

비주기적 실시간 데이터 전송을 위한 IEEE 802.15.4 망의 동적 백오프 조정 기법에 대한 연구

A Dynamic Backoff Adjustment Method of IEEE 802.15.4 Networks for Real-Time Sporadic Data Transmission

이 정 일, 김 동 성*
(Jungll Lee and Dong-Sung Kim)

Abstract : In this paper, a dynamic backoff adjustment method of IEEE 802.15.4 is proposed for time-critical sporadic data in a noisy factory environment. For this, a superframe of IEEE 802.15.4 is applied to a real-time mixed data (periodic data, sporadic data, and non real-time message) transmission in factory communication systems. To guarantee a channel access of real-time sporadic(non-periodic) data, a transmission method using the dynamic backoff is applied to wireless control networks. For the real-time property, different initial BE, CW parameters are used for the dynamic backoff adjustment method. The simulation results show an enhancement of the real-time performance of sporadic emergency data. The proposed method provides the channel access of real-time sporadic data efficiently, and guarantee real-time transmission simultaneously within a limited timeframe.

Keywords : dynamic backoff adjustment method, IEEE 802.15.4 superframe, wireless control network, real-time sporadic data

I 서론

공장 환경에서는 실시간이 요구되어지는 기기이상, 오동작 등으로 인한 비주기적 긴급 데이터와 주기적 I/O 데이터들의 전송을 위해 유선 기반의 신뢰성 있는 필드버스 통신방식을 주로 사용하여 왔다. 최근 들어 무선 통신 기술의 발전으로 근거리 무선 통신 기술을 산업용 제어 네트워크에 적용하려는 연구들이 꾸준히 시도되고 있다[1-3]. 이러한 연구 방법들 중에서 IEEE 802.15.4는 블루투스나 무선 랜에 비해 무선 센서와 제어 장치를 위한 노드 수, 저비용 및 네트워크 구조 등의 특수한 요구사항들을 만족하는 저속 근거리 무선 통신 기술 중의 하나이다[4].

IEEE 802.15.4 기술은 많은 수의 노드를 지원하고 메시(Mesh) 네트워크를 통한 넓은 통신거리와 구현이 용이한 프로토콜 구조를 가지고 있다. 이러한 장점들은 무선 제어 네트워크로의 적용 가능성을 보여준다. 하지만, IEEE 802.15.4의 표준에서는 산업용 환경에서 요구되어지는 긴급 데이터 및 주기 데이터들의 실시간성과 신뢰성을 보장하는 전송 기법은 고려하지 않고 있다.

본 논문에서는 IEEE 802.15.4의 산업용 무선 필드버스 적용을 위해 비주기적 긴급 데이터의 실시간 전송을 안정적으로 보장하는 기법을 제안한다. 이를 위해, CAP에서 매체 접근 기법인 Slotted CSMA/CA의 BE(Backup Exponent)와 CW(Contention Window)의 초기 값을 차등 적용하는 동적

백오프(backoff) 조정 기법과 추가적 오프셋(offset)의 활용을 통해 알람 데이터와 같은 비주기적 실시간 데이터의 채널 접속을 안정적으로 보장케 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 실시간 혼잡 트래픽의 전송을 위한 IEEE 802.15.4의 슈퍼프레임 구조를 설명했다. 3장에서 비주기적 실시간 데이터 전송의 신뢰성과 실시간성을 향상할 수 있는 트래픽 적응형 동적 백오프 조정 기법을 제안했다. 4장에서는 제안된 실시간 전송 기법의 효용성을 모의실험을 통해 보였다. 마지막으로 5장에서는 결론 및 향후연구에 대해 언급한다.

II. 실시간 혼합 데이터 전송을 위한 슈퍼프레임 구조의 설계

IEEE 802.15.4의 슈퍼프레임 구조(그림 1)는 비콘 프레임, CAP(Contention Access Period), CFP(Contention Free Period) 등의 세 부분으로 구성된다. CFP는 최대 7개의 GTS(Guaranteed Time Slot)로 구성되어진다. 슈퍼프레임 구간은 (1)과 같이 SO(Superframe Order)와 BO(Beacon Order)에 의해 결정된다.

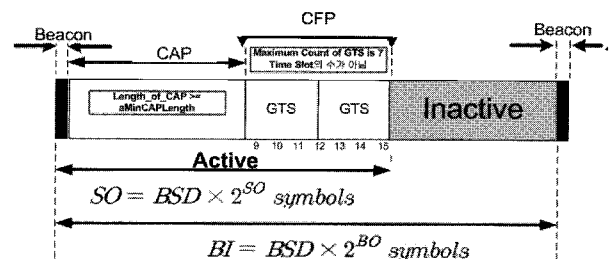


그림 1. IEEE 802.15.4 슈퍼프레임 구조 [4].
Fig. 1. IEEE 802.15.4 Superframe structure [4].

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2007. 9. 14., 채택확정 : 2008. 1. 19.
이정일, 김동성 : 금오공과대학교 전자공학부
(windwiser@kumoh.ac.kr/dskim@kumoh.ac.kr)
※ 이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-D-00150).

$$\begin{aligned} 0 \leq BO \leq 14, BI = BSD \times 2^{BO}, \\ 0 \leq SO \leq BO \leq 14, SD = BSD \times 2^{SO}. \end{aligned} \quad (1)$$

(1)에서 $BSD(aBaseSuperframeDuration)$ 는 SO 가 0 일 때 슈퍼프레임의 활성 구간의 길이이며 960심볼(1 Symbol = 4bits)에 해당한다. 본 논문에서 사용하는 2.4Ghz 주파수 대역에서 250kbps의 데이터 전송률을 고려하면 15.36ms의 시간이 소요된다. 본 논문에서는 $SO=BO=0$ 의 설정을 통해 최소한의 슈퍼프레임을 사용한다. CAP와 CFP로 이루어진 활성(Active) 구간은 동일한 16개의 구간으로 구성되기 때문에, 하나의 시구간은 0.96ms가 된다.

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

본 논문에서는 실시간 주기 I/O 데이터의 전송을 보장받기 위해 CFP 구간에서 사용되는 GTS(Guaranteed Time Slot) 및 실시간 이벤트 처리나 메시지 전송에 있어 유용한 비콘 허용모드를 사용했다[5-7].

데이터 전송의 실시간성을 최대화하기 위해 비콘 프레임의 오버헤드를 최소화할 필요가 있다. 이를 위해 비콘의 페이로드, GTS 연결방향, 대기 주소 목록 필드 등을 사용하지 않는다.

최대 실시간 주기 I/O 데이터 전송을 위해서 7 개의 GTS를 사용한다. 따라서 하나의 노드 주소 정보를 기억하기 위해서는 3바이트가 필요하므로 GTS를 획득한 노드정보를 저장하기 위해서는 21바이트의 GTS 목록 필드를 가지게 된다. 이로 인해 비콘 프레임의 최대 크기는 40바이트가 된다.

산업 환경에서의 대부분의 데이터는 주기 데이터 [8]이므로, 최대 할당 가능한 GTS 구간인 7개 모두를 사용하는 것이 바람직하다. 조정자 노드에게는 데이터의 길이와 IFS(Inter Frame Space)를 고려하여 할당되는 GTS의 수를 결정해야 한다. 주기 데이터가 연결 설정 없이 전송되면, 할당되는 GTS의 수는 (2)에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned} T_{NGT} &= \left\lfloor \frac{T_O + T_d + IFS}{T_{slot}} \right\rfloor, \\ IFS &= \begin{cases} T_d \leq 5 \text{ byte}, IFS = SIFS = 6 \text{ byte}, \\ T_d > 5 \text{ byte}, IFS = LIFS = 20 \text{ byte}. \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

(2)에서 T_{NGT} 와 T_O 는 각각 할당된 GTS 구간의 수와 IEEE 802.15.4 프레임에서 데이터 부분을 제외한 나머지 길이를 의미한다. 2바이트의 주소를 사용하므로, T_O 는 19바이트가 된다. 만약 데이터의 길이가 5바이트보다 작다면 할당되는 GTS의 수는 1이 된다.

공장 자동화 환경에서의 대부분의 주기 데이터는 4바이트를 넘지 않기에, 실시간성 주기 데이터는 하나의 GTS 내에서 전송이 가능하게 된다[8].

III. 비주기적 긴급 메시지 데이터 전송 기법

1. Slotted CSMA/CA에서의 백오프 과정

CAP는 슈퍼프레임에서 50% 이상을 점유하는 구간으로

비콘 허용모드에서는 Slotted CSMA/CA를 사용한다. CAP에서는 실시간 비주기적 데이터와 비실시간 메시지 데이터의 전송이 이루어진다. 알람과 같은 비주기적 실시간 데이터가 망의 관리 및 구성 등에 사용되는 비실시간 메시지 데이터보다 중요한 데이터이기 때문에 우선적인 매체 접속을 보장해 주어야 한다.

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA의 백오프 과정의 특징을 이용하여 비주기적 실시간 데이터의 매체 접속의 우선권을 보장하는 기법을 제시한다. IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA 기법은 3가지의 중요한 파라미터(NB, BE, CW)에 기반하여 수행되게 된다.

NB(Number of Backoff Period)는 백오프 구간의 수이며 CSMA/CA의 수행 횟수이다. BE는 채널이 유희한 상태에서 CCA 동작 전에 이루어지는 백오프 지연(백오프 주기)을 결정하기 위해 사용되는 파라미터이다. (3)에 의해 랜덤 백오프 지연이 결정된다.

$$D_R = \text{Random}[0, 2^{BE} - 1]. \quad (3)$$

CW는 백오프 지연을 수행한 후에 이루어지는 CCA 동작에서 사용되는 것으로 최종 프레임의 전송에 앞서 다시 한 번 채널의 상태를 확인하기 위한 것이다. CW는 단위 백오프 구간(aUnitBackoffPeriod)에 기초하여 수행되어 저야 한다.

단위 백오프 구간은 IEEE 802.15.4에서는 20 심볼의 크기로 규정되어져 있다. 예를 들어, 앞서 지연 시간이 4로 결정되었다면, 1개의 CW는 80(4×20)의 심볼 크기를 가지게 된다. BE값은 MAC에서 상수 5로 지정되어 있는 macMaxBe 값을 초과할 수 없다. 그러므로 하나의 CW를 구성하는 최대의 백오프 주기(BackOff Period)의 수는 31이 된다. 즉 하나의 CW내에 최대 31개의 단위 백오프구간이 구성될 수 있다.

증가된 백오프 지연은 큰 CW를 만들게 되어 CCA를 수행하기 위해 필요한 수행시간을 증가시키게 된다. 구성 가능한 CW의 범위는 해당 네트워크의 트래픽에 관련된다. 예를 들어 IEEE 802.11은 DSSS(direct sequence spread spectrum)의 물리계층을 사용할 때, CW의 최대 구성 슬롯 수가 1023 개에 이른다.

이에 반해, IEEE 802.15.4의 백오프 과정에서의 CW의 최대 구성 슬롯 수는 31개에 불과하다. 이러한 작은 범위를 가진 IEEE 802.15.4 네트워크에서는 가중되는 트래픽에 적응하기 어려운 면이 있다.

트래픽의 증가는 패킷 충돌(Collision)의 확률을 증가시키고 이로 인해 백오프 지연이 발생하게 한다. 따라서 CAP내에서 실시간 긴급 데이터 노드와 경쟁하는 메시지 노드의 수가 많거나 해당 노드의 트래픽 발생이 클 경우에, 실시간 긴급 데이터의 실시간성을 보장할 수 있는 동적 백오프 과정이 필요하다. 그림 2는 IEEE 802.15.4와 IEEE 802.11의 CW 구성 범위상의 차이를 나타낸 것이다.

그림 2는 CCA의 충돌 현상으로 인해 재 전송시 두 통신 기술의 백오프 과정의 CW의 크기가 차이를 보여준다. 이는 CCA 수행시간에 영향을 주게 된다. 네트워크에 부가되

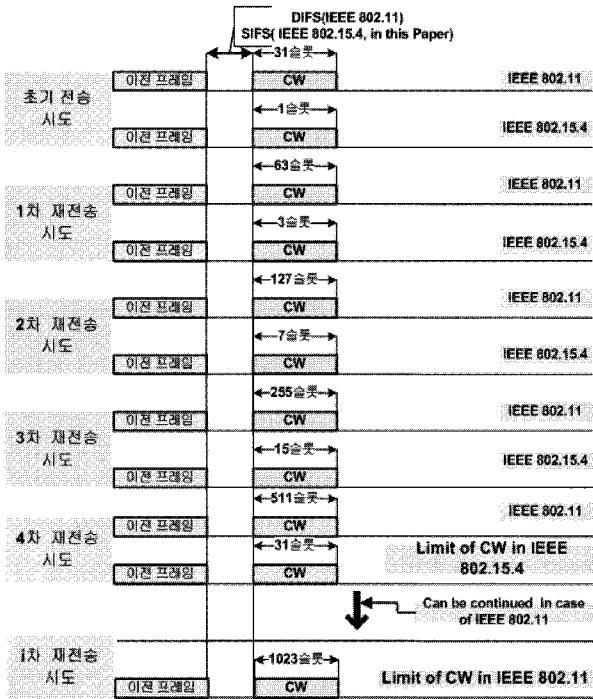


그림 2. IEEE 802.11과 15.4에서의 CW 구성의 차이 [4].
Fig. 2. Comparison of allowable CW [4] (IEEE 802.11 vs. IEEE 802.15.4).

는 트래픽이 증가될수록 작은 CW를 가지는 IEEE 802.15.4의 재전송 시도 횟수가 빠르게 증가되고, 백오프 과정을 리셋하고 수행하는 반복동작의 횟수가 증가한다. 만약, CSMA/CA의 허용가능 최대 횟수인 5(macMaxCSMABackoff [4])에 이르게 되면, 해당 프레임을 버리게 된다. 이에 비해, IEEE 802.11의 경우는 CW의 크기가 크고 재전송 횟수의 여유가 있기 때문에 부가 트래픽에 적용하기 용이한 구조를 가지고 있다.

2. 동적 백오프 과정의 적용을 통한 성능 향상

2.1 차등 BE와 CW 적용

CAP 구간은 비콘 프레임 전송 후 이어 나타난다. 이때 조정자 노드는 비주기적 실시간 데이터를 전송하고자 하는 노드가 있는지를 조사한다. 만약, 노드가 감지되었다면, CAP 구간에 남아있는 구간의 수와 요구된 타임 구간의 수를 비교한다. 이때, 여유 슬롯이 있다면, 비주기적 실시간 데이터를 전송하게 된다.

이때 비실시간 메시지 데이터 노드의 프레임 전송요구가 동시에 발생하게 되면, 비주기적 긴급 데이터 노드는 매체 접속 경쟁을 피할 수 없게 된다. 따라서 안정적으로 비주기적 실시간 데이터의 매체 접속을 보장할 수 있는 기법이 필요하다. 이때, BE와 CW를 특성을 이용하면, 비주기적 실시간 데이터 노드가 매체를 우선적으로 접속할 수 있는 확률을 높일 수 있다.

채널이 유희하지 않게 되면, BE 값이 하나 증가한 후, 다시 백오프 지연과정을 수행하게 된다. 높아진 BE값은 2ⁿ를 최대로 하는 범위 내에서 지연 값을 결정하기 때문에, 큰 백오프 지연 값을 가지게 한다.

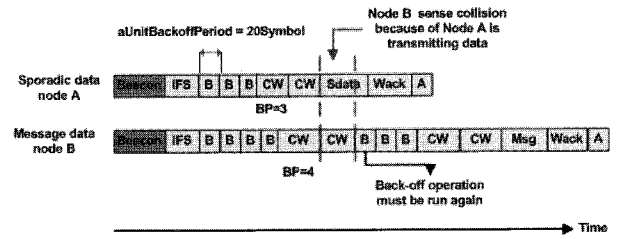


그림 3. 초기 BE, CW 변수값에 따른 백오프 과정.
Fig. 3. BackOff process according to initial BE, CW parameters.

CW의 초기 값도 차별화된 적용을 할 수 있다. 큰 초기 CW 값은 추가적인 CCA수행을 요구하게 된다. 따라서 낮은 CW 초기 값으로 시작한 비주기적 실시간 데이터 노드의 프레임 전송 확률을 높일 수 있게 된다. 그림 3은 초기 BE와 CW값에 의해 비주기적 실시간 데이터가 채널을 선점함에 따라 비실시간 메시지 데이터가 백오프 지연과정을 다시 수행하게 되는 과정을 보여주고 있다.

비주기적 실시간 데이터의 채널 우선 접근을 보장하기 위해서 오프셋 슬롯을 사용할 수도 있다. 오프셋 슬롯은 긴급 데이터의 전송 확률을 높여주기 위한 여유시간의 역할을 할 수 있다.

초기 BE 값이 메시지 데이터 노드 쪽이 큰 경우라도 확률적으로 지연 시간을 결정하기 때문에 비주기적 실시간 데이터 보다 작은 백오프 지연을 획득할 가능성은 존재한다. 이러한 경우에는 오프셋을 이용해 긴급 데이터의 전송을 확보 할 수 있다. 여기서 타임 슬롯의 수에 해당하는 오프셋은 비주기적 실시간 데이터 노드의 백오프 수행에 우선권을 주기 위한 여유시간에 해당한다. 오프셋이 설정되면, 해당 크기의 타임 슬롯만큼 비실시간 메시지 데이터 노드들은 기다리게 된다. 그 동안 비주기적 실시간 데이터 노드는 백오프 과정을 먼저 수행할 수 있게 된다.

초기 BE와 CW의 차별된 설정 과정을 통해, 지속적으로 실시간 긴급 노드의 채널 점유를 보장하면서 선택적으로 오프셋을 활용하면, 보다 안정적인 결과를 얻을 수 있다. 하지만, 오프셋은 비주기적 실시간 데이터를 위해 일정 대역폭을 할당하는 방법이기 때문에, 네트워크의 부하가 적을 경우에는 사용치 않아야 한다. 즉, 실시간 긴급 데이터의 트래픽이 증대하거나 실시간 긴급 노드의 수가 증가하여 BE와 CW의 값만으로 실시간성을 보장기 힘들 때에 오프셋을 적용한다.

그림 4의 경우 1과 2의 비교를 통해, 실시간 긴급 노드가 백오프 과정상의 매체 접근의 우선권을 가짐을 알 수 있다. 초기 BE가 작기 때문에, 확률적으로 백오프 지연과정에서 작은 BP (경우 1에서는 3)를 얻게 된다. 이는 짧은 백오프 과정을 만들게 되어, 메시지 노드는 CCA 수행 중에 긴급 노드의 매체 선점에 의해 다시 백오프 과정을 수행하게 된다. 경우 3은 오프셋의 역할을 보여주고 있다. 오프셋이 3으로 설정된 경우에, 3번째 슬롯까지 메시지 노드는 백오프 과정에 돌입하지 못하고 기다리게 된다. 이때 비주기적 실시간 데이터 노드는 백오프 과정을 수행하여 매체를 선점할 수 있게 된다.

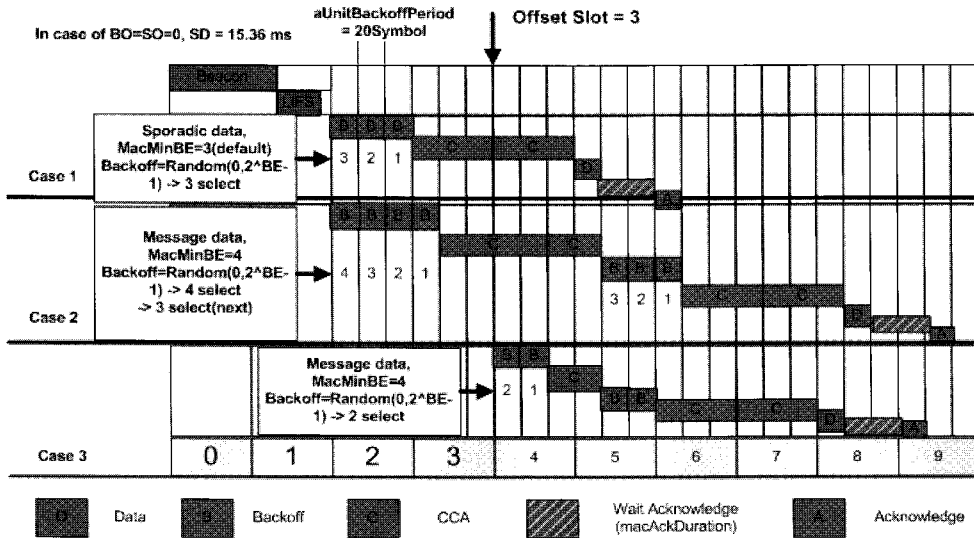


그림 4. CAP에서의 전송 타이밍 차트.
Fig. 4. Transmission timing chart on CAP.

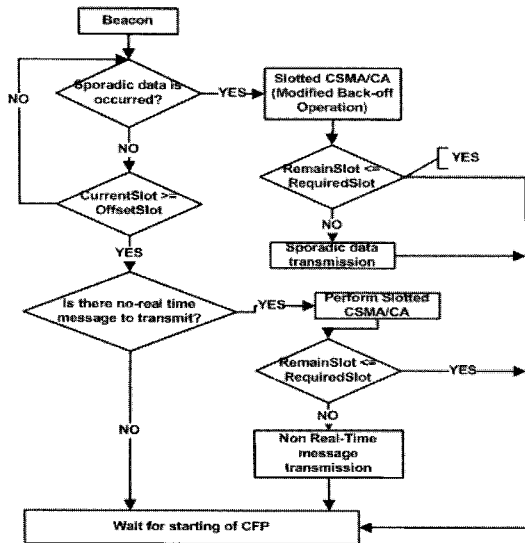


그림 5. CAP에서의 실시간 혼합 데이터 전송 기법.
Fig. 5. Transmission method of real-time mixed traffic on CAP.

그림 5는 초기 BE와 CW의 차이를 두는 백오프 과정과 오프셋을 모두 사용하였을 때의 CAP에서 이루어지는 실시간 혼합 데이터 전송 기법을 나타낸 것이다. 조정자 노드는 CAP 구간이 시작되면, 비주기적 실시간 데이터 노드의 전송 요구를 검사한다.

전송 요구가 없다면, IEEE 802.15.4의 백오프 과정을 포함하는 Slotted CSMA/CA를 수행한다. 만약 긴급 데이터 노드의 전송 요구가 감지된다면, 동적 백오프 과정을 적용한다.

2.2 트래픽 적응형 동적 백오프 과정 적용 기법

차등 BE와 CW의 적용을 통한 백오프 과정의 장점은 비주기적 실시간 데이터 노드의 실시간성의 향상을 가져온다. 하지만, 비실시간 메시지 데이터 노드 수의 증가와 네트워크에 과부하가 발생할 시 비주기적 실시간 데이터 노드에 적용된 차등 BE, CW의 효과는 크게 감소한다. 그 이유는

그림 2에 나타난 것처럼 IEEE 802.15.4의 백오프 과정이 높은 트래픽에 적용하기에는 어려운 구조를 가지고 있기 때문이다. 네트워크에 추가되는 트래픽이 증가시 이에 적용 가능한 BE와 CW값이 동적으로 비주기적 실시간 데이터 노드의 백오프 과정에 설정되어야 한다. 따라서 실시간 긴급 데이터 노드에 적용되는 초기 BE와 CW의 값에도 네트워크에 추가되는 트래픽 변화에 따라 초기 BE와 CW값의 차등 적용이 이루어져야 한다.

해당 네트워크의 주어지는 부하 N_{load} 은 CAP구간에서 매체 접근을 위해 경쟁하는 실시간 긴급 데이터 노드와 비실시간 메시지 데이터 노드의 총 수 n 과 각 노드에서의 프레임 발생률($f_{n_i}^{rate}$)의 곱으로 계산되어 진다.

$$N_{load} = f_{n_i}^{rate} \times n \quad (4)$$

각각의 실시간 긴급 데이터 노드는 최대 허용 지연 시간 D_{max}^{allow} 와 최소한 보장받기 원하는 평균 처리율 Th_{min}^{allow} 을 고려한다. 네트워크에 주어진 트래픽이 증대하게 되면, 비주기적 실시간 데이터 노드가 요구한 D_{max}^{allow} , Th_{min}^{allow} 은 보장받지 못하는 상황이 발생한다.

트래픽이 증대하기 전의 네트워크에서라면, 차등 적용된 초기 BE, CW를 통해 두 실시간 파라미터를 만족할 수 있지만, 트래픽 증대에 따라 빈번해진 패킷 충돌(collision)로 인해 차등 적용된 BE, CW의 효과가 크게 감소하기 때문이다. 따라서 증가한 트래픽 변화에 적응하여 동적으로 초기 BE와 CW를 새로이 설정함으로써 비주기적 실시간 데이터 노드의 실시간성을 유지시켜 주어야 한다. (5)에 증가한 네트워크 트래픽에 적응하기 위한 동적 초기 BE, CW 설정 과정을 나타내었다.

$$\begin{aligned} D_{max}^{allow} &\leq D_{avg}, BE_{SP}^{New_Init} = BE_{SP}^{Init} - i_{BE}, \\ Th_{min}^{allow} &\geq Th_{avg}, CW_{SP}^{New_Init} = CW_{SP}^{Init} - i_{CW}. \end{aligned} \quad (5)$$

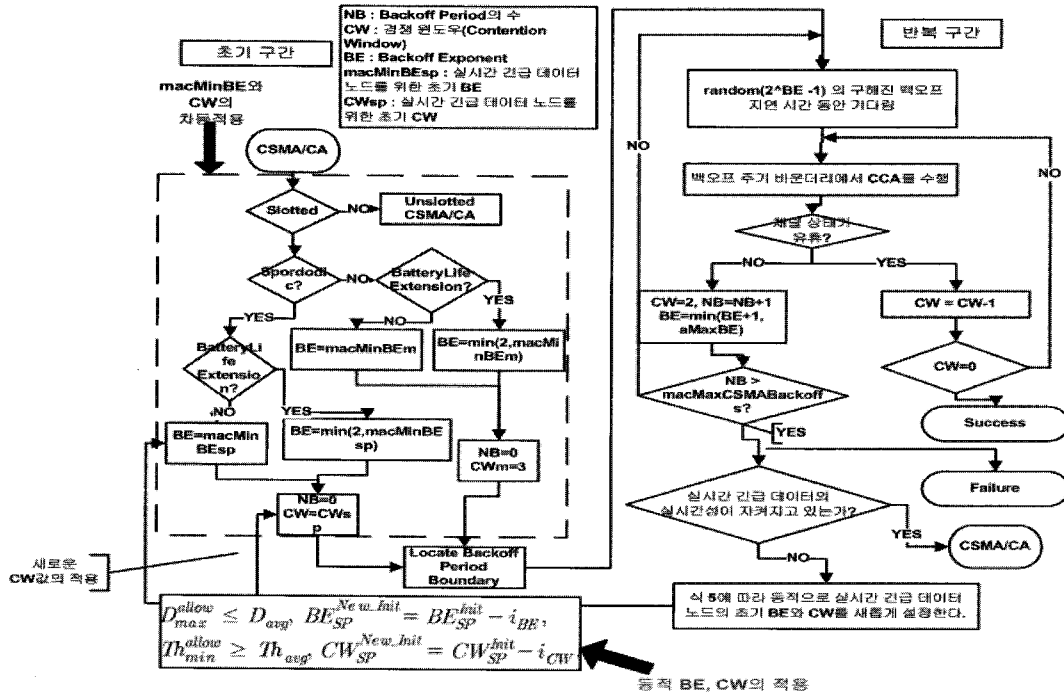


그림 6. 네트워크 트래픽 증가에 따른 동적 백오프 과정 기법.
 Fig. 6. Dynamic backoff method according to increasing network traffic.

i_{BE} 는 BE값의 감소를 나타내며 i_{SP} 는 CW의 감소를 나타내는 1-4 범위의 정수 값이다. BE와 CW의 감소 정도를 결정하는 정수 i 에 차이를 두는 이유는 BE와 CW가 평균 지연 시간과 처리율에 있어서 각기 다른 영향을 끼치기 때문이다. BE의 경우 평균 지연 시간에 CW의 경우 처리율에 큰 영향을 끼치기 때문에, 구분하여 기술하였다.

D_{avg} 와 Th_{avg} 는 각각 네트워크에서의 평균 지연시간과 처리율을 나타낸다. BE_{SP}^{mit} 와 CW_{SP}^{mit} 는 각각 트래픽이 증가하기 전의 네트워크에서의 실시간 긴급 데이터 노드에 차등 적용된 초기 BE와 CW값을 의미한다. $BE_{SP}^{New_Init}$ 와 $CW_{SP}^{New_Init}$ 는 각각 변화된 트래픽에 적응하기 위해 정수 i 만큼 감소한 새로운 초기 BE, CW값에 해당한다.

실시간 긴급 데이터 노드의 초기 BE와 CW의 감소 정도를 결정하는 정수 i 의 값은 증대된 트래픽 정도에 따라 결정되어 진다. 또한 정수 i 의 값은 순차적으로 증가해야 한다. 그 이유는 주어진 네트워크 트래픽에 비해 실시간 긴급 데이터 노드의 BE와 CW를 급격히 감소시키게 되면, 비실시간 메시지 데이터 노드의 전송이 방해될 수 있다. 만약 높은 네트워크 트래픽이 부가되는 상황이라면, 오프셋을 활용할 수 있다.

오프셋의 크기는 타임 슬롯의 수이며 슈퍼프레임이 시작하면서 백오프 과정 진입 전에 비실시간 메시지 데이터 노드가 기다려야 하는 시간에 해당한다. 이는 비주기적 실시간 데이터 노드가 백오프 과정에 먼저 진입함으로써 매체 선점을 할 수 있도록 유도하기 위함이다.

트래픽 적응형 백오프 기법에서는 초기 BE와 CW의 적용을 우선적으로 사용하며 네트워크의 과부하가 주어질 경

우에 한해서 오프셋을 활용하게 된다.

실시간 긴급 데이터 노드의 트래픽이 발생하지 않는 슈퍼프레임 구간이 존재하면, 오프셋으로 설정된 슬롯만큼 대역폭이 낭비되기 때문이다. 또한 차등 적용된 초기 BE, CW와 오프셋을 동시에 활용할 경우 실시간 긴급 데이터 노드의 실시간성이 크게 향상될 수 있지만, 비실시간 메시지 데이터 노드의 전송이 방해될 수 있다. 즉, 비실시간 메시지 데이터 노드가 장시간 데이터 전송을 하지 못하는 상태가 된다.

오프셋의 크기에 따른 비실시간 메시지 데이터 노드의 대기 시간 W_{Msg} 은 다음 (6)에 의해 계산된다.

$$W_{Msg} = 60 \times \frac{1}{symbol_rate} \times offset \quad (6)$$

본 논문에서 제안되어진 부가 트래픽 적응형 백오프 기법의 동작 절차는 아래와 같다.

1. 조정자 노드는 (4)에 기초하여 초기 네트워크의 CAP 내의 부하를 계산하고 실시간 긴급 데이터 노드의 최대 허용 시간 D_{max}^{allow} 와 Th_{min}^{allow} 을 설정한다.
2. 1번 절차를 통해 계산된 네트워크 부하에 기초하여 실시간 긴급 데이터 노드와 비실시간 메시지 데이터 노드에 BE와 CW를 차등 적용한다.
3. Slotted CSMA/CA를 수행한다.
4. 네트워크의 트래픽이 증가하여 두 실시간 파라미터 (D_{max}^{allow} , Th_{min}^{allow})이 저해되면 (5)를 이용한 트래픽 적응형 동적 백오프 기법을 수행한다.
5. 네트워크가 과부하상태에 이르게 되어 BE와 CW의 최대 감소폭에 도달하게 되면, 오프셋을 적용한다.

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

본 장에서는 비주기적 긴급 데이터의 전송에 대한 모의 실험 결과를 설명한다. 시뮬레이션을 위해서 비주기적 긴급 데이터와 비실시간 메시지 데이터 노드 각각 20개로 구성된 단일 PAN을 구성하였다. 초기 CW, macMinBE(초기 BE), 오프셋이 각각 실시간 혼합 데이터의 성능(평균 지연 시간, 처리율)에 어떠한 영향을 끼치는지 실험하였다. CAP 내에서의 모든 노드의 트래픽 발생은 지수 분포(Exponential Distribution)를 따른다. 데이터 프레임의 크기는 176bits이며, ACK 프레임의 크기는 88bits이다.

이를 통해 동적으로 네트워크에 주어지는 트래픽에 변화(비실시간 메시지 데이터 노드 수의 증가)가 주어질 때 트래픽 적응형 동적 백오프 기법을 적용 여부에 따른 평균 지연 시간과 처리율의 성능 평가를 하였다.

1. 차등 초기 CW, BE, 오프셋 적용 결과 실험

네트워크의 부하가 증가에 따른 초기 BE, CW 및 오프셋의 역할을 분석하기 위해 표 1의 설정치를 활용하여 모의 실험을 수행하였다. 메시지 데이터 노드의 수는 20개로 설정하였다.

그림 7의 처리율에 관한 결과를 보면 초기 BE의 설정이 처리율에 미치는 영향은 미비함을 알 수 있다.(긴급 데이터, 메시지 데이터에 macMinBE=4, CW=2인 경우 참고)

CW와 오프셋의 적용은 처리율의 감소를 가져온다. CW에 의한 처리율의 감소는 증가된 CW에 의해 CCA의 수행 시간이 증가하기 때문이다. 반면, 오프셋에 의한 처리율의 감소는 특정 구간 동안을 대기함으로 인해 대역폭이 낭비되기 때문이다. 두 경우 모두 네트워크의 부하가 증가함에 따라 빈번해진 패킷 충돌로 CCA를 보다 많이 수행하게 되어, 계속적인 처리율의 감소를 초래한다.

CW의 증가와 오프셋의 적용을 동시에 사용하게 되면, 급격한 처리율 감소를 관찰할 수 있다. 이는 대역폭 낭비와 함께 늘어난 CCA 수행시간으로 인한 결과이다.

그림 8은 CAP에서의 실시간 혼합데이터의 평균 지연 시간을 나타낸 것이다. 그림 7과는 달리, CW보다 BE의 초기 값(macMinBE)이 중요한 영향을 미침을 알 수 있다. 오프셋의 적용에 의해 증가된 지연시간과 macMinBE의 증가로 인한 지연시간은 비슷한 추이를 가진다. 하지만, 이 둘을 모

표 1. 모의실험 위한 초기 설정 값 (macMinBE, CW, Offset).

Table 1. macMinBE, CW, Offset values for simulation setup.

	처리율 [kbps]	평균 지연시간[ms]
실시간 긴급 데이터	macMinBE=3, CW=2	macMinBE=3, CW=2
메시지 데이터	macMinBE=4, CW=2	macMinBE=4, CW=2
	macMinBE=3, CW=3	macMinBE=3, CW=2
	macMinBE=3, CW=2, Offset=2	macMinBE=3, CW=3, offset=2
	macMinBE=3, CW=3, Offset=2	macMinBE=4, CW=2, Offset=2

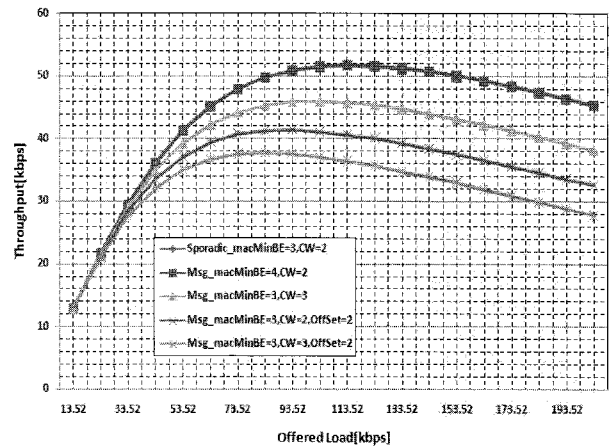


그림 7. 실시간 혼합 데이터의 처리율.

Fig. 7. Throughput of real-time mixed data.

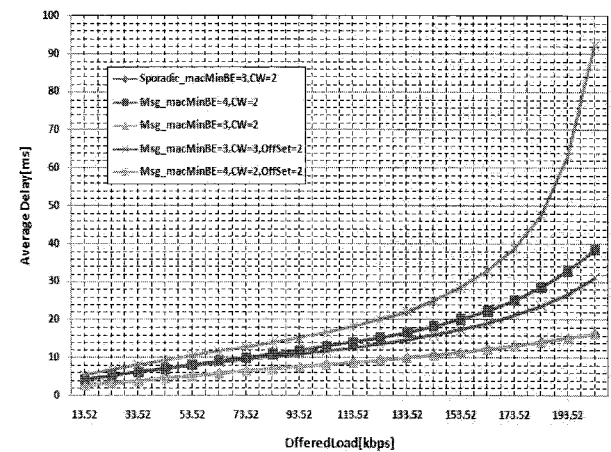


그림 8. 실시간 혼합 데이터의 평균 지연 시간.

Fig. 8. Average delay of real-time mixed data.

두 적용하였을 경우(macMinBE=4, Offset=2의 경우)는 급격한 평균 지연 시간의 증가를 유발한다. 이는 오프셋 적용으로 인해, 다른 노드들이 매체 경쟁에서 우선순위를 가지지 못하기 때문이다. 이로 인해, 많은 백오프 지연과정을 수행하게 되고, 이는 빠른 BE의 상승을 유도하기 때문이다. BE가 빠르게 상승하게 되면, (3)에 의한 큰 백오프 지연 시간 가능범위를 가지게 된다. 그리고 이는 비실시간 메시지의 전송의 방해 요소가 될 수 있다.

2. 트래픽 적응형 동적 백오프 기법 적용 실험

본 절에서는 비실시간 메시지 데이터 노드의 수를 증가(20->40->50)시켜 네트워크의 트래픽을 증가시켜 간다. 비실시간 메시지 데이터 노드의 수가 20개일 경우를 초기 상황으로 두고 노드 수를 40, 50개로 증가시켜 가면서, 동적 백오프 기법의 적용 여부에 따른 실시간 긴급 데이터 노드의 평균 지연 시간의 변화를 그림 9에 나타내었다. 동적 백오프 기법을 적용할 경우 네트워크에 트래픽이 가중됨에도 불구하고 실시간 긴급 데이터 노드의 평균 지연시간의 급격한 상승을 막고 요구된 최대 허용 지연을 만족할 수 있음을 알 수 있다.

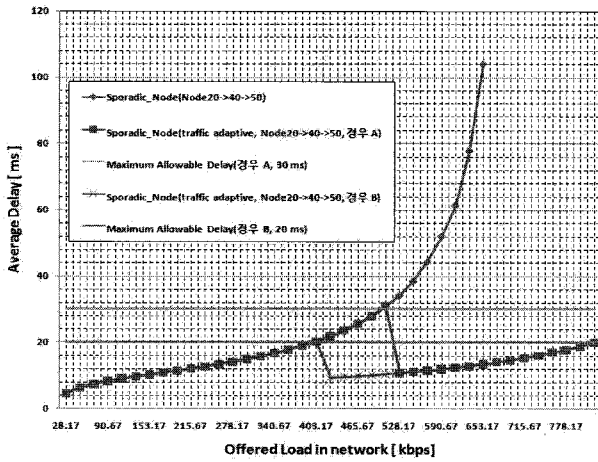


그림 9. 노드수 증가에 따른 동적 백오프 기법 적용 결과 (20->40->50).

Fig. 9. Result of average delay after adjusting dynamic backoff method (node number: 20->40->50).

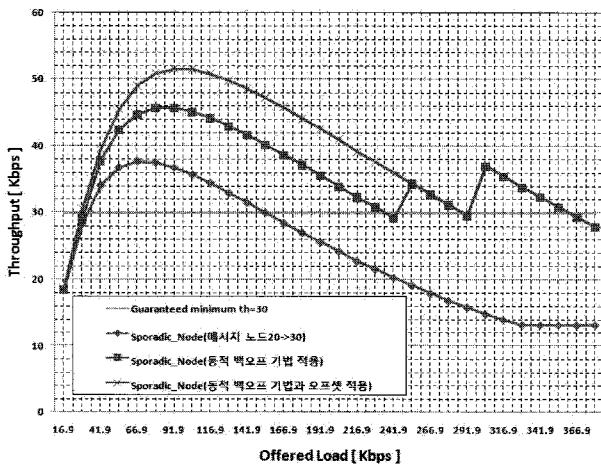


그림 10. 동적 백오프 기법 적용 시 처리율의 변화.

Fig. 10. Throughput after adjusting by dynamic backoff method (node number: 20->30).

그림 9는 노드수를 20개에서 40개 및 50개로 증가시켰을 경우이다. 실시간 긴급 데이터의 최대 허용 지연 시간 D_{max}^{allow} 은 각각 20 ms, 30 ms가 사용되었다. 트래픽이 증대 되었음에도 불구하고, 기존에 차등 적용된 BE, CW값의 변화를 주지 않을 경우 그림 9에 나타난 것처럼 요구된 최대 허용 지연시간을 보장할 수 없다. 하지만, 경우 A, B에서는 각각 최대 허용 지연 시간을 초과하는 상황이 발생할 경우 증가한 트래픽 상황에 적용할 수 있는 BE, CW가 새롭게 설정되어 진다. 따라서 양쪽 모두 최대 허용 지연 범위 안으로 평균 지연시간이 유지될 수 있게 된다. 그림 10은 비실시간 메시지 데이터 노드를 2개에서 30개로 증가한 후 동적 백오프 기법의 적용에 따른 처리율 결과를 나타낸다.

비부기적 실시간 데이터 노드가 보장받기를 원하는 최소한의 처리율은 30kbps이다. 기존에 차등 적용된 초기 CW의 값을 백오프 과정에 사용할 경우, 그림 10에 나타난 것처럼

증가한 트래픽에 따라 빈번해진 패킷 충돌 현상으로 처리율이 급격히 하락하는 현상을 볼 수 있다. 반면에, 동적 백오프 기법을 적용할 경우 처리율이 크게 향상될 뿐 아니라 포화(saturation) 상태에 도달하는 속도를 늦춰줄 수 있음을 알 수 있다.

동적 백오프 기법을 적용함에 있어서도 한계점이 있을 수 있다. 비실시간 메시지 데이터의 노드 수를 60, 70개로 하여 매우 높은 네트워크 트래픽이 추가되게 되면 동적 BE, CW, 오프셋의 적용 효과는 크게 감소하게 된다. 이는 그림 2에 나타난 것처럼 기본적으로 IEEE 802.15.4의 백오프 과정 자체의 한계점에 기인한다. 하지만, 실제 산업 환경에서의 메시지 데이터 노드의 수는 제한적이다. 따라서, 트래픽에 적용할 수 있는 동적 백오프 기법은 산업 현장에서 사용되는 IEEE 802.15.4 기반의 무선 제어 네트워크에 적용 가능하다.

V. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 기반 무선 제어망에서 네트워크에 추가되는 트래픽에 따라 동적으로 적응하는 백오프 기법을 제안하였다. 이를 위해 초기 BE와 CW를 다르게 적용하는 백오프 과정과 오프셋의 활용을 통해 비주기적 실시간 데이터의 채널 접속을 보장하는 전송 기법을 제안되었다.

또한 모의 실험결과를 통해 제안된 알고리즘의 효용성을 증명하고 분석 결과를 통해 무선 제어 네트워크에 IEEE 802.15.4 프로토콜의 이용 가능성 및 적절한 초기 값 설정 방법을 제시하였다.

향후 연구로 CFP에서의 GTS를 활용한 주기적 입출력 노드들의 실시간성을 보장하는 동적 스케줄링 기법을 연구하고자 한다.

참고문헌

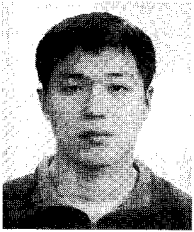
- [1] A. Willig, and K. Matheus, "Wireless technology in industrial network" *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, Issue 6, June 2005.
- [2] K. Koumpis, "Wireless industrial control and monitoring beyond cable replacement." *International conference on PROFIB-US*, June 2005.
- [3] M. Maury, "Realtime communications over IEEE 802.11e in industrial environments." *Master's thesis, Royal Institute of Technology, Sweden*, 2005.
- [4] 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.
- [5] A. Koubaa, M. Alves, and E. Tovar, "A comprehensive simulation study of slotted CSMA/CA for IEEE 802.15.4 wireless sensor networks," *IEEE International Workshop on Factory Communication Systems*, pp. 183-192, June 27, 2006.
- [6] M. Petrova, J. Riihijarvi, P. Mahonen, and S. Labella, "Performance Study of IEEE 802.15.4 Using

Measurements and Simulations," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 487-492, April 2006.

[7] L.-C. Ko, Y.-C. Liu, and H.-W. Fang "Design and Implementation of IEEE 802.15.4 Beacon-enabled Network Devices," *Fourth Annual IEEE International*

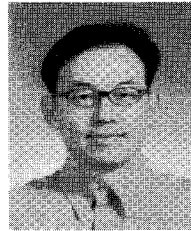
Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, pp. 13-17, March 2006.

[8] F. De Pellegrini, D. Miorandi, S. Vitturi, and A. Zanella, "On the Use of Wireless Networks at Low Level of Factory Automation Systems," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, pp. 129-143, vol. 2, no. 2, 2006.



이 정 일

2001년 금오공과대학 전자공학부 졸업.
2007년 동 대학원 재학. 관심분야는
산업용 통신망 및 무선 제어 시스템.



김 동 성

1992년 한양대학교 전자공학과 졸업.
2003년 서울 대학교 전기 및 컴퓨터
공학박사. 2003년~2004년 Cornell Univ.
전기 및 컴퓨터 PostDoc.연구원. 2004
년~현재 금오공과 대학교 전자공학부
조교수. 2007년 12월~현재 UC Davis,
Computer Science, 객원교수. 관심분야는 실시간 산업용 통
신망, 무선 제어 네트워크 및 네트워크 기반 임베디드 시
스템.