

논문 2008-45SC-2-6

공장 환경에서의 무선 제어 시스템을 위한 센서네트워크의 동적 스케줄링 기법에 대한 연구

(Dynamic Scheduling Method of Wireless Control System in Factory Environment)

이 정 일*, 김 동 성**

(JungIl Lee and Dong-Sung Kim)

요 약

본 논문에서는 근거리 저속 무선 기술인 IEEE 802.15.4 이용한 무선 제어 시스템의 구현을 위해 동적 스케줄링 및 전송 기법을 제안하였다. 제안된 스케줄링 기법은 공장 환경에서 주어진 시간 구간 내에 실시간 혼합 데이터(실시간 주기 데이터, 긴급 데이터, 비실시간 메시지 데이터)를 효율적으로 처리하는 기능을 제공한다. 이를 위하여 IEEE 802.15.4의 슈퍼프레임의 구조적 특징을 응용하여 실시간 혼합 데이터의 효율적인 전송을 위한 동적 스케줄링 기법을 설계했다. 제안된 기법은 실시간 및 비실시간 데이터 간에 독립적인 처리 알고리즘을 적용하기 때문에 전체적인 제어 네트워크의 성능 향상을 가져올 수 있다. 제안된 알고리즘의 효용성을 증명하기 위하여 OPnet Modeler 기반의 IEEE 802.15.4 시뮬레이션 모델을 구현하고 주어진 주기 및 긴급 데이터를 이용하여 제안된 기법이 실시간성 향상에 기여함을 보였다.

Abstract

In this paper, a dynamic GTS scheduling method based on IEEE 802.15.4 is proposed for wireless control system. The proposed method can guarantee a transmission of real-time periodic and sporadic data within the time frame in factory environment. The modified superframe of IEEE 802.15.4 was used to the dynamic scheduling method of real-time mixed traffic(periodic data, sporadic data, and non real-time message). By separating CFP and CAP properly, the sporadic and non real-time messages are transmitted effectively and guarantee real-time transmission within a deadline. The simulation results show the improvement of real-time performance of periodic and sporadic data.

Keywords : 무선 제어 시스템, 실시간 동적 스케줄링 기법, 실시간 혼합 데이터, IEEE 802.15.4 슈퍼프레임

I. 서 론

무선 제어 망 기술은 장치의 이동성을 제공하고 설치와 유지/보수 등이 용이하다는 장점들을 가지고 있어 공장 및 발전소 환경에서 적용하려는 연구들이 시도되고 있다^[1~3]. 이를 위해서는 주기성을 가진 많은

수의 입출력 노드의 지원과 실시간 전송의 문제 등이 해결되어야한다^[4].

무선 제어 망 구현을 위해 적용할 수 있는 상용 무선 통신 기술로는 IEEE 802.11 표준의 무선 랜 기술과 IEEE 802.15.1 표준의 블루투스 기술, 저속 근거리 무선 통신인 IEEE 802.15.4 기술 등이 있다.

IEEE 802.11기반의 무선 제어 망 기술은 최근 들어 활발하게 연구가 진행된 분야 중에 하나이다. 대부분의 관련 연구 들은 IEEE 802.11 무선망 기술을 단독으로 적용하기 보다는 유선 필드버스와 결합된 형태로 소개되어 졌다. 그 예로 Profibus와 IEEE 802.11을 같이 사용한 하이브리드(Hybrid)형태의 무선 제어 망 기

* 학생회원, ** 정회원, 금오공과대학교 전자공학부 (School of Electonic Engineering, Kumoh National Institute of Technology)
※ 본 논문은 구미전자산업진흥원의 소재·부품·모듈 핵심기술개발 사업 연구비에서 지원하여 연구하였습니다.
접수일자: 2007년3월30일, 수정완료일: 2008년2월29일

술이 제안되었다^[4~6]. 이러한 하이브리드 형태의 필드 버스의 예로 R-Fieldbus라는 기술이 제안되기도 했다 [7~8].

IEEE 802.11 기술은 고가의 노드 가격으로 인해 설치비용이 증가와 큰 전력 소모로 인한 문제점들이 있다. 대용량 데이터 전송이 용이하다는 장점에도 불구하고, 이러한 문제점들은 IEEE 802.11 기술의 무선 필드버스로의 적용을 어렵게 하고 있다.

IEEE 802.15.1 표준의 블루투스 기술을 이용한 무선 제어기술도 제안 되었다^[9]. 블루투스는 노드의 가격도 저렴하고 전송속도도 비교적 빠르지만, 지원 가능한 노드 수가 극히 제한적이며 전송거리가 짧아서 다수의 센서와 구동기가 위치하는 넓은 산업 현장에서 사용하는 것은 어렵다.

IEEE 802.15.4는 무선 센서와 제어장치를 위한 특수한 요구사항을 만족하면서 저비용, 저 전력을 목적으로 하는 저속 근거리 무선 통신 기술이다^[10]. 많은 입출력 노드의 지원과 함께 실시간적 요구 사항이 매우 엄격하지 않은 산업 환경에서는 IEEE 802.15.4가 모니터링 용도로 충분히 고려될 수 있다. 산업 환경에서의 대부분의 데이터는 4 바이트 이하의 주기적인 입출력 데이터이므로 주기적인 입출력 데이터를 지원 하면서 많은 입출력 노드 수를 요구하는 필드버스 환경에 적합한 장점들을 가진다. 하지만, 하위레벨의 장치들의 제어를 지원하기 위해서는 실시간성 및 신뢰성의 보장이 필요하다.

본 논문에서는 저속 근거리 무선 통신인 IEEE 802.15.4를 기반으로 하는 무선 제어 망의 실시간성 및 신뢰성을 향상시키기 위하여 동적 실시간 전송 기법을 제안하고자 한다. 이를 위하여 효과적인 실시간 주기 데이터 전송을 위해 동적 GTS (Guaranteed Time Slot) 할당 및 스케줄링 알고리즘을 설계 및 구현하고 모의실험을 통해 성능을 측정하였다.

II. 무선 제어 네트워크의 프레임 구성

1. 슈퍼 프레임 구성

IEEE 802.15.4의 슈퍼프레임은 그림 1과 같이 비콘 프레임, CAP(Contention Access Period) 구간, CFP(Contention Free Period) 구간의 세 부분으로 구성 된다^[10]. CFP 구간은 최대 7개의 GTS로 구성된다.

IEEE 802.15.4에서는 CAP 구간에서의 비콘의 허용 여부에 따라 허용모드와 비 허용 모드를 지원한다. 비

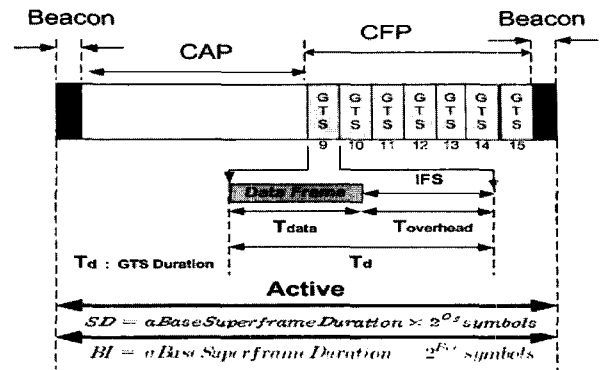


그림 1. 수정된 슈퍼프레임 구조 및 GTS 구간
Fig. 1. Modified Superframe structure and GTS Duration.

콘 허용모드에서는 CAP 구간 내에서 Slotted CSMA/CA 기법을 사용한다. 비콘 비 허용 모드에서는 CFP 구간을 지원하지 않기 때문에 대부분 비콘 허용모드를 사용 한다^[10].

2. 비콘 프레임 설정

비콘 프레임에는 CAP 구간과 CFP 구간의 길이 등에 관한 정보와 GTS를 할당 받는 노드의 주소 등이 포함되어 있다.

그림 2는 수정된 IEEE 802.15.4 비콘 프레임 구조를 보여 준다^[10]. 데이터 전송의 실시간성을 향상시키고 전송 프레임의 오버헤드를 최소화하기 위하여 비콘 페이로드, GTS 연결방향(Uplink인지 Down-link를 표시), 대기 주소 목록(Pending Address List) 필드 등을 사용하지 않는다. GTS를 획득한 노드에 대한 정보를 저장하기 위한 목록은 사용 된다. 각각의 실시간 주기 데이터 노드가 하나씩의 GTS를 점유하고자 할 때, 최대 할당 가능한 GTS의 수가 7개이다. GTS를 획득한 각각의 실시간 주기 노드 정보를 기억하기 위해서는 3 바이트가 필요하게 된다. 결과적으로 21 바이트의 크기가 필요하므로 7개의 GTS를 사용 시에 구성되는 비콘 프레임의 최대 크기는 40 바이트가 된다.

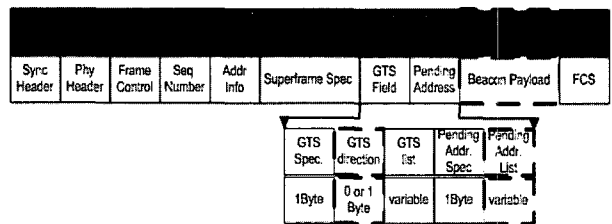


그림 2. IEEE 802.15.4 비콘 프레임
Fig. 2. Beacon Frame Format in IEEE 802.15.4.

3. CAP/CFP(Contention Access and Contention Free Period) 구간의 관리

CAP 구간에서는 비주기 긴급 데이터 및 비 실시간 메시지 데이터의 전송이 동시에 이루어진다. 조정자 노드는 망을 구성하고, 노드의 추가 탈퇴 등을 확인하는 메시지 데이터를 송수신한다. 따라서 효율적인 CAP 구간 활용을 위해서는 비주기 긴급 데이터 전송을 위한 구간과 비 실시간 메시지 데이터 전송을 위한 구간을 동시에 관리할 필요성이 있다.

비콘 프레임 전송 후 조정자 노드는 일정시간 동안 채널을 감시 할 것이다. 이때 비주기 긴급 데이터 전송 노드들이 채널에 접근하여 자신들의 데이터를 전송하고자 할 때, 일정시간 동안 비주기 긴급 데이터 전송 노드의 접근이 감지되지 않았다면, 조정자 노드는 채널 감시를 중단하고, CFP 구간이 시작되기 전까지 네트워크의 관리를 위한 메시지 데이터를 전송할 수 있게 한다.

CFP 구간은 IEEE 802.15.4 슈퍼프레임의 총 16개의 구간 중에서 최대 7개를 차지하므로 이 구간은 최대 할당 가능한 GTS의 구간 수를 의미한다. 나머지 구간은 비콘 프레임과 CAP 구간에서 사용된다. GTS는 실시간 주기 데이터를 전송하는 노드에게 할당된다. 비콘 프레임을 수신한 노드들은 GTS 목록을 확인하고, 자신의 GTS 구간 번호에서 실시간 주기 데이터를 전송할 수 있다. 이때, 해당 실시간 주기 데이터 노드는 자신의 GTS 구간 이내에 데이터 전송과 IFS(Inter Frame Space)를 종료해야 한다.

IFS의 크기는 전송 데이터의 길이가 24 바이트 이상일 경우 최소 20 바이트 이상이어야 하고, 그 이하일 경우 최소 6 바이트 이상이어야 한다. 2 바이트의 어드레스와 PAN ID를 사용한다면 IEEE 802.15.4의 데이터 프레임은 19 바이트의 오버헤드가 포함된다. 따라서 실시간 주기 데이터 노드가 전송하고자 하는 데이터의 크기가 5 바이트 이하일 경우에는 하나의 GTS로 가능하지만, 초과할 경우에는 2개 이상의 GTS를 할당받아야 한다.

III. 실시간 스케줄링 방법과 네트워크의 관리

1. 슈퍼프레임 구성

실시간 주기 데이터는 CFP 구간에서 전송되고 실시간 긴급데이터와 비실시간 메시지 데이터는 CAP 구간에서 전송된다. 실시간 주기 데이터의 전송을 위한 기

본 주기를 결정함에 있어서 슈퍼프레임의 길이를 사용할 수 있다. 슈퍼프레임의 길이는 지연시간의 최소를 위해 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$T_{SF} = T_{BD} \times 2^{O_s} \quad (T_{BD} = 480Byte, 0 \leq O_s \leq 15) \quad (1)$$

여기서, T_{SF} 와 T_{BD} 는 슈퍼프레임의 길이와 주기를 의미한다. O_s 는 슈퍼프레임의 순서로써, MAC PIB 안에서 정의한다. IEEE 802.15.4의 평균 전송률은 250 kbps이기 때문에, 슈퍼프레임의 주기가 15.36 ms로 정해지면 O_s 는 0이 된다. 만약, 15.36 ms보다 낮은 시간 안에 전송되기를 원하는 데이터가 있다면 이는 거부된다. 산업 환경에서 대부분의 데이터는 주기 데이터이므로, 최대 할당 가능한 GTS 구간인 7개 모두를 사용하는 것이 바람직하다.

$$T_{slot} = T_{Bslot} \times 2^{O_s} (T_{Bslot} = 30 byte). \quad (2)$$

식 (2)에서 T_{slot} 와 T_{Bslot} 은 한 구간의 길이와 기본 구간의 길이를 의미 한다. 만약, O_s 가 0 이면, 하나의 구간 길이 T_{slot} 는 0.96 ms로 계산되어 진다. 조정자 노드에게는 데이터의 길이와 IFS를 고려하여 할당되는 GTS의 수는 식 (3)과 같이 계산되어질 수 있다.

$$T_{NGT} = \left\lceil \frac{T_o + T_d + IFS}{T_{slot}} \right\rceil, \quad IFS = \begin{cases} T_d \leq 5 byte, & IFS = SIFS = 6 byte, \\ T_d > 5 byte, & IFS = LIFS = 20 byte. \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)에서 T_{NGT} 와 T_o 는 각각 할당된 GTS 구간의 수와 IEEE 802.15.4 데이터 프레임에서 순수 데이터 부분을 제외한 나머지 길이를 의미한다. 2 바이트 주소 지정 방식을 사용하므로, T_o 는 19 바이트가 된다. 만약 데이터의 길이가 5 바이트보다 작다면 할당되는 GTS의 수는 1로 계산되어 진다. 따라서 실시간성 주기 데이터는 하나의 GTS 내에서 전송이 가능하다.

2. CAP 구간에서의 실시간 긴급 데이터와

비실시간 메시지 데이터 처리 기술

그림 3은 본 논문에서 제시한 CAP 구간에서의 대역폭 관리 기법을 나타낸 것이다. CAP 구간은 슈퍼프레임의 50% 이상을 차지하므로 효율적인 대역폭 관리 기법이 요구된다. 산업용 환경에서는 실시간 긴급 데이터가 비실시간 메시지 데이터보다 중요하므로, 실

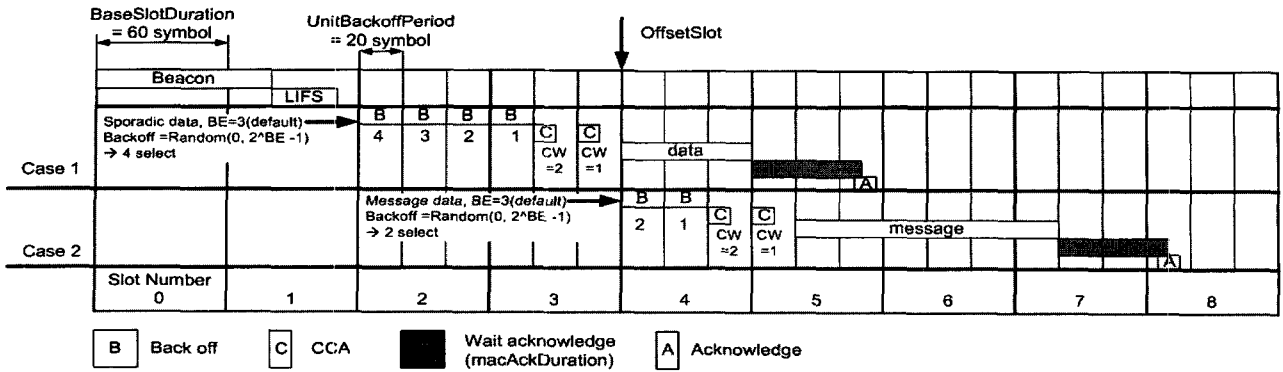


그림 4. CAP 구간에서의 타이밍 차트
Fig. 4. Timing chart in CAP duration.

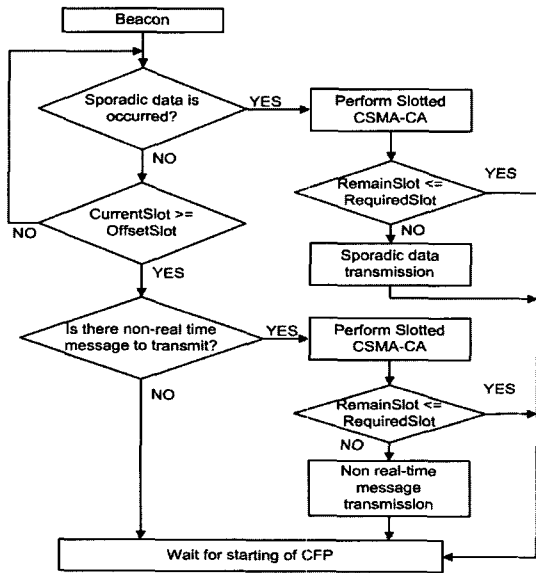


그림 3. CAP 구간에서의 대역폭 관리 기법
Fig. 3. Bandwidth management method in CAP duration.

시간 긴급 데이터의 전송 효율을 보장하는 기술이 필요하다.

CAP 구간은 비콘 프레임에 이어 나타난다. 이때 조정자 노드는 실시간 긴급 데이터를 전송하고자 하는 노드가 있는지를 조사한 후 전송 노드가 감지된다면, CAP 구간에 남아있는 구간의 수와 요구된 타임 구간의 수를 비교한다. 여유구간이 있다면, 실시간 긴급 데이터를 전송한다. 그림 4의 경우 1이 이에 해당된다.

그림 4의 경우 2는 오프셋 구간 (OffsetSlot) 후에 비실시간 메시지 데이터를 전송하고자 하는 노드가 채널을 먼저 접근할 경우를 나타낸다. 오프셋 구간의 역할은 실시간 긴급 데이터를 가지는 노드에게 채널 접근의 우선순위를 주기 위함이다. 즉, 조정자 노드가 비실시간 메시지 데이터를 전송하고자 한다면, 오프셋 구간의 발생 전에 채널로 접근하는 실시간 긴급 데이

터 노드가 존재하지 않아야 함을 의미한다. 오프셋 구간은 실시간 긴급 데이터가 전송될 확률을 높여주기 위한 역할을 한다.

3. GTS 할당 알고리즘

본 논문에서는 그림 5에서와 같이 GTS 요청 프레임 안에 1 바이트의 데드라인(deadline)을 추가하여 주기 데이터 노드의 유지 및 관리를 한다. 데드라인 필드에는 주기데이터의 전송 정보를 포함 시킬 수 있다. 조정자 노드는 주기 데이터 노드에 대한 주소와 데드라인을 가지는 스케줄링 표를 가지고, 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 주기는 식 (4) 와 같이 계산된다.

$$T_{TP}^i = \left\lfloor \frac{T_D^i}{T_{SF}} \right\rfloor \times 16. \tag{4}$$

T_{SF} 는 이고, T_{TP}^i 와 T_D^i 는 각각 i 번째 실시간 주기 데이터 노드의 전송 주기와 데드라인을 의미한다. 슈퍼프레임의 총 구간의 수는 16개이고 최대 GTS 구간의 수가 7개이다. 이를 이용하여 해당 노드에서의 전

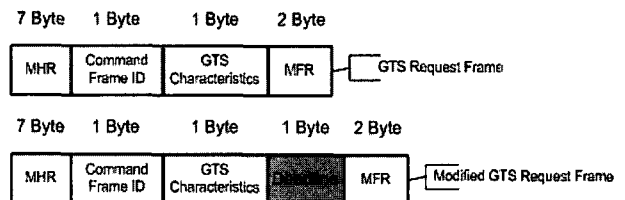


그림 5. 수정된 GTS 요청 프레임
Fig. 5. Modified GTS request frame.

송 주기는 식 (5)와 같이 계산되어 진다.

$$T_{UGT}^i = \frac{T_{TP}}{16} \times 7. \quad (5)$$

여기서, T_{UGT}^i 는 i 번째 실시간 주기 데이터 노드에서 할당 가능한 GTS를 의미한다. 따라서 임의의 n 개의 실시간 주기 노드에서 GTS의 이용률은 식 (6)과 같이 계산되어 질 수 있다,

$$U_{GTS} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_{UGT}^i} \leq 1. \quad (6)$$

여기에서 U_{GTS} 는 GTS의 이용률에 해당한다. 그러므로 식 (6) 조건의 만족은 GTS가 할당 가능함을 의미한다. 예를 들어, 새로운 주기 데이터 노드가 망에 추가된다면, GTS 할당은 다음 순서에 따라 수행된다.

1. 추가된 실시간 주기 데이터 노드는 수정된 GTS 요청 프레임에 조정자 노드에게 전송한다.
2. 조정자 노드는 식 (4)와 받은 GTS요청 프레임을 이용하여 식 (6)의 GTS 할당 가능성을 검사한다.
3. 식 (6)에 의해 GTS가 할당가능하다면, 추가된 노드를 포함해 스케줄링 표를 갱신한 후에 GTS를 할당한다.
4. 만약 식 (6)이 만족되지 않았다면, 조정자 노드는 GTS 요청을 거부한다.

비콘 프레임이 브로드캐스팅 되기 전에 실시간 주기 노드는 보완된 EDF(Earliest Deadline First Algorithm)^[11]에 의해 스케줄링 된다. 스케줄 된 결과를 바탕으로 실시간 주기 노드에 대한 GTS 할당 표를 계속적으로 갱신해 간다. 실시간 주기 노드가 데이터 전송을 마치면, 해당 노드의 정보를 스케줄링 표에서 삭제하여 다음 슈퍼프레임에서의 새로운 스케줄링에 대비한다. 이에 각 주기 데이터 노드의 데드라인 정보를 고려한 GTS 이용률을 계산하고 이를 통해 GTS 할당 가능성을 검사한다.

하지만, 이러한 GTS 할당 기법은 한 가지 한계점을 내포하고 있다. 동일한 실시간 주기 I/O 데이터 노드라 할지라도, 해당 GTS를 획득한 각 노드들의 데이터 전송률, 데이터의 지속성과 주기성은 다양하다. 이러한 차이를 가만하지 않고 앞서 조건에만 근거하여 해당 GTS를 노드에게 할당할 경우, 대역폭의 낭비는 물론 특정 노드가 오랫동안 GTS를 획득치 못하는 현상을

초래할 수가 있다. GTS를 획득한 특정 노드가 아무런 데이터 전송을 하지 않는 휴지기가 발생할 경우를 고려해 보자. 이때, 지속적인 GTS 요청을 통해 GTS를 획득하기를 원하는 노드가 존재한다고 할지라도, 해당 GTS를 이러한 노드들에게 할당할 수가 없다. 이미 해당 GTS는 기존 노드가 점유하고 있기 때문이다. 이러한 경우에는 휴지기에 들어간 노드의 GTS 할당 우선 순위는 줄이고 높은 GTS 요청을 나타내고 있는 노드의 해당 GTS 할당 우선순위를 높여줄 필요가 있다. 이것은 특정 GTS내에서의 각 실시간 주기 I/O 간의 데이터 지속성 여부에 따른 GTS 할당 우선순위를 동적으로 조절할 수 있는 기법이 필요함을 의미한다.

IV. GTS 트래픽 레벨에 기초한 동적 GTS 할당 알고리즘

1. GTS 요청 프레임

GTS를 할당받기를 원하는 주기 데이터 노드는 GTS 요청 프레임을 CAP구간에서 조정자 노드로 전송해야 한다. 조정자 노드는 GTS 허용 여부를 검사한 후에 GTS 요청이 받아들여진 주기 데이터 노드들의 목록을 새롭게 갱신한 후에 CAP 구간에서 이를 통지하게 된다. IEEE 802.15.4 표준에서는 FCFS(First Come First Service)방식으로 목록을 작성한다.

GTS를 해지하기를 원하는 주기 데이터 노드는 GTS 해지 요청 프레임을 조정자 노드로 전송해야 한다.

GTS 해지와 관련하여 IEEE 802.15.4 표준에서는 해지 타이머를 GTS 해지의 기준으로 사용한다. 즉, 해지 타이머에 기초한 특정 시간 범위 안에 재요청이나, 삭제 요구가 이루어지지 않으면, 해당 노드의 GTS를 조정자 노드가 강제적으로 해지토록 한 것이다. 해지 타이머의 시간 T_c 는 비콘 순서에 따라 식 (7)과 같이 두 가지 중에 하나로 결정된다.

$$T_c = SFD \times 2^n \quad (SFD: {}^n \text{ Frame Duration}) \quad (7)$$

$$(n = 2^8 - BO, 0 \leq BO \leq 8n = 1, 9 \leq BO \leq 14)$$

FCFS 기법과 타이머 시간에 기초한 GTS의 할당과 해지 방식은 각각의 실시간 주기 데이터 노드들의 다양한 트래픽 요구와 전송형태(데이터 전송의 지속성)에 동적으로 적용되기는 어렵다.

2. 지속적인 주기 데이터 전송

지속적인 주기 데이터 전송을 요구하는 노드일수록 더 높은 확률로 GTS를 할당받을 수 있어야 한다. 또한, 해당 GTS를 안정적으로 유지하고 있어야 한다. 이러한 노드는 CFP 구간에서 GTS를 통해 확보한 대역폭 안에서 보다 지속적인 주기 데이터 전송을 시도할 것이기 때문이다. 반대로 간헐적인 주기 데이터 전송을 보여주는 노드가 GTS를 획득할 경우에는 해당 GTS내의 대역폭 낭비를 가져오는 요인을 발생시킬 수 있다.

반면에, 지속적이고 높은 데이터 전송률을 요구하지는 않더라도, 반드시 전송되어야 하는 데이터를 가지는 실시간 주기 I/O 데이터 노드 또한 고려되어야 한다. 무엇보다도, 데이터 전송의 지속성 여부는 가변적인 요소이기 때문이다. 이처럼, 동일한 실시간 주기 데이터 노드라 할지라도, 주기 데이터 전송의 지속성 여부에 따라서 요구되는 GTS 트래픽은 다양하다.

이러한 GTS 트래픽의 다양성을 고려하지 않을 경우 계속적인 GTS 요청 프레임의 실패로 인해 전송 지연을 가지게 되는 실시간 주기 I/O 데이터 노드들이 발생할 수 있다. 경우에 따라서는, 장기간 GTS를 할당받지 못하는 노드들이 나타날 수 있다. 따라서 실시간 주기 데이터 노드간의 공평성을 고려한 GTS 할당과 해지 알고리즘이 필요하다.

3. GTS 트래픽 레벨을 고려한 동적 GTS 할당 알고리즘

그림 6은 각각의 실시간 주기 데이터 노드들의 GTS 트래픽 레벨 사이의 천이관계를 나타낸다. 그림 6의 우선순위 천이 메커니즘은 실시간 주기 노드의 안정적인 GTS 확보와 노드간의 데이터 전송의 공평성을 고려한 초기 GTS 할당 과정이다. 높은 레벨에 존재하고 있는 실시간 주기노드는 상대적으로 낮은 속도로 GTS 할당 우선순위 하락을 유도하고 낮은 레벨에 노드는 우선적으로 순위 상승을 유도하는 것이 알고리즘 핵심이다.

GTS 트래픽에 따른 각 주기 데이터 노드들의 우선순위를 결정하는 프로시저는 크게 두 가지 과정으로 이루어진다. 먼저 초기 GTS 트래픽을 검사하여, GTS 할당 및 스케줄링 테이블을 만드는 과정이 필요하다. 이를 그림 7의 순서도를 통해 나타내었다.

다음으로, 초기 상태의 설정이 완료되었다면, 그림 8와 같이 각 실시간 주기 노드들의 데이터 지속성과

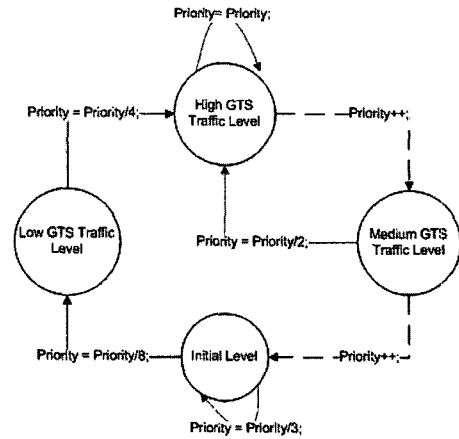


그림 6. GTS 트래픽의 4가지 레벨 상태 천이도
Fig. 6. State transition by GTS traffic.

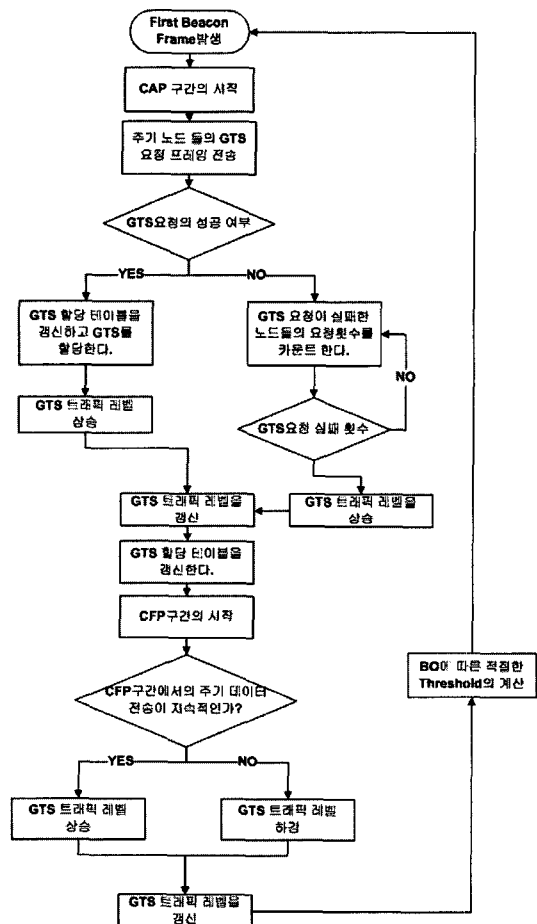


그림 7. 조정자 노드에 의한 초기 GTS 트래픽 레벨과 할당 테이블 완성과정
Fig. 7. Initial GTS traffic level and processor of making GTS allocate table.

GTS 요청의 빈도를 가만한 동적 GTS 할당 알고리즘을 계속적으로 수행 한다.

이때, 동적인 BO의 적용에 따른 문제를 고려해야 한다. BO(비콘 순서)가 증가하게 되면, 비콘 구간의 길이가 길어지게 되어 결과적으로 긴 슈퍼프레임이 만

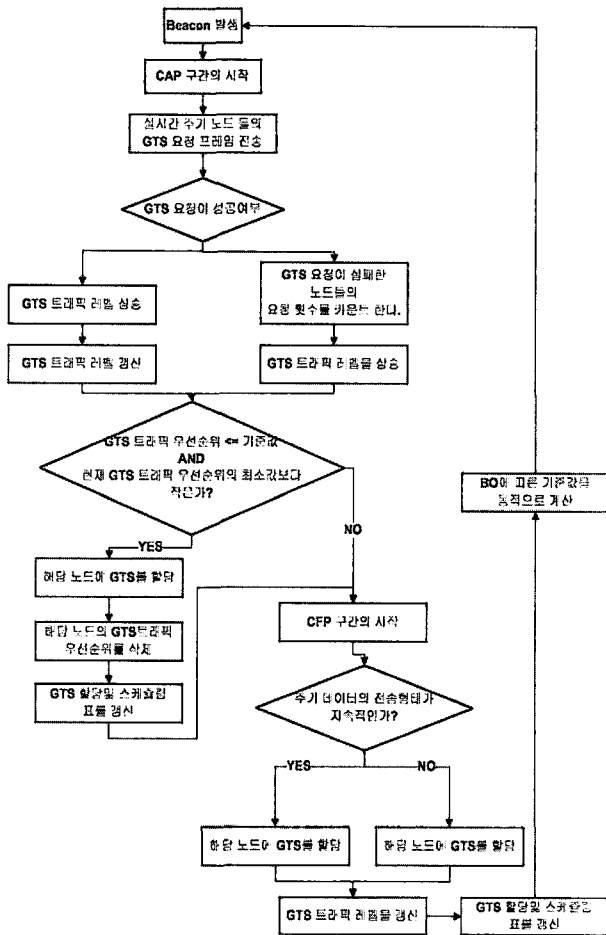


그림 8. 동적 GTS 할당 알고리즘
Fig. 8. Dynamic GTS allocating algorithm.

들어 지게 된다. 긴 슈퍼프레임은 확률적으로 단 한번의 GTS 요청을 시도하는 노드에게도 높은 우선순위를 줄 수 있는 상황을 만들 수 있다. 이는 비교적 긴 슈퍼프레임의 결과로 인해 길어진 CAP 구간 때문에 GTS 요청이 받아들여질 확률이 높아지기 때문이다. 이러한 경우 실제 상대적으로 더 높은 트래픽을 요구하는 노드들이 GTS를 할당받을 기회가 상실될 가능성이 존재한다. 이에 임계 기준 값(Threshold)의 개념을 도입할 필요가 있다. 매우 작은 기준 값을 설정하면 이보다 우선순위 값이 큰(우선순위가 낮은) 노드의 요청을 거부할 수 있다. 기준 값은 물론 BO 값에 따라 식 (8)과 같이 결정된다.

$$T_h = P_{Max} R^{BO}, 0 < R < 1. \quad (8)$$

T_h 는 기준 값을 의미하며, R 은 정수 값이다. 또한 P_{Max} 는 GTS 트래픽 우선순위 집합에서 가장 높은 값으로 가장 낮은 우선순위를 의미한다. 작은 기준 값을 정해주는 것은, 적은 횟수의 GTS 요청을 시도하는 노

Procedure Of GTS Allocation According to GTS Traffic

- 1: Investigate the initial GTS Traffic in CAP and CFP Period until second or third Superframe
- 2: Make GTS Traffic Priority Set $P_{set} = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$
- 3: Calculate the Threshold base on recent BO
- 4: do while(GTS Capacity is not overloaded)
- 5: if($(P_i \leq Threshold)$ and $(P_i \leq Min(P_{set}))$)
- 6: Allocate GTS into i th node in current superframe
- 7: Remove P_i from P_{set}
- 8: else then
- 8: Calculate GTS Request Fail Count in CAP Period
- 9: Update GTS Traffic Priority Set $P_{set} = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$
- 11: Count actual data transfer in CFP Period
- 12: Update GTS Traffic Priority Set $P_{set} = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$
- 13: GoTo line 4

그림 9. GTS 트래픽에 기초한 우선순위에 따른 GTS 할당 알고리즘

Fig. 9. GTS allocating algorithm by priority according to GTS traffic.

드들보다 빈번한 GTS 요청을 시도하는(GTS요청 프레임의 전송 주기가 매우 짧은) 노드들에게 더 높은 성공확률을 주는 것이다. 이러한 노드들은 지속적이고 높은 데이터 전송률을 가지는 노드일 확률이 크기 때문이다.

기준 값은 BO에 따른 슈퍼프레임의 길이에 따라 동적으로 결정되어야 한다. 반대로 작은 BO값에 의해 짧은 주기의 슈퍼프레임이 생성된다면, 기준 값을 크게 하여 상대적으로 작아진 CAP 구간의 길이로 인해 높은 GTS 트래픽을 요구하는 노드들이 피해를 보지 않도록 GTS 요청 성공확률을 보상해야 한다.

V. 시뮬레이션

본 장에서는 실시간 주기 데이터 및 긴급 데이터 전송에 대한 시뮬레이션 결과를 설명한다. 시뮬레이션을 위해서 단일 홉 환경의 아래 조건들을 가정 한다.

- 실시간 주기 데이터의 경우 확인(Acknowledge)를 사용하지 않는다.
- 실시간 주기 데이터의 길이는 산업용 환경을 고려하여 5 바이트 이하로 가정 한다^[12].

첫 번째 가정은 전송 지연을 최대한 방지하기 위해서 사용되었다. 두 번째 가정은 주기 데이터 노드에게 하나의 GTS를 할당하기 위해 사용되었다.

사용된 노드의 수는 10개이며, 데드라인, 실시간 주기, 할당 가능한 GTS 수 등은 표 1에 나타내었다.

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

Table 1. Deadline, real-time period, allocating GTS used for simulation.

노드 번호	$T_D(ms)$	$T_{TP}(slot)$	$T_{UGT}(slot)$
1~3	20	16	7
4~8	50	48	21
9~10	100	96	42

표 2. GTS 할당 결과

Table 2. Result of Allocating GTS.

비콘 번호	할당된 GTS 갯수						
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

할당 가능한 GTS의 수는 아래와 같이 계산되어 진다.

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

표 2는 연속적인 6개의 슈퍼 프레임에서의 GTS 할당 결과를 보여준다. 여기에서 비어있는 GTS 구간은 조정자 노드에 의해 관리되어 진다.

CAP 구간에서 실시간 긴급 데이터 노드의 매체 접근의 우위를 보장해 주기 위해서 오프셋 구간을 각 비실시간 메시지 데이터 노드들에게 적용하였다. 20개의 비실시간 메시지 데이터 노드가 사용되었다. 오프셋 구간은 실시간 메시지 데이터 노드들에게 각각 1에서 7까지 적용되도록 하였다.

본 논문에서 하나의 타임 구간 크기는 0.96ms에 해당하므로, 각 실시간 메시지 데이터 노드들은 CAP에서 Slotted CSMA/CA를 수행하기 전에, 1.92ms에서 6.72ms까지 기다리게 된다. 오프셋의 적용이 실시간 긴급 데이터 노드와 비실시간 메시지 데이터 노드의 평균 지연 시간과 평균 처리율에 어떠한 영향을 미치는지를 실험 하였다.

그림 10은 각 비실시간 메시지 데이터 노드들에 대해 오프셋 구간의 크기를 1~7로 증가시키면서 적용했을 때의 CAP에서의 노드들의 평균 매체 접근 지연 시간을 나타낸 것이다. 그림 11은 그림 10과 같은 조건에서의 각 노드들의 평균 처리율을 나타낸 것이다.

오프셋의 적용은 실시간 긴급 데이터의 매체 접근에

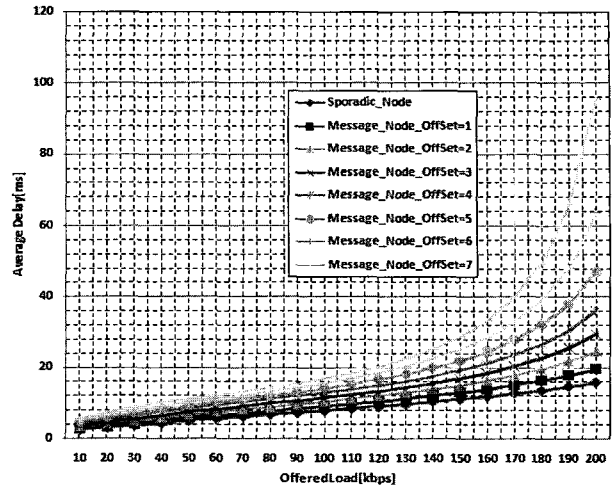


그림 10. 산발적 실시간 데이터의 평균 지연시간의 변화 (노드 수 : 20개)

Fig. 10. Variance of average delay time of Sporadic data. (Node No. : 20)

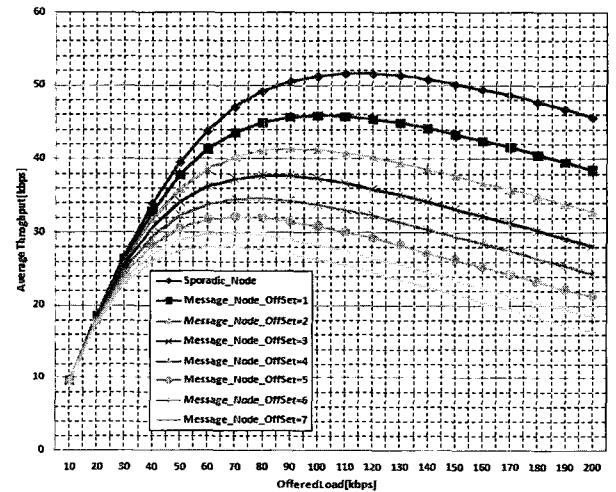


그림 11. 평균 처리율의 변화(노드 수: 20개)

Fig. 11. Variance of average throughput.

(Node No. : 20)

필요한 평균 지연 시간과 처리율 측면에서의 성능향상에 기여함을 알 수 있다. 반면, 그림 11의 오프셋 구간을 6에서 7개 정도로 적용했을 경우에서도 알 수 있듯이, 네트워크에 부하가 가중 될수록, 오프셋의 적용은 비실시간 메시지 데이터 노드의 전송을 방해하는 요인이 될 수 있다. 하지만, 실제 산업 환경에서는 입출력 데이터에 대한 트래픽에 비해 비실시간 메시지 데이터와 같은 트래픽은 작은 비중을 차지하기 때문에, CAP 내에서 지나친 트래픽이 발생하는 경우는 드물다. 따라서 오프셋의 활용을 통한 긴급 데이터의 노드의 실시간성을 충분히 보장해 줄 수 있다.

VI. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 무선 제어 시스템을 위해 IEEE 802.15.4의 GTS 트래픽을 고려한 동적 GTS 할당 및 스케줄링 기법을 제안하였다. 제안된 스케줄링 및 전송 메커니즘을 통해, CAP 구간에서의 두 혼합 데이터가 효율적으로 전송됨을 보였다. 이를 통해 산업용 환경에서 IEEE 802.15.4를 이용한 제어 네트워크의 응용 가능성을 볼 수 있다.

향후 과제로는 동적인 슈퍼프레임 길이의 조정이나, 실시간 주기노드간의 GTS 공유를 통한 대역폭의 효율적인 관리 방법 등을 고려해 볼 수 있다.

참고 문헌

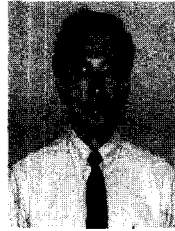
- [1] Willig, A, Matheus, K. and Wolisz, A. "Wireless technology in industrial network" Proceedings of the IEEE, Vol. 93, Issue 6, 2005.
- [2] Koumpis, K. et al. "Wireless industrial control and monitoring beyond cable replacement. International Conference on PROFIBUS", 2005.
- [3] Maury, M. "Realtime communications over IEEE 802.11e in industrial environments" Master's thesis, RIT, Sweden, 2005.
- [4] Willig, A. "Investigations on MAC and link layer for a wireless PROFIBUS over IEEE 802.11", PhD. thesis, TU Berlin, Germany, 2002.
- [5] Willig, A. "An architecture for wireless extension of PROFIBUS", The 29th Annual Conference on Industrial Electronics Society, Vol. 3, pp.2369-2375, 2003.
- [6] Lee, S., Lee, K. C. Lee, M. H. Harashima, F., "Integration of mobile vehicles for automated material handling using Profibus and IEEE 802.11 networks", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 49, Issue 3, pp. 693-701, 2002.
- [7] Rauchhaupt, L. "System and device architecture of a radio based fieldbus-the RFieldbus system", IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, pp.185-192, 2002.
- [8] Haehniche, J., Rauchhaupt, L., "Radio communication in automation systems: the R-fieldbus approach", IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, pp. 319 - 326, 2000.
- [9] Mahlkecht, S., "Virtual wired control networks: a wireless approach with Bluetooth", Africon Conference in Africa, 2002, IEEE AFRICON. 6th Vol. 1, 2-4 pp. 269 - 272, 2002.
- [10] 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.
- [11] Park, H.S., Kim, Y.H., Kim, D.S. and Kwon, W.H., "A Scheduling Method for Network Based Control Systems", IEEE Trans. on Control System Technology, Vol.10, pp.318-330. 2002.
- [12] F. De Pellegrini, D. Miorandi, S. Vitturi, and A. Zanella, "On the Use of Wireless Networks at Low Level of Factory Automation Systems," IEEE Trans. on Industrial Informatics, p p. 129-143, Vol. 2, No. 2, 2006.

저 자 소 개



이 정 일(학생회원)
 2005년 금오공과대학교
 전자공학부 학사졸업.
 2008년 동대학원 전자제어공학과
 석사 과정
 2008년 포스 데이터 인턴 연구원

<주관심분야 : 무선 제어 시스템, 산업용 통신망,
 임베디드 시스템>



김 동 성(정회원)
 1992년 한양대학교
 전자공학과 학사
 2003년 서울대학교 전기 및
 컴퓨터공학부 박사
 (전공: 산업용 통신망)
 2004년 Cornell 대학교 전기 및
 컴퓨터 WNL 박사후 연
 구원

2004년 3월~현재 금오공대 전자공학부 조교수,
 2007년 12월~현재 UC Davis, Computer
 Science, 네트워크 그룹 방문 교수

<주관심분야 : 산업용 통신망, 네트워크 기반 임
 베디드 시스템 설계 및 성능분석>