

# IEEE 802.15.4 기반의 무선 제어 망을 위한 실시간 전송기법에 대한 연구

## Real-Time Transmission Method of Wireless Control Network using IEEE 802.15.4 Protocol

이정일\*, 최동혁\*\*, 김동성\*\*\*  
(JungIl Lee, Dong-Hyuck Chol and Dong-Sung Kim)

**Abstract :** In this paper, a real-time transmission algorithm based on IEEE 802.15.4 is proposed. The superframe of IEEE 802.15.4 is applied to the transmission method of real-time mixed data (periodic data, sporadic data, and non real-time message). The simulation results show the real-time performance of sporadic data is improved by using the proposed transmission algorithm.

**Key Words :** 무선 필드버스, 실시간 혼합 데이터, IEEE 802.15.4 슈퍼프레임, GTS

### 1. 서론

무선 통신 기술의 비약적인 발전으로 인해 근거리 무선 통신 기술을 필드버스에 적용하려는 연구들이 시도되어 지고 있다 [1]. 제어용 산업 통신망에서 활발하게 연구가 진행된 분야 중에 하나는 IEEE 802.11기반의 무선 필드버스 기술이라 할 수 있다. 하지만, IEEE 802.11 기술은 단독으로 적용되기 보다는 유선 필드버스와 결합된 형태로 소개되어 졌다. 그 예로 Profibus와 IEEE 802.11을 결합하는 하이브리드(Hybrid) 형태의 무선 필드버스가 제안되었다 [2][3]. 이러한 하이브리드 형태의 필드버스의 한 예로 R-Fieldbus라는 기술이 제안되기도 했다 [4].

IEEE 802.11 기술은 고가의 노드 가격으로 인해 설치비용이 증가한다. 또한, 비교적 큰 전력 소모로 인한 지연 확산(delay spectrum)등의 문제점이 있다. 대용량 데이터 전송이 용이하다는 장점에도 불구하고, 이러한 문제점들은 IEEE 802.11 기술의 무선필드버스로의 적용을 어렵게 하고 있다.

IEEE 802.15.1 표준의 블루투스 기술을 이용한 무선 제어 기술도 제안 되었다 [5]. 블루투스는 노드의 가격도 저렴하고 전송속도(723Kbits/s, 2.4GHz ISM)도 비교적 빠르지만, 지원 가능한 노드 수가 극히 제한적이며 전송거리가 짧아서 다수의 센서와 구동기가 위치하는 넓은 현장에서 사용하는 것은 불가능하다.

IEEE 802.15.4는 무선 센서와 제어장치를 위한 특수한 요구사항을 만족하면서 저비용, 저전력을 목적으로 하는 저속 근거리 무선 통신 기술이다 [6]. 이러한 장점에도 불구하고, IEEE 802.15.4 기술을 필드버스에 적용하기 위해서는 실시간 성능을 지원하는 통신 기법이 요구된다.

본 논문에서는 IEEE 802.15.4에 기반한 무선 필드 버스 프레임 설계 방법과 실시간 주기 I/O 데이터 스케줄링 기법을 제안하고자 한다.

### 2. 실시간 전송기법

#### 1. 수정된 슈퍼프레임 구조

그림 1은 실시간 트래픽을 지원하기 위한 수정된 슈퍼프레임의 구조를 나타낸다. 실시간 주기 데이터는 CFP 구간에서 전송되고 실시간 긴급데이터와 비실시간 메시지 데이터는 CAP 구간에서 전송된다. 본 논문에서는 실시간 주기 데이터의 전송을 위한 기본 주기를 결정함에 있어서 슈퍼프레임의 길이를 사용한다. 또한 지연시간을 최소화하기 위해서  $O_s = BO = 0$ 로 설정하여, 15.36 ms의 최소 슈퍼프레임 주기를 사용한다 [6].

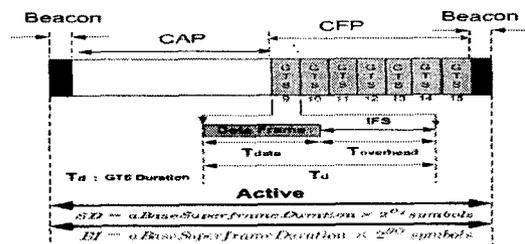


그림 1. 수정된 슈퍼프레임 구조

만약, 15.36 ms보다 낮은 시간 안에 전송되기를 원하는 데이터가 있다면 이는 거부된다. 산업 환경에서의 대부분의 데이터는 주기 데이터이므로, 최대 할당 가능한 GTS 구간인 7개 모두를 사용하는 것이 바람직하다.

슈퍼프레임의 active구간은 총 16개의 동일한 크기를 가지는 시간 구간(Time Slot)으로 구성된다. 따라서, 15.36 ms의 주기를 가지는 슈퍼프레임에서 하나의 시간 구간은 0.96 ms에 해당한다. 조정자 노드에게는 데이터의 길이와 IFS를 고려하여 할당되는 GTS의 수를 결정할 책임이 있다. 주기 데이터가 연결설정 없이 전송된다고 한다면, 할당되는 GTS의 수는 식 (1)과 같이 계산되어질 수 있다.

$$T_{NGT} = \left\lceil \frac{T_O + T_d + IFS}{T_{slot}} \right\rceil$$

$$IFS = \begin{cases} T_d \leq 5 \text{ byte}, & IFS = SIFS = 6 \text{ byte}, \\ T_d > 5 \text{ byte}, & IFS = LIFS = 20 \text{ byte}. \end{cases} \quad (1)$$

#### 저자 소개

- \* 이정일: 금오공과대학 전자공학부 석사과정
- \*\* 최동혁: 포스콘 기술연구소 연구원
- \*\*\* 김동성: 금오공과대학교 전자공학부 조교수

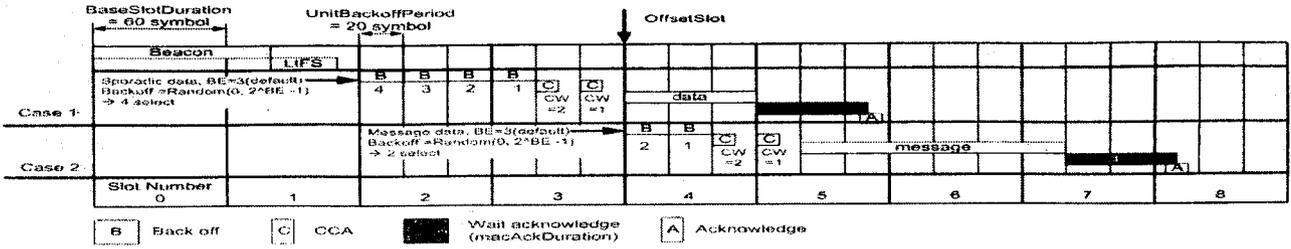


그림 3. CAP 구간에서의 타이밍 차트

식 (1)에서  $T_{NGT}$ 와  $T_0$ 는 각각 할당된 GTS 구간의 수와 IEEE 802.15.4 데이터 프레임에서 순수 데이터 부분을 제외한 나머지 길이를 의미한다. 2 byte의 주소 지정 방식을 사용하므로,  $T_0$ 는 19 byte가 된다. 만약 데이터의 길이가 5 byte보다 작다면 할당되는 GTS의 수는 1로 계산되어 진다. 산업 환경에서 대부분의 주기 데이터는 5 byte를 넘지 않기때문에, 실시간 주기 데이터는 하나의 GTS 내에서 전송이 가능하다.

## 2. CAP 구간에서의 실시간 긴급 데이터와 비실시간 메시지의 전송기술

그림 2는 본 논문에서 제시한 CAP 구간에서의 대역폭 관리 기법을 나타낸 것이다. CAP 구간은 슈퍼 프레임 구간의 반 이상을 점유 때문에 효율적인 대역폭 관리 기법이 요구된다. CAP 구간은 비콘 프레임이 시작함과 동시에 바로 나타난다. 이때 조정자 노드는 실시간 긴급 데이터를 전송하고자 하는 노드가 있는지를 조사한 후 만약 그러한 노드가 감지되었다면, CAP 구간에 남아있는 구간의 수와 요구된 타임 구간의 수를 비교한다. 여유가 있다면, 실시간 긴급 데이터를 전송한다. 이러한 경우 1을 그림 3에 나타내었다.

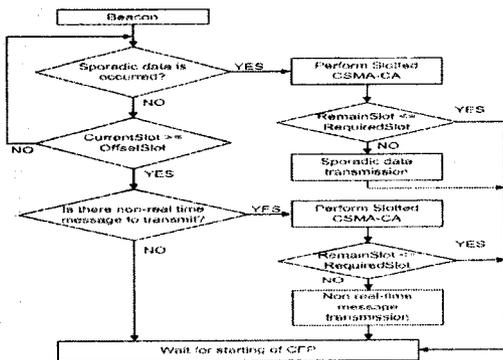


그림 2. CAP 구간에서의 대역폭 관리 기법

그림 3의 경우 2는 OffsetSlot 후에 비실시간 메시지 데이터를 전송하고자 하는 노드가 채널을 먼저 접근할 경우를 묘사한다. OffsetSlot의 역할은 실시간 긴급 데이터를 가지는 노드에게 채널 접근의 우선순위를 주기 위함이다. 즉, 조정자 노드가 비실시간 메시지 데이터를 전송하고자 한다면, OffsetSlot의 발생 전에 채널로 접근하는 실시간 긴급 데이터 노드가 존재하지 않아야 함을 의미한다. OffsetSlot은 실시간 긴급 데이터가 전송될 확률을 높여주기 위한 여유시간의 역할을 한다.

## 3. GTS 할당 알고리즘

본 논문에서는 GTS 요청 프레임 안에 1 Byte의 데드라인 (deadline)을 추가하여 주기 데이터 노드의 유지 및 관리를 한다. 데드라인 필드에는 주기데이터가 전송 정보를 조합 시킬 수 있다. 조정자 노드는 주기 데이터 노드에 대한 주소와 데드라인을 가지는 스케줄링 표를 가지게 되는데 이 표에 근거하여, 주기 데이터 노드들에게 GTS를 할당하고 스케줄링을 하게 된다. 각각의 주기 노드에서의 데이터 전송을 스케줄링 하기 위해서는 슈퍼프레임의 주기가 결정되어야 한다. 각 노드의 데드라인에 근거하여,  $i$ 번째 실시간 주기 데이터 노드의 전송 주기가 식 (2) 와 같이 계산되어 진다.

$$T_{TP}^i = \left\lceil \frac{T_D^i}{T_{SF}} \right\rceil \times 16, \quad (2)$$

$T_{SF}$ 는 슈퍼프레임의 주기이고,  $T_{TP}^i$ 와  $T_D^i$ 는 각각  $i$  번째 실시간 주기 데이터 노드의 전송 주기와 데드라인을 의미한다. 슈퍼프레임의 총 구간의 수는 16개이고 이중 최대 GTS 구간의 수가 7개이다. 이를 이용하여 해당 노드에서의 전송 주기는 식 (3) 와 같이 계산되어 진다.

$$T_{UCT}^i = \frac{T_{TP}^i}{16} \times 7, \quad (3)$$

여기서,  $T_{UCT}^i$ 는  $i$ 번째 실시간 주기 데이터 노드에서 할당 가능한 GTS를 의미한다. 따라서 임의의  $n$ 개의 실시간 주기 노드에서 GTS의 이용률은 식 (4)과 같이 계산되어 질 수 있다.

$$U_{GTS} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_{UCT}^i} \leq 1, \quad (4)$$

여기에서  $U_{GTS}$ 는 GTS의 이용률에 해당한다. 그러므로 식 (4)가 만족된 GTS가 할당 가능함을 의미한다. 예를 들어, 새로운 주기 데이터 노드가 네트워크에 삽입된다면, GTS 할당은 다음 순서에 따라 수행된다.

1. 삽입된 실시간 주기 데이터 노드는 수정된 GTS 요청 프레임을 조정자 노드에게 전송한다.
2. 조정자 노드는 식 (2)와 받은 GTS요청 프레임을 이용하여 식 (4)의 GTS 할당 가능성을 검사한다.
3. 식 (4)에 의해 GTS가 할당가능하다면, 새로운 노드를 스케줄링 표에 삽입하고 스케줄링 표를 갱신한 후에 GTS를 할당한다.
4. 만약 식 (4)가 만족되지 않았다면, 조정자 노드는 GTS 요청을 거부한다.

## 3. 모의실험

모의실험 환경은 2.4GHz 대역의 단일 PAN으로 구성하였다. 또한 주기 데이터의 실시간성을 고려하여 비 연결설정(Non Acknowledge) 전송 모드를 사용했다. 각각의 실시간 주기

데이터 노드에게 하나의 GTS를 할당하기 위해서 주기 데이터의 길이는 5 Byte이하로 설정하였다. 모의실험에 사용된 노드의 수는 10개이며, 데드라인, 실시간 주기, 할당 가능한 GTS 수 등은 표 1에 나타내었다. 할당 가능한 GTS의 수는 아래와 같이 계산되어 진다.

$$U_{GTS} = \left(\frac{1}{7} \times 3\right) + \left(\frac{1}{21} \times 5\right) + \left(\frac{1}{42} \times 2\right) \approx 0.71$$

표 1. 모의실험을 위해 사용된 데드라인, 실시간 주기, 할당 가능한 GTS의 수

Node No.	$T_D(ms)$	$T_{TP}(slot)$	$T_{UGT}(slot)$
1 ~ 3	20	16	7
4 ~ 8	50	48	21
9 ~ 10	100	96	42

모의실험 결과는 그림 4와 5에 나타내었다. x축은 모두 Offset 구간의 수를 의미한다. 그림 4에서의 y축은 수신된 비실시간 메시지 데이터 간의 시간 간격의 평균을 의미한다. 그림 5의 y축은 수신된 실시간 긴급 데이터의 평균 지연시간을 의미한다. 평균 지연시간은 식 (5)에 나타내었다,

$$M_{Recv} = \frac{\sum_{i=1}^n \{T_g^i - T_R^i\}}{n} \quad (5)$$

표 2는 연속적인 6개의 슈퍼프레임에서의 GTS 할당 결과를 보여준다. 결과에서 비어있는 GTS 구간은 조정자 노드에 의해 관리되어 진다. 다음으로 CAP 구간에서의 성능 측정을 위해서 다음 가정이 사용되었다. 3개의 실시간 긴급 데이터 노드가 각각 초당 10, 20, 30 패킷을 발생시킨다. 비실시간 메시지 데이터 노드의 경우는 계속적으로 데이터 전송을 시도한다. 따라서 조정자 노드는 이 두 가지가 혼합된 데이터를 수신하게 된다.

표 2. GTS 할당 결과

Beacon No.	GTS Allocated Node Number							
1	1	2	3	4	5	6	7	
2	1	2	3	8	9	10	C	
3	1	2	3	C	C	C	C	
4	1	2	3	4	5	6	7	
5	1	2	3	8	C	C	C	
6	1	2	3	C	C	C	C	

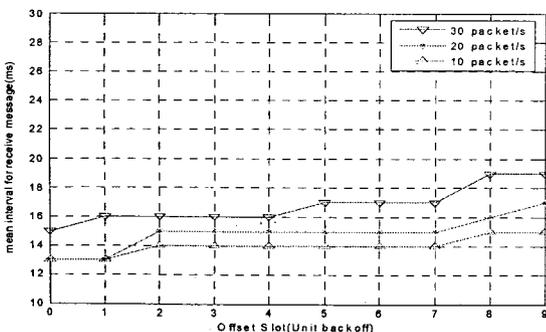


그림 4. 비실시간 메시지 데이터 수신 주기의 평균

$T_g^i$ 와  $T_R^i$ 는 각각  $i$ 번째 데이터의 생성 시간과 수신 시간을 의미한다.  $n$ 은 전송되는 데이터의 수를 의미한다. 그림 4에서, OffsetSlot의 수가 좀 더 증가하거나, 실시간 긴급 데이터의 패킷 생성이 점점 증가 한다면, 수신된 비 실시간 메시지 데이터의 시간 간격의 평균값은 증가됨을 보여주고 있다. 즉, 비실시간 메시지 데이터 전송 확률이 감소됨을 의미한다. 그림 5에서는 Offset 구간의 수가 증가함에 따라,  $M_{Recv}$ 이 감소함을 보여주고 있다. 즉, 증가된 Offset 구간 크기로 인해 실시간 긴급 데이터 전송 지연이 감소한 것이다.

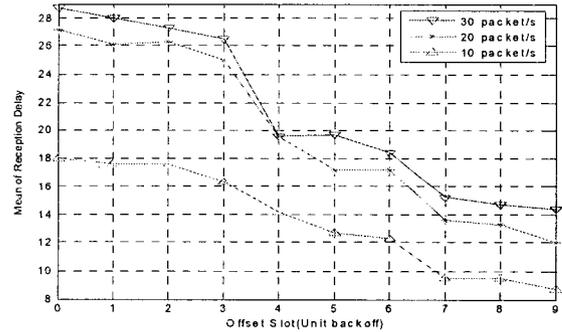


그림 5. 실시간 긴급 데이터의 전송지연의 평균

#### 4. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.15.4의 슈퍼프레임의 구조에 기반한 실시간 스케줄링 기법을 제안하였다. 실시간 비주기 긴급 데이터와 비실시간 메시지 데이터를 CAP 구간에서의 효율적인 대역폭 관리 기법을 통해 전송하는 메커니즘을 제안했으며, 실시간 주기 데이터의 경우는 GTS를 사용하여 전송하는 메커니즘을 제시하였다. 또한 제안된 실시간 스케줄링 및 전송 메커니즘을 통해, CAP 구간에서의 두 혼합 데이터가 효율적으로 전송됨을 보였다.

#### 참고문헌

- [1] Willig, A, Matheus, K. and Wolisz, A. "Wireless technology in industrial network" Proceedings of the IEEE, Vol. 93, Issue 6, June 2005
- [2] Willig, A. Investigations on MAC and link layer for a wireless PROFIBUS over IEEE 802.11. PhD thesis, TU Berlin, Germany, 2002.
- [3] Willig, A. "An architecture for wireless extension of PROFIBUS", The 29th Annual Conference on Industrial Electronics Society, Vol. 3, pp.2369-2375, 2003
- [4] Rauchhaupt, L. "System and device architecture of a radio based fieldbus—the RFieldbus system", Factory Communication Systems 2002, 4th IEEE International Workshop on, 2002, pp.185-192
- [5] Mahlknecht, S., "Virtual wired control networks: a wireless approach with Bluetooth", Africon Coference in Africa, 2002, IEEE AFRICON. 6th, Vol. 1, 2-4 pp. 269 - 272, Oct. 2002
- [6] IEEE 802.15.4 Standard-2003, "Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS)", IEEE-SA Standards Board, 2003.