

IEEE 802.15.4 메쉬 센서 네트워크에서의 경쟁 및 충돌 완화 기법

이 효련*, 정경학*, 서영주°

Contention/Collision Mitigation Scheme in IEEE 802.15.4 Mesh Sensor Networks

Hyo Ryun Lee*, Kyoung-Hak Jung*, Young-Joo Suh°

요 약

본 논문은 IEEE 802.15.4 기반 메쉬 센서 네트워크 환경에서 인접 코디네이터 간 발생할 수 있는 패킷 충돌 문제를 완화하는 기법을 다룬다. 기존 연구에서는 센서 노드의 backoff period (BP)를 적절하게 조절하여 재전송 횟수를 줄이거나, 트래픽 부하에 따라 채널 활용도를 효율적으로 높임으로써 불필요한 에너지 소모를 줄이고자 하였다. 기존 연구와 달리 제안 기법에서는 인접 코디네이터 사이의 경쟁을 회피하여 센서 노드의 에너지 효율성을 향상시키고자 한다. 이를 위해 제안하는 기법에서는 인접 코디네이터들의 경쟁 구간 시작 시점을 분산시켜 코디네이터 간에 발생하는 경쟁 및 패킷 충돌을 완화하였다. 시뮬레이션을 이용한 성능 평가를 통해 제안하는 기법이 에너지 소모 측면에서 보다 효율적일 뿐만 아니라 충돌 발생 정도, throughput, 전송 지연 등 다양한 측면에서 그 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다.

Key Words : IEEE 802.15.4, Contention, Collision, Energy, ZigBee

ABSTRACT

This paper address a new scheme that alleviates the packet collision problem caused by contentions among nearby coordinators (CNs) in IEEE 802.15.4 meshed sensor networks. In existing studies, the number of retransmissions is reduced by adjusting the proper backoff period (BP) of sensor nodes, or unnecessary energy consumption is diminished by increasing channel utilization efficiently based on traffic load. In contrast, the proposed scheme avoids contentions among nearby CNs, thereby it enhances the energy efficiency of sensor nodes. To achieve this, the proposed scheme separates the starting points of CNs' contention periods and reduces contentions and collisions among overlapping CNs. According to our simulation results, the proposed scheme shows improved performance in terms of energy consumption, throughput, the number of collisions, and average delay for all conditions.

I 서 론

IEEE 802.15.4 LR-WPAN (Low-Rate Wireless Personal Area Networks)은 무선 네트워크의 물리 계

※본 연구는 2013년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0024938).

※본 연구는 2013년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 것임(2011-0029034).

◆ 주저자 : 포항공과대학교 정보전자융합공학부 모바일네트워킹 연구실, wowlhr@postech.ac.kr, 학생회원

° 교신저자 : 포항공과대학교 정보전자융합공학부 모바일네트워킹 연구실, yjsuh@postech.ac.kr, 종신회원

* 포항공과대학교 컴퓨터공학과 모바일네트워킹 연구실, yeopki81@postech.ac.kr

논문번호 : KICS2013-02-094, 접수일자 : 2013년 2월 16일, 최종논문접수일자 : 2013년 8월 7일

층과 매체 접근 제어 (Medium Access Control, MAC)에 대한 표준으로써 저속 및 저전력 통신에 중점을 두었다^[1]. 따라서 현재 다양한 무선 접속 기술들이 발전하고 있지만, 이러한 특징을 이용하여 전체 자원이 한정됨에 따라 그 사용에 제약이 따르는 군사, 의료 분야를 비롯한 다양한 분야에 활용이 가능할 것으로 전망된다.

IEEE 802.15.4는 코디네이터가 주기적으로 전송하는 비콘 프레임에 의해 구분되는 슈퍼프레임 구조를 사용한다. 각 슈퍼프레임은 활성 구간과 비활성 구간으로 나누어지며, 활성 구간은 다시 경쟁 구간 (Contention Access Period, CAP)와 비경쟁 구간 (Contention Free Period)으로 나누어진다. 그 중 경쟁 구간에서는 센서 노드 간 경쟁을 통해 패킷 전송을 수행하는데, 이 때 다수의 센서 노드가 동시에 전송을 시도하는 경우 패킷 충돌이 발생할 수 있으며, 이는 패킷 손실로 인한 대역폭과 에너지가 낭비되는 문제를 야기한다. 특히 이러한 문제가 빈번하게 발생하는 경우, 네트워크의 전체 성능을 저하시킬 뿐만 아니라 네트워크의 생명주기를 단축시키는 결과를 가져올 수 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 참고문헌 [2], [3], [4]에서는 센서 노드의 백오프 값을 적절하게 조절하여 센서 노드 간 경쟁 및 충돌을 완화하는 기법을 제안하였고, 참고문헌 [5], [6], [7]에서는 슈퍼프레임 구조를 일부 변경하여 센서 노드 간 경쟁 및 충돌을 완화하는 기법을 제안하였다. 이들은 IEEE 802.15.4 기반 무선 센서 노드의 큰 수정 없이 패킷 충돌 문제를 완화할 수 있는 장점을 가진다. 그러나 코디네이터에 대한 고려 없이 단순히 센서 노드 간 경쟁만을 고려하였기 때문에, 다수의 코디네이터로 구성된 메시 네트워크 환경에서 발생할 수 있는 코디네이터 간 경쟁 문제를 해결하기 어렵다는 한계를 가진다. 예를 들어, 각 센서 노드는 활성 구간이 시작되면 비활성 구간동안 생성되었던 다수의 패킷들 (패킷 버스트)을 코디네이터에게 전송하기 시작한다. 이 때, 이웃 코디네이터들의 활성 구간 시작 시점이 인접한 경우, 서로 다른 코디네이터에 연결된 다수의 센서 노드들이 동시에 채널에 접근을 시도하기 때문에 패킷 버스트 간 심각한 경쟁이 발생할 수 있다. 그러나 기존의 기법들은 이를 고려하고 있지 않기 때문에 빈번한 패킷 충돌로 인한 네트워크의 성능 저하를 겪을 수 있다.

본 논문에서는 다수의 코디네이터로 구성된 IEEE 802.15.4 기반의 메시 센서 네트워크에서의 패킷 버스트 간의 경쟁으로 인한 센서 노드의 불필요한 에너지

소모를 줄이는 효율적인 경쟁 완화 기법을 제안한다. 본 논문은 다음과 같이 구성된다. 먼저 2장에서는 IEEE 802.15.4 기반 무선 센서 네트워크에서의 에너지 효율적 기법을 제안한 기존 연구 결과들을 살펴보고, 발생하는 문제점 및 해결 방안을 제시한다. 3장에서는 본 논문에서 제안하는 기법의 기본 구조와 동작 방법을 설명하고, 4장에서는 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 성능을 평가한다. 마지막으로, 5장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 관련 논문 연구 및 문제점

IEEE 802.15.4에서의 초저전력 통신을 위하여 다양한 효율적 에너지 소모 기법이 제안되었다. 먼저 참고문헌 [2]에서는 네트워크 상황과 충돌 발생 정도를 고려하여 백오프 시간을 적절하게 할당하여 센서 노드 간 발생할 수 있는 충돌을 완화하였고, 참고문헌 [3]에서는 트래픽 부하에 따라 백오프 시간을 동적으로 할당하여 충돌을 완화하였다. 이러한 방법들은 비교적 간단한 수정을 통해 패킷 충돌 문제를 완화할 수 있지만, 네트워크 내에 숨겨진 노드가 있는 경우 발생할 수 있는 연쇄 충돌 문제 (collision chain problem, CCP)를 효율적으로 해결하지 못하는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 참고문헌 [4]에서는 CFP 내 GTS (Guaranteed Time Slot)와 코디네이터의 응답메시지 (GACK)를 사용하여 CCP를 완화함과 동시에 불필요한 재전송 과정을 줄임으로써 낭비되는 에너지를 줄였다.

또한, 트래픽 부하에 따라 채널 활용도를 효율적으로 높여 소모되는 에너지를 줄이는 다양한 기법들이 제안되었다. 참고문헌 [5]에서는 트래픽 부하에 따라 활성 구간과 비활성 구간의 길이를 적절하게 조절하고, 활성 구간에 패킷을 분산 전송함으로써 전송 시간을 줄여 소모되는 에너지를 줄였다. 이 외에도 참고문헌 [6]에서는 IEEE 802.15.4 표준에 정의된 슈퍼프레임을 서브구간 (subperiod)으로 나누고, 트래픽 부하에 따라 적절하게 서브구간을 사용하여 전송 시간을 줄임으로써 에너지를 효율적으로 사용했다. 이와 유사하게, 참고문헌 [7]에서는 CFP 구간의 타임 슬롯을 다시 작게 나누어 사용하는 기법을 통해 늘어난 채널 활용도를 사용하여 전송 횟수를 줄임과 동시에 낭비되는 에너지를 줄였다.

이외에도 기존 PAN 코디네이터의 구조 및 동작을 일부 수정하여 에너지 효율성을 높이는 기법들이 제안되었다. 참고문헌 [8]에서는 기존 IEEE 802.15.4 기

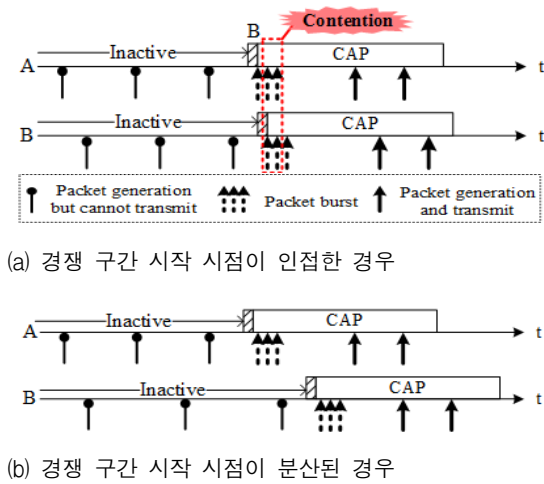


그림 1. 경쟁 구간 시작 시점에 따른 동작 비교
 Fig. 1. Operation comparison based on beginning time of CAP

반 PAN 코디네이터의 GTS 분산 메커니즘을 수정하고, GTS 리스트를 사용함으로써 브로드캐스트 비콘의 크기와 에너지 소비를 줄였다. 참고문헌 [9]에서는 기존 IEEE 802.15.4 기반 PAN 코디네이터의 self-managing, self-configuration, self-regulation을 고려한 토폴로지 구성을 통해 에너지를 효율적으로 관리 및 사용하였고, 참고문헌 [10]에서는 동기화 과정에서 Low Power Listening (S-LPL)을 사용함과 동시에 Periodic Wakeup (PW) 메커니즘을 개선함으로써 PAN 코디네이터의 수명을 늘리고, 에너지 효율성 또한 높였다.

그러나 이러한 기법들은 모두 인접 코디네이터의 정보를 고려하고 있지 않기 때문에, 메쉬 네트워크 환경에서 이웃한 코디네이터와의 활성 구간 시작 시점이 인접한 경우 패킷 버스트 간의 경쟁 및 충돌 문제를 효과적으로 해결하지 못하는 단점을 가진다. 예를 들어, 그림 1(a)에서와 같이 코디네이터들의 활성 구간 시작 시점이 인접하는 경우, 동일 코디네이터에 속한 센서뿐만 아니라 이웃 코디네이터에 속한 센서 노드와의 경쟁을 수행해야 한다. 이는 보다 많은 센서 노드와의 경쟁으로 인한 패킷충돌 문제를 발생시킬 수 있다.

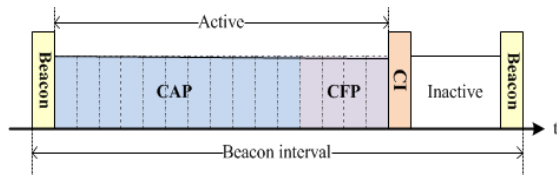


그림 2. 제안 기법의 슈퍼프레임 기본 구조
 (CI : coordinator information 메시지)
 Fig. 2. Superframe structure for proposed scheme
 (CI : coordiantor information message)

그러나 그림 1(b)와 같이 각 코디네이터의 활성 구간 시작시점이 분산될 경우, 패킷 버스트 간 발생할 수 있는 심각한 경쟁과 이로 인한 패킷 충돌 문제를 완화할 수 있다. 이는 동일한 코디네이터에 종속된 센서 노드 간에서만 경쟁이 발생하도록 유도하며, 패킷 충돌로 인한 패킷 손실 및 재전송 과정을 줄임과 동시에 그에 따른 추가적인 에너지 소모를 줄일 수 있다. 위와 같은 특성을 고려하여, 제안 기법에서는 코디네이터의 활성 구간 시작 시점을 조절함으로써 패킷 버스트 간 경쟁으로 인한 불필요한 에너지의 낭비를 줄인다.

III. 본 론

3.1. 제안 기법의 기본 구조

그림 2는 제안 기법의 슈퍼프레임 기본 구조를 보여준다. 앞서 설명한 바와 같이, 각 슈퍼프레임은 활성 구간과 비활성 구간으로 나누어지며, 활성 구간은 다시 경쟁 구간과 비경쟁 구간으로 구성된다. 이 때, 제안하는 기법에서는 주기적으로 전송하는 비콘 프레임 외에, 자신의 ID와 비콘 프레임 전송 시점에 대한 정보를 담고 있는 coordinator information 메시지 (CI 메시지)를 활성 구간이 종료되는 시점에 추가적으로 전송한다. 여기서 비콘 프레임 전송 시점은 현재 시점을 기준으로 다음 비콘 프레임 전송까지 기다려야 하는 시간을 의미한다. 이 CI 메시지는 이를 수신한 주변 코디네이터에게 해당 코디네이터의 활성 구간 종료 시점과 다음 비콘 프레임의 전송 시점을 전달하여, 최종적으로 인접 코디네이터들이 자신의 활성 구간 시작 시점을 파악할 수 있도록 한다.

3.2. 제안 기법의 동작

각 코디네이터는 기본적으로 비콘 프레임과 CI 메시지를 주기적으로 전송/수신함으로써 네트워크에 코디네이터가 추가 또는 제거되었는지의 여부를 판단한다. 만일 새로운 비콘 프레임 또는 CI 메시지가 수신되거나, 특정 비콘 프레임 또는 CI 메시지가 일정 시간동안 수신되지 않는 경우, 네트워크 토폴로지의 변화를 인지하고 자신의 경쟁 구간 시작 시점을 조절한다.

3.2.1. 코디네이터의 추가

새로운 코디네이터가 자신의 비콘 프레임 전송 시점을 결정하는 방법은 다음과 같다. 먼저, 네트워크에 참여하기 전 일정 시간동안 기존 코디네이터

들이 전송하는 비콘 프레임 및 CI 메시지의 수신을 통해 주변 코디네이터의 활성 구간 시작 시점에 대한 정보를 얻는다. 수집한 정보들을 이용해 새로운 코디네이터는 기존 코디네이터들과 활성 구간 시작 시점이 적절히 분산될 수 있는 간격을 계산한 뒤 자신의 활성 구간 시작 시점을 결정하고, 해당 시점부터 비콘 프레임을 주기적으로 전송함으로써 센서 노드와의 통신을 시작한다. 이 후, 기존 코디네이터들도 새로 추가된 코디네이터의 비콘 프레임 또는 CI 메시지를 수신하고 자신의 활성 구간 시작 시점을 조절함으로써 패킷 버스트 간 경쟁 문제를 완화한다.

예를 들어, 그림 3에서와 같이 새로운 코디네이터 C_{new} 가 $i-1$ 번째 슈퍼프레임 구간에서 네트워크에 추가되는 경우, 먼저 인접 코디네이터 C_1 과 C_2 가 전송하는 비콘 프레임 및 CI 메시지를 수신하게 된다. 이 때, 수집된 인접 코디네이터의 수를 n , 코디네이터 활성 구간의 길이를 L_{CAP} 이라고 가정했을 때, 코디네이터 간의 새로운 활성 구간 시작 간격 BTI (beacon time interval)는 다음과 같다. 이 때, 각 코디네이터는 수집한 정보에 따라 n 값을 다르게 가질 수 있으며, 이로 인해 BTI 값 또한 다를 수 있다.

$$BTI \leftarrow \frac{L_{CAP}}{n + 1} \quad (1)$$

이를 기반으로 새로운 코디네이터 C_{new} 는 활성 구간 시작 시점 $TBTT$ (target beacon transmission time)를 다음과 같이 결정한다. 현재 C_{new} 가 $i-1$ 번째 슈퍼프레임에 위치하고 있다고 가정했을 때, i 번째 슈퍼프레임 구간에서 가장 먼저 활성 구간을 시작하는 코디네이터의 $TBTT$ 를 기준으로 (e.g., C_1),

식 (1)을 통해 계산된 BTI 시간만큼 더한 값을 코디네이터의 C_{new} 의 $TBTT$ 로 정의한다.

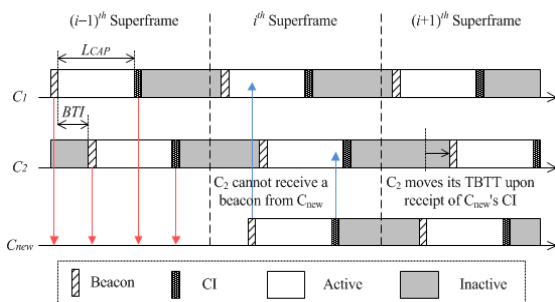


그림 3. 새로운 코디네이터의 추가
Fig. 3. An adaptive operation for joined coordinator

$$TBTT_{new}^i \leftarrow TBTT_1^i + BTI \quad (2)$$

여기서 $TBTT_j^i$ 는 i 번째 슈퍼프레임 구간에서 j 번째로 시작되는 활성 구간 시작 시점을 의미한다.

특히, 코디네이터가 비활성 구간에 위치하고 있는 동안에는 다른 노드가 전송하는 메시지를 수신할 수 없기 때문에, 새로운 코디네이터가 전송한 비콘 프레임을 일부 코디네이터가 수신할 수 없다. 예를 들어, 그림 3과 같이, i 번째 슈퍼프레임 구간에서 C_{new} 의 비콘 프레임이 전송되는 시점에 C_2 가 비활성 구간에 위치하기 때문에 C_2 는 이를 수신할 수 없다. 따라서 이러한 코디네이터들은 비콘 프레임 대신 활성 구간 종료 시점에 전송하는 CI 메시지를 수신하여 새로운 코디네이터의 추가를 인식하고, 아래와 같이 새로 변경된 BTI 의 크기만큼 자신의 활성 구간 시작 시점을 이동한다.

$$TBTT_j^i \leftarrow TBTT_1^i + j \times BTI, \quad j \geq 2 \quad (3)$$

위의 식 (3)을 이용하여 기존의 코디네이터들은 BTI 정보를 이용하여 $TBTT$ 를 조정함으로써 각 활성 구간 시작 시점을 분산시킨다. 이는 코디네이터 간 활성 구간 시작 시점이 서로 인접하는 것을 방지하고 모든 코디네이터들은 인접 코디네이터와의 비콘 프레임 전송 간격을 일정하게 유지함으로써 패킷 버스트 간의 경쟁을 회피하고, 이를 통해 센서 노드의 에너지 효율성을 향상시킨다.

3.2.2. 숨겨진 코디네이터의 추가

네트워크에 새로 추가되는 코디네이터가 기존의 특정 코디네이터에 대해 숨겨진 노드가 되는 경우에도 네트워크상의 비콘과 CI 메시지를 이용하여 각 코디네이터가 적절히 BTI 및 $TBTT$ 를 결정할 수 있게 된다. 예를 들어, 그림 4.(a)와 같이 코디네이터 C 가 코디네이터 A 에 대해 숨겨진 노드가 되는 경우, 코디네이터 C 는 코디네이터 B 의 CI 메시지를 수신하고 CI 메시지에 저장된 코디네이터 ID를 통해 코디네이터 A 의 존재를 인지하지만, 코디네이터 A 로부터 비콘 및 CI 메시지를 직접 수신하지 못한다. 이를 바탕으로 코디네이터 C 는 코디네이터 A 에 대해 자신이 숨겨진 노드가 됨을 인지하게 된다.

새로운 코디네이터 C_{new} 가 기존의 특정 코디네이터에 대해 숨겨진 노드가 되는 경우, C_{new} 가 비콘 전송 시점을 결정하는 방법은 다음과 같다. 먼저

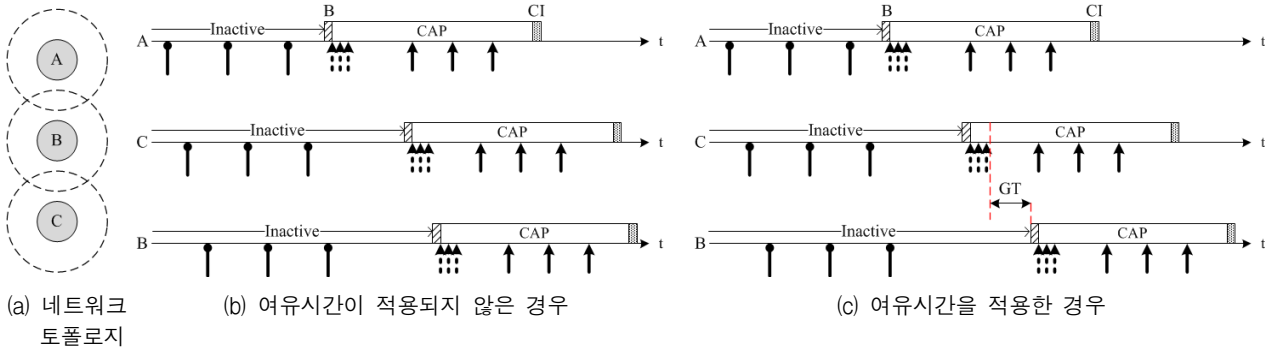


그림 4. 숨겨진 코디네이터가 있는 경우의 동작
Fig. 4. An adaptive operation for hidden coordinator

BTI 는 식 (1)을 사용하여 결정되며, $TBTT$ 는 C_{new} 가 수집한 CI 메시지를 이용해 알아낸 코디네이터 집합 C' 내에서 가장 빠른 시점에 비콘을 전송하는 코디네이터의 $TBTT$ 에 BTI 만큼 더한 값으로 결정된다.

$$TBTT \leftarrow \min_{\{1 \leq i \leq n\} \in C'} (TBTT_i) + BTI \quad (4)$$

그러나, 네트워크의 규모가 커짐에 따라 숨겨진 코디네이터의 수가 증가할 수 있으며, 이는 그림 4.(b)와 같이 기존 IEEE 802.15.4에서 문제점으로 제기되었던 활성 구간 직후에 발생하는 패킷 버스트 간 경쟁 및 충돌 문제를 다시 야기할 수 있다. 이 문제점을 해결하기 위해 그림 4.(c)와 같이 여유시간 (guard time, GT)을 이용해 C_{new} 를 제외한 다른 코디네이터의 $TBTT$ 를 보정함으로써 비콘 전송 시점을 적절하게 분산시키고 패킷 버스트 간 경쟁 및 충돌을 완화할 수 있다. 이 때, GT를 결정하는 식은 다음과 같다.

$$GT = \left| \min_{\{1 \leq i \leq n\} \in C'} (BTI_i) - BTI \right|$$

$$TBTT \leftarrow TBTT + GT \quad (5)$$

GT는 수집한 CI 메시지를 통해 수집한 인접 코디네이터의 BTI 중 가장 작은 값의 BTI 값과 자신의 BTI 값의 차이로 정의된다. 여기서 최소의 BTI 값은 가장 많은 수의 인접 코디네이터에 의해 심각한 경쟁을 겪는 코디네이터를 의미하며, 이에 대해 BTI 값을 보정함으로써 패킷 버스트 간 경쟁 및 충돌 회피 효과를 얻을 수 있게 된다.

이와 같이 특정 코디네이터가 숨겨진 노드가 되는 경우에도 CI 메시지에 저장된 정보를 이용하여 기존 코디네이터가 비콘 전송 시점을 조정 및 보정하여 패킷 버스트 간 경쟁 및 충돌을 회피하여 센

서 노드의 에너지 효율성을 향상시킨다.

3.2.3. 코디네이터의 제거

일정 시간동안 이웃 코디네이터의 비콘 프레임 또는 CI 메시지가 수신되지 않는 경우, 해당 노드가 제거되었음을 판단하고 각 코디네이터는 자신의 활성 구간 시작 시점을 조절한다. 예를 들어, 그림 5와 같이 $i-1$ 번째 슈퍼프레임 구간에서 코디네이터 C_1 과 C_2 는 C_3 의 비콘 프레임 및 CI 메시지를 더 이상 수신하지 못한다. 이를 통해, 기존 코디네이터 C_1 과 C_2 는 네트워크 토폴로지의 변화를 인지하고, i 번째 슈퍼프레임 구간에서 식 (1)을 통해 새로운 BTI 를 다시 계산한다. 이를 기반으로 식 (3)을 이용해 새로운 활성 구간 시작 시점을 결정한 뒤, 변경된 $TBTT$ 값을 이용하여 $i+1$ 번째 슈퍼프레임에서 통신을 진행한다.

중요한 점은, 해당 코디네이터에 속한 센서 노드가 비콘 프레임을 성공적으로 수신하도록 하기 위해 $i-1$ 번째 슈퍼프레임에서 특정 코디네이터의 제거를 인식한 기존 코디네이터들이 i 번째 슈퍼프레임동안 비활성 상태를 유지한 뒤, $i+1$ 번째 슈퍼프레임 구간부터 통신을 진행한다. 그 이유는 센서 노드는 예정된 $TBTT$ 시점에 비활성 상태에서 깨어나 비콘

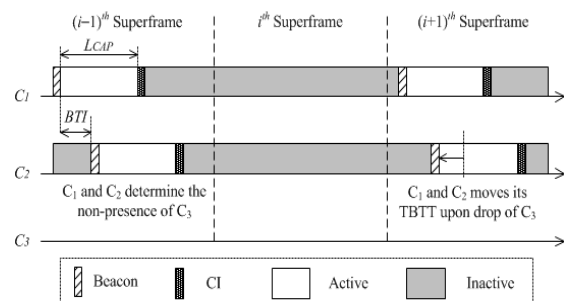


그림 5. 특정 코디네이터의 제거
Fig. 5. An adaptive operation after a coordinator is removed

표 1. IEEE 802.15.4 시스템 파라미터
Table 1. System parameter settings for IEEE 802.15.4

System parameter	Specific value
Frequency band	2.4 GHz
Data rate	250 Kbps
minBE	3
maxBE	5
maxNB	4
Data frame overhead	0.48 ms (15 B)
ACK frame	0.352 ms (11 B)
Backoff slot unit	0.32 ms (20 symbols)

표 2. OPNET 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation parameter settings for OPNET simulation

Simulation parameter	Specific value
Propagation model	Two-ray ground
# coordinators	1 - 10
# sensors per coordinators	5
Simulation time	300 s
Deployment	Random
Traffic load	1 Kbps
Traffic model	CBR
Beacon order	9
Superframe order	7
Transmit power	17.4 mA
Receive power	19.7 mA
Idle power	20 uA
Sleep power	1 uA

프레임을 수신하도록 함으로써, 변경된 활성화 구간 시작 시점에 적응하도록 하기 위함이다.

IV. 성능 평가

제안하는 기법의 성능을 측정하기 위하여, OPNET 시뮬레이터를 사용하였다. 실험에 사용한 파라미터는 참고문헌 [1]을 참조하여 IEEE 802.15.4 표준을 기반으로 적용하였고, 이에 대한 내용은 표 1에 정리되어 있다. 시뮬레이터 상에서 무선 구간 데이터 전송 속도는 250 Kbps이며, 각 코디네이터는 5개의 무작위로 배치된 센서 노드를 가지고 스타 토폴로지를 구성한다. 이 때, 센서 노드의 전송 반경은 에너지 소비를 최소화하기 위해 10 m로 설정하였으며, 코디네이터의 전송 반경은 약 25 m로 설정하여 인접 코디네이터의 유무를 정확히 파악할 수 있도록 하였다. 또한 시뮬레이션 시간이 지남에 따라 추가되는 코디네이터의 위치를 무작위로 배치하였다. 특히, 참고문헌 [9]의 MICAz mote를 기준

으로 TX, RX, Idle, 그리고 Sleep 상태의 에너지 소비를 설정하였으며, 이에 관한 상세한 시뮬레이션 파라미터는 표 2에 정리되어 있다. 제안하는 기법의 실험 결과는 에너지 효율성, 충돌 발생 정도, throughput 및 평균 전송 지연 측면에서 IEEE 802.15.4 및 참고문헌 [5]에서 제안된 Adaptive Contention Strategy (ACS)와 비교된다.

그림 6은 코디네이터 수의 변화에 따른 네트워크의 에너지 효율성을 보여준다. 이 때, 측정된 에너지 효율성은 단위 에너지 당 성공적으로 전송한 bit의 크기로 정의된다. 그림에서 알 수 있듯이, 단일 코디네이터에 의해 네트워크가 구성될 때 제안하는 기법은 기존 IEEE 802.15.4 표준과 동일하게 동작하므로 소모하는 에너지가 같지만, 코디네이터가 추가됨에 따라 활성화 구간 시작 시점에 발생하는 패킷 버스트 간 경쟁 및 충돌을 완화한다. 이 때, ACS 또한 기존 IEEE 802.15.4보다 높은 에너지 효율성을 보이지만 트래픽 부하를 효과적으로 분산시킬 뿐, 활성화 구간 시작 시점에서 발생하는 패킷 버스트 간의 경쟁 및 충돌에 대한 해결 방안이 없기 때문에 제안 기법보다는 성능 향상의 폭이 낮다. 그러나 네트워크에 코디네이터의 수가 늘어남에 따라 제안하는 기법을 적용하더라도 각 코디네이터의 활성화 구간 시작 시점이 점차 인접해진다. 이로 인해 코디네이터의 수가 적을 때에 비해 패킷 버스트 간 경쟁 및 충돌을 효율적으로 회피하기 어려워지며, 결국 에너지 효율성이 IEEE 802.15.4와 비슷해지는 양상을 보인다.

그림 7은 코디네이터 수의 변화에 따른 패킷 충돌 발생 정도의 차이를 보여준다. 측정된 결과는 성공적으로 전송한 패킷 당 발생한 충돌의 횟수로 나

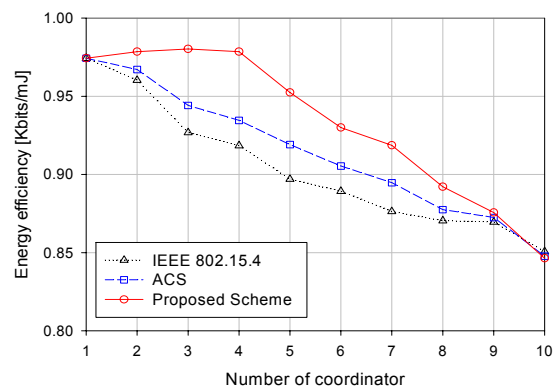


그림 6. 코디네이터 수의 변화에 따른 에너지 효율성 차이
Fig. 6. Energy efficiency with varying number of coordinators

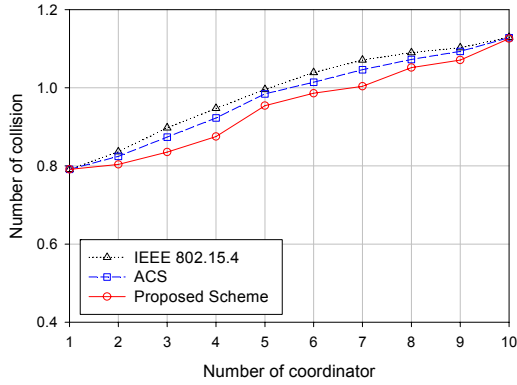


그림 7. 코디네이터 수의 변화에 따른 충돌 발생 정도 차이

Fig. 7. Number of collisions of each successful transmission with varying number of coordinators

타내었다. 먼저 IEEE 802.15.4는 각 코디네이터의 활성 구간 시작 시점이 인접해지는 경우 패킷 버스트 간 경쟁으로 인해 발생할 수 있는 패킷 충돌을 완화하기 어렵다. 이와 유사하게, ACS 또한 활성 구간 내에서 트래픽을 분산시키기 때문에 패킷 버스트로 인한 경쟁 및 충돌을 효과적으로 해결하지 못한다. 반면, 제안하는 기법은 활성 구간 시작 시점을 분산시킴으로써 패킷 버스트 간 경쟁 및 충돌을 완화할 수 있다. 하지만 그림 6에서 보인 결과와 유사하게 코디네이터의 수가 많아짐에 따라 활성 구간 시작 시점을 분산시키더라도 점차 그 시점이 인접해지기 때문에 패킷 버스트 간 경쟁 및 충돌을 완화하기 어려운 한계를 보인다. 이로 인해, 코디네이터의 추가에 따른 그 성능이 IEEE 802.15.4와 비슷해진다.

그림 8은 코디네이터의 추가에 따른 개별 센서 노드의 throughput을 보여준다. 코디네이터의 수가 적을 때에는 패킷 버스트 간 경쟁 및 충돌로 인한 재전송 과정이 간헐적으로 일어나기 때문에 제안하는 기법은 IEEE 802.15.4와 비슷한 throughput을 보인다. 반면, 코디네이터의 수가 점차 증가함에 따라 제안 기법은 보다 높은 throughput을 보인다.

이는 코디네이터의 수가 많아지더라도 활성 구간 시작 시점을 분산시킴으로써 패킷 충돌과 그에 따른 재전송을 줄이기 때문이다. 이 때, 트래픽 분산 효과로 ACS 역시 기존 IEEE 802.15.4보다 높은 성능을 보이지만, 앞선 결과로 미루어 보아 충돌 횟수가 제안 기법보다 많기 때문에 그 성능 향상폭이 낮은 것을 확인할 수 있다. 그러나 앞선 충돌 발생 정도의 결과를 보았을 때, 코디네이터의 수가 증가함에 따라 제안하는 기법의 패킷 충돌 정도가 IEEE

802.15.4와 비슷해지면서 그로 인한 재전송 횟수가 많아진다. 따라서 앞선 결과들과 유사하게 그 성능이 IEEE 802.15.4와 비슷한 양상을 보이게 된다.

그림 9는 코디네이터의 추가에 따른 네트워크의 평균 전송 지연을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이, 전체적으로 제안하는 기법이 IEEE 802.15.4

에 비해 작은 전송 지연을 갖는다. 코디네이터의 수가 적을 때에는 제안하는 기법이 활성 구간 시작 시점을 적절하게 분산시킴으로써 패킷 버스트 간 충돌을 완화함과 동시에 재전송 과정에 필요한 지연 시간을 줄이므로 IEEE 802.15.4보다 적은 전송 지연을 갖는다. 그러나 다수의 코디네이터가 네트워크에 추가되면 앞서 설명한 제안하는 기법의 한계로 인해 활성 구간 시작 시점이 점차 인접해지고, 이에 따라 패킷 충돌 발생 정도 및 재전송 횟수의 증가로 인한 전송 지연 시간이 늘어나기 때문에 IEEE 802.15.4와 비슷한 전송 지연 성능을 보인다.

실험 결과를 종합적으로 보았을 때, 대부분의 경

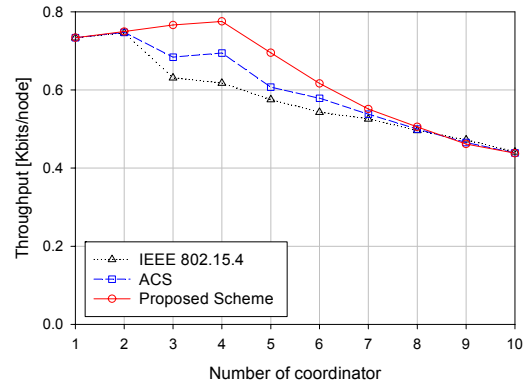


그림 8. 코디네이터 수의 변화에 따른 throughput 차이
Fig. 8. Throughput with varying number of coordinators

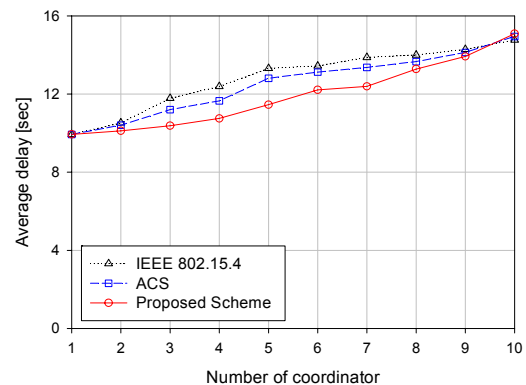


그림 9. 코디네이터 수의 변화에 따른 평균 전송 지연 차이
Fig. 9. Average delay with varying number of coordinators

우에 네트워크에서는 제안하는 기법이 패킷 버스트 간 경쟁 및 충돌을 효율적으로 완화, 회피함으로써 재전송 횟수를 줄인다. 이는 재전송 과정에서 소모되는 불필요한 에너지 및 지연 시간을 줄이는 결과를 가져옴으로써 전체적으로 IEEE 802.15.4 및 ACS에 비해 높은 성능을 보인다.

V. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 기반 무선 센서 네트워크를 위한 효율적 에너지 소모 기법을 제안하였다. 이를 위해 코디네이터의 비콘 프레임 전송 시점을 적절하게 분산시킴으로써 활성 구간 시작 시점에 발생하는 패킷 버스트 간의 경쟁 및 충돌을 완화하였다. 실험 결과를 통해 제안하는 기법이 극단적으로 센서 노드의 수가 많은 경우를 제외한 일반적인 환경의 센서 네트워크에서 기존 IEEE 802.15.4보다 높은 에너지 효율성을 보일 뿐만 아니라, throughput, 충돌 발생 정도 및 평균 전송 지연 측면에서 보다 높은 성능을 보임을 확인할 수 있었다.

향후 이번 연구 결과를 바탕으로 코디네이터가 상당 수 존재하는 대규모 센서 네트워크로의 적용 방안에 대해 연구할 계획이다.

References

[1] IEEE, *Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specification for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, IEEE std 802.15.4a, 2007.

[2] A.-C. Pang and H.-W. Tseng, "Dynamic backoff for wireless personal networks," in *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf. (GLOBECOM '04)*, vol. 3, pp. 1580-1584, Dallas, U.S.A., Nov.-Dec. 2004.

[3] B.-H. Lee and H.-K. Wu, "Study on a delayed backoff algorithm for IEEE 802.15.4 low-rate wireless personal area networks," *IEF Commun.*, vol. 3, no. 7, pp. 1089-1096, July 2009.

[4] S.-T. Sheu and Y.-Y. Shih, "P-Frozen Contention Strategy (PFCS) for solving collision chain problem in IEEE 802.15.4

WPANs," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC 2006-Spring)*, vol. 3, pp. 1323-1327, Melbourne, Australia, May 2006.

[5] H.-W. Tseng, A.-C. Pang, and C.-F. Kuo, "An adaptive contention control strategy for IEEE 802.15.4 based wireless sensor networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 9, pp. 5164-5173, Nov. 2009.

[6] S.-T. Sheu, Y.-Y. Shih, and L.-W. Chen, "An adaptive Interleaving Access Scheme (IAS) for IEEE 802.15.4 WPANs," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC 2005-Spring)*, vol. 3, pp. 1523-1527, Stockholm, Sweden, May-June 2005.

[7] L. Cheng, G. Bourgeois, and X. Zhang, "A new GTS allocation scheme for IEEE 802.15.4 networks with improved bandwidth utilization," in *Proc. Int. Symp. Commun. Inform. Technol. (ISCIT '07)*, pp. 1143-1148, Sydney, Australia, Oct. 2007.

[8] M. Valero, S. S. Jung, A. G. Bourgeois, and R. Beyah, "An incrementally Deployable Energy Efficient 802.15.4 MAC Protocol (DEEP)," *Ad Hoc Networks*, vol. 10, no. 7, pp. 1238-1252, Sep. 2012.

[9] F. Cuomo, A. Abbagnale, and E. Cipollone, "Cross-layer network formation for energy-efficient IEEE 802.15.4/ZigBee wireless sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 2, pp. 672-686, Mar. 2013.

[10] X. Li, C. J. Bleakley, and W. Bober, "Enhanced beacon-enabled mode for improved IEEE 802.15.4 low data rate performance," *Wireless Networks*, vol. 18, no. 1, pp. 59-74, Jan. 2012.

[11] OPNET Technologies, Inc., OPNET, Retrieved Aug., 15, 2012, from <http://www.opnet.com/>.

[12] MOOG Inc., *MICAz datasheet*, Retrieved Oct., 3, 2012, from <http://www.xbow.com/>.

[13] H. R. Lee, K.-H. Jung, and Y.-J. Suh, "A contention mitigation scheme in wireless sensor networks based on IEEE 802.15.4," in *Proc. KICS Int. Conf. Commun. 2013 (KICS ICC 2013)*, pp. 274-275, Yongpyeong, Korea, Jan. 2013.

이 효 련 (Hyo Ryun Lee)



2012년 2월 경북대학교 IT대학
전자공학과
2013년 3월~현재 포항공과대
학교 정보전자융합공학부 석
사과정
<관심분야> 전자공학, 무선 센
서 네트워크, 무선네트워크

정 경 학 (Kyoung-Hak Jung)



2007년 2월 단국대학교 전기전
자컴퓨터공학부
2008년 3월~현재 포항공과대
학교 컴퓨터공학과 통합과정
<관심분야> 무선랜, 무선 네트
워크, 애드혹 네트워크

서 영 주 (Young-Joo Suh)



1985년 2월 한양대학교 전자공
학과
1987년 2월 한양대학교 전자공
학과 석사
1996년 미국 조지아 공대
(Georgia Tech) 컴퓨터공학
박사

1988년~1990년 LG전자 연구원

1990년~1993년 충청대학 교수

1996년~1997년 미국 Georgia Tech 연구원

1997년~1998년 미국 University of Michigan 연구
원

1998년~현재 포항공과대학교 컴퓨터공학과 교수

<관심분야> 무선랜 프로토콜, 이동 IP, 이동 멀티캐
스트, ad-hoc/sensor 네트워크, 차세대 이동 네트
워크