레스 할당
- 보장시간슬롯(GTS)의 할당
- CSMA-CA (충돌회피기법을 지닌 캐리어센싱 다중 접속방식)
- 전송신뢰를 위한 회답(Ack) 방식
- 저전력 소모

전체기능기기(full-function device, FFD)와 축소기능기기(reduced-function device, RFD)의 두 가지 다른 형태의 기기가 LR-WPAN에 존재한다. FFD는 주 코디네이터(main coordinator), 코디네이터, 또는 디바이스 중의 하나로서 사용될 수 있다. FFD는 패킷을 RFD 또는 다른 FFD에게 보낼 수 있는 반면, RFD는 FFD에만 통신할 수가 있다. RFD는 단순한 구동기 또는 수동 센서들의 기기 응용에 사용될 수 있다. 이들은 많은 양의 데이터량을 보내도록 요구되지 않으며, 단지 한 번에 하나의 FFD와 접속되어 사용될 수 있다.

IEEE 802.15.4 표준은 슈퍼프레임 구조를 선택하여 사용할 수 있음을 명시하고 있다. 슈퍼프레임은 저전력 소모를 위하여 정의되며, 슈퍼프레임의 형태는 코디네이터에 의해 네트워크 비콘을 통해서 각 기기들에 제공

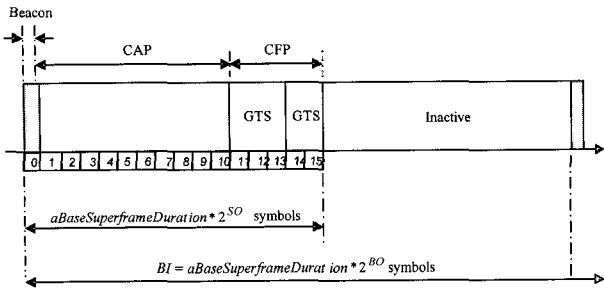


그림 1. IEEE 802.15.4 슈퍼프레임 구조  
Fig. 1. IEEE 802.15.4 superframe structure.

된다. 슈퍼프레임은 코디네이터에 의해 송신되며, 이는 16개의 동일한 크기의 슬롯으로 구성된다. 비콘 프레임은 각 슈퍼프레임의 첫 번째 슬롯에서 전송되며, 기기들을 동기화시키고 네트워크를 구별시키며 슈퍼프레임 구조를 알려주는데 사용된다. 두 비콘 사이에 충돌 접속 기간(contention access period, CAP) 동안에 통신하기를 희망하는 기기는 슬롯형 CSMA-CA 매커니즘을 통해 다른 기기들과 경쟁해야 한다. 슈퍼프레임은 비콘 프레임의 전송으로 그 경계가 지어지며, 활성 부분과 비활성 부분 두 가지로 구성될 수 있다. 코디네이터는 슈퍼프레임의 활성부분 동안만 네트워크와 접속하므로, 비활성부분에는 저전력 수면 모드로 들어간다.

적은 지연시간을 요구하는 응용이나 특수한 대역폭을 요청하는 응용에서는, 코디네이터는 활성 슈퍼프레임의 특정부분을 이에 할당할 수 있다. 이 부분을 보장 시간슬롯(GTS)이라 하며, GTS는 충돌 없는 기간(contention-free period, CFP)을 CAP의 바로 뒤에 있는 슬롯부터 시작한다. 주 코디네이터는 GTS들에 대해 총 7개 슬롯까지 할당할 수 있고, 하나의 GTS는 하나 이상의 슬롯으로 구성된다. CAP의 최소 영역이 비주기적 트래픽의 충돌기반 액세스를 위해서 항상 남겨진다.

슈퍼프레임 구조의 예는 그림 1에서 보여진다. 슈퍼프레임 구조는 비콘차수(beacon order, BO)와 슈퍼프레임 차수(superframe order, SO)에 의해 구성된다. BO는 코디네이터가 비콘 프레임을 전송하는 주기를 알려준다. BO 값과 비콘 주기(beacon interval, BI)의 관계식은 다음과 같다<sup>[9]</sup>.

$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO}(\text{symbols}) \quad (1)$$

$$0 \leq BO \leq 14$$

SO는 슈퍼프레임의 활성 부분의 길이를 알려주며, 비콘 프레임을 포함한다. SO 값과 슈퍼프레임 기간(superframe duration, SD)은 다음 식과 같다<sup>[9]</sup>.

$$SD = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO}(\text{symbols}) \quad (2)$$

$$0 \leq SO \leq BO \leq 14$$

각 슈퍼프레임의 활성부분은 aNumSuperframeSlots 개의 동일하게 나뉜 슬롯들로 구성되며, 슬롯 길이는  $2^{SO} \times aBaseSlotDuration$ 이다. 활성 부분은 비콘, CAP, CFP의 세 가지 부분으로 구성된다. 비콘은 CSMA의 사용없이 슬롯 0의 시작에서 전송된다. CAP은 비콘 후에 즉시 시작되며, CFP가 있다면, 슈퍼프레임의 활성부분의 후반부인 CAP 후에 시작된다. 할당된 GTS들은 CFP 이내에 위치된다.

CFP의 길이가 0이라면, CAP은 슈퍼프레임의 끝에서 종료한다. 비콘 프레임의 전송을 위한 추가 스페이스가 필요하지 않다면 CAP은 규격에서 정의된 최소값인 aMinCAPLength (=440) 심볼이 될 수 있다. 이 값은 CFP의 영역 크기를 조절하기 위해 조정될 수 있다. Ack 프레임과 응답을 빨리 받아야 하는 데이터를 제외한 모든 프레임은 슬롯형 CSMA-CA 매커니즘을 이용한다. CAP 이내에서 전송하는 기기는 CAP 끝에 하나의 프레임간 간격(IFS, Inter-Frame Space)전에 트랜잭션이 완료되어야 한다. 이것이 가능하지 않은 것을 알게 되면, 기기는 전송을 다음 슈퍼프레임의 CAP까지 연기하게 된다. MAC 명령어 프레임은 언제나 CAP에서 전송되어야 한다.

CFP는 CAP 직후 슬롯 경계에서 시작하며 다음 비콘 시작 전에 완료되어야 한다. GTS가 코디네이터에 의해 할당되었다면 CFP 이내에 위치될 것이며 일정 슬롯들을 차지하게 된다. CFP는 GTS들의 전체 길이에 따라 그 크기가 커지거나 작아지며, CFP 이내의 어떤 전송도 채널 접속을 위해 CSMA-CA 매커니즘을 사용하지 않는다.

### III. 듀티사이클 고려한 트래픽 스케줄링

디바이스와 제어기 사이에 송수신되는 트래픽은 두 가지 주요 형태인 주기적 트래픽과 비주기적 트래픽으로 분류될 수 있다. 주기적 트래픽은 매 고정주기(예를 들어, 매 2초)로 생성되고 전달되는 트래픽으로 정의된다. 센서 노드는 주변상태를 센싱하고 일정 주기 동안 최소 한 번 센싱 된 데이터를 포함한 패킷을 전송한다. 주기적 트래픽을 한 주기 동안 전달하는데 실패한다는 것은 그 주기 동안 정상적 동작을 하지 못했다는 것을 의미한다.

주기적 트래픽과 달리, 비주기적 트래픽은 주기성의 제한을 가지고 있지 않다. 비주기적 트래픽은 알람 패킷과 제어 명령어로 구분될 수 있다. 디바이스와 제어 기간의 내부 동작을 위한 제어 명령어는 실시간 제약을 거의 가지고 있지 않다. 그러나 알람 패킷은 보통 최악의 경우가 발생하기 전에 긴급 상황을 보고해야 하는 시간제약 특성을 가지고 있다.

GTS는 충돌 없이 대역폭을 예약할 수 있으므로 주기적 트래픽의 경우처럼 계속해서 대역폭을 점유해야 하는 트래픽에 적합하다. 시간제약을 요구하지 않는 비주기적 제어 명령어의 전달에는 경쟁기반 액세스인 CAP이 사용될 수 있다.

센서 디바이스로부터 생성된 사건기반 알람 패킷을 처리하기 위해 시간제약 전달을 위한 새로운 슬롯들이 CFP에 더해질 것이다. 비주기적 트래픽은 보통 여분의 대역폭을 이용하거나, 발생시 CAP를 증가시킨다. 그러므로 주기적 트래픽과 달리 스케줄링을 필요로 하지 않으므로, 본 논문의 스케줄링 방식은 실시간 주기적 트래픽에 초점을 맞추어 진행한다.

### 1. 심볼과 슬롯 시간 결정

활성 부프레임의 심볼수  $N_a$ 는

$$N_a = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} \text{ (symbols)} \quad (3)$$

이며<sup>[9]</sup>, 식의 SO는 수퍼프레임 차수이며 aBaseSuperframeDuration은 수퍼프레임 차수가 0일 때 활성 심볼의 숫자이다. aBaseSuperframeDuration는

$$aBaseSuperframeDuration = B_s \times S_a \text{ (symbols)} \quad (4)$$

의 식으로 계산된다<sup>[9]</sup>. 여기에서  $B_s$ 는 기본 슬롯기간으로, 이는 SO가 0일 때, 수퍼프레임 슬롯을 형성하는 심볼수와 같다.  $S_a$ 는 활성 부프레임의 슬롯수이다.

(1)과 (2)를 이용하여, 슬롯당 심볼수는 수식

$$\begin{aligned} \text{Symbols per slot} &= N_a / S_a \\ &= B_s \times 2^{SO}. \end{aligned} \quad (5)$$

에 의해 얻어진다. CFP가 시작하는 심볼의 오프셋은

$$\text{CFP start symbol} = N_{\text{beacon}} + N_{\text{CAP}} \quad (6)$$

이며,  $N_{\text{beacon}}$ 과  $N_{\text{CAP}}$ 은 비콘 슬롯과 CAP의 심볼수와 각각 같다. 비콘 슬롯  $N_{\text{beacon}}$ 의 심볼수는 일반 슬롯의 심볼수와 같다. 그러므로 (5)로부터,

$$N_{\text{beacon}} = B_s \times 2^{SO} \quad (7)$$

주기적 트래픽의 실시간 제약을 보장하기 위해서, CFP동안 노드 간 충돌은 네트워크를 비결정적(undeterministic)으로 만들기 때문에, 주기적 트래픽은 CFP동안 전송된다. 그러므로 CAP은 노드들이 가지는 비주기적 트래픽을 처리할 수 있기 위해 최소 길이로 고정된다. 최소길이의 CAP은 CFP가 활성 부프레임에서 최대 슬롯을 가지도록 한다. 최소 CAP은 GTS들이 사용될 때 MAC 명령어가 디바이스에 전달될 수 있도록 한다. IEEE 802.15.4 표준에 따르면, 최소 CAP 심볼수는 440이다. (7)과 CAP 최소심볼수를 이용하면 (6)의 CFP의 시작 심볼은

$$\begin{aligned} \text{CFP start symbol} &= N_{\text{beacon}} + \min(N_{\text{CAP}}) \\ &= B_s \times 2^{SO} + 440 \end{aligned} \quad (8)$$

이며 CFP 시작 슬롯은 아래 식으로 구할 수 있다.

$$\text{CFP start slot} = 1 + \left\lceil \frac{440}{B_s \times 2^{SO}} \right\rceil. \quad (9)$$

심볼률은 심볼수를 시간으로 변환하기 위해 필요하다. 표 1에 따르면, 2.45GHz에서 LR-WPAN을 사용하면, 심볼률은 62.5 ksymbols/sec이다. 868 또는 915MHz에서, 심볼률은 2.45GHz때와 다르다. 2.4 GHz 비면허 대역 주파수가 MICAz 노드처럼 센서네트워크에서 사용된다면, 하나의 심볼은 표 1로부터 16μsec와 같다. 그리고, CFP start offset (μsec) =  $(B_s \times 2^{SO} + 440) \times 16$  (μsec) =  $B_s \times 2^{SO+4} + 7040$  (μsec)이고, 여기에서 첫째항  $B_s \times 2^{SO+4}$ 는 비콘에 해당하는 시간을 나타내고 두번째 항은 최소 CAP의 길이이다. 수퍼프레임 오프셋 SO는  $0 \leq SO \leq 14$ 의 범위를 가지므로,  $B_s$ 가 디폴트값인 60일 때, CFP 시작 오프셋의 범위는  $8\text{msec} \leq \text{start offset duration} \leq 15.74\text{sec}$ 로 취해진다.

활성 부프레임의 슬롯 기간은  $B_s \times 2^{SO}$  심볼수이며, 이

표 1. IEEE 802.15.4 물리계층 파라미터  
Table 1. IEEE 80215.4 physical layer parameters.

주파수 (MHz)	변조	비트율 (kbps)	심볼률 (ksymbols/s)
868	BPSK	20	20
915	BPSK	40	40
2450	O-QPSK	250	62.5

것은 16-ary 모듈레이션을 사용하여 디바이스는  $B_s \times 2^{SO+2}$  비트를 한 슬롯동안 보낼 수 있다는 것을 나타낸다.  $SO=0$ 과 디폴트값  $B_s=60$ 에서, 하나의 슬롯은 240비트, 즉 30바이트와 같다.  $SO$ 가 1만큼 증가할 때, 슬롯당 비트수는 두 배로 증가한다. 예를 들어  $SO=1$ 에서 슬롯당 비트수는 60 바이트가 된다.

활성과 비활성 부프레임을 포함하는 전체 부프레임 이내의 심볼수는  $N_{sf}$ 로 나타내며, 표준에서는 아래 식으로 규정되어 있다.

$$N_{sf} = B_s 2^{BO} \text{ (symbols)} \quad (10)$$

$BO$ 는 비콘 차수이며,  $0 \leq SO \leq BO \leq 14$ 의 범위에 있다.  $BO$ 와  $SO$ 로 듀티사이클은  $2^{SO}/2^{BO}=2^{(SO-BO)}$ 로 계산된다. 더 작은 듀티사이클이 더 적은 에너지 소모를 의미하므로, 프레임과 슬롯 스케줄링을 설계할 때, 시간 제약 하에서  $BO$ 는 더 크게,  $SO$ 는 더 작게 만드는 것이 센서네트워크가 더 적은 에너지 소모를 하도록 한다.

### 2. 비콘주기와 스케줄링

주기적 트래픽의 실시간 동작을 보장하기 위해서, 네트워크의 비콘 주기는 노드들에 할당된 주기들 중 최소값인  $P_{min}$  보다 작거나 같아야 한다. 이 조건은

$$B_s S_a 2^{BO} R_s^{-1} \leq P_{min} \quad (11)$$

와 같으며,  $R_s$ 는 표 1에서 선택된 주파수에서의 심볼률이다. (11)에서  $BO$ 의 최대범위는

$$BO \leq \log_2 \frac{R_s P_{min}}{B_s S_a} \quad (12)$$

으로 구해진다. 따라서  $BO$ 는  $0 \leq SO \leq BO \leq 14$ 의 정수이므로,  $BO$ 의 범위는

$$0 \leq SO \leq BO \leq \log_2 \frac{R_s P_{min}}{B_s S_a} \leq 14, BO \text{는 정수} \quad (13)$$

이 된다. CFP의 슬롯길이는 슈퍼프레임의 활성부분에서 비콘 슬롯과 CAP의 슬롯길이를 제외한 부분의 길이와 같다. 따라서 최대 CFP 슬롯은

$$S_{CFP_{max}} = S_a - S_{beacon} - S_{CAP_{min}} \quad (14)$$

이며,  $S_{CAP_{min}}$ 은 (5)의 슬롯당 심볼과 최소 CAP 심볼수를 이용하여 얻어질 수 있다. 식 (14)는

$$S_{CFP_{max}} = 16 - 1 - \left\lceil \frac{440}{B_s 2^{SO}} \right\rceil = 15 - \left\lceil \frac{440}{B_s 2^{SO}} \right\rceil \quad (15)$$

가 되며,  $S_{CFP_{max}}$ 에 슬롯당 심볼수를 곱하여 다음 식과 같이 최대 CFP 심볼수를 구한다.

$$S_{CFP_{max}} \times B_s 2^{SO} = B_s 2^{SO} \left( 15 - \left\lceil \frac{440}{B_s 2^{SO}} \right\rceil \right) \quad (16)$$

그러므로 노드들이 최대 CFP 심볼수 동안 전송 가능한 데이터 비트수는 표 1로부터 선택된 심볼률  $R_s$ 와 비트율  $R_b$ 를 이용하여

$$R_b R_s^{-1} B_s 2^{SO} \left( 15 - \left\lceil \frac{440}{B_s 2^{SO}} \right\rceil \right) \text{ (bits)} \quad (17)$$

와 같이 구해질 수 있다. 최대 CFP 비트들은 노드들이 프레임 전송가능한 주기적 트래픽의 최대량이다.

IEEE 802.15.4 PHY/MAC에 기반한  $N$ 개의 노드를 가진 네트워크에서,  $n$ 번째 노드는  $M_n$  비트 데이터패킷을 코디네이터에 매 주기  $P_n$  마다 송신해야 하는 요구사항 ( $M_n, P_n$ )을 가진다. 네트워크에 하나의 코디네이터와 제어가 있다고 가정하자. 만약 하나의 노드가 코디네이터  $D$ 에  $M_n$  비트를 송신해야 하고 충분한 GTS 슬롯을 가지고 있지 않다면, 노드는 패킷을 여러 개로 분할하고 분리된 프레임으로 이들을 전송할 수 있다. 코디네이터는 이들 분할된 패킷들을 원래 패킷으로 복구한다.

스케줄링을 용이하게 하기 위하여, 노드들이 트래픽을 생성하는 주기가 상호 조화(harmonic)하게 만드는 것이 바람직하다. 조화한 주기들의 집합에서는, 최소 주기는 다른 주기들의 약수이다. 예를 들어, 주기  $P_1=2, P_2=4, P_3=7, P_4=8$ 이 주어지면,  $P_3=7$ 은 더 작은 값인  $P_3=6$ 으로 대체되며, 다음 식을 따른다.

$$\text{Harmonized } P_n = \left\lceil \frac{P_n}{P_{min}} \right\rceil \times P_{min} \quad (18)$$

이 식에서  $P_{min}$ 은 주기들  $P_n$ 에서 최소값이다. 이 식은 모든 주기들이 조화하게 만들고 위의  $P_n$  예는 2, 4, 6, 8 이 된다. 주기를 감소시키는 것은 오버샘플링과 같으므로 주어진 요구사항을 계속 만족시키게 된다.

IEEE 802.15.4 표준<sup>[9]</sup>에 따르면, 하나의 슬롯에서 연속적인 데이터 전송은 그림 2와 같이 프레임간 간격

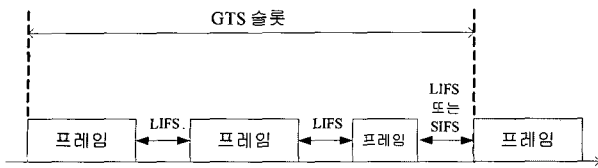


그림 2. 하나의 슬롯에서의 연속적인 데이터 전송에  
Fig. 2. Consecutive data transmissions in a slot.

(IFS)에 의해 분리된다.

데이터 프레임이  $aMaxSIFSFrame = 144bits$  보다 작다면, 짧은 IFS ( $SIFS = 48 bits$ )가 사용된다. 그렇지 않다면, 긴 IFS ( $LIFS = 160 bits$ )가 프레임을 분리하는데 사용된다.  $aMaxPHYPacketSize$ 은 [9]에서 정의된 최대 패킷 사이즈로 1016 비트이다. 만약  $\Gamma$ 가 IFS 오버헤드를 고려할 때 슬롯당 실질 전송되는 데이터 비트라고 하면,

$$\Gamma = \begin{cases} \Psi \cdot aMaxPHYPacketSize, & \text{if } B_{slot} - \Psi \cdot aMaxPHYPacketSize < SIFS, \\ B_{slot} - \Psi \cdot LIFS - SIFS, & \text{if } SIFS \leq B_{slot} - \Psi \cdot aMaxPHYPacketSize \leq aMaxSIFSFrame, \\ B_{slot} - \Psi \cdot LIFS - LIFS, & \text{if } aMaxSIFSFrame < B_{slot} - \Psi \cdot aMaxPHYPacketSize \end{cases} \quad (19)$$

이며, 위 식에서 슬롯당 비트수  $B_{slot}$ 는

$$B_{slot} = R_b R_s^{-1} B_s 2^{SO} \quad (20)$$

이고 한 슬롯에서 전송되는 최대 크기 패킷의 수는

$$\Psi = \left\lfloor \frac{B_{slot}}{aMaxPHYPacketSize + LIFS} \right\rfloor \quad (21)$$

이다.

노드들이 정해진 주기적 트래픽을 송신하는데 필요로 하는 대역폭의 총합은 네트워크에서의 효과비트 수보다 작거나 같아야 한다. 정수 SO는 다음 조건 :

$$\sum_n \frac{M_n}{P_n} \leq \frac{\Gamma \cdot \left( 15 - \left\lfloor \frac{440}{B_s 2^{SO}} \right\rfloor \right)}{\text{Beacon Interval}} = \frac{\Gamma \cdot \left( 15 - \left\lfloor \frac{440}{B_s 2^{SO}} \right\rfloor \right)}{2^{BO} B_s S_a R_s^{-1}} \quad (22)$$

으로 구해지며, 오른쪽 항은 비콘 주기동안 전송될 수 있는 (17)의 비트수로부터 계산된 실질 전송 데이터 비트 전송률이다. 조건식 (12)과 (13)에서 선택된 정수 BO를 이용하여, (13)과 (22)을 만족시키는 최소 정수

SO가 얻어질 수 있다. 더 작은 SO는 더 짧은 활성 주기를 의미하므로 더 적은 에너지 소모를 하게 된다. 요구사항 ( $M_n, P_n$ )과 네트워크의 설계 명세가 주어지면, (19)의  $\Gamma$ 와 [9]의 표준에서 선택된  $S_a, B_s, R_s$ 와 함께, (12)과 (13)로부터 얻어진 BO, (22)으로부터 얻어진 SO를 이용하여 프레임 포맷이 설계될 수 있다.

#### IV. 성능평가

본 장에서는 실시간 트래픽 전송 요구사항을 지닌 네트워크에서 GTS를 사용할 때의 프레임 성능평가 결과를 보여준다. 그림 3은 다른 SO에 대하여 GTS 슬롯당 효과비트, 즉, IFS 오버헤드를 제외한 트랜잭션용 실질 대역폭을 보여주는 것이다. 그림 3에서, 수면 주기가 긴 배터리 수명을 위해 0부터 8까지의 낮거나 중간 정도의 슈퍼프레임 차수가 x축에 배치되어 있다. CFP 길이는 SO가 증가함에 따라 더 길어지기 때문에, GTS 슬롯당 전송되는 데이터 비트 또한 증가한다.

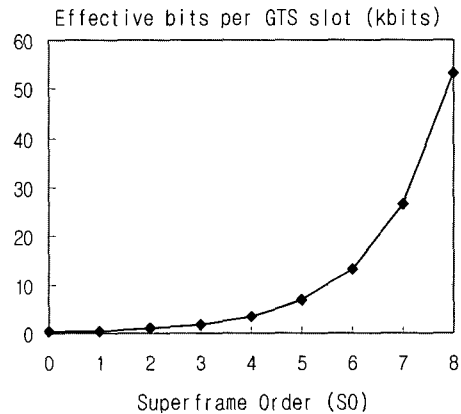


그림 3. GTS 슬롯당 효과비트

Fig. 3. Effective bits per slot of GTS.

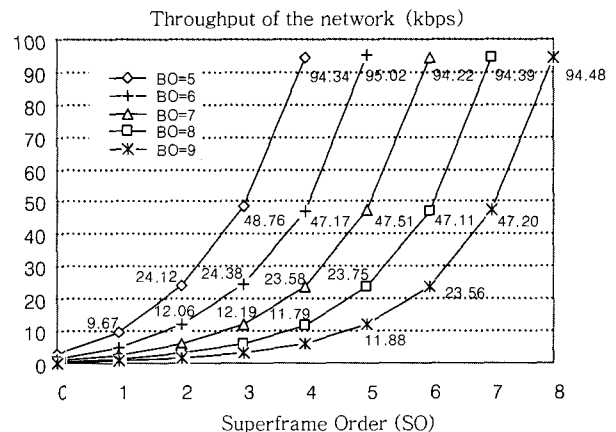


그림 4. 다른 SO값에 대한 프레임의 스루풋 성능

Fig. 4. Throughput of the frame for different SOs.

그림 4에서는 다른 BO와 SO들에 대한 프레임의 스루풋 성능이 보여진다. 스루풋은 BO와 SO 간 차이와 밀접히 관련되어 있다. 만약 송신 데이터량과 송신주기 요구사항 ( $M_n, P_n$ )이 주어지면, BO와 SO는 최소의 듀티 사이클을 얻기 위해 선택된다.

그림 5는 BO와 SO같은 적절한 프레임 파라미터들을 제안된 방식으로 어떻게 찾는지를 보여주기 위하여 성능평가에 사용된 무선 센서 네트워크이다. IEEE 802.15.4는 스타형, 메쉬형, 그리고 하이브리드의 세 가지 토폴로지를 제공한다. 제시된 무선 네트워크는 스타형으로 가정하여, 통신은 디바이스들과 메인 장치인 하나의 코디네이터 간에 이루어진다. 그림 5는 세 개의 센서 디바이스 A, B, C와 하나의 코디네이터로 구성된다. 디바이스 A는 8000비트를 4초 주기로 보내야 하며, B는 4000비트를 2초 주기로, C는 4000비트를 1초 주기로 코디네이터로 송신해야 한다.

$P_{min}$ 은  $P_C=1sec$ 이며, 세 가지 센서노드들의 주기 중 최소이다. IEEE 802.15.4 표준에서 제공하는 디플트값이  $B_s$ 가 60이고  $S_a$ 가 16이다. 2.4GHz의 802.15.4 (또는 ZigBee) 모듈에서 표 1에서와 같이  $R_s$ 는 62.5 ksymbols/sec이고  $R_b$ 는 250 kbits/sec이다. (13)으로부터,  $0 \leq SO \leq BO \leq 6.02$  가 되며, 그러므로 정수 BO는 스케줄가능성과 비활성 부프레임 길이의 최대화, 즉 에너지 절약을 위하여 6으로 선택된다. (22)의 왼쪽 항인  $\Sigma_n \frac{M_n}{P_n}$ 은 8000 bits/sec이다. 표 2는 이 시험용 네트워크에서 BO와 SO의 후보를 나열한다. 표 2에서 조건  $0 \leq SO \leq BO=6$ 에서, SO가 1일 때, 전송률은 4834 bps이고, SO=2일 때, 전송률은 12061 bps이고,

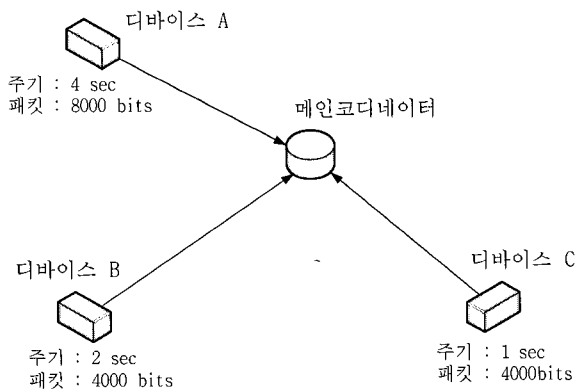


그림 5. 성능평가를 위한 IEEE 802.15.4 네트워크  
Fig. 5. Example of a simple IEEE 802.15.4 sensor network.

표 2. 시험용 네트워크에서 ( $M_n, P_n$ )에서 후보 파라미터

Table 2. Candidate parameters ( $M_n, P_n$ ) in the example network.

BO	SO	Beacon Interval(sec)	Duty Cycle (%)	Throughput (bps)
4	0	0.246	6.25	5468
4	1	0.246	12.50	19336
5	1	0.492	6.25	9668
5	2	0.492	12.50	24121
6	1	0.983	3.13	4834
6	2	0.983	6.25	12061
6	3	0.983	12.50	24382

SO=3일 때는 24382 bps이다. 그러므로 BO=6과 주어진 ( $M_n, P_n$ )으로 조건 (22)을 만족하는 최소 SO는 SO=2이다.

최적값으로 구한 BO=6과 SO=1에서, CFP 시작 슬롯은 식 (9)에 의해 3이며, 결과적으로 슬롯 0은 비콘 슬롯이고, 슬롯 1과 2는 CAP이며, CFP는 슬롯 3부터 슬롯 15까지 차지한다. 따라서 비콘 길이는 0.98초이고 비콘을 포함한 활성 부프레임은 0.25초이다. BO=6과 SO=2는 6.25%의 듀티사이클을 내며,  $\Sigma_n \frac{M_n}{P_n} = 8000$  bps의 실시간 트래픽 스루풋을 낸다. 표 2에 있는 (BO=5, SO=1)은 또 다른 최소 듀티사이클을 가져오는 후보이다. 이것이 (BO=6, SO=2)와 차이점은 더 자주 비콘들(더 짧은 비콘 주기)과 프레임을 발생시킨다. 따라서 비콘들로 소모되는 전력소모가 고려되면 (BO=5, SO=1)가 유리하다고 할 수 있다.

#### IV. 결 론

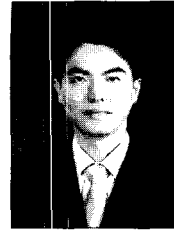
본 논문은 무선센서네트워크용 IEEE 802.15.4에서 실시간 트래픽 전송 보장을 위해 GTS 슬롯을 할당하는 스케줄링 방식과 이를 위한 프레임과 부프레임 길이에 대한 파라미터들을 결정하는 방법을 제안하였다. 네트워크에서 각 노드에 요구되는 송신 비트량과 주기 등의 요구사항이 주어지면, 비콘 주기는 요구된 주기와 듀티 사이클을 고려하여 선택되고, 요구된 대역폭과 에너지 절약을 제공하기 위하여 활성 부프레임 길이를 선택한다. IEEE 802.15.4의 프레임과 비콘의 주기적인 전달을 GTS와 결합하여 이용하면 주기적인 시간 제약을 보장할 수 있기 때문에, 실시간 주기 트래픽의 전송을 위해서 GTS를 사용한다. 본 연구의 성능 평가로는 다른 길

이의 프레임과 부프레임에서의 스루풋을 계산하였고, 이들 결과를 이용하여 노드 에너지를 포함한 네트워크 자원을 효율적으로 이용하기 위한 프레임/부프레임 길이와 GTS 스케줄을 결정할 수 있음을 보여주었다. 제안된 방식과 실시간 트래픽에 대한 분석은 센서네트워크를 포함한 다양한 실시간 응용에서의 IEEE 802.15.4 또는 지그비에서의 프레임과 부프레임의 체계적인 설계를 향한 첫 번째 단계가 될 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] Hayoung Oh, Bahn, H., and Ki-Joon Chae, vol. 51, Issue 3, pp. 836-839, Aug. 2005.
- [2] A.R. Al-Ali, Y.R. Aji, H.F. Othman, and F.T. Fakhreddin, pp. 536 - 540, March 2005.
- [3] E. Callaway, P. Gorday, L. Hester, J.A Gutierrez, M. Naeve, B. Heile, V. Bahl, "vol. 40, Issue 8, pp. 70-77, Aug. 2002.
- [4] ZigBee-Alliance: ZigBee specification, 2005.
- [5] Crossbow, MICAz datasheet <http://www.xbow.com>, 2004.
- [6] Hyung Seok Kim, Tarek Abdelzaher, and Wook Hyun Kwon, "Dynamic delay-constrained minimum-energy dissemination in wireless sensor networks," ACM transactions on Embedded Computing Systems. Vol. 4, No.3, pp. 679-706, 2005.
- [7] Anis Koubaa, Eduardo Tovar, and Mario Alves, "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), Rhode Island, Greece, 2006.
- [8] Anis Koubaa, Eduardo Tovar, and Mário Alves, "i-GAME: An Implicit GTS Allocation Mechanism in IEEE 802.15.4," in Proc. of the 18th Euromicro Conference on Real-Time Systems (ECRTS'06), Dresden, Germany, Jul, 2006.
- [9] IEEE TG15.4b, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE Standard for Information technology pp.1-305, 2006.

### 저 자 소 개



김 형 석(정회원)

1996년 서울대학교 전기공학부  
학사 졸업.

1998년 서울대학교 전기공학부  
석사 졸업.

2004년 서울대학교 전기컴퓨터  
공학부 박사 졸업.

2002년~2003년 버지니아대학 방문 연구원.

2004년~2006년 삼성전자 통신연구소 책임연구원.

2006년~현재 세종대학교 교수.

<주관심분야 : 무선네트워크, 휴대인터넷>