

IEEE 802.15.4 MAC 계층의 성능 향상을 위한 분할 경합 접근 방식 (Partitioned Contention Access Mechanism to Enhance the Performance of IEEE 802.15.4 MAC Layer)

배 성 재 [†] 기 형 주 ^{**}
(Sueng Jae Bae) (Hyung Joo Ki)

이 태 진 ^{***} 정 민 영 ^{****}
(Tae-Jin Lee) (Min Young Chung)

요 약 본 논문은 IEEE 802.15.4 beacon-enabled 모드의 경합 접근 구간(CAP: Contention Access Period)에서 단말수의 증가에 따른 성능 저하를 개선하기 위해 분할 경합 접근 방식(PCAM: Partitioned Contention Access Mechanism)을 제안한다. 분할 경합 접근 방식에서 PAN 코디네이터는 사용 가능한 전체 경합 접근 구간을 같은 크기의 두 개의 소구간으로 나눈다. 단말은 자신이 소속된 소구간에서만 전송을 위해 서로 경쟁한다. 이와 같은 방법으로 분할 경합 접근 방식은 경쟁하는 단말의 수를 반으로 줄여 전송 프레임의 충돌을 감소시키고 경쟁 시간을 반으로 줄여 단말의 전력 소모를 줄이는 특징을 가진다. 본 논문에서는 분할 경합 접근 방식과 기존 IEEE 802.15.4 표준

의 접근 방식과의 성능을 비교하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과 정규화 수율 및 에너지 효율 측면에서 분할 경합 접근 방식이 기존의 방식보다 좋은 성능을 가짐을 확인하였다.

키워드 : IEEE 802.15.4, LR-WPAN, 센서 네트워크, CSMA/CA

Abstract In IEEE 802.15.4 beacon-enabled mode, performance decreases as the number of devices competing in the contention access period (CAP) increases. In this letter, we propose partitioned contention access mechanism (PCAM) to compensate performance degradation. In PCAM, the PAN coordinator divides CAP into two sub-periods and activity of devices is delimited in their assigned sub-periods. Since PCAM reduces the number of devices which compete at the same time by half, collision probability between transmitted frames can be reduced. In addition, devices can save their power consumption because PCAM shorten the duration that devices stay in active state into half. We perform simulations to compare the performance of PCAM with that of the IEEE 802.15.4 standard. From the result, PCAM yields better performance than IEEE 802.15.4 standard.

Key words : IEEE 802.15.4, LR-WPAN, Sensor Network, CSMA/CA

1. 서 론

IEEE 802.15.4 표준은 Low Rate - Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs)의 물리 계층과 MAC 부계층을 규정하기 위한 표준이다[1]. IEEE 802.15.4는 IEEE 802.15.1 블루투스나 IEEE 802.15.3 WPAN과 같은 고속/중속의 WPAN이 사용될 수 없는 저전력, 저비용을 요구하는 응용을 위하여 설계되었다. 이를 통해 IEEE 802.15.4 표준은 무선 센서, 무선 허브, 가상 선(Virtual Wire)과 같은 제한된 출력과 성능으로 간단한 단거리 무선 통신을 필요로 하는 폭넓은 응용에 사용될 수 있다.

IEEE 802.15.4 표준의 MAC 부계층은 비콘 프레임의 사용 여부에 따라 beacon enabled mode와 non-beacon enabled mode로 구분된다. beacon enabled mode에서는 비콘, 경합 접근 구간(CAP: Contention Access Period)과 Guaranteed Time Slot (GTS)으로 이루어진 슈퍼프레임을 정의한다. 각 구간의 길이는 PAN 코디네이터에 의해 결정되며 GTS의 보장을 위한 특별한 경우를 제외하면 경합 접근 구간은 최소 440 symbols 이상의 길이를 가져야 한다. 경합 접근 구간에서 단말들은 채널에 접근하기 위하여 slotted CSMA/CA 알고리즘을 사용하며, GTS에서는 단말이 정해진 자신의 시간구간에서만 전송하는 방식을 사용한다.

현재까지 IEEE 802.15.4 표준에 관한 많은 연구가 진

· 이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2006-000-10402-0).

· 이 논문은 제34회 추계학술대회에서 'IEEE 802.15.4 MAC 계층의 성능 향상을 위한 분할 경합 접근 방식'의 제목으로 발표된 논문을 확장한 것임

[†] 학생회원 : 성균관대학교 정보통신공학부
nooi@ece.skku.ac.kr

^{**} 정 회원 : 성균관대학교 정보통신공학부
ki0724@ece.skku.ac.kr

^{***} 정 회원 : 성균관대학교 정보통신공학부 교수
tjlee@ece.skku.ac.kr

^{****} 종신회원 : 성균관대학교 정보통신공학부 교수
mychung@ece.skku.ac.kr

논문접수 : 2007년 12월 14일

심사완료 : 2008년 3월 24일

Copyright©2008 한국정보과학회: 개인 목적이거나 교육 목적인 경우, 이 저작물의 전체 또는 일부에 대한 복사본 혹은 디지털 사본의 제작을 허가합니다. 이 때, 사본은 상업적 수단으로 사용할 수 없으며 첫 페이지에 본 문구와 출처를 반드시 명시해야 합니다. 이 외의 목적으로 복제, 배포, 출판, 전송 등 모든 유형의 사용행위를 하는 경우에 대하여는 사전에 허가를 얻고 비용을 지불해야 합니다.

정보과학회논문지: 컴퓨팅의 실제 및 레터 제14권 제4호(2008.6)

행되어왔다. IEEE 802.15.4의 성능을 평가하기 위한 연구로 Lu 등은 CBR 트래픽을 사용하여 IEEE 802.15.4 MAC의 성능을 평가하였다[2]. Mišić 등은 IEEE 802.15.4 MAC을 상향전송과 하향전송 측면에서 성능 평가를 위한 모델을 제시하였다[3]. Ramachandran 등은 수율과 에너지 소비 관점에서 경합 접근 구간의 성능을 분석하였다[4]. Bougard 등은 Chipcon社의 IEEE 802.15.4 규격 RF 송수신기인 CC2420을 기준으로 IEEE 802.15.4 표준의 에너지 모델을 제시하였으며 이를 통하여 에너지 효율을 측정하였다[5]. Pang 등은 프레임간의 충돌을 줄이기 위해 MAC frame의 예약된 비트를 활용하여 백오프 지수의 가중 이동 평균을 이용한 Memorized Backoff Scheme (MBS)을 제시하였다[6].

동시에 경쟁하는 단말의 수가 많아질수록 전송되는 프레임의 충돌 발생 확률이 늘어나며 이에 따라 에너지 효율과 정규화 수율이 감소한다[7]. 본 논문에서는 LR-WPANs의 통신 효율을 향상시키고 에너지 소모를 줄이기 위하여 분할 경합 접근 방식(PCAM: Partitioned Contention Access Mechanism)을 제안한다. 논문의 구성은 서론에 이어 2장에서는 IEEE 802.15.4 표준에서의 슈퍼프레임의 구조와 PAN의 생성 및 관리 기능에 대하여 알아보고 3장에서는 분할 경합 접근 방식을 제시한다. 4장에서는 시뮬레이션을 통해 성능을 평가하며 5장에서 결론을 내린다.

2. 슈퍼프레임의 구조

슈퍼프레임은 활성 구간과 비활성 구간으로 이루어져 있다. 비활성 구간에서는 단말이 저전력 모드로 동작하며 최소한의 전력만을 소모한다. 활성 구간은 경합 접근 구간과 비경합 접근 구간(CFP: Contention Free Period)으로 이루어져 있으며 비경합 접근 구간은 하나 이상의 GTS으로 구성된다. 그림 1은 슈퍼프레임 구조를 나타낸다.

슈퍼프레임을 이루는 각 구간의 위치와 길이는 PAN 코디네이터가 PAN 상황을 고려하여 결정한다. 이러한 정보는 PAN 코디네이터가 정기적으로 브로드캐스팅하는 비콘 프레임의 superframe specification field에 포

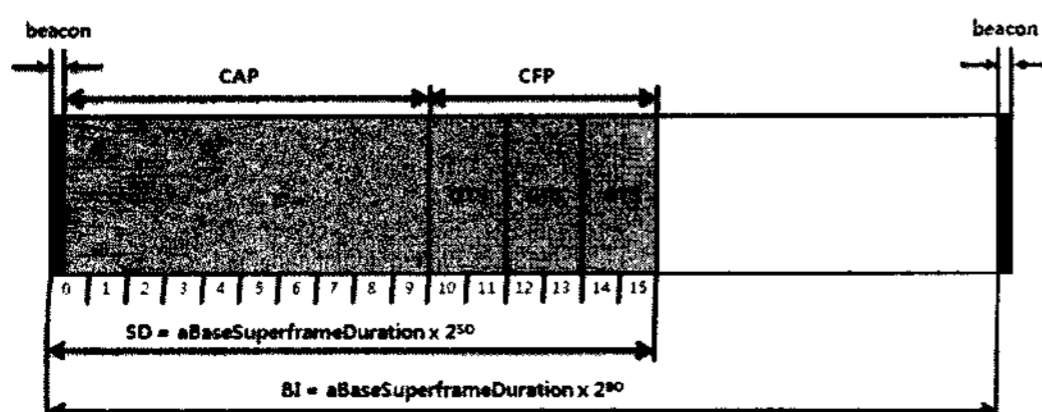


그림 1 슈퍼프레임 구조

함되어 있는 BO, SO, Final CAP slot으로 제공된다. BO는 현재 비콘 프레임과 다음 비콘 프레임 사이의 간격(BI: Beacon Interval)을 나타내는 지수로 BO에 따라 비콘 프레임 사이의 간격은 다음과 같이 결정된다.

$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO} \text{ symbols}$$

여기서 aBaseSuperframeDuration은 슈퍼프레임의 최소 길이를 나타내는 상수이다. SO는 슈퍼프레임 중 활성 구간의 길이(SD: Superframe Duration)를 나타내는 지수로써 활성 구간의 길이는 SO에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$SD = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} \text{ symbols}$$

이때 $0 \leq SO \leq BO \leq 14$ 이다.

IEEE 802.15.4 표준에서는 SD를 16개의 동일한 크기의 타임 슬롯으로 나눈다. 경합 접근 구간은 비콘 프레임 바로 다음부터 Final CAP slot까지이며 비경합 접근 구간은 경합접근 구간 바로 다음부터 활성 구간의 끝까지이다.

슈퍼프레임의 경합 접근 구간에서 단말들은 패킷을 전송하기 위해 서로 slotted CSMA/CA 알고리즘을 이용하여 경쟁한다. 이때 동시에 경쟁하는 단말의 수가 늘어날수록 충돌 발생 확률이 늘어나며 전송을 위해 수행하는 백오프와 CCA(Clear Channel Assessment)의 횟수가 늘어나게 되고 이로 인하여 네트워크의 수율과 에너지 효율이 떨어지게 된다. 이러한 문제를 개선하기 위해 본 논문에서는 분할 경합 접근 방식 제안한다.

3. 분할 경합 접근 방식

분할 경합 접근 방식(PCAM: Partitioned Contention Access Mechanism)은 기존 IEEE 802.15.4 표준과 같이 slotted CSMA/CA 알고리즘을 사용하여 채널에 접근을 시도한다. IEEE 802.15.4 표준에서는 전체 경합 접근 구간 동안 PAN에 소속된 모든 단말들이 동시에 경쟁할 수 있다. 이와 달리 분할 경합 접근 방식에서는 경합 접근 구간을 두 개의 소구간으로 분할하고 PAN에 소속된 단말들은 정해진 소구간에서만 경합 접근한다. 이로 인하여 단말에게 할당된 경쟁 접근 시간과 동시에 경쟁하는 단말의 수가 반으로 줄어든다. 경쟁 접근 시간이 반으로 줄어들기 때문에 단말이 데이터의 전송을 위해 활성화 상태로 있는 시간이 줄어들어 전력 소비를 줄일 수 있다. 또한 동시에 경쟁하는 단말의 수가 반으로 줄어들기 때문에 전송되는 프레임의 충돌 발생 가능성이 감소하고 통신 자원을 보다 효율적으로 사용할 수 있다.

분할 경합 접근 방식에서는 슈퍼프레임의 경쟁 접근 구간을 구간 0과 구간 1의 2개의 소구간으로 나눈다. PAN에 소속되어 있는 단말은 분할 경합 접근 방식에서

정한 기준에 따라 어느 소구간에서 데이터의 전송을 위한 접근을 시도할지 결정한다. 구간을 결정하는 방법은 1) 단말이 PAN에 소속될 때 PAN 코디네이터에 의해 결정되는 경우와 2) PAN 코디네이터가 각 구간별로 전송을 시도하는 단말의 수의 심각한 불균형을 인지하고 비콘 프레임에 재설정 비트를 설정하여 전송했을 때 이를 수신한 단말들이 스스로 전송 구간을 선택하는 경우의 2가지가 있다. 여기서 PAN 코디네이터가 특정 소구간에서 데이터의 전송을 위해 경쟁하는 단말의 수가 몇 대인지를 자체 카운터에 저장하고 있다고 가정한다.

1) IEEE 802.15.4 표준에서 단말은 기존에 존재하는 PAN에 참여하기 위해 PAN 코디네이터에게 참여 요청 명령(Association Request Command)를 전송하여 해당 PAN으로의 참여 요청을 한다. 이때 기존 단말들과의 호환성을 유지하기 위해 분할 경합방식에서는 참여 요청 명령의 Capability Information field에 있는 4번째 reserved 비트를 PCAMS(Partitioned Contention Access Mechanism Support)라는 변수로 지정한다. 단말이 분할 경합 접근 방식을 사용 가능 하다면 PCAMS의 값을 '1'로, 사용 가능하지 않다면 '0'으로 설정하여 전송한다. PAN 코디네이터는 PCAMS를 참조하여 참여를 요청한 단말의 분할 경합 접근 방식의 사용 유무를 판단한다. 판단 후 PAN 코디네이터는 기존 PAN에 소속되어 있는 분할 경합 접근 방식을 사용하는 단말들이 구간 0과 구간 1에 배정되어 있는 수를 고려하여 새로운 단말에게 접근을 허용할 소구간을 결정한다. 이 결과를 PAN 코디네이터가 단말이 PAN으로의 소속을 요청한 것에 대한 응답으로 전송하는 참여 응답 명령(Association Response Command)의 결합 상태 필드(Association Status field)의 값을 통하여 단말에게 알려준다. 표 1은 분할 경합 접근 방식에서 결합 상태 필드 값에 따른 의미를 나타낸다.

2) PAN에서 단말들의 등록과 탈퇴에 따라서 각 소구간에서 데이터의 전송을 위해 채널 접근을 시도하는 단말들의 수의 차이가 커질 경우 속해 있는 구간에 따른 단말간의 형평성이 떨어지게 된다. 이러한 문제를 개선하기 위해서 분할 경합 접근 방식에서는 비콘 프레임의 프레임 제어 필드(Frame Control field)의 7번째 reserved 비트를 RAP(Reset Access Period) 변수로 지정한다. 구간별 단말의 수의 차이가 커질 경우 PAN 코디네이터는 RAP를 '1'로 하여 단말의 접근 구간의 초기화를 지시한다. 분할 경합 접근 방식을 지원하는 단말들은 비콘 프레임 수신시 RAP를 참조한다. RAP가 '1'인 경우 전송을 시도할 구간으로 구간 0 또는 구간 1을 각각 0.5의 확률로 임의 선택하며 '0'일 경우 기존 구간을 유지한다.

표 1 결합 상태 필드값에 따른 의미

Association Status	Description
0x00	Association successful.
0x01	PAN at capacity.
0x02	PAN access denied.
0x03	Association successful and Access at Period 0
0x04	Association successful and Access at Period 1
0x05 - 0x7f	Reserved.
0x80 - 0xff	Reserved for MAC primitive enumeration values.

표 2 결합 해지 원인 필드값에 따른 의미

Association Status	Description
0x00	Reserved.
0x01	The coordinator wished the device to leave the PAN
0x02	The device wishes to leave the PAN
0x03	The device which accessed at period 0 wishes to leave the PAN
0x04	The device which accessed at period 1 wishes to leave the PAN
0x05 - 0x7f	Reserved.
0x80 - 0xff	Reserved for MAC primitive enumeration values.

이와 같은 방법으로 분할 경합 접근 방식을 사용하는 단말은 구간 0과 구간 1 중 하나의 구간을 선택하고 해당 구간에서만 채널 접근을 시도한다. 단말은 PAN을 떠나기 위해서 PAN 코디네이터에게 결합 해지 통보 명령(Disassociation Notification Command)을 전송한다. 이 때 결합 해지 통보 명령의 결합 해지 원인 필드(Disassociation Reason Field)의 값에 따라 PAN 코디네이터는 어느 구간에 속해 있는 단말이 떠나는지를 파악하고 이를 구간별 단말 수의 균형 유지를 위한 자료로 활용한다. 표 2는 결합 해지 원인 필드값에 따른 의미이다.

PAN에 소속된 단말이 한 대 뿐일 때 분할 경합 접근 방식을 사용하면 시간을 낭비하여 비효율적이다. 본 논문에서 제안하는 분할 경합 접근 방식에서는 이와 같은 특수한 PAN의 상황을 위하여 PAN 코디네이터에 의해 소속된 단말들이 분할 경합 접근 방식을 사용하지 않도록 할 수 있다. 이를 위해 비콘 프레임의 Superframe Specification field의 13번째 reserved 비트를 APCAM(Access with Partitioned Contention Access Mechanism) 변수로 지정한다. PAN 코디네이터는 비콘 프레임에 따른 해당 슈퍼프레임에서 분할 경합 접근 방식을 사용하기 위해서는 APCAM을 '1'으로, 사용하지

않기 위해서는 APCAM을 '0'으로 설정한다. 단말은 비콘 프레임에서 APCAM을 참조하여 해당 슈퍼프레임에서 분할 경합 접근 방식의 사용 유무를 결정한다.

4. 성능 평가

분할 경합 접근 방식의 성능을 평가하기 위하여 N개의 단말이 하나의 PAN 코디네이터에 접근하기 위해 경합하는 성형 토폴로지 PAN을 가정하였다. 시뮬레이션은 한 슈퍼프레임 동안 수행되었으며 슈퍼프레임의 전 구간은 slotted CSMA/CA 알고리즘을 사용하는 경합 접근 구간으로 구성된다고 가정하였다. 시뮬레이션에서는 한 프레임의 성공적인 전송 후에 곧바로 다음 전송을 위해 이용할 수 있는 프레임이 항상 존재하는 포화 (Saturation) 조건을 가정하였다. 시뮬레이션에 사용된 MAC 파라미터는 표 3과 같다.

경합 접근 구간에서 경쟁하는 단말의 수가 늘어남에 따라 전송되는 프레임의 충돌 발생 빈도와 CCA 실패 횟수가 늘어나게 되고 이로 인하여 정규화 수율은 감소한다. 분할 경합 접근 방식은 기존 방식에 비하여 단말별 경쟁하는 시간과 동시에 경쟁하는 단말의 수가 반으로 줄어든다. 그림 2는 IEEE 802.15.4 표준 방식과 분할 경합 접근 방식 각각의 단말 수의 변화에 따른 정규화 수율을 나타내며 단말의 수가 증가할수록 기존 방식 대비 분할 경합 접근 방식의 수율 향상폭이 커짐을 확인할 수 있다.

IEEE 802.15.4 표준을 사용하는 PAN을 개선하기 위해 새로운 방법들이 제시되고 있다. 이러한 방법들을 기존 PAN에 쉽게 적용하기 위해서는 기존 단말과의 호환성 보장이 중요하다. 분할 경합 접근 방식에서는 PAN 코디네이터가 기존 방식을 사용하는 단말과 분할 경합 접근 방식을 사용하는 단말 모두를 수용 가능하다. 그림 3

표 3 시뮬레이션에 사용된 MAC 파라미터

파라미터		값
T_{slot}	슬롯 시간	640 μ s (20 symbols)
T_H	MAC header + PHY header 전송시간	480 μ s (15 bytes)
T_P	MAC payload (118 bytes) 전송시간	25 byte : 0.8 ms 50 byte : 1.8 ms 75 byte : 2.4 ms
T_{Prop}	전파 지연	1 μ sec
t_{ack}	Data 프레임 전송 후 ACK 프레임 수신 대기 시간	192~1024 μ sec (12~32 symbols)
T_{Ack}	ACK 프레임 전송시간	352 μ sec (11 bytes)
T_{LIFS}	long IFS duration	1.28 ms (40 symbols)

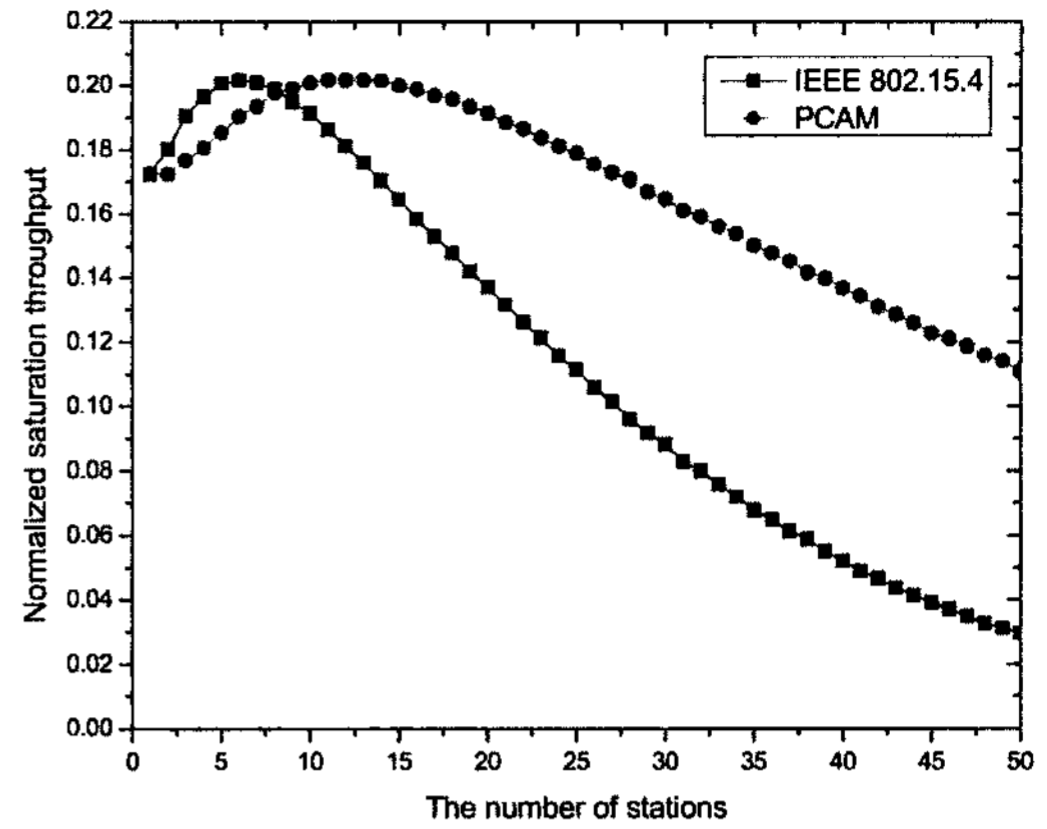


그림 2 포화상태 정규화 수율

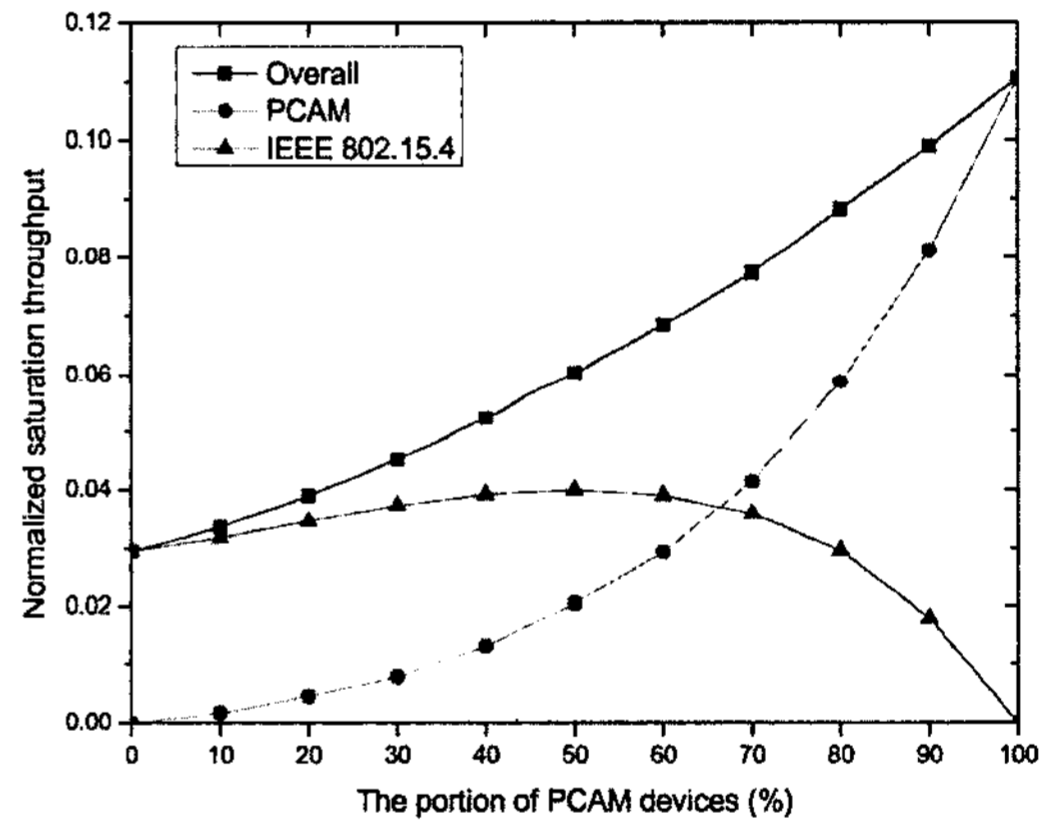


그림 3 50대 단말 중 PCAM 단말 비율에 따른 정규화 수율

은 50대의 단말로 구성된 PAN에서 기존 방식의 단말들에 대한 분할 경합 접근 방식을 적용한 단말들의 비율에 따른 정규화 수율을 나타낸다. 분할 경합방식을 사용하는 단말들이 각자 정해진 구간에서만 경쟁함으로써 인하여 기존 모든 경합 접근 구간에서 경쟁하는 단말 입장에서 동시에 경쟁하는 단말의 수가 줄어 수율이 향상된다. 시뮬레이션 결과 분할 경합 접근을 사용하는 단말의 수가 늘어날수록 전체 수율이 향상되었다.

무선 센서 네트워크에서는 단말의 에너지 소비가 중요한 성능 평가 파라미터이다. 본 논문에서는 Chipcon사의 802.15.4 규격 RF 송수신기인 CC2420을 기준으로 단말 동작의 각 상태에 따른 에너지 소비량을 시뮬레이션을 통해 측정하였다. 표 4는 CC2420에서 지원하는 4가지 상태와 각 상태마다 소모하는 전력의 크기를 나타낸다[5,8].

그림 4에서 단말의 수가 증가할수록 단말 당 에너지 소모가 작아지는 것은, 단말의 수가 적을 때에는 CCA

표 4 Chipcon CC2420 동작 상태에 따른 소비 전력

상태	소비 전력
Shutdown state	144 nW
Idle state	712 uW
Transmit state	19.62 mW (-10 dBm 기준)
Receive state	35.28 mW

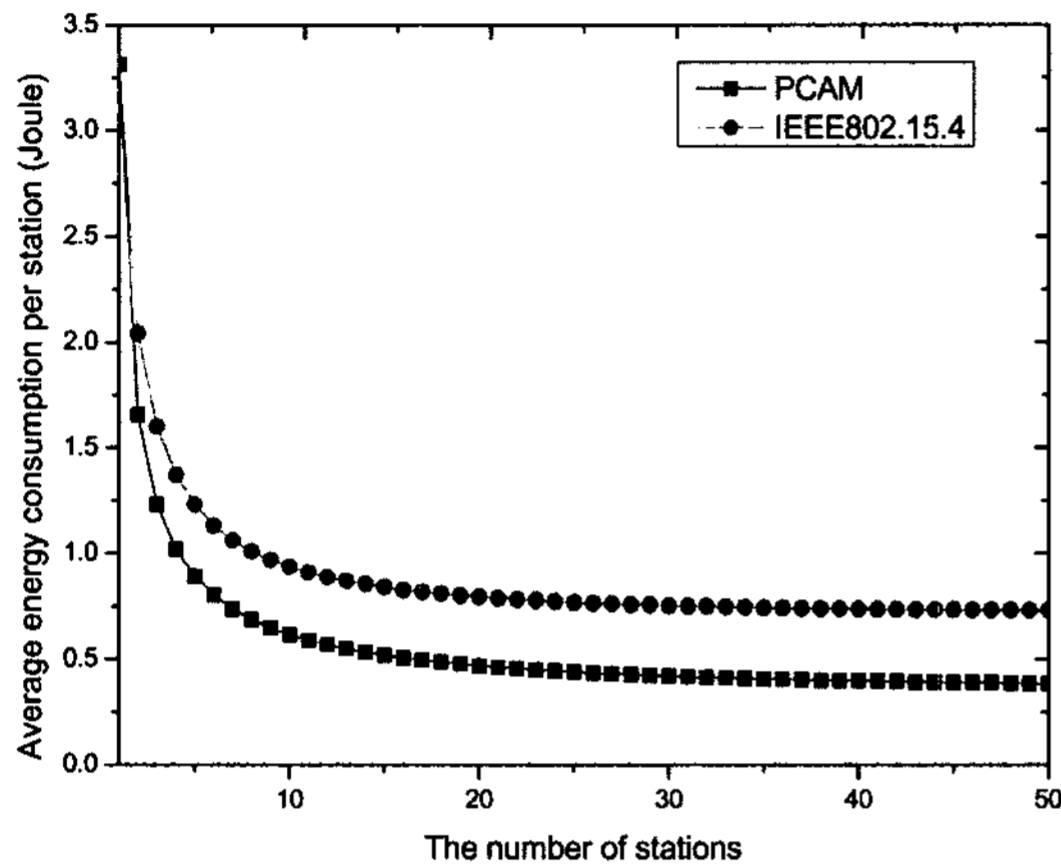


그림 4 단말 당 평균 에너지 소비량

실패확률이 적으며 이에 따라 백오프 수행 시간이 짧아 Idle 상태에 머무는 시간이 짧고 데이터 전송의 간격이 좁아 전송 상태에 머무는 시간이 많기 때문이다. 분할 경합 접근 방식은 전체 경합 접근 구간의 반 동안 경쟁하고 나머지 시간동안 shutdown 상태로 머물기 때문에 기존 방식에 비해 에너지 소모가 적다. 또한 동시에 경쟁하는 단말의 수가 적어 충돌확률과 CCA 실패 확률이 기존 방식보다 감소하여 이에 따른 불필요한 에너지 소모를 줄인다.

5. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.15.4 표준의 beacon enabled mode에 기반을 둔 PAN에서의 단말 수의 증가에 따른 성능 저하 문제를 해결하고자 분할 경합 접근 방식을 제안하였다. 분할 경합 접근 방식은 경합 접근 구간을 두 개의 소구간으로 분할하고 각 소구간에 전체 단말을 균등히 분산시킨다. 각 단말은 자신에게 할당된 소구간에서만 프레임의 전송을 위해 경쟁을 하며, 나머지 소구간에서는 shutdown 상태로 진입하여 전력 소모를 최소화한다. 이러한 방법을 통해 경쟁 밀도를 절반으로 감소시켜 전송되는 프레임의 충돌 발생 확률, CCA에 실패할 확률, 그리고 높은 백오프 카운터를 가질 확률을 줄임으로써 PAN의 수율과 에너지 효율을 향상시

킬 수 있다. 시뮬레이션 결과 분할 경합 접근 방식에 따른 단말들이 기존 방식의 단말들보다 높은 수율과 에너지 효율을 가짐을 확인하였다. 또한 분할 경합 접근 방식에 따른 단말들과 기존 단말들이 동시에 존재하는 PAN의 시뮬레이션을 통해 분할 경합 접근 방식이 기존 IEEE 802.15.4 표준과의 호환성을 보장함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] IEEE 802.15.4, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2006.
- [2] G. Lu, B. Krishnamachari and C. S. Raghavendra, "Performance Evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC for Low-rate Low-power Wireless Networks," in Proc. of IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications, pp: 701-706, 2004.
- [3] J. Mišić, S. Shafi, V. B. Misšić, "Performance of a Beacon Enabled IEEE 802.15.4 Cluster with Downlink and Uplink Traffic," IEEE Transaction on Parallel and Distributed Systems, Vol.17, No.4, pp. 361-376, 2006.
- [4] I. Ramachandran, A. K. Das, and S. Roy, "Analysis of the contention access period of IEEE 802.15.4 MAC," ACM Transactions on Sensor Networks, Vol.3, Issue 1, Article 4, 2007.
- [5] B. Bougard, F. Catthoor, D. Daly, A. Chandrakasan, and W. Dehaene, "Energy efficiency of the IEEE 802.15.4 standard in dense wireless microsensor networks : Modeling and improvement perspectives," IEEE Design Automation and Test in Europe (DATE '05), pp. 196-201, 2005.
- [6] A. Pang, H. Tseng, "Dynamic Backoff for Wireless Personal Networks," Global Telecommunications Conference, Vol.3, pp. 1580-1584, 2004.
- [7] T. R. Park, T. H. Choi, S. Choi and W. H. Kwon, "Throughput and energy consumption analysis of IEEE 802.15.4 slotted CSMA/CA," IEE Electron. Lett., Vol.41, Issue 18, pp. 1017-1019, 2005.
- [8] Chipcon. 2004. 2.4GHz IEEE 802.15.4 / Zigbee-ready RF Transceiver. <http://www.ti.com/lit/gpn/cc2420>.