creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

무선 센서 네트워크에서의 전송 자원 관리 기술

2016 년 8 월

서울대학교 대학원

공과대학 전기정보공학부

정 광 희

초 록

주요어: 무선 센서 네트워크, 전송 자원 관리, 적응 동작, 패킷 송수신, 전력 소모
학 번: 2014-21675

무선 센서 네트워크를 사용하여 산불 감시, 농장 관리, 공장 자동화, 가정 자동화 등 다양한 IoT 서비스 구현을 위해서는 다양한 트래픽을 처리할 수 있는 저전력 통신 기술이 요구된다. 무선 센서 네트워크 구축에 널리 쓰이는 ZigBee는 CSMA/CA를 사용하여 신호를 송수신하므로 대규모/고밀집 환경에서 신호 송수신 경쟁 및 숨은 기기 충돌로 인한 전송 성능 저하가 심각하다. ZigBee는 신호를 송수신하는 활성 구간과 휴식을 취하는 비활성 구간으로 이루어지는 프레임 구조를 사용하여 전력 소모를 줄일 수 있으나 각 부모 기기의 자녀 기기 수와 트래픽을 고려하지 않고 동일한 크기의 활성 구간을 사용하므로 패킷 손실 및 전력 낭비 문제가 발생할 수 있다.

본 논문에서는 패킷 송수신 성능을 향상시키며 전력 소모를 최소화하는 전송 자원 관리 기법을 제안한다. 부모 기기는 활성 구간의 일부를 자녀 라우터들에게 TDMA 방식의 전용 전송 자원으로 할당하고, 나머지 활성 구간을 자녀 종단 기기들에게 CSMA/CA 방식의 공용 경쟁 전송 자원으로 할당하여 신호를 송수신하게 한다. 각 기기들은 송신하는 패킷에 다음에 송신할 패킷의 정보와 버퍼 경고 정보를 포함시켜 전송하여, 부모 기기들이 자녀 기기들과의 상/하향 트래픽을 인지하여 패킷 송수신에 필요한 전송 자원과 자신의 활성 구간 크기를 적응적으로 조정한다. 또한, 상기 전용 전송 자원을 사용하는 부모-자녀 기기들은 할당된 자원에서 상기 다음에 송신할 패킷의 정보에 따라서 송수신 역할을 변경하며 상/하향으로 패킷을 송수신하고, 전체 활성 구간에서 송수신을 완료한 기기들은 수면 상태로 전환한다. 모의 실험을 통해 제안 기법의 성능을 다양한 통신 환경에서 검증한다.

목 차

제 1 장 서 론 1
제 2 장 시스템 모델 6
제 1 절 클러스터 트리 구조의 비컨 모드 6
제 2 절 주기적 프레임 구조 및 사용 7
제 3 장 제안 전송 자원 관리 기법 10
제 1 절 초기 전송 자원 할당 11
제 2 절 전송 자원의 사용 13
제 3 절 전송 자원의 조정 19
제 4 절 신호 교환 부담 29
제 4 장 성능 평가 30
제 5 장 결 론 38
참고문헌 39
Abstract 41

표 목차

표 1. 신호 교환 부담 비교 30
표 2. 모의 실험 변수 31
표 3. 트래픽 송수신 능력 비교 32

그림 목차

그림 1. 클러스터 트리 구조 및 활성 구간 사용 예 7
그림 2. IEEE 802.15.4 주기적 프레임 구조 9
그림 3. 제안 기법 전체 동작 과정 11
그림 4. 버퍼 정렬 및 추가 정보 포함 13
그림 5. 송수신 역할 변경 및 수면 전환 과정 15
그림 6. 채널 관찰로 상대 기기의 역할을 파악하는 과정 16
그림 7. GTS 크기 조정 21
그림 8. 필요 자원량 파악 25
그림 9. 필요 CAP 판단 및 활성 구간 크기 조정 26
그림 10. 간섭이 없는 환경의 패킷 송수신 성능 및 전력 소모 . 33
그림 11. 간섭이 있는 환경의 패킷 송수신 성능 및 전력 소모 . 35
그림 12. 간섭이 있는 환경의 패킷 중요도별 전달 비중 37

제 1 장 서 론

무선 센서 네트워크(wireless sensor network; WSN) 기술은 산불 감시, 농장 관리, 공장 자동화, 스마트 홈 등 다양한 IoT(Internet-of-Things) 서비스에서 필수적인 센서 기기들의 연결성을 제공하는 기본 기술이다 [1, 2]. WSN내의 대부분의 기기들은 배터리로 동작하므로 전력 소모를 최소화하며 운용하는 것이 필요하다 [3].

WSN의 대표적 네트워킹 기술인 ZigBee는 클러스터 트리 구조로 다중 홉 네트워크를 구성하고, 각 클러스터에 주기적으로 활성 구간(active period)을 할당한다. ZigBee 기기들은 할당된 활성 구간에서만 신호를 송수신하고 활성 구간이 종료되면 송수신기 작동을 중지시켜 저전력으로 네트워크를 운용할 수 있다 [4]. 그러나 ZigBee는 활성 구간에서 반송파 감지 다중 접속/충돌 회피(carrier sensing multiple access with collision avoidance; CSMA/CA) 기반으로 신호를 송수신하기 때문에, 대규모/고밀집 네트워크 환경에서 기기간 송수신 경쟁 충돌 및 숨은 기기 충돌로 인한 전력 낭비 및 패킷 손실 문제가 심각하다. 또한, 다중 홉 기반의 대규모 네트워크 환경에서 각 부모 기기의 자녀 기기 수 및 그에 따른 트래픽 양의 편차가 큼에도 불구하고 동일한 크기의 활성 구간을 사용하기 때문에 트래픽 양이 클 경우 패킷 손실이 발생하고, 적은 경우에는 유휴 수신으로 인한 전력 낭비 문제가 발생한다.

활성 구간에서 신호 충돌 문제를 완화하기 위하여 자녀 기기들에게 전용의 통신 구간을 할당하는 방안이 제시되었으나 대규모 네트워크에 적용하기에는 적합하지 못하다 [5, 6]. ZigBee에 적용하는 IEEE 802.15.4 PHY/MAC 계층 프로토콜은 상기 활성 구간의 일부를 시간 분할 다중 접속(time-division multiple access; TDMA) 방식의 전용 전송 자원(guaranteed time slot; GTS)의 사용이 가능하나, 구체적인 사용 방안이 정의되어 있지 않다 [4, 7]. 클러스터 트리 기반 GTS 할당(cluster-tree based GTS allocation scheme; CTGAS)은 네트워크 설정에 따라서 부모 기기별 최대 자녀 수가 제한되는 ZigBee의 DAAM(distributed address assignment mechanism) 주소 구조의 특성을 이용하여 초기 네트워크 구성 시에 각 부모 기기들이 자신의 활성 구간 전체를 자신이 수용 가능한 최대 자녀 수에 맞추어서 GTS로 균등 분배하는 기법을 제안하였다. 이 기법은 자원 필요량 판단과 자원

요청 및 할당 과정이 필요하지 않아서 저 복잡도와 신호교환 부담이 없이 GTS 사용이 가능하다. 그러나 각 자녀 기기들에게 고정된 자원을 할당하므로 간섭 및 토폴로지 변화 등의 네트워크 환경 변화에 취약하고, 모든 기기에게 동일한 양의 GTS를 할당하기 때문에 트래픽 양이 큰 라우터(router)에서 버퍼 오버플로우(overflow)에 의한 패킷 손실 문제 및 트래픽 부담이 적은 종단 기기(end device)에서 유휴 동작에 따른 전력 낭비 문제가 존재한다. 또한, 활성 구간 전체를 GTS로 개별 자녀 기기들의 전용 자원으로 할당하기 때문에 한번 자원 할당이 이루어진 이후에 부모 기기는 자원을 할당한 자녀 기기들과의 통신만 가능하므로 자가 치료(self-healing) 동작을 포함한 네트워크 동작 중에 발생하는 추가 기기의 가입 요청 메시지를 수신할 수 없는 문제도 존재한다 [5]. CTGAS와 달리 자녀 기기의 트래픽 상황에 따라 자원을 할당하는 방법을 취하는 동적 GTS 할당(dynamic GTS allocation scheme; DGAS) 기법은 IEEE 802.15.4 표준에서 제공하는 GTS 할당 과정에 따라서 자녀 기기들이 부모 기기에게 GTS 요청 패킷을 전송하는데, 이때 자신의 버퍼의 패킷양을 알림으로써 부모 기기가 각 자녀 기기들에게 트래픽양에 따라서 다른 크기의 GTS를 할당하고, 각 자녀 기기에게 GTS 사용률(utilization)이 클수록 다음 GTS 할당시 자원을 우선할당 하는 기법을 제안하였다. 그러나 대규모 기기가 존재하고 많은 양의 트래픽이 발생되는 상황에서 GTS 요청 패킷의 사용 및 버퍼의 잔여 패킷양을 송신하는 패킷에 포함하여 부모 기기에게 보고하는 것에 의한 신호 교환 부담에 대한 고려가 전혀 없으며, 네트워크에서 상향 트래픽만 존재하며 채널 간섭이 발생하지 않는 환경에 대해서만 설계되어 WSN의 다양한 통신 환경에서 패킷 송수신 성능을 보장하기 어렵다. 또한, 네트워크에서 여러 종류의 패킷이 각기 다른 중요도를 가질 때 이 기법은 패킷 중요도에 따른 전송 및 자원 할당의 차등 동작이 불가능하며, 할당된 자원이 패킷 송수신에 실제 사용되는 정도를 관찰하지만 사용되지 않는 할당된 자원으로 인한 전력 및 자원 낭비를 막기 위한 동작은 고려하지 않았다 [6].

한편, 고정된 활성 구간 사용에 따른 전력 낭비 및 패킷 손실 문제를 해결하기 위하여, 부모 기기가 활성 구간에서 패킷을 수신하지 않은 유휴 시간과 자녀 기기들로부터 수신한 패킷의 시간당 전송량(throughput)을 측정하여 자녀 기기들이 보고한 버퍼의 남은 패킷양을 기반으로 상기 활성 구간의 크기를 적응적으로 조절하는 기법(adaptive duty cycle algorithm; ADCA)이 연구되었다. 핵심은

측정한 유휴 시간과 시간당 전송량을 사용하여 필요 활성 구간 크기를 판단하는 시점에서 자녀 기기들의 버퍼에 남아있는 패킷을 다음 활성 구간에서 자녀 기기들과 통신하여 자녀 기기들의 버퍼에 남아있는 패킷을 모두 수신 가능한지를 판단하는 것이다. 그러나 이 기법은 한 활성 구간에서 측정한 유휴 시간의 발생 원인이 동일 채널의 간섭과 신호 충돌에 의해 발생할 수 있다는 점을 간과하고, 다음 활성 구간에서 온전히 패킷 전송에 사용 될 수 있다는 판단으로 인하여 활성 구간을 실제 패킷을 송수신하는데 필요한 크기보다 작게 판단하게 되는 문제점이 존재한다. 또한, 이 기법에서 각 자녀 기기들은 자신의 버퍼의 패킷양을 7 단계로 구분하여 3비트를 부모 기기에게 송신하는 패킷에 포함시키는데, 이로 인한 필요 활성 구간 판단에 양자화 오류가 발생하며 하향 트래픽에 대한 고려도 없기 때문에 WSN의 다양한 운용 환경에서 패킷 송수신 성능을 보장하기 어렵다 [8]. 부모 기기가 직전 활성 구간과 현재 활성 구간에서 자녀 기기들로부터 수신한 패킷 수만을 비교하여 트래픽 변화를 예측하고 활성 구간 크기를 조절 하는 기법(adaptive algorithm to optimize the dynamics; AAOD)이 제안되었다. 이 기법은 데이터 패킷의 수만을 관찰하기 때문에 추가적으로 활성 구간 크기 조정을 위한 제어 패킷을 사용하지 않고 추가 신호 교환 부담이 없다는 장점이 있다. 그러나 단순히 수신 패킷 수에만 의존하여 트래픽양을 판단하기 때문에 여러 크기 또는 중요도를 가지는 패킷이 생성되는 네트워크에서는 이 기법을 적용하여 활성 구간 크기를 조정할 수 없다. 또한, 연속된 두 개의 활성 구간에서 부모 기기가 수신한 패킷 수를 비교하여 그 변화량이 특정 기준값 보다 클 경우에 활성 구간을 증가 또는 감소 시키기 때문에, 이 기준값을 정하는 것이 매우 중요함에도 불구하고 각 부모 기기별 자녀 수와 트래픽 크기를 무시한 네트워크에서 일괄적으로 정해진 기준값을 사용하여 적절한 활성 구간 조정이 이루어질 수 없다 [9]. 부모 기기가 자녀 기기들로부터 패킷을 수신하기 위해 사용된 활성 구간의 사용률(occupancy rate; OR)과 자녀 기기가 자신에게 송신하는 패킷의 충돌률(collision rate; CR)을 사용하여 활성 구간 크기를 조정하는 기법(dynamic super-frame adjustment algorithm; DSAA)도 제안되었다. 여기서 충돌률은 한 활성 구간에서 모든 자녀 기기들 중에서 성공적으로 부모 기기에게 패킷을 전송하지 않은 기기의 비율을 나타낸다. 상기 충돌률을 산출하기 위해서 이 기법은 부모 기기의 활성 구간에서 각 자녀 기기들이 항상 부모 기기에게 송신할 패킷이 존재함을

가정하고, 부모 기기는 자신에게 패킷을 송신하지 않은 자녀 기기는 신호 경쟁 충돌로 인해서 패킷 송신이 원할하지 않은 것으로 판단한다. 그리고 상기 OR과 CR 각각에 대한 기준값을 설정하여 대소 비교를 통한 4 가지 경우에 대해서 활성 구간 증가 및 감소를 시행한다. 이 기법은 상기 AAOD 기법과 마찬가지로 네트워크에서 하나의 값으로 공유하는 이 기준값들의 설정에 따라서 그 동작과 성능이 크게 변함에도 불구하고 네트워크 환경에 따른 기준값 설정을 전혀 고려하지 않았다. 또한, CR 산출을 위한 트래픽 가정은 WSN 운용 환경에 적용하기 어렵다 [10].

또한, WSN의 기기 간 링크(link) 상태는 동일 채널 간섭 또는 장애물 등의 발생에 따라 빈번히 변화하므로, 송수신 성능을 보장하기 위한 필요 GTS 크기 및 활성 구간 크기가 가변할 뿐만 아니라 링크 손상 시 네트워크 토폴로지의 변화에 따라서 트래픽 부담 또한 변한다. 따라서, 환경 변화에 따라 적응적으로 GTS 및 활성 구간을 변경하는 것이 필요하다. 기존 연구된 전송 자원 할당 기법들은 전송 자원을 효율적으로 사용하는 방법에 대해 충분히 고려하지 못하여 그 응용 범위가 극히 제한적이다 [5, 6, 8, 9, 10]. 대부분의 기존 기법은 상향 트래픽만 존재하는 것을 가정하여 설계되어 상/하향 트래픽이 혼재하는 응용 환경에 적용하기 어렵다. 또한 패킷의 중요도에 대한 고려 없이 설계되어 높은 중요도의 패킷에 대한 송수신 성능을 보장할 수 없다.

본 논문에서는 네트워크를 제어하는 AP, 자신의 자녀 기기를 수용할 수 있는 기기인 라우터, 자신의 자녀 기기를 수용할 수 없는 기기인 종단 기기들이 다중 홉(hop)을 사용하여 부모-자녀 기기 관계로 연결되는 클러스터 트리(cluster-tree) 구조의 네트워크를 형성하고, 부모-자녀 기기들이 신호를 송수신 할 수 있는 활성구간과 송수신을 중지하는 비활성 구간(inactive period)으로 구성된 주기적 프레임 구조를 사용하는 무선 통신 시스템에서 송수신에 필요한 전송 자원을 적응적으로 관리하는 방법을 연구한다. 부모 기기는 활성 구간의 일부를 자녀 라우터들에게 전용 전송 자원으로 할당하고, 나머지 활성 구간을 자녀 종단 기기들에게 공용 경쟁 전송 자원으로 할당한다. 이때 각 기기들은 송신하는 패킷에 다음에 송신할 패킷의 정보를 포함시켜 전송하여, 부모 기기들이 자녀 기기들과의 상/하향 트래픽을 인지하여 패킷 송수신에 필요한 전송 자원과 자신의 활성 구간 크기를 적응적으로 조정한다. 또한, 전용 전송 자원을 사용하는 부모-자녀 기기들은 상기 다음에 송신할 패킷의 정보에 따라 송수신 역할을 변경하여 상/하향으로

패킷을 송수신하고, 전체 활성 구간에서 송수신을 완료한 기기들은 수면(sleep) 상태로 전환한다. 제안 기법은 다양한 통신 환경에서도 전송 자원 및 전력 낭비를 최소화하면서도 패킷 송수신 성능을 향상시킬 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 비컨 모드의 무선 센서 네트워크 모델을 기술한다. 제 3장에서는 제안 전송 자원 관리 기법을 소개하고, 제 4장에서는 시뮬레이션 성능 평가로 제안 기법의 성능 향상을 검증한다. 마지막으로 제 5장에서 결론을 맺는다.

제 2 장 시스템 모델

제 1 절 클러스터 트리 구조의 비컨 모드

그림 1은 클러스터 트리 구조 기의 무선 센서 네트워크의 개념을 도시한 것이다. AP는 네트워크를 관리하며, 라우터는 자녀 기기를 가질 수 있으며, 종단 기기는 하나의 AP 또는 라우터에 연결되지만 자녀 기기를 가질 수 없다. 하나의 홉으로 연결된 임의의 쌍에 대해서, 주 통신 기기와 더 적은 홉으로 연결된 기기를 부모 기기, 더 많은 홉으로 연결된 기기를 자녀 기기로 정의한다. 즉, AP는 오직 부모 기기로서 동작하며, 라우터는 부모 기기로서 동작하는 한편 자녀 기기로서도 동작하며, 종단 기기는 오직 자녀 기기로서 동작한다. 일례로, 그림 1의 102기기를 기준으로, 상기 기기와 연결된 기기 중 AP에 더 적은 홉으로 연결된 101기기에 대해서는 102기기가 자녀 기기가 되고, AP에 더 많은 홉으로 연결된 103기기에 대해서는 102기기가 부모 기기가 된다.

그림 1과 같이 하나의 AP와 다수의 라우터 및 종단 기기로 구성되는 ZigBee/IEEE 802.15.4 비컨 모드 클러스터 트리 네트워크를 고려한다[4, 7]. 각 기기는 전체 네트워크 지역에서 무작위 배치되며, 각 기기들은 자율적으로 부모-자녀관계를 형성하며 클러스터 트리 네트워크를 구성한다. AP와 라우터는 부모 기기로서 자녀 종단 기기의 가입을 받아줄 수 있으며, 이 종단 기기들로 구성되는 각 클러스터의 헤드(cluster head)가 된다.

비컨을 수신한 기기들은 일정한 주기로 상향 패킷을 발생시키고, 부모 기기의 활성 구간에서 상기 부모 기기와 패킷을 송수신 한다. AP는 연결이 정상적으로 유지되고 있다고 판단되는 자녀 기기에게 하향 데이터 패킷을 생성하고 송신한다. 상기 상/하향 패킷들은 각각 두 가지 종류의 중요도 중 하나를 가진다. 중요도가 높은 패킷을 HP(high priority) 패킷, 중요도가 상대적으로 낮은 패킷을 LP(low priority) 패킷이라 하고, 상기 HP 패킷은 상기 LP 패킷보다 전송 자원 관리로 패킷 송수신 성능을 우선적으로 보장해야 할 필요가 있다.

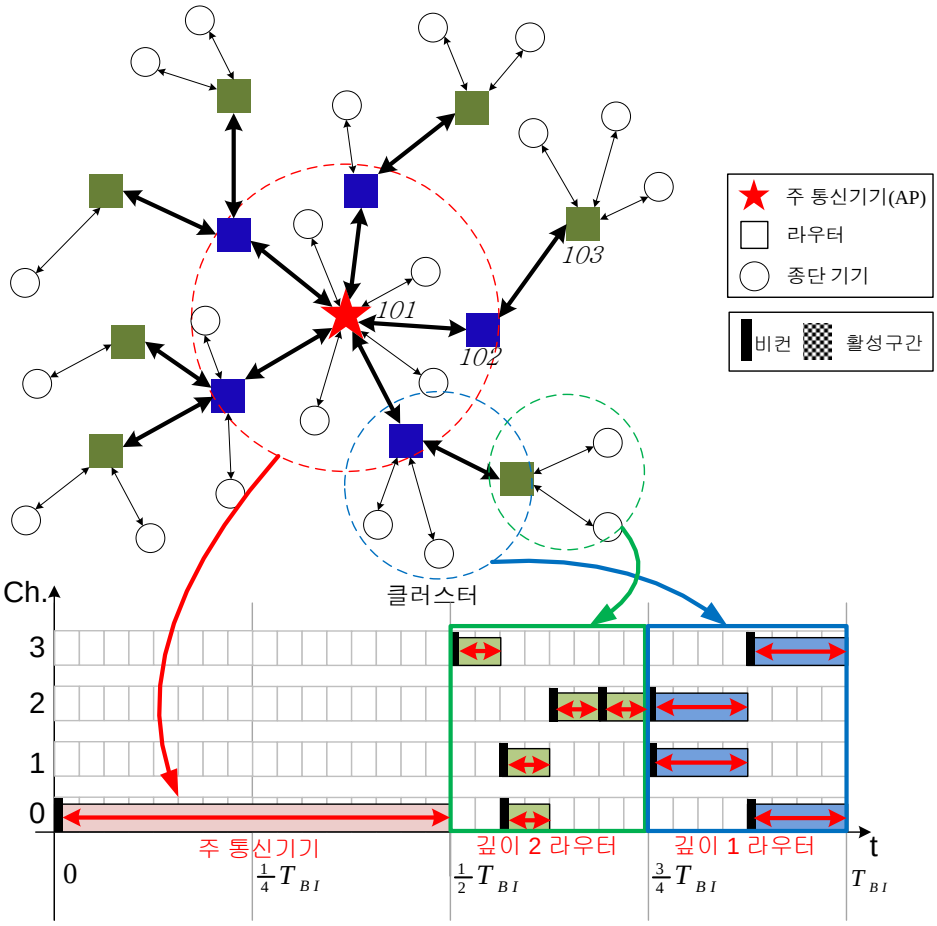


그림 1. 클러스터 트리 구조 WSN의 활성 구간 사용 예

제 2 절 주기적 프레임 구조 및 사용

그림 2는 IEEE 802.15.4의 네트워크 프레임의 구조를 나타낸다. 네트워크의 기기들은 신호를 송수신할 수 있는 활성 구간과 신호를 송수신할 수 없는 비활성 구간으로 이루어진 주기적 전송 구조를 사용한다. 부모 기기(즉, AP 또는 라우터)은 네트워크 가입 시에 자신의 부모 기기로부터 다른 부모 기기들과 겹치지 않는 주파수 및 시간 구간으로 이루어진 자원을 할당 받고 그것의 전체 또는 일부를 자신의 활성 구간으로 설정하고, T_{BI} 마다 비컨을 전송하면서 자신의 활성 구간을 시작하고, 자녀 기기들은 T_{BI} 마다 상기 비컨을 수신하여 부모 기기와 동기화한다. T_{BI} 는 다음과 같이 정의한다.

$$T_{BI} = \left(aBSD \cdot 2^{BO}\right) t_{\mathrm{sym}}, \quad 0 \le BO \le 14 \qquad (2-1)$$

여기서 t_{sym} 은 심볼(symbol) 시간, BO 는 네트워크 초기 설정 값인 비컨 지수, $aBSD$ 는 $aBaseSuperframeDuration$ 이며 960 심볼을 나타낸다 [7]. 부모 기기와 자녀 기기들은 활성 구간에서 신호를 송수신하고, 비활성 구간에서는 수면 동작으로 전력 소모를 줄인다. 라우터들은 자신이 비컨을 송신하고 부모로 동작하는 활성 구간과 자신의 부모가 전송한 비컨을 수신하고 자녀로 동작하는 활성 구간, 총 2개의 활성 구간에서 신호를 송수신하여 신호를 전달(routing)할 수 있다. 여기서 상기 자녀 기기가 상기 부모 기기에게 신호를 전송하는 것을 상향 전송으로 정하고, 반대로 상기 부모 기기가 상기 자녀 기기에게 신호를 전송하는 것을 하향 전송이라 정한다.

부모 기기 p 의 j 번째 비컨 간격의 활성 구간 크기 $T_{SD,p}^{j}$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$T_{SD,p}^{j} = \left(aBSD \cdot 2^{SO_p^j} \right) t_{\mathrm{sym}}, \text{ for } 0 \le T_{SD,p}^{j} \le T_{BI} \qquad (2-2)$$

여기서 SO_p^j 는 상기 $T_{SD,p}^{j}$ 를 결정짓는 변수이다. 또한, 부모 기기는 자신의 활성 구간을 CSMA/CA를 사용하는 공용 경쟁 전송 자원(contention access period; CAP)과 TDMA를 사용하는 전용 전송 자원(즉, GTS) 으로서 자녀 기기들에게 할당할 수 있다. 여기서 할당한 GTS의 총합은 활성 구간의 무 경쟁 구간(contention free period; CFP)가 되며, 상기 GTS를 할당 받지 않은 자녀 기기들 전체는 CAP을 전송 자원으로 사용한다. 상기 부모 기기는 할당한 상기 GTS 및 CAP 정보를 비컨에 포함하여 자녀 기기들에게 전달한다. 즉, 하나의 부모 기기 p 에 대해서 1-홉 자녀 전체 수를 K_p, 1-홉 자녀 라우터의 수를 $\hat{K}_p$ 이라고 하면, 상기 부모 기기 p 의 $\left(K_p - \hat{K}_p\right)$ 개의 자녀 종단 기기들은 CAP에서 상기 부모 기기 p 와 신호를 송수신하고, 상기 부모 기기 p 의 $\hat{K}_p$ 개의 자녀 라우터들은 CFP에서 각자 할당 받은 GTS를 사용해서 상기 부모 기기 p 와 신호를 송수신한다. 이 때 j 번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p 의 CFP의 길이 $T_{CFP,p}^{j}$ 와 CAP의 길이 $T_{CAP,p}^{j}$ 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{CFP,p}^{j} = T_{slot,p}^{j} \sum_{k=1}^{K_p} n_r^j \ , \qquad T_{CAP,p}^{j} = T_{SD,p}^{j} - T_{CFP,p}^{j} \qquad (2-3)$$

여기서 n_r^j 는 j 번째 비컨 간격에서 자녀 라우터 r 에게 할당된 CFP

슬롯양(즉, GTS의 크기), $T^{j}_{slot,p}$ 는 j 번째 비컨 간격에서의 상기 부모 기기 p 의 활성 구간 슬롯 하나의 길이를 나타내며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T^{j}_{slot,p} = T^{j}_{SD,p} / aNSS \qquad (2-4)$$

여기서 $aNSS$ 는 $aNumSuperframeSlots$ 이며 부모 기기의 활성 구간을 구성하는 전체 슬롯의 개수이다. 자녀 라우터들에게 할당하는 CFP 슬롯 총합의 최대량은 $N^{\max}_{CFP}$ 로 제한하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N^{\max}_{CFP} = aNSS - N^{\min}_{CAP} \qquad (2-5)$$

여기서 $N^{\min}_{CAP}$ 은 최소 CAP 슬롯양이며 440 심볼에 해당된다 [7].

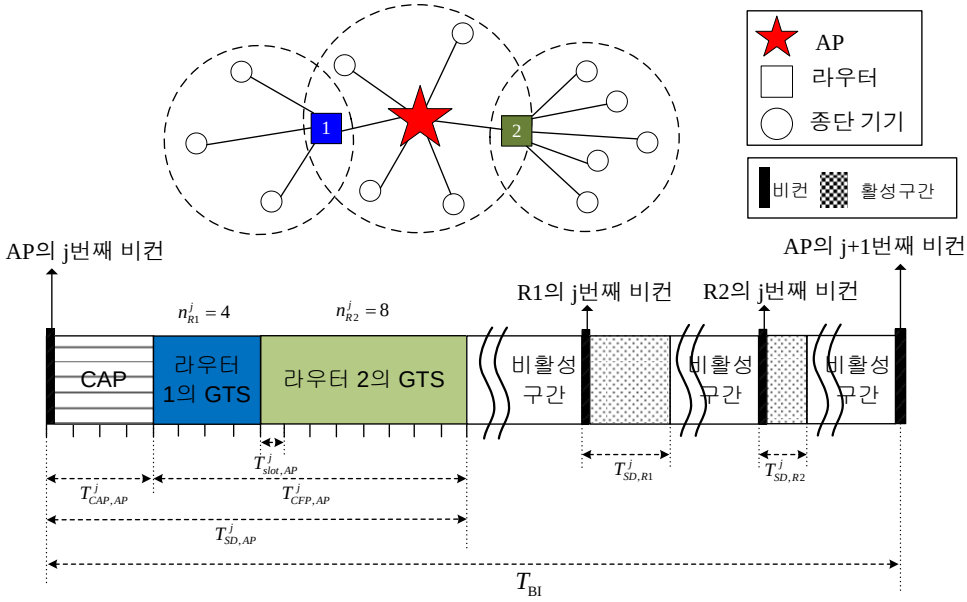


그림 2. IEEE 802.15.4 주기적 프레임 구조

제 3 장 제안 전송 자원 관리 기법

제안 전송 자원 사용 관리 기법은 그림 3과 같은 단계로 동작한다. 부모 기기의 활성 구간이 시작되면 부모 기기는 301단계 및 302단계에서 이전 비컨 간격에서 자녀 기기들과의 송수신과정에서 송수신한 패킷에 포함된 다음에 송신할 패킷의 정보와 버퍼 경고 정보부터 판단한 전송 결과를 사용하여 자녀 라우터 각각에 GTS를 할당하고 자신의 활성 구간 크기를 조정한다(상기 GTS들의 총합이 CFP가 되고, 자녀 종단 기기들에게 할당할 CAP 슬롯양은 수학식 (2-3)과 같이 결정된다). 상기 부모 기기는 303단계에서 상기 활성 구간의 크기 및 자녀 라우터에 할당한 GTS 정보(시작 슬롯, 할당 슬롯양, 초기 전송 방향, 자원 부족 여부)를 비컨에 포함하여 자신의 자녀 기기들에게 송신한다. 상기 자녀 기기는 304단계에서 상기 부모 기기로부터 비컨을 수신하여 현재 자신에게 할당된 자원을 인지한다. 만약 할당 받은 전송 자원이 패킷 손실을 방지하기에 부족하다고 상기 비컨에 표시된 경우에 305단계에서 상기 자녀 기기는 패킷 손실을 막기 위한 전송 자원을 할당해 줄 수 있는 다른 부모 기기를 검색하고 링크를 전환하는 동작을 수행한다. 상기 부모 기기와 상기 자녀 기기는 상기 할당된 자원을 사용하여 306단계에서 다음에 송신할 패킷의 정보와 버퍼 경고 정보가 포함된 패킷을 상/하향 송신한다. 이때, 송신 기기와 수신 기기는 상기 다음에 송신할 패킷의 정보를 사용하여 할당된 자원이 끝나기 이전에 수면 상태로 전환하고, 특히 부모 기기와 자녀 라우터는 하나의 전송 자원에서 상기 다음에 송신할 패킷의 정보를 사용하여 송수신 역할을 변경하면서 중요도가 높은 패킷을 우선 송신한다. 상기 라우터는 부모 기기로서 자신의 자녀 기기들과 송수신할 때는 상기 301단계, 302단계, 303단계 및 306단계의 부모 기기 동작을 수행하고, 비컨을 수신하고 자녀 기기로서 부모 기기와 송수신할 때에는 자신의 부모 기기의 활성 구간에서 상기 304단계, 305단계 및 306단계의 자녀 기기 동작을 수행한다.

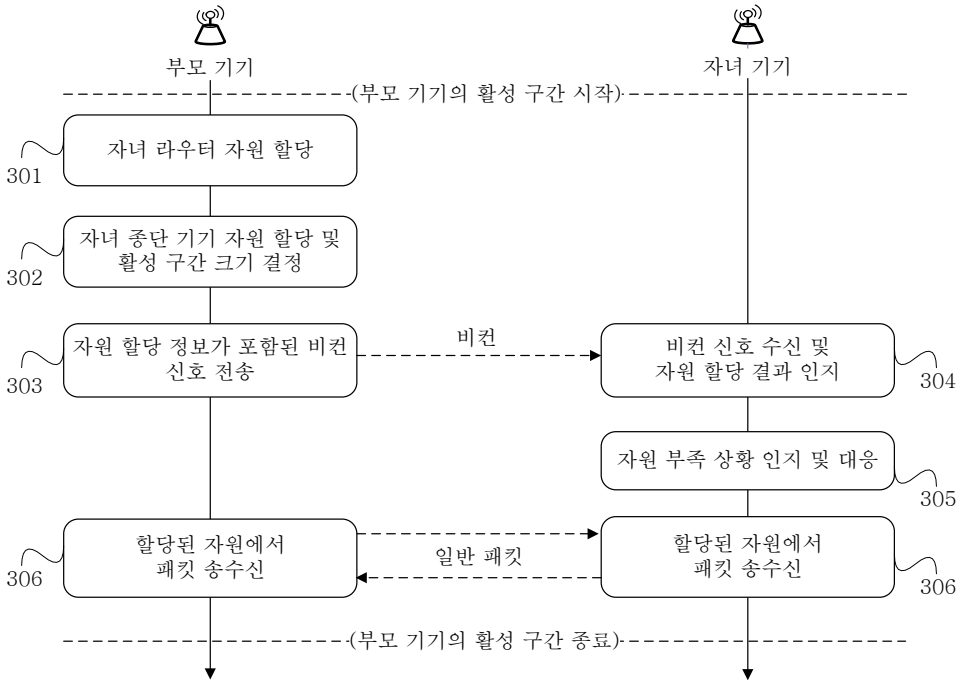


그림 3. 제안 기법 전체 동작 과정

제 1 절 초기 전송 자원 할당

제안 전송 자원 관리 기법은 기기들의 네트워크 가입이 완료되고 트래픽이 생성되기 이전에 부모 기기들이 자신의 자녀 기기들에게 생성될 트래픽양에 적절한 전송 자원을 할당하고 그 총량을 수용 가능하도록 자신의 활성 구간 크기를 결정한다. 특히, 상/하향 패킷의 중간 기기로서 패킷 전달 동작을 수행하기 때문에 많은 트래픽이 집중되는 자녀 라우터에게는 전용 TDMA 전송 자원인 GTS를 할당하고, 나머지 자녀 종단 기기들은 부모 기기의 활성 구간에서 상기 GTS를 제외하고 남은 CAP에서 CSMA/CA를 사용하여 부모 기기와 패킷을 송수신하도록 한다.

제 1 항 자녀 라우터에게 GTS 할당

부모 기기 p는 가입 과정에서 파악한 자녀 라우터 r의 자녀 기기 수 $N_{subtree,r}$ (즉, 트래픽 부담)에 따라 자신의 활성 구간 일부를 GTS로 할당한다. 네트워크에서 정해진 각 기기들이 생성하는 상향 트래픽양과 AP로부터 수신할 하향 트래픽양의 송수신을 보장하는 GTS 초기량(즉,

CFP 슬롯 수) n_r^{init} 를 다음과 같이 결정한다.

$$n_r^{init} = \min\left\{ n \middle| \tau_{CFP} \cdot n \cdot T_{slot,p} \geq (r_{UL} + r_{DL}) \cdot N_{SubTree,r} \cdot T_{BI} \right\} \qquad (3-1)$$

여기서 τ_{CFP} 는 GTS에서의 초당 데이터 전송량(kbps), r_{UL} 은 각 기기별 평균 상향 데이터 생성량(kbps), r_{DL} 은 각 기기별 평균 하향 데이터 수신량(kbps)을 나타낸다.

제 2 항 자녀 종단 기기들의 필요 CAP 파악

부모 기기 p 는 자녀 종단 기기들 E 의 트래픽 부담에 따라 자신의 활성 구간 중 CAP 필요량을 파악한다. 네트워크에서 각 기기들이 생성하여 송신할 상향 트래픽양과 AP로부터 수신할 하향 트래픽양의 전송을 보장하는 CAP 초기량(슬롯 수) N_E^{init} 을 다음과 같이 산출한다.

$$N_E^{init} = \min\left\{ n \middle| \tau_{CAP} \cdot n \cdot T_{slot,p} \geq (r_{UL} + r_{DL}) \cdot N_E \cdot T_{BI} \right\} \qquad (3-2)$$

여기서 τ_{CAP} 는 CAP에서의 초당 데이터 전송량(kbps), N_E 는 부모 기기 p 의 자녀 종단 기기 수이다.

제 3 항 활성 구간 크기 결정

부모 기기 p 는 각 자녀 라우터에게 트래픽 부담에 적합한 GTS를 할당하고 자녀 종단 기기들에게 필요한 CAP를 파악하여 그 총량을 수용 가능한 최소 활성 구간을 사용하기 위한 SO 를 다음과 같이 결정한다.

$$SO_p = \min\left\{ n \middle| aBSD \times 2^n \geq (N_R^{init} + N_E^{init}) \times T_{slot,p},\ 0 \leq n \leq SO_p^{\max} \right\} \qquad (3-3)$$

여기서 N_R^{init} 은 부모 기기 p 의 자녀 라우터들에게 할당한 GTS의 총합이며, $SO_p^{\max}$ 는 부모 기기 p 가 네트워크에 가입하는 과정에서 자신의 부모 기기로부터 할당 받은 다른 부모 기기들의 활성 구간과 충돌하지 않는 최대 SO 이다.

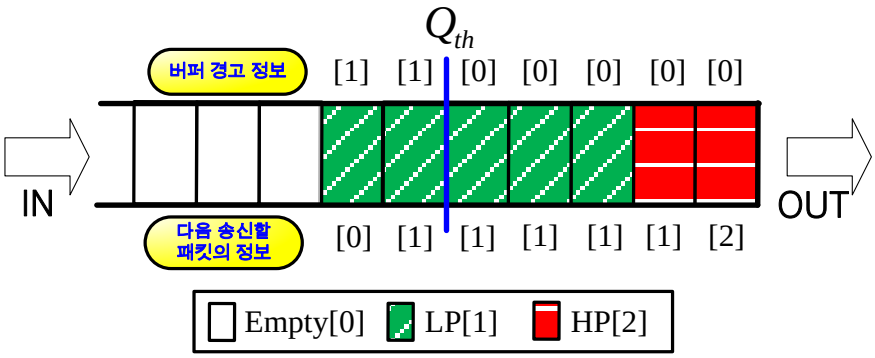


그림 4. 버퍼 정렬 및 추가 정보 포함

제 2 절 전송 자원의 사용

네트워크 가입 과정이 완료되고 자녀 기기별 초기 전송 자원 및 부모 기기의 활성 구간 크기가 결정되면, 할당된 전송 자원에서 부모 기기와 자녀 기기는 서로 패킷을 송수신하는 동작을 수행한다. 제안 기법은 이 과정에서 패킷 중요도에 따라서 기기간 송수신 역할 변경 및 빠른 수면 전환 동작을 하며, 부모 기기는 자녀 기기별 전송 자원 조정 및 자신의 활성 구간 크기 조정을 위해서 패킷 송수신 결과를 판단하고 기록한다.

제 1 항 버퍼 정렬 및 추가 정보 포함

각 기기들은 그림 4와 같이 버퍼를 정렬하여 높은 중요도(HP)의 패킷을 낮은 중요도(LP)의 패킷보다 앞쪽에 배치시켜서 우선적으로 송신하도록 한다. 또한 기기들은 패킷에 2 비트(bit)로 구성된 다음에 송신할 패킷의 정보와 1비트로 구성된 버퍼 경고 정보를 포함시켜 송신한다. HP 패킷의 정보는 0b11, LP 패킷의 정보는 0b01이고, 다음 전송할 패킷이 없을 경우에 패킷의 정보는 0b00으로 설정한다.

이때 주의할 점은 상기 다음에 송신할 패킷의 정보는 버퍼에 저장된 모든 패킷을 대상으로 결정되지 않고 1-홉 목적지 주소가 같은 패킷들만을 고려하여 결정된다. 예를 들어 상기 부모 기기가 자녀 기기 A, B, C에게 하향 송신할 패킷이 각각 1개, 1개, 2개가 있다면 상기 1개, 1개, 2개의 패킷만 각각 고려하여 상기 다음에 송신할 패킷의 정보를 결정한다. 라우터의 경우는 상향 송신할 패킷과 하향 송신할 패킷을 모두 가지고 있을 때, 부모 기기에게 송신하는 패킷에는 상향 전송할 패킷들만 고려하여 상기 다음에 송신할 패킷의 정보를 결정한다. 마찬가지로, 각 기기는 자신의 버퍼에 저장된 패킷양이 시스템에서

정해진 버퍼 임계값 Q_{th} 보다 많으면 송신하는 패킷에 버퍼 경고 정보 $Q_{warning}$ 을 0b1로 설정하고, 그렇지 않으면 0b0으로 설정한다.

제 2 항 송수신 역할 변경

부모 기기와 자녀 라우터가 GTS에서 패킷을 송수신하는 과정에서 패킷에 포함된 다음에 송신할 패킷의 정보에 따라서 부모 기기와 자녀 라우터는 그림 5와 같이 송수신 역할을 변경한다. 이 동작을 사용함으로써 패킷의 상/하향 송수신에 별개의 GTS를 필요로 하지 않으므로 낭비되는 자원 양을 줄일 수 있고, GTS 정보를 표현하기 위한 비컨의 신호 부담도 줄일 뿐만 아니라 한정된 자원에서 간섭이 발생하여 순시적으로 자원이 부족한 상황이 발생하여도 높은 중요도를 가지는 패킷의 상/하향 송수신을 낮은 중요도를 가지는 패킷보다 우선적으로 처리할 수 있다.

상기 부모 기기는 상기 자녀 라우터에게 GTS를 할당할 때, 자신이 상기 자녀 라우터에게 송신할 HP 패킷이 버퍼에 있을 경우는 초기 전송 방향을 하향으로 설정하고, 그 반대의 경우는 초기 전송 방향을 상향으로 설정하여 GTS 정보에 포함시킨다.

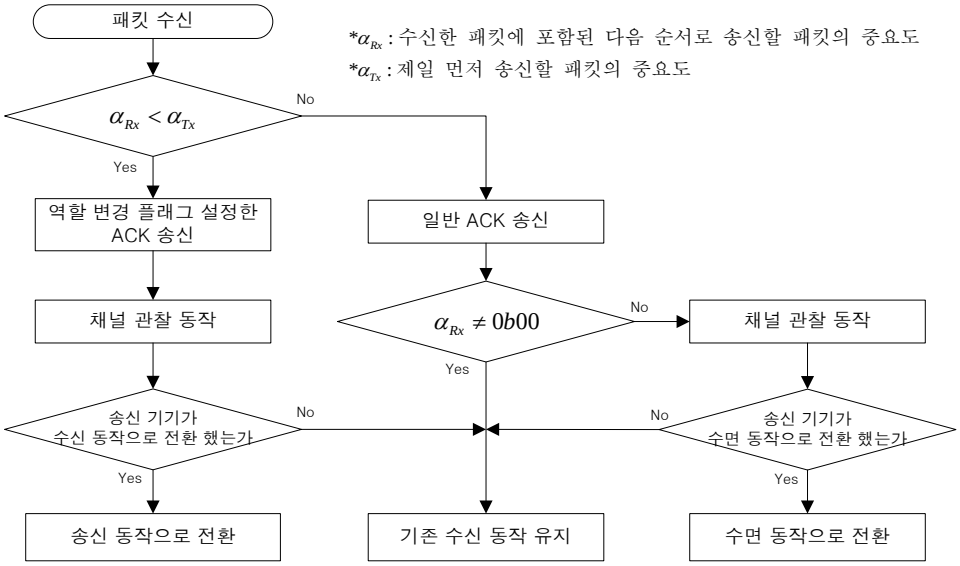
상기 결정된 초기 전송 방향에 따라서, 상기 부모 기기 또는 상기 자녀 라우터가 패킷 전송을 시작한다. 이 때 송신 기기가 송신한 패킷에 포함된 다음에 송신할 패킷의 정보로부터 수신 기기가 파악한 상기 송신 기기가 상기 패킷 다음에 송신할 패킷의 중요도가 상기 수신 기기가 상기 송신 기기에게 제일 먼저 송신할 패킷의 중요도보다 낮을 경우 응답(acknowledgement; ACK)에 송수신 역할 변경 플래그(flag)를 설정하여 송신하고 그 외의 경우에는 역할 변경 플래그를 설정하지 않은 ACK을 송신한다.

상기 역할 변경 플래그가 설정된 ACK을 수신한 기기는 수신 동작으로 전환하고, 상기 역할 변경 플래그가 설정 되지 않은 ACK을 수신한 기기는 기존의 송신 동작을 유지한다.

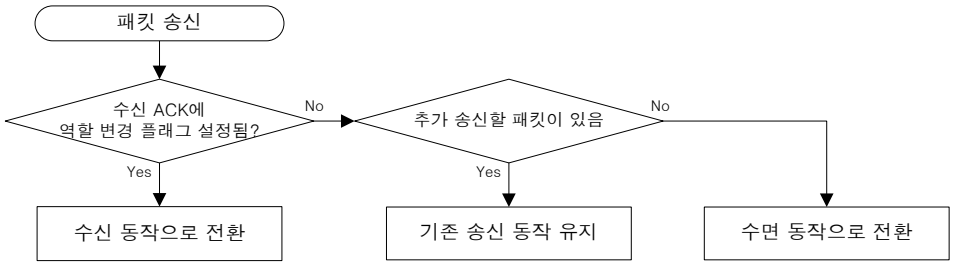
상기 역할 변경 플래그가 설정된 ACK을 송신한 기기는 그림 6과 같이 수신 동작을 유지하며 채널을 관찰하여 상기 패킷의 송신 기기의 송수신 상태(즉, 송신, 수신, 수면 중 하나)를 판단하여 그것에 따라서 자신의 송수신 상태를 설정한다. 즉, 상기 ACK의 송신 기기가 채널을 관찰하여 간섭 신호가 없으면서 자신에게 송신된 패킷이 존재하지 않을 경우 상기 패킷의 송신 기기가 상기 역할 변경 플래그가 설정된 ACK을 성공적으로 수신하고 수신 동작으로 전환하였음을 인지하고 자신은 송신

동작으로 전환한다. 반대로 상기 ACK의 송신 기기가 채널을 관찰하는 중에 자신에게 송신된 패킷을 수신할 경우 간섭으로 인해 상기 ACK이 성공적으로 전달되지 못한 것으로 판단하고 기존에 송신했던 ACK을 다시 송신하고 수신 동작을 유지한다.

상기 패킷을 수신한 기기가 역할 변경 플래그를 설정한 ACK을 송신한 직후에 자신의 송수신 역할을 변경하지 않고 채널을 관찰하는 동작을 함으로써, 간섭으로 인한 역할 변경 정보가 포함된 ACK이 손실되는 상황이 발생할 경우에도 송수신 기기가 송수신 역할 정보 불일치로 인한 자원 및 전력 낭비를 방지할 수 있다.



(a) 수신 기기의 송수신 역할 변경 및 수면 전환 과정



(b) 송신 기기의 송수신 역할 변경 및 수면 전환 과정

그림 5. 송수신 역할 변경 및 수면 전환 과정

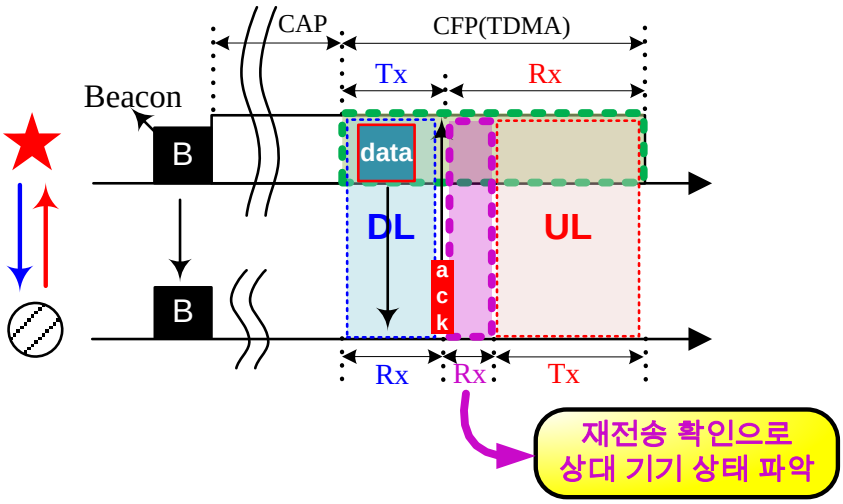


그림 6. 채널 관찰로 상대 기기의 역할을 파악하는 과정

제 3 항 빠른 수면 전환

부모 기기와 자녀 기기가 할당된 전송 자원으로 서로 패킷을 송수신하는 과정에서 그림 5와 같이 패킷에 포함된 다음에 송신할 패킷의 정보를 기반으로 상호 송수신이 완료되었음을 판단하면 각 기기가 할당된 전송 자원을 모두 사용하지 않고 일부에서 수면 상태로 전환 한다. 제안 기법의 전송 자원 할당 및 조정 과정을 통해서 트래픽 부담에 적합한 자원을 사용하도록 하지만, 부모 기기의 활성 구간은 2의 배수로 증가 및 감소만 가능하며 이 활성 구간도 시스템에서 정해진 슬롯 개수로 양자화 되어 사용되기 때문에 잉여 자원에서의 수면 전환을 통해서 잉여 전송 자원에서의 전력 소모를 최소화할 수 있다. CFP 구간에서는 부모 기기 및 자녀 라우터, CAP 구간에서는 자녀 종단 기기들은 빠른 수면 전환 동작을 수행한다.

CFP 구간에서 부모 기기와 자녀 라우터가 GTS를 사용하여 송수신 할 때, 송신 기기가 송신한 패킷의 다음에 송신할 패킷의 정보가 0b00(즉, 추가로 송신할 패킷 없음)인 경우 상기 패킷을 수신한 기기는 상기 송신 기기에 송신할 패킷이 있을 경우 역할 변경 플래그를 설정한 ACK을 송신하고, 그렇지 않은 경우 역할 변경 플래그를 설정하지 않은 ACK을 송신한다.

상기 패킷의 송신 기기는 상기 역할 변경 플래그가 설정된 ACK을 수신한 경우 수신 동작으로 전환하고, 상기 역할 변경 플래그가 설정되지 않은 ACK을 수신한 경우 수면 상태로 전환한다.

상기 역할 변경 플래그가 설정된 ACK 또는 역할 변경 플래그가

설정되지 않은 ACK을 송신한 기기는 그림 6과 같이 기존의 수신 동작을 유지하며 채널을 관찰하여 간섭 신호가 없으면서 자신에게 송신된 패킷이 존재하지 않을 경우, 역할 변경 플래그가 설정된 ACK을 송신 했었다면 상기 역할 변경 플래그가 설정된 ACK을 수신한 기기가 수신 동작으로 전환했음을 인지하고 자신은 송신 동작으로 전환하며, 역할 변경 플래그가 설정 되지 않은 ACK을 송신 했었다면 상기 역할 변경 플래그가 설정되지 않은 ACK을 수신한 기기가 수면 상태로 전환했음을 인지하고 자신도 수면 상태로 전환한다. 반대로 상기 역할 변경 플래그가 설정된 ACK 또는 역할 변경 플래그가 설정되지 않은 ACK을 송신한 기기가 채널을 관찰하는 중에 자신에게 송신된 패킷을 수신할 경우 간섭으로 인해 상기 역할 변경 플래그가 설정된 ACK 또는 역할 변경 플래그가 설정되지 않은 ACK이 성공적으로 전달되지 못한 것으로 판단하고 기존에 송신했던 ACK을 다시 송신하고 수신 동작을 유지한다.

상기 패킷의 수신 기기가 상기 역할 변경 플래그가 설정된 ACK 또는 역할 변경 플래그가 설정되지 않은 ACK을 송신한 직후에 자신의 송수신 역할을 변경하지 않고 채널을 관찰하는 동작을 함으로써, 간섭으로 인한 역할 변경 정보가 포함된 상기 역할 변경 플래그가 설정된 ACK 또는 역할 변경 플래그가 설정되지 않은 ACK이 손실되는 상황이 발생할 경우에도 송수신 기기가 송수신 역할 정보 불일치로 인한 성능 열화 없이 패킷 전송 기능을 유지할 수 있고, 또한 상기 GTS에서 패킷 송수신에 사용되지 않은 부분에서 수면 상태로 전환함으로써 전력 소모를 줄일 수 있다.

CAP 구간에서 자녀 종단 기기는 부모 기기로부터 다음에 송신할 패킷의 정보가 0b00(즉, 추가로 송신할 패킷 없음)인 하향 패킷을 수신하거나 상기 부모 기기로부터 수신한 비컨으로부터 수신할 하향 패킷이 없음을 인지하고, 상기 부모 기기에게 송신할 상향 패킷이 버퍼에 남아 있지 않은 경우(즉, 송수신이 완료되었음) 상기 부모 기기의 다음 활성 구간이 시작되기 전까지 수면 상태로 전환함으로써 전력 소모를 줄인다.

제 4 항 전송 결과 파악 및 기록

부모 기기는 GTS 할당, CAP 할당 및 활성 구간 크기 결정을 위해서 각 자녀 기기들에게 할당한 전송 자원이 끝난 시점에서 상기 전송 자원을 사용하여 상/하향 송수신한 패킷들에 포함된 다음에 송신할

패킷의 정보와 버퍼 경고 정보를 기반으로 전송 결과를 파악하고 기록한다.

부모 기기 p는 j번째 비컨 간격에서 자신의 자녀 종단 기기들 E 중에서 자신에게 각 기기별로 마지막으로 송신한 패킷들의 다음에 송신할 패킷의 정보가 모두 0b00인 경우(즉, 상기 자녀 종단 기기들 E의 버퍼에 상기 부모 기기 p에게 송신할 패킷이 없음)에만 j번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p가 상기 자녀 종단 기기들 E로부터 상향 패킷을 수신한 결과 $I_{E,UL}^{j}$를 0b00(즉, 상기 자녀 종단 기기들 E는 j번째 비컨 간격에서 할당된 CAP으로 모든 상향 패킷을 상기 부모 기기에게 전송 가능함)으로 설정하고, 그 외에는 수신한 패킷들의 다음에 송신할 패킷의 정보들 중에 가장 큰 값을 $I_{E,UL}^{j}$으로 설정하여 j번째 비컨 간격에서 자녀 종단 기기들 E에게 할당한 CAP으로 어떤 중요도의 패킷까지 전송이 가능한지를 기록한다. 예를 들어, 부모 기기가 하나의 자녀 기기로부터 다음에 송신할 패킷의 정보가 0b11인 패킷을 수신한 경우, 상기 부모 기기는 상기 자녀 종단 기기가 버퍼에 존재하는 HP 패킷들을 다 전송하지 못한 상태라는 것을 파악 가능하다.

또한, 상기 부모 기기 p가 j번째 비컨 간격에서 상기 자녀 종단 기기들 E에게 마지막으로 하향 송신한 패킷의 상기 자녀 종단 기기들 E에게 하향 송신할 패킷 전체에 대해서 판단한 다음에 송신할 패킷의 정보를 j번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p가 상기 자녀 종단 기기들 E에게 하향 패킷을 송신한 결과 $I_{E,DL}^{j}$로 설정한다.

그리고 j번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p가 상기 자녀 종단 기기들 E 중에서 자신에게 각 기기별로 마지막으로 송신한 패킷 중에 버퍼 경고 정보 $Q_{warning}$이 1인 패킷이 있었다면, j번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p가 인지한 상기 자녀 종단 기기들 E의 버퍼 상황 $Q_{E,UL}^{j}$를 0b1으로 설정하고, 그렇지 아니한 경우는 0b0으로 설정한다. 또한, 상기 부모 기기 p가 j번째 비컨 간격에서 상기 자녀 종단 기기들 E에게 마지막으로 하향 송신한 패킷의 상기 자녀 종단 기기들 E에게 하향 송신할 패킷 전체에 대해서 판단한 버퍼 경보 정보를 j번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p가 상기 자녀 종단 기기들 E에게 송신하는 하향 패킷에 대한 버퍼 상황 $Q_{E,DL}^{j}$로 설정한다.

한편, 상기 부모 기기 p는 j번째 비컨 간격에서 자신의 자녀 라우터 r이 자신에게 마지막으로 송신한 상향 패킷의 다음에 송신할

패킷의 정보를 j 번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p 가 상기 자녀 라우터 r 로부터 상향 패킷을 수신한 결과 $I_{r,UL}^{j}$ 로 설정한다. 또한, 상기 부모 기기 p 는 j 번째 비컨 간격에서 상기 자녀 라우터 r 에게 마지막으로 송신한 하향 패킷의 다음에 송신할 패킷의 정보를 j 번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p 가 상기 자녀 라우터 r 에게 하향 패킷을 송신한 결과 $I_{r,DL}^{j}$ 로 설정한다.

그리고 상기 부모 기기 p 는 j 번째 비컨 간격에서 자신의 자녀 라우터 r 이 자신에게 마지막으로 송신한 상향 패킷의 버퍼 경고 정보 $Q_{warning}$ 을 j 번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p 가 상기 자녀 라우터 r 에 대해 인지한 버퍼 상황 $Q_{r,UL}^{j}$ 로 설정한다. 또한, 상기 부모 기기 p 는 j 번째 비컨 간격에서 상기 자녀 라우터 r 에게 마지막으로 송신한 하향 패킷의 버퍼 경고 정보 $Q_{warning}$ 을 j 번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p 가 상기 자녀 라우터 r 에게 송신하는 하향 패킷에 대한 버퍼 상황 $Q_{r,DL}^{j}$ 로 설정한다.

특히, 부모 기기의 자원 부족 상황에서 자녀 라우터들과 높은 중요도의 패킷을 우선적으로 송수신하기 위한 차등 GTS 할당을 위해서 상기 패킷 송수신 결과(즉, $I_{r,UL}$, $I_{r,DL}$)를 기반으로 상기 각 자녀 라우터들의 GTS 중요도를 결정한다. 상기 부모 기기 p 가 j 번째 비컨 간격에서 자녀 라우터 r 에게 할당한 GTS의 중요도 P_r^j 는 다음과 같이 정한다.

$$P_r^j = \max(I_{r,UL}^{j-1}, I_{r,DL}^{j-1}) . \qquad (3-4)$$

제 3 절 전송 자원의 조정

네트워크의 기기간 연결은 간섭 또는 장애물 등의 발생에 따라 빈번히 변화하므로, 패킷 송수신 성능을 보장하기 위한 필요 GTS양 및 필요 활성 구간 크기가 가변할 뿐만 아니라 링크 손상 시 네트워크 토폴로지의 변화에 따라서 트래픽 부담 또한 변화한다.

따라서, 부모 기기는 상기 환경 변화를 인지하고 적응적으로 각 자녀 기기별 전송 자원량 및 자신의 활성 구간의 크기를 조정하여 패킷 송수신 성능을 보장하고 전력 낭비를 막는다. 상기 부모 기기는 비컨을 생성할 때, 할당한 전송 자원으로 자녀 기기들과 송수신한 패킷의 다음에 송신할 패킷의 정보를 바탕으로 파악한 송수신 결과 I 와 버퍼

경고 정보 $Q_{warning}$ 를 이용하여 다음과 같은 과정으로 자녀 기기들의 전송 자원 및 자신의 활성 구간 크기를 조정한다.

첫째, 각 자녀 라우터의 GTS 크기를 조정한다.

둘째, 자녀 종단 기기들이 필요로 하는 CAP 크기를 파악한다.

셋째, GTS 및 CAP를 수용 가능한 활성 구간 크기를 결정한다.

제 1 항 GTS 크기 조정

부모 기기가 비컨을 생성할 때 GTS를 사용하여 각 자녀 라우터와 패킷을 송수신한 결과를 바탕으로 상/하향 트래픽을 인지하여 상기 트래픽을 저전력으로 손실 없이 처리하기 위하여 해당 GTS의 크기를 조정하는 그림 7의 과정을 수행한다. 기존에 할당되어 있던 각 자녀 라우터별 GTS의 증가 및 감소 필요를 판단하여 GTS의 크기를 조정하며, 각 GTS의 초기 전송 방향(상/하향)결정과 자원 부족 상황에서의 차등 GTS 할당 동작도 수행한다.

이 과정을 통해서 부모 기기는 각 자녀 라우터에 대한 트래픽 및 간섭이 고려된 필요 GTS 슬롯양을 저 복잡도로 인지하고 할당하여 비컨에 그 정보를 추가함으로써, 다음 비컨 간격부터 자녀 라우터들이 변경된 GTS를 사용할 수 있도록 할뿐만 아니라 자원 부족 상황에서도 높은 중요도를 가지는 패킷의 송수신 성능을 향상시킬 수 있다.

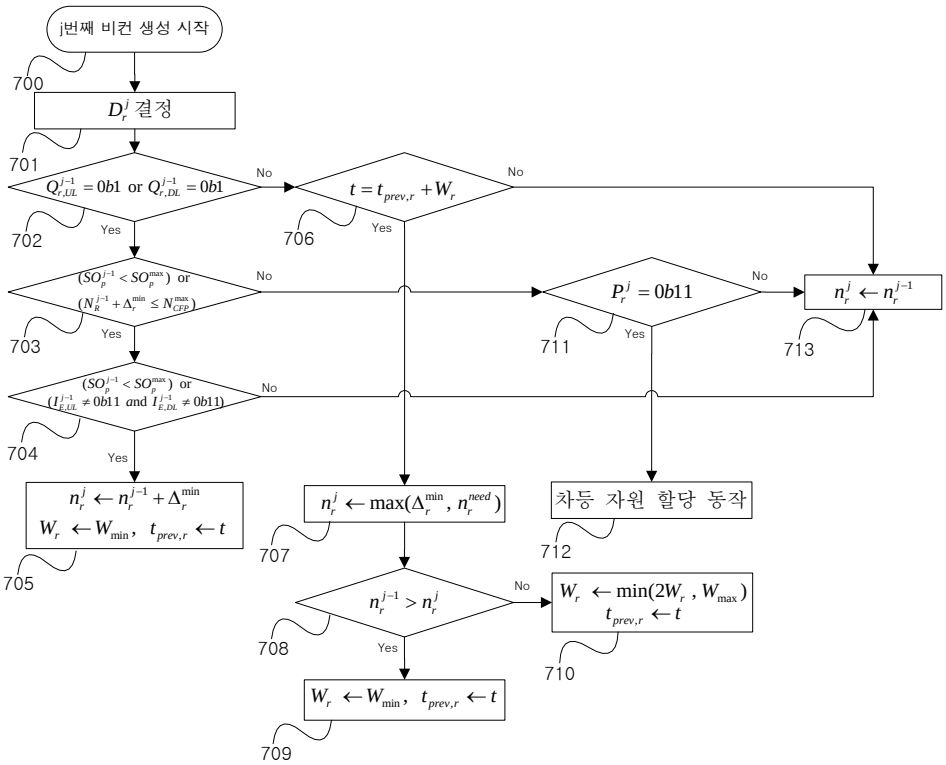


그림 7. GTS 크기 조정

1. 전송 시작 방향 설정

부모 기기 p는 자신의 j번째 비컨을 생성할 때, 각 자녀 라우터별 GTS 조정 과정을 시작한다. 상기 그림 7의 701단계에서 상기 부모 기기 p가 상기 자녀 라우터 r에게 할당한 GTS를 j번째 비컨 간격에서 상기 두 기기가 상/하향 전송에 공용으로 사용하기 위해서, 초기 전송 방향 D_r^j를 결정한다. 만약, 상기 부모 기기 p의 버퍼에 상기 자녀 라우터 r에게 송신할 HP 패킷이 존재하면 D_r^j을 1로 설정하여 상기 자녀 라우터 r의 GTS를 하향 전송을 우선하고, 그렇지 않으면 D_r^j을 0으로 설정하여 상기 자녀 라우터 r의 GTS를 상향 전송을 우선하도록 정한다. 상기 D_r^j은 비컨을 통해서 상기 부모 기기 p와 상기 자녀 라우터 r이 공유하게 되고, 일례로, 상기 D_r^j이 1인 경우는 상기 자녀 라우터 r에게 할당한 GTS의 시작점에서 상기 부모 기기 p는 송신 동작을 시작하고 상기 자녀 라우터 r은 수신 동작을 시작하여 송수신하는 패킷의 다음에 송신할 패킷의 정보에 따라서 각각의 송수신 역할을 변경하게 된다.

2. GTS 크기 증가

상기 그림 7의 702단계에서 $j-1$ 번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p 와 상기 자녀 라우터 r 사이의 GTS가 종료 되었을 때, 각각의 버퍼에 임계값보다 많은 서로에게 송신할 패킷이 남아 있었던 경우(즉, $Q_{r,UL}^{j-1} = 0b1$ or $Q_{r,DL}^{j-1} = 0b1$), 상기 그림 7의 703단계 및 704단계에서 상기 자녀 라우터 r 의 GTS 슬롯양을 증가시킬 수 있는지 검사한다. 즉, 상기 703단계에서 상기 부모 기기 p 가 $j-1$ 번째 비컨 간격에서 자신의 자녀 라우터들에게 할당한 GTS 총량 N_R^{j-1} 에 $\Delta_r^{\min}$ 슬롯 만큼을 증가시켜도 $N_{CFP}^{\max}$ 를 초과하지 않거나(즉, $N_R^{j-1} + \Delta_r^{\min} \le N_{CFP}^{\max}$) 상기 부모 기기 p 가 자신의 활성 구간 크기를 증가시켜 GTS로 할당할 활성 구간을 더 확보할 수 있는 경우(즉, $SO_p^{j-1} < SO_p^{\max}$), 상기 그림 7의 704단계에서 상기 부모 기기 p 가 자신의 활성 구간 크기를 증가(즉, CAP의 증가) 시킬 수 없으면서 CAP를 사용하는 자녀 종단 기기들 E 가 $j-1$ 번째 비컨 간격에서 HP 패킷의 송수신 조차 완료하지 못한 경우(즉, $(SO_p^{j-1} = SO_p^{\max})$ and $(I_{E,UL}^{j-1} = 0b11$ or $I_{E,DL}^{j-1} = 0b11)$)만을 제외하고, 상기 그림 7의 705단계로 넘어가 상기 자녀 라우터 r 의 $j-1$ 번째 비컨 간격에서의 GTS 슬롯양 n_r^{j-1} 에 $\Delta_r^{\min}$ 슬롯 만큼을 추가로 할당하고, 다음 GTS 감소 판단을 위한 시점을 현재 시점으로부터 $W_{\min}$ 비컨 간격 이후로 설정한다. 상기 703단계와 705단계의 $\Delta_r^{\min}$ 는 상기 부모 기기 p 와 상기 자녀 라우터 r 사이에서 패킷 한 개를 전송하는데 필요한 최소 GTS 슬롯양이며 패킷의 크기, 전송 속도 및 상기 부모 기기 p 의 한 슬롯의 크기로부터 구할 수 있다. 한편 상기 704단계에서 상기 부모 기기 p 가 자신의 활성 구간의 크기를 증가 시키지 못하고(즉, CAP의 증가) $j-1$ 번째 비컨 간격에서 자녀 종단 기기들 E 와의 HP 패킷 조차 전송을 완료하지 못한 경우(즉, $(SO_p^{j-1} = SO_p^{\max})$ and $(I_{E,UL}^{j-1} = 0b11$ or $I_{E,DL}^{j-1} = 0b11)$), 상기 그림 7의 712단계에서 j 번째 비컨 간격의 상기 자녀 라우터 r 의 GTS 슬롯양 n_r^j 을 $j-1$ 번째 비컨 간격에서 사용한 GTS 슬롯양 n_r^{j-1} 으로 유지한다.

3. 중요도에 따른 차등 할당

만약 상기 703단계에서 상기 부모 기기 p 가 $j-1$ 번째 비컨 간격에서 자신의 자녀 라우터들에게 할당한 GTS 총량 N_R^{j-1} 에 $\Delta_r^{\min}$ 슬롯 만큼을 증가시켰을 때 $N_{CFP}^{\max}$ 를 초과(즉, $N_R^{j-1} + \Delta_r^{\min} > N_{CFP}^{\max}$)하고, 상기 부모

기기 p 가 자신의 활성 구간 크기를 증가시킬 수 없어서(즉, $SO_p^{j-1} = SO_p^{\max}$) GTS로 할당할 활성 구간을 더 확보할 수 없는 경우, 상기 그림 7의 711단계로 넘어가 상기 부모 기기 p 가 $j-1$ 번째 비컨 간격에서 상기 자녀 라우터 r 과의 HP 패킷의 송수신을 다 완료하지 못한 경우(즉, $P_r^j = 0b11$)라면, 상기 그림 7의 712단계에서 상기 부모 기기 p 는 자신의 자녀 라우터들 중에서 $j-1$ 번째 비컨 간격에서의 상/하향 전송에서 적어도 HP 패킷의 송수신은 완료(즉, $P^j < 0b11$)했으면서 P^j 가 제일 낮은 라우터 r' 의 GTS를 $\Delta_r^{\min}$ 만큼 빼앗아 상기 자녀 라우터 r 에게 추가 할당한다. 여기서 상기 부모 기기 p 가 j 번째 비컨 간격에서 GTS를 빼앗을 자녀 라우터 r' 을 선택할 때, j 번째 비컨 간격에서 GTS를 빼앗긴 자녀 라우터는 제외한다. 또한, 상기 라우터 r' 는 자원 부족 상황을 비컨을 통해서 자신의 자녀 기기들에게 전파하고, 상기 상황을 인지한 기기들은 버퍼가 가득 차서 패킷 손실이 발생하는 것을 막기 위해서 버퍼 최대 크기 대비 일정량의 패킷이 쌓이면 다른 부모 기기로 연결을 전환한다. 그러나 상기 711단계에서 상기 부모 기기 p 가 $j-1$ 번째 비컨 간격에서 자신과의 HP 패킷의 송수신은 완료된 라우터 r 에 대해서는 상기 713단계로 넘어가 j 번째 비컨 간격에서 상기 라우터 r 이 사용할 GTS 슬롯양 n_r^j 을 $j-1$ 번째 비컨 간격에서 상기 라우터 r 이 사용한 GTS 슬롯양 n_r^{j-1} 으로 유지한다.

4. GTS 크기 감소

상기 702단계에서 $j-1$ 번째 비컨 간격에서 부모 기기 p 와 자녀 라우터 r 사이의 GTS가 종료되었을 때, 각각의 버퍼에 임계값보다 많은 서로에게 송신할 패킷이 남아 있지 않았던 경우(즉, $Q_{r,UL}^{j-1} \neq 0b1$ and $Q_{r,DL}^{j-1} \neq 0b1$), 상기 그림 7의 706단계에서 GTS 감소 판단을 수행할 시점인지를 검사하여 상기 그림 7의 707단계에서 상기 자녀 라우터 r 에게 필요 GTS 슬롯양인 n_r^{need} 을 할당하고, 아직 상기 자녀 라우터 r 의 이전 GTS 감소 판단 시점 $t_{prev,r}$ 로부터 W_r 비컨 간격 만큼 시간이 지나지 않았을 경우에는 상기 713단계에서 j 번째 비컨 간격의 상기 자녀 라우터 r 의 GTS 슬롯양 n_r^j 을 $j-1$ 번째 비컨 간격에서 사용한 GTS 슬롯양 n_r^{j-1} 으로 유지한다. 이 때, n_r^{need} 은 $j-W_r$ 번째 비컨

간격부터 j 번째 비컨 간격 동안 상기 부모 기기 p 가 상기 자녀 라우터 r 과의 전송 결과를 통해서 판단한 상기 자녀 라우터 r 에게 할당해야 하는 GTS 슬롯양이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_r^{need} = \max(\Delta_r^{\min}, \left\lceil \frac{\tilde{T}_{r,used}}{T_{slot,p}^{j-1}} \right\rceil) \qquad (3-5)$$

여기서 $\tilde{T}_{r,used}$ 는 상기 부모 기기 p 가 상기 자녀 라우터 r 과의 i 번째 비컨 간격에서의 송수신에 실제로 사용된 초 단위 CFP 크기 $T_{r,used}^i$ 의 $j-W_r$ 번째 비컨 간격부터 j 번째 비컨 간격 동안의 한 비컨 간격당 평균 값을 나타낸다. 상기 $T_{r,used}^i$ 는 그림 8과 같이 i 번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p 가 상기 자녀 라우터 r 에게 할당한 GTS의 시작점에서부터 상기 부모 기기 p 와 상기 자녀 라우터 r 의 버퍼에 서로에게 송신할 패킷이 남아 있지 않은(즉, $I_{r,UL}^i = 0b00$ and $I_{r,DL}^i = 0b00$) 시점까지의 차이로 정한다. 만약, i 번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p 가 상기 자녀 라우터 r 에게 할당한 GTS를 사용한 송수신이 끝났을 때, 상기 부모 기기 p 와 상기 자녀 라우터 r 의 버퍼에 서로에게 송신할 패킷이 남아 있었다면(즉, $I_{r,UL}^i \neq 0b00$ or $I_{r,DL}^i \neq 0b00$) 상기 $T_{r,used}^i$ 는 i 번째 비컨 간격에서 상기 자녀 라우터 r 에게 할당된 GTS 전체가 된다.

한편, 상기 그림 7의 708단계에서 $j-1$ 번째 비컨 간격에서보다 j 번째 비컨 간격에서 상기 자녀 라우터 r 의 GTS 슬롯양이 감소했다면, 상기 그림 7의 709단계에서 다음 GTS 감소 판단 시점을 현재 시점 t 로부터 $W_{\min}$ 비컨 간격 이후로 설정하여 트래픽 변화에 빠르게 대응하도록 하고, 반대로 j 번째 비컨 간격에서의 상기 자녀 라우터 r 의 GTS 슬롯양이 $j-1$ 번째 비컨 간격에서보다 크거나 같다면 $j-1$ 번째 비컨 간격에서 상기 자녀 라우터 r 이 사용한 GTS 슬롯양이 트래픽에 대해 송수신 성능을 보장하기에 적절하다고 판단하여 상기 그림 7의 710단계에서 상기 자녀 라우터 r 에 대한 다음 GTS 감소 판단 시점을 현재 시점 t 로부터 W_r 의 두 배로 설정하여 연산 부담을 줄인다.

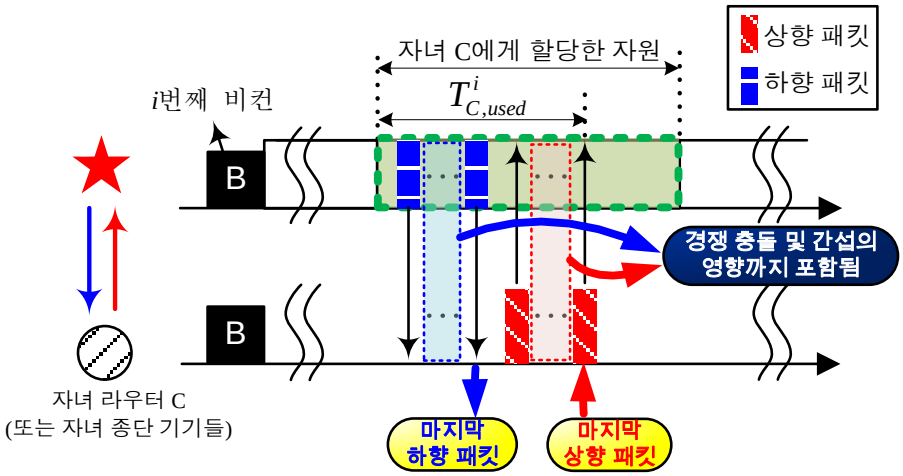


그림 8. 필요 자원량 파악

제 2 항 필요 CAP 판단 및 활성 구간 크기 조정

부모 기기가 GTS 조정 과정을 마친 후, 자녀 종단 기기들과 패킷을 송수신한 결과를 바탕으로 자녀 종단 기기들과의 패킷 송수신을 위하여 필요한 CAP 크기를 파악하고, 자녀 기기들의 필요 전송 자원(즉, CAP와 GTS)을 수용 가능한 자신의 활성 구간 크기를 결정하는 그림 9의 과정을 수행한다.

활성 구간은 CAP와 GTS들의 총합으로 구성되기 때문에, 활성 구간의 일부에서 GTS 할당 및 조정이 완료되면 나머지 영역이 CAP로 결정된다. 따라서 부모 기기는 CAP의 필요량을 파악하고 이미 할당된 GTS양을 함께 고려하여 활성 구간 크기를 조정하는 동작을 수행한다.

이 과정에서 부모 기기는 자녀 종단 기기들의 트래픽, 간섭 및 경쟁 충돌까지 고려된 패킷 송수신을 위해서 필요한 CAP를 저 복잡도로 인지하고, GTS 조정 과정과 연계하여 자녀 라우터 및 자녀 종단 기기들의 패킷 송수신 성능을 보장하면서도 최소 전력을 소모하는 활성 구간 크기를 결정하여 그 정보를 비컨에 추가함으로써, 다음 비컨 간격부터 자녀 기기들이 변경된 전송 자원을 사용할 수 있도록 할 수 있다.

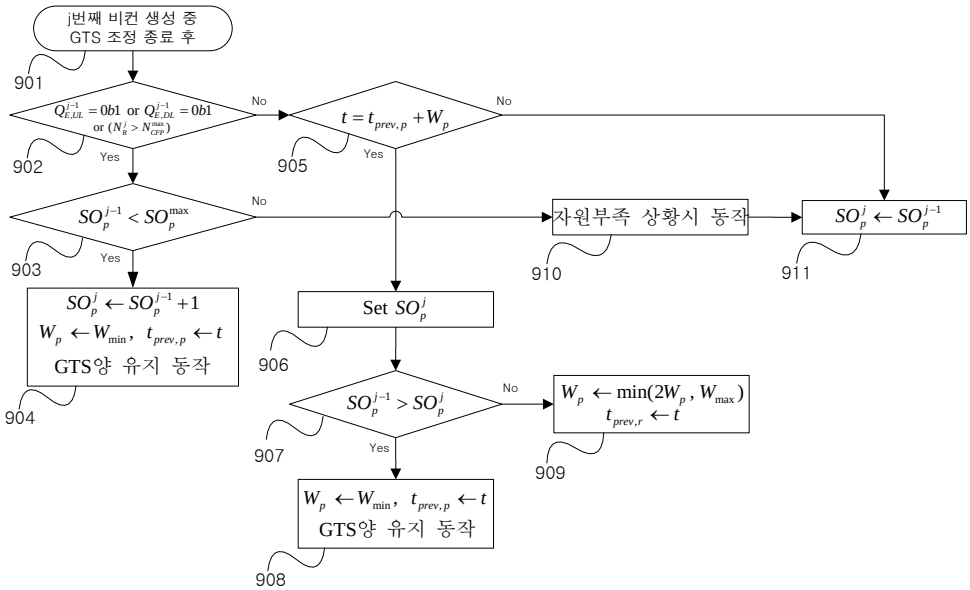


그림 9. 필요 CAP 판단 및 활성 구간 크기 조정

1. 활성 구간 크기 증가

부모 기기 p는 상기 그림 9의 901단계에서 자신의 j번째 비컨을 생성할 때, 상기 301단계에서 자녀 라우터들에 대한 GTS 할당이 종료된 후에, 자녀 종단 기기들의 필요 CAP 크기 파악 및 자신의 활성 구간 크기 결정을 시작한다. 상기 그림 9의 902단계에서 $j-1$번째 비컨 간격에서 부모 기기 p와 자녀 종단 기기들 E 사이의 CAP이 종료되었을 때, 각각의 버퍼에 임계값보다 많은 서로에게 송신할 패킷이 남아 있었던 경우(즉, $Q_{E,UL}^{j-1}=0b1$ or $Q_{E,DL}^{j-1}=0b1$) 또는 상기 301단계에서 j번째 비컨 간격에서 자녀 라우터들이 사용할 GTS의 총량 N_R^j가 GTS 최대 슬롯양 $N_{CFP}^{\max}$보다 클 경우(즉, $N_R^j > N_{CFP}^{\max}$, 상기 301단계에서 SO가 증가될 것을 고려하여 GTS를 할당한 상황), 상기 그림 9의 903단계에서 부모 기기 p는 자신의 활성 구간 크기를 증가 할 수 있는지 검사한다. 즉, 상기 부모 기기 p가 $j-1$번째 비컨 간격에서 사용한 자신의 활성 구간 크기를 결정한 SO_p^{j-1}가 상기 부모 기기 p의 SO 최대값 $SO_p^{\max}$보다 작은 경우, 상기 그림 9의 904단계로 넘어가 상기 부모 기기 p가 j번째 비컨 간격에서 사용할 SO_p^j를 자신이 $j-1$번째 비컨 간격에서 사용한 SO_p^{j-1}보다 1만큼 증가(활성 구간 크기가 2배가 됨)시키고, 다음 활성 구간 크기 감소 판단을 위한 시점을 현재 시점으로부터 $W_{\min}$ 비컨 간격 이후로 설정하며, 상기 활성 구간 크기

변화로 인한 GTS 한 슬롯 크기의 변화에 따라서 상기 301단계에서 각 자녀 라우터에게 할당한 GTS 크기를 유지하기 위하여 상기 부모 기기 p는 상기 301단계에서 j번째 비컨 간격에서 각 자녀 라우터 r에게 할당한 GTS 슬롯양 n_r^j을 다음과 같이 수정한다.

$$n_r^j = \left\lceil \frac{n_r^j \times T_{slot,p}^{j-1}}{T_{slot,p}^j} \right\rceil \qquad (3-6)$$

반대로, 상기 903단계에서 SO 증가가 필요하지만 이미 최대 SO를 사용하고 있는 경우(즉, $SO_p^{j-1} = SO_p^{\max}$), 상기 그림 9의 910단계에서 상기 부모 기기 p의 상기 자녀 종단 기기들 E의 CAP이 부족한 상황을 비컨을 통해서 상기 자녀 종단 기기들 E에게 알리고, 해당 상황을 인지한 상기 자녀 종단 기기들 E는 버퍼가 가득 차서 패킷 손실이 발생하는 것을 막기 위해서 버퍼 최대 크기 대비 일정량의 패킷이 쌓이면 다른 부모 기기로 연결을 전환한다.

2. 활성 구간 크기 감소

한편 상기 902단계에서 $j-1$번째 비컨 간격에서 부모 기기 p와 자녀 종단 기기들 E 사이의 CAP이 종료 되었을 때, 각각의 버퍼에 임계값보다 많은 서로에게 송신할 패킷이 남아 있지 않았고, 상기 301단계에서 자녀 라우터에게 GTS를 할당할 때에도 활성 구간 크기의 증가가 필요하지 않았던 경우(즉, $Q_{E,UL}^{j-1} \neq 0b1 \text{ and } Q_{E,DL}^{j-1} \neq 0b0 \text{ and } (N_R^j \leq N_{CFP}^{\max})$), 상기 그림 9의 905단계에서 활성 구간 감소 판단을 수행할 시점인지를 검사하여 상기 그림 9의 906단계에서 j번째 비컨 간격에서의 상기 부모 기기 p가 자녀 기기들의 CAP 및 GTS를 수용 가능한 최소 활성 구간 크기를 사용하도록 하는 SO_p^j를 설정하고, 아직 이전 활성 구간 감소 판단 시점 $t_{prev,p}$로부터 W_p 비컨 간격만큼 시간이 지나지 않았을 경우에는 상기 그림 9의 911단계에서 $j-1$번째 비컨 간격에서 사용한 SO를 j번째 비컨 간격에서도 그대로 사용한다. 여기서 상기 906단계의 SO_p^j는 다음과 같이 설정한다.

$$SO_p^j = \min\left\{ n \middle| aBSD \times 2^n \geq (N_{R,p}^{need} + N_{E,p}^{need}) \times T_{slot,p}^{j-1},\ 0 \leq n \leq SO_p^{\max} \right\} \qquad (3-7)$$

여기서 $N_{R,p}^{need}$는 상기 301단계에서 결정된 부모 기기 p의 각 자녀 라우터들에 대한 개별 n^{need}의 총합이고, $N_{E,p}^{need}$는 $j-W_r$번째 비컨 간격부터 j번째 비컨 간격 동안 상기 부모 기기 p가 자신의 자녀 종단

기기들 E 와의 전송 결과를 통해서 판단한 상기 자녀 종단 기기들 E 에게 할당해야 하는 CAP 슬롯양이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{E,p}^{need} = \max(n_{CAP}^{\min}, \left\lceil \frac{\tilde{T}_{E,used}}{T_{slot,p}^{j-1}} \right\rceil) \qquad (3-8)$$

여기서 $\tilde{T}_{E,used}$ 는 상기 부모 기기 p 가 상기 자녀 종단 기기들 E 와의 i 번째 비컨 간격에서의 송수신에 실제로 사용된 초 단위 CAP 크기 $T_{E,used}^{i}$ 의 $j-W_r$ 번째 비컨 간격부터 j 번째 비컨 간격 동안의 한 비컨 간격당 평균 값을 나타낸다. 상기 $T_{E,used}^{i}$ 는 그림 8과 같이 i 번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p 가 상기 자녀 종단 기기들 E 에게 할당한 CAP의 시작점에서부터 상기 부모 기기 p 와 상기 자녀 종단 기기들 E 의 버퍼에 서로에게 송신할 패킷이 남아 있지 않은(즉, $I_{E,UL}^{i} = 0b00$ and $I_{E,DL}^{i} = 0b00$) 시점까지의 차이로 정한다. 만약, i 번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p 가 상기 자녀 종단 기기들 E 에게 할당한 CAP이 종료 되었을 때, 상기 부모 기기 p 와 상기 자녀 종단 기기들 E 의 버퍼에 서로에게 송신할 패킷이 남아 있다면(즉, $I_{E,UL}^{i} \neq 0b00$ or $I_{E,DL}^{i} \neq 0b00$) 상기 $T_{E,used}^{i}$ 는 i 번째 비컨 간격에서 상기 자녀 종단 기기들 E 에게 할당된 CAP 전체가 된다.

한편, 상기 그림 9의 907단계에서 $j-1$ 번째 비컨 간격에서보다 j 번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p 의 활성 구간 크기가 감소했다면, 상기 그림 9의 908단계에서 다음 활성 구간 감소 판단 시점을 현재 시점 t 로부터 $W_{\min}$ 비컨 간격 이후로 설정하여 트래픽 변화에 빠르게 대응하도록 하고, 상기 활성 구간 크기 변화로 인한 GTS 한 슬롯 크기의 변화에 따라서 상기 301단계에서 각 자녀 라우터에게 할당한 GTS 크기를 유지하기 위하여 상기 부모 기기 p 는 상기 301단계에서 j 번째 비컨 간격에서 각 자녀 라우터 r 에게 할당한 GTS 슬롯양 n_r^j 을 상기 수학식 (3-6)을 사용하여 수정한다. 반대로 j 번째 비컨 간격에서의 상기 부모 기기 p 의 활성 구간 크기가 $j-1$ 번째 비컨 간격에서보다 크거나 같다면 $j-1$ 번째 비컨 간격에서 상기 부모 기기 p 가 사용한 활성 구간의 크기가 패킷 송수신 성능을 보장하기에 적절하다고 판단하여 상기 그림 9의 909단계에서 다음 활성 구간 감소 판단 시점을 현재 시점 t 로부터 W_p 의 두 배로 설정하여 연산 부담을 줄인다.

제 4 절 신호 교환 부담

아래 표 1은 기존의 여러 기법들과 제안 전송 자원 관리 기법의 단일 종류(중요도)의 패킷이 생성되는 네트워크에서의 신호 교환 부담을 나타낸다.

ZigBee는 신호 교환 부담의 기준으로서 전송 자원 관리 동작이 존재하지 않기 때문에 추가 신호 교환 부담이 없고, CTGAS는 네트워크에서 정의된 자녀 수 제한에 따라서 초기에 모든 전송 자원을 배분하여 사용하기 때문에 추가 신호 교환 부담이 없다.

한편 ADCA에서 각 기기들은 자신의 버퍼에 남은 패킷을 7개 레벨(level)로 양자화하여 부모 기기에게 송신하는 상향 패킷에 포함시키기 때문에 모든 패킷에 3 비트를 추가적으로 사용한다.

제안 기법의 모든 기기는 다음에 송신할 패킷의 정보를 단 1 비트로 표현하고 버퍼 경고 정보 1비트와 함께 송신하는 패킷에 포함시킨다. 또한, 제안 기법의 부모 기기는 자신의 각 자녀 라우터에게 GTS를 할당하고 그 정보를 비컨에 포함 시킨다. 상기 GTS로 인한 추가 신호 교환 부담은 비컨의 크기 및 활성 구간에서 기기들이 송수신하는 수십~수백개 패킷들의 총량에 비하면 매우 적은 양에 해당된다. 뿐만 아니라, 환경에 대해서 적응하여 전송 자원의 조정이 끝나고 각 자녀 라우터에게 할당한 GTS 크기의 변화가 발생하지 않을 경우에 해당 GTS 정보는 비컨에 포함시키지 않아서 신호 교환 부담을 감소 시킨다. 만약, N 개의 중요도를 가지는 다양한 패킷이 생성되는 네트워크에서 제안 전송 자원 관리 기법이 패킷의 중요도에 따른 차등 동작을 하기 위해서는 $1+\lceil \log_2(N+1) \rceil$ 비트의 추가 정보가 각 패킷에 포함된다.

이후 성능 평가장에서 상기 신호 교환 부담의 증가를 수용함으로써 결과적으로 매우 큰 트래픽 송수신 능력 향상 및 전력 소모 감소가 가능한지를 확인할 수 있다.

표 1. 신호 교환 부담 비교

기법	추가 신호 교환 부담 (단위: 비트)	
	모든 패킷	비컨
ZigBee	0	0
CTGAS	0	0
ADCA	3	0
제안기법	2	0 ~ 24×(자녀 라우터 수)

제 4 장 성능평가

모의 실험을 통해서 제안 기법의 성능을 확인한다. 이를 위해서 최대 깊이가 3인 클러스터 트리 구조의 네트워크를 형성하고, AP는 네트워크 설치 영역의 중심에 위치하고 반복 실험마다 전체 기기의 위치는 임의로 정해지고 기기간의 연결도 달라진다. 채널은 IEEE 802.15.4에서 정의된 실내 채널 모델을 사용하고, 실험 변수는 표 2과 같다.

우선, 간섭 존재 유무에 따라 트래픽 생성량을 변화시키면서 제안 기법의 패킷 송수신 성능과 전력 소모를 확인하고, 생성되는 패킷 중요도에 따른 차등 동작의 성능도 확인한다. 또한, 제안 기법의 성능 향상을 기존 기법들과 비교한다. CTGAS는 부모 기기가 자녀 기기의 트래픽 부담을 고려하지 않고 일괄 고정된 GTS를 할당하는 것이며 제안 기법과의 비교를 위해 각 라우터의 활성 구간 크기는 최대로 설정한다. 또한, ADCA는 부모 기기가 자신의 활성 구간의 유휴 수신 시간을 측정하여 상기 자신이 활성 구간 크기를 트래픽에 따라 변화시키는 기법이며 GTS는 사용하지 않고 CSMA/CA로만 동작한다.

모의 실험에서 네트워크에 연결된 기기들은 일정한 주기로 AP를 목적지로 하는 상향 패킷을 생성하고, AP는 상기 기기들에게 하향 패킷을 생성하고 송신한다. 이때, 상/하향 트래픽의 총량은 일정하며 한 방향의 트래픽에서 HP패킷과 LP패킷을 생성하는 기기의 비율은 동일하다.

표 2. 모의 실험 변수

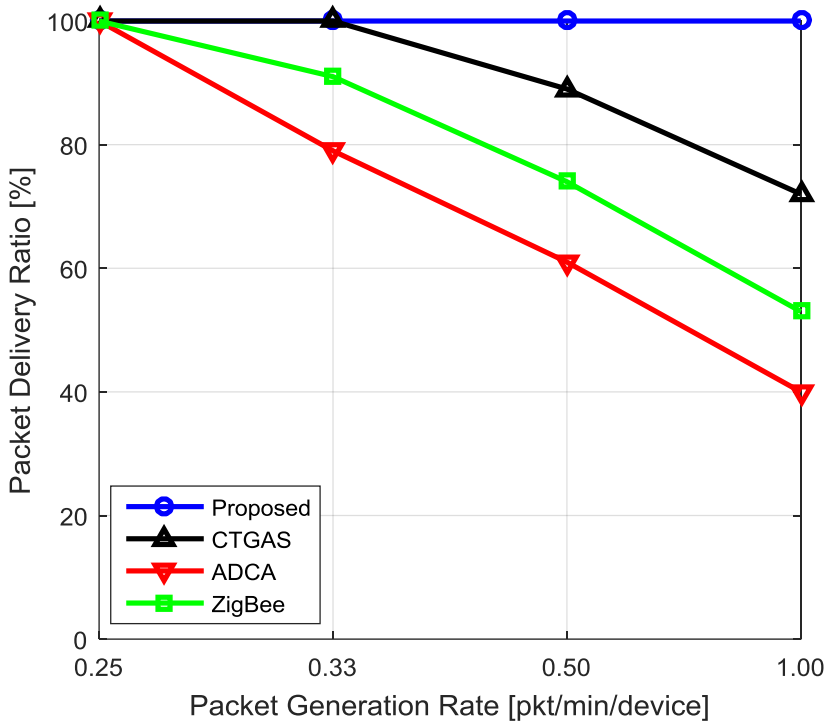
실험 변수	값	
비컨 지수(*BO*)	8 (3.93 초)	
활성 구간 지수(*SO*)	AP	5 (0.49 초)
	깊이 1 라우터	1 ~ 4(0.03 ~ 0.25 초)
	깊이 2 라우터	1 (0.03 초)
사용 가능 채널 수	4	
트래픽 특성	1) 각 기기는 네트워크에 연결된 시점부터 일정한 주기로 패킷 생성 2) 상/하향 트래픽은 각각 HP 50%, LP 50%로 구성 3) 상향 트래픽양과 하향 트래픽양은 동일	
MAC payload 크기	20 bytes	
최대 네트워크 깊이 (*Lm*)	3	
간섭 발생량 (loading factor)	0.3	
송신 속도	250 kbps (IEEE 802.15.4 PHY)	
기기 수	1000	
네트워크 면적	30 m * 30 m	

표 3. 트래픽 송수신 능력 비교

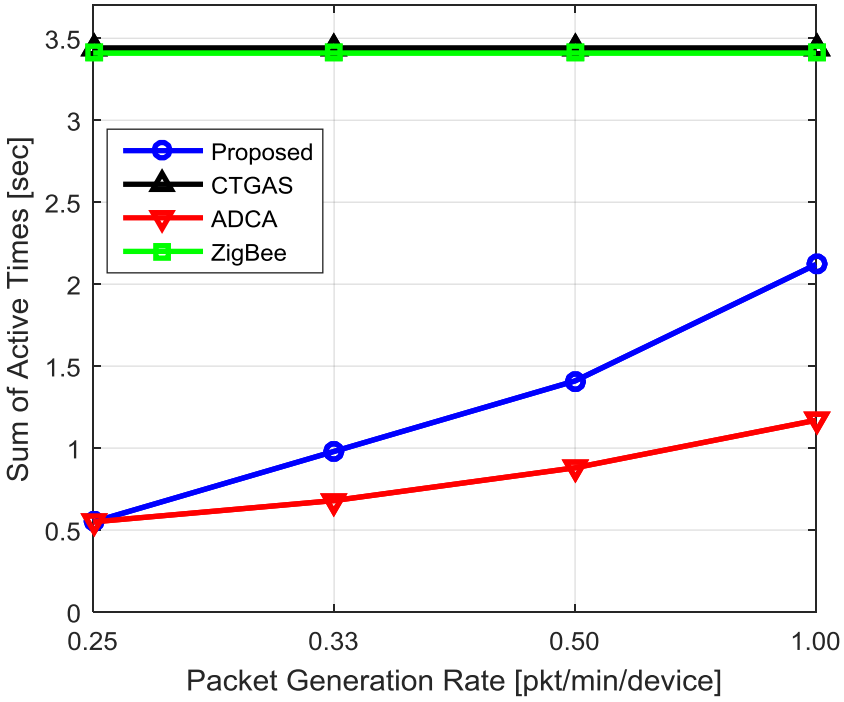
기법	트래픽 송수신 능력 (패킷/분/기기)	
	간섭 없음	간섭 있음
ZigBee	0.25	0.125
CTGAS	0.33	0.25
ADCA	0.25	0.125
제안기법	2	1

표 3은 간섭 존재 여부에 따른 각 기법의 트래픽 송수신 능력을 나타낸다. 여기서 트래픽 송수신 능력은 패킷 손실 없이 각 기기들이 생성하는 상/하향 패킷의 목적지까지 전달을 보장할 수 있는 최대 트래픽을 의미한다. 상기 표에 나타난 각 기기별 패킷 생성량은 상향 패킷에 대한 것이며, 전체 네트워크에서 생성되는 상향 트래픽과 동일한 양의 하향 트래픽을 AP가 발생시킨다.

제안 전송 자원 관리 기법은 간섭이 없는 경우에는 각 기기가 분당 2개의 패킷을 생성하는 것까지 패킷 전달을 보장하고, 간섭이 있을 경우에는 분당 1개의 패킷을 생성하는 것까지 패킷 전달을 보장한다. 이것은 기존 기법들의 트래픽 송수신 능력의 4~8배에 해당되는 것이다. 따라서 제안 전송 자원 관리 기법은 기존 기법에 비하여 네트워크의 트래픽 처리 능력을 대폭 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.



(a) 패킷 생성량에 따른 패킷 전달률



(b) 패킷 생성량에 따른 비컨 간격 당 활성 구간의 합

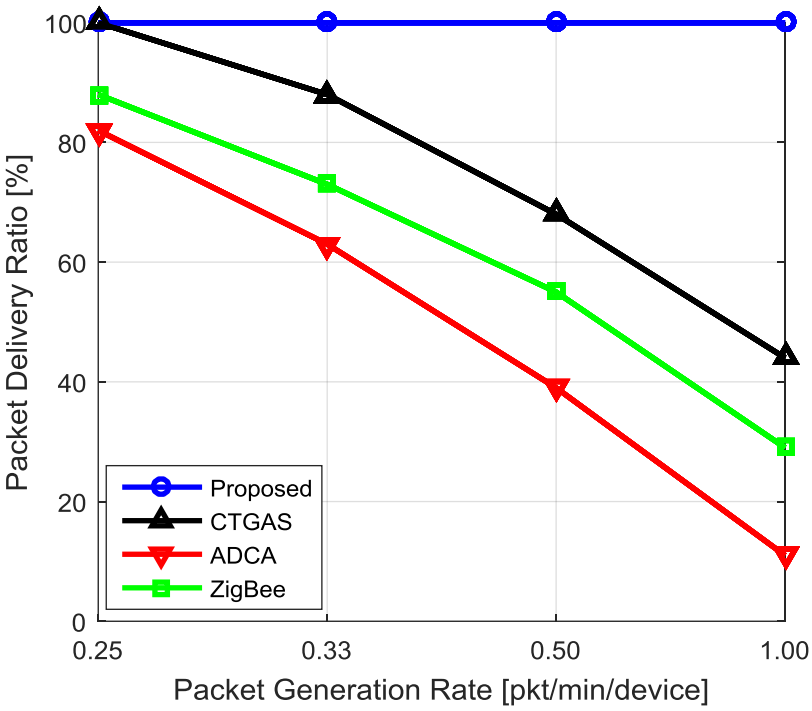
그림 10 간섭이 없는 환경의 패킷 송수신 성능 및 전력 소모

그림 10의 (a), (b)는 간섭이 없는 환경에서 각 기기의 패킷 생성량에 따른 패킷 전달률과 활성 구간 크기의 합을 나타낸 것이다. 여기서 패킷 전달률은 네트워크에서 생성된 전체 상/하향 패킷 중에 패킷의 최종 목적지까지 전달된 패킷의 비율로 정의하고, 활성 구간 크기의 합은 부모 기기들이 전체 실험 시간 동안 사용한 평균 활성 구간 크기의 총합을 나타낸다. 또한, 상기 각 기기의 패킷 생성량은 단위 시간당 생성하는 상향 패킷의 수이고 AP는 네트워크의 모든 기기들이 생성하는 상향 패킷의 총량과 동일한 하향 패킷을 생성한다.

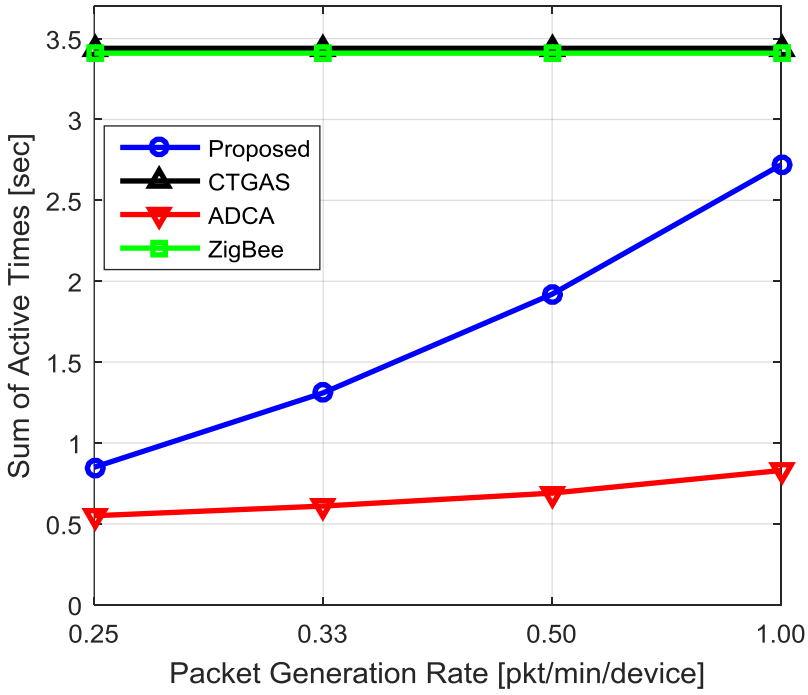
그림 10의 (a)는 간섭이 없는 환경에서 트래픽 생성 량에 따른 패킷 전달률을 나타낸다. 여기서 기존 기법들은 트래픽이 증가 할수록 패킷 손실이 증가하지만 제안 기법은 전체 실험 트래픽 범위에서 패킷 전달을 보장하는 것을 확인할 수 있다. CTGAS는 자녀 라우터에게 GTS를 할당했으나 자녀 기기 수에 따른 트래픽 부담을 고려하지 못하여 패킷 손실이 발생하고, ADCA 및 ZigBee는 GTS할당 동작이 없기 때문에 송수신 경쟁이 심각하여 대규모 기기의 트래픽을 처리하지 못했다. 반면에 제안 기법은 부모 기기가 자녀 기기별 트래픽 부담을 고려하여 상기 자녀 기기별로 다른 양의 GTS를 할당하여 패킷 전달률을 보장하면서도 자원을 효율적으로 사용할 수 있다.

그림 10의 (b)는 간섭이 없는 환경에서 트래픽 생성 량에 따른 부모기기들의 활성 구간의 합을 나타낸다. 활성 구간 크기는 곧 매 비컨 주기의 전력 소모로 직결된다. 여기서 제안 기법과 ADCA의 부모 기기는 트래픽을 인지하여 자신의 활성 구간 크기를 결정함을 확인할 수 있다. ZigBee와 CTGAS를 사용하는 네트워크의 부모 기기는 네트워크 초기 설정 시에 결정된 활성 구간 크기를 고정된 값으로 사용하고, ADCA는 제안 기법보다 더 작은 활성 구간 크기를 사용했다. 하지만, 상기 그림 10의 (a)를 참고하면 ADCA는 많은 패킷 손실이 발생함에도 불구하고 활성 구간 크기를 증가 시키는 동작을 하지 못하는 것을 알 수 있다. 이것은 ADCA가 유휴 수신 구간을 측정하여 활성 구간 크기를 결정하는 것이 대규모 기기의 패킷들의 송수신 경쟁이 발생할 때 트래픽 상황을 정확하게 판단하지 못함을 나타낸다.

상기 그림 10의 (a)와 (b)를 통해서 간섭이 없는 환경에서 기존 기법들에 비해서 제안 기법은 자녀 기기별 트래픽 부담에 적합한 자원을 할당하여 패킷 전달률을 보장하면서도 전력 소모를 최소화할 수 있음을 확인할 수 있다.



(a) 패킷 생성량에 따른 패킷 전달률



(b) 패킷 생성량에 따른 비컨 간격 당 활성 구간의 합

그림 11 간섭이 있는 환경의 패킷 송수신 성능 및 전력 소모

그림 11의 (a)는 간섭이 있는 환경에서 트래픽 생성량에 따른 패킷 전달률, 그림 11의 (b)는 간섭이 있는 환경에서 트래픽 생성량에 따른 부모 기기들의 활성 구간의 합을 나타낸 것이다.

그림 11을 간섭이 없는 환경에서의 패킷 전달률 및 활성 구간 크기의 합을 나타낸 그림 10과 비교해보면, 기존 기법들은 전체 실험 트래픽 구간에서 트래픽이 증가되거나 간섭이 발생하면 패킷 손실로 인하여 패킷 전달률을 보장하지 못하지만 제안 기법은 간섭이 있는 환경에서도 패킷 전달을 보장하는 것을 확인할 수 있다.

이것은 ZigBee와 CTGAS는 간섭으로 인한 신호 경쟁 충돌 증가 및 재전송 증가를 고려하여 적응적으로 자원을 할당하는 동작이 없기 때문이다. 특히, ADCA는 잘못된 트래픽 및 필요 자원 판단으로 인하여 간섭이 있는 환경에서 간섭이 없는 상황일 때보다 더 적은 활성 구간을 사용하여 패킷 손실을 더욱 유발했다.

반면에 제안 기법은 간섭이 없는 환경(그림 10의 (b))에서 보다 간섭이 있는 환경(그림 11의 (b))에서 부모 기기들은 간섭으로 인한 필요 전송 자원량의 변화를 인지하고 더 큰 활성 구간을 적응적으로 사용하는 것을 확인할 수 있다.

상기 그림 10과 그림 11을 통해서 간섭이 존재하지 않거나 간섭이 있는 환경 모두에서 기존 기법들과 달리 제안 기법은 환경의 변화를 인지하고 그것에 따라 전송 자원량을 적응적으로 조정하여 패킷 전달을 보장하면서도 전력 소모를 최소화 할 수 있음을 확인할 수 있다.

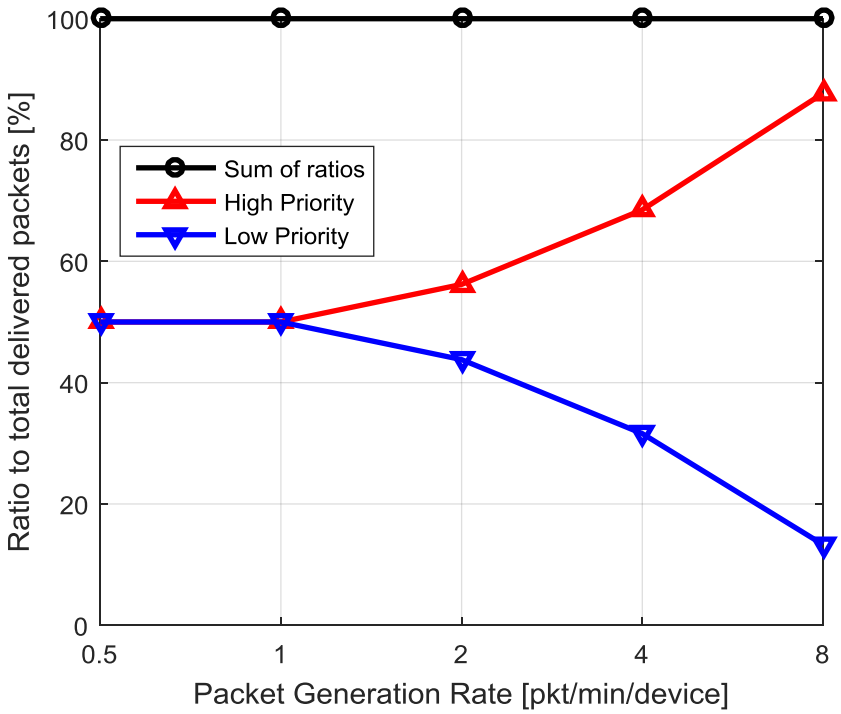


그림 12 간섭이 있는 환경의 패킷 중요도별 전달 비중

그림 12는 간섭이 있는 환경에서 패킷 중요도에 따른 전달 비중을 나타낸 것이다. 여기서 패킷 중요도에 따른 전달 비중은 전체 네트워크에서 목적지까지 전달된 패킷들 중에 각 중요도의 패킷이 차지하는 비중으로 정의한다. 즉, 전송 자원이 트래픽 부담에 비해서 여유롭다면 상기 패킷 중요도에 따른 전달률은 각각 50%로 나타난다.

여기서 기기들의 패킷 생성 및 송수신 경쟁의 임의성으로 인한 송수신 트래픽의 시간적 변화에 따라서 순시적으로 발생 가능한 전송 자원 부족 상황을 모사하기 위하여 순시적 자원 부족 상황이 아닌 지속되고 고정된 자원 부족 상황을 만들 수 있는 높은 트래픽과 간섭이 있는 환경에서 실험을 진행하였다.

그림 12에서 자녀 기기별 분당 패킷 생성량이 1보다 크면 자원 부족 상황이 발생하며, 목적지까지 전달된 전체 패킷들 중에 높은 중요도를 가지는 패킷의 비중이 트래픽이 생성량이 증가할수록 커지고, 낮은 중요도를 가지는 패킷의 비중은 트래픽 생성량이 증가할수록 작아지는 것을 확인할 수 있다.

이것은 제안 기법이 패킷 중요도에 따른 차등 전송 자원 관리로 상향 및 하향 전송에 각각 존재하는 높은 중요도를 가지는 패킷의

전달을 낮은 중요도를 가지는 패킷보다 우선적으로 처리하기 위한 차등 전송 자원 할당 및 송수신 역할 변경 동작을 수행하기 때문이다.

제 5 장 결 론

본 논문에서는 대규모 무선 센서 네트워크에서 패킷 송수신 성능을 향상시키면서도 전력 소모를 최소화하는 전송 자원 관리 기법을 제안하였다.

무선 센서 네트워크에서 가장 널리 쓰이는 네트워킹 기술인 ZigBee는 활성 구간에서 신호 송수신을 CSMA/CA에만 의존하여 대규모/고밀집 환경에서 대규모 기기간 전송 경쟁 충돌 및 숨은 노드 충돌로 인한 전력 낭비 및 패킷 손실 문제가 심각하다. 또한, 대규모 기기들 네트워크를 구축하는 과정에서 각 부모 기기의 자녀 기기 수 및 그에 따른 트래픽 양의 편차에 무관한 고정되고 동일한 크기의 활성 구간을 사용하기 때문에 패킷 손실 및 전력 낭비 문제가 발생한다.

상기 활성 구간 내 신호 충돌 문제 및 고정되고 획일화된 활성 구간 크기에 따른 문제를 해결하기 위하여 제안 기법은 패킷 송수신에 필요한 전송 자원을 상기 각 부모-자녀 기기들 사이에서 적응적으로 관리한다. 각 기기들은 송신할 패킷에 다음에 송신할 패킷의 정보와 버퍼 경고 정보를 포함시켜 전송하여, 부모 기기들은 자녀 기기들과의 상/하향 트래픽을 인지하여 각 자녀 기기와의 패킷 송수신에 필요한 전송 자원과 그 합을 수용 가능한 활성 구간 크기를 적응적으로 할당하고, 하나의 상기 전송 자원에서 자녀 라우터와 송수신 역할 변경을 통해 패킷 중요도에 따른 차등 전송이 가능할 뿐만 아니라 송수신 기기간 상호 패킷 전송이 완료되면 해당 전송 자원이 끝나기 이전에 수면 상태로 전환하여 전력 소모를 줄인다.

결론적으로 제안 기법은 다양한 통신 환경에서 저 복잡도로 트래픽 양을 인지하고 패킷 송수신에 필요한 전송 자원을 조정함으로써 기존 기법에 비해 대규모 무선 센서 네트워크에서 전력 낭비를 최소화하면서도 패킷 송수신 성능을 크게 향상시킬 수 있다.

참고 문헌

[1] Stankovic, J.A., “Research Directions for the Internet of Things,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol.1, no.1, pp.3-9, Feb. 2014.

[2] S. Chen, et al., “A Vision of IoT: Applications, Challenges, and Opportunities with China Perspective,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol.1, no.4, pp. 349-359, Aug. 2014.

[3] Tilak, Sameer, Nael B. Abu-Ghazaleh, and Wendi Heinzelman. "A taxonomy of wireless micro-sensor network models," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review* 6.2 (2002): 28-36.

[4] ZigBee Alliance, “ZigBee specification”, Jan. 2008.

[5] Huang, Der-Chen, Hsiang-Wei Wu, and Yi-Wei Lee. "A Cluster-Tree-Based GTS Allocation Scheme for IEEE 802.15.4 MAC Layer," *Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS)*, 2012 Sixth International Conference on. *IEEE*, 2012.

[6] Ho, Ching-Li, et al. "Dynamic GTS Allocation Scheme in IEEE 802.15.4 by Multi-Factor," *Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing (IIH-MSP), 2012 Eighth International Conference on. IEEE*, 2012.

[7] IEEE Std. 802.15.4-2006, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), *IEEE*, Sept. 2006.

[8] Rasouli, Hadi, Yousef S. Kavian, and Habib F. Rashvand. "ADCA: adaptive duty cycle algorithm for energy efficient IEEE 802.15.4 beacon-enabled wireless sensor networks," *Sensors Journal, IEEE* 14.11 (2014): 3893-3902.

[9] Hurtado-López, Javier, and Eduardo Casilari. "An adaptive algorithm to optimize the dynamics of IEEE 802.15.4 networks," *International Conference on Mobile Networks and Management.* Springer International Publishing, 2013.

[10] Lee, Bih-Hwang, and Huai-Kuei Wu. "Study on a dynamic superframe adjustment algorithm for IEEE 802.15. 4 LR-WPAN," *Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), 2010 IEEE 71st. IEEE*, 2010.

Abstract

Resource Management in Wireless Sensor Networks

Gwang-Hui Jeong

Dept. of Electrical and Computer Engineering

The Graduate School

Seoul National University

It is required for the deployment of Internet of things (IoT) services to employ low-power communication technology that can support a various kinds of traffic in wireless sensor networks (WSNs). ZigBee has been applied to the construction of WSNs, but it may not provide desired transmission performance mainly due to the use of carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA/CA) which is vulnerable to signal collision and hidden node problems in large-scale WSNs. ZigBee can save power consumption with the use of duty-cycle frame structures comprising active and inactive period, but it may seriously suffer from packet loss and power waste mainly due to the use of active period of a fixed equal size without consideration of the size of child devices and traffic.

In this thesis, we consider the resource management to improve packet transmission performance and to reduce power consumption in cluster-tree structured WSNs. A parent device utilizes a portion of its active period as exclusive resource to its child routers for time division multiple access (TDMA) and the rest of its active period as common resource to its child end devices for CSMA/CA.

Each device transmits its packets including the information of the next packet and buffer status, enabling its parent device to adaptively allocate the resource to its child devices and its active period as well. Moreover, the proposed scheme utilizes the allocated resources efficiently by changing transmission and reception role according to the priority of transmitting packets and by entering sleep modes after recognizing the termination of transmission and reception. Finally, the performance of the proposed scheme is verified by computer simulation.

Keywords: wireless sensor networks, resource management, adaptation, packet transmission, power consumption
Student Number: 2014-21675