

논문 2012-49CI-3-8

무선 센서 네트워크에서 효율적인 데이터 전송을 위한 동적 할당 알고리즘

(The Dynamic Allocation Algorithm
for Efficient Data Transmission in Wireless Sensor Network)

김 지 원*, 윤 완 오*, 김 강 희*, 홍 창 기*, 최 상 방**

(Ji-Won Kim, Wan-Oh Yoon, Kang-Hee Kim, Chang-Ki Hong, and Sang-Bang Choi)

요 약

저속, 저전력, 저가의 특징을 갖는 IEEE 802.15.4 standard는 무선 센서 네트워크 환경에서 효율적이다. IEEE 802.15.4 표준에서 사용하는 다양한 토폴로지 중에서도 많은 노드들이 참여하는 클러스터-트리 토폴로지는 싱크 노드 주변에 트래픽이 집중되어 전송 지연과 에너지 소모 증가 및 데이터 손실을 초래하게 된다. 본 논문에서는 효율적인 데이터 전송을 위해 패킷간의 충돌을 최소화하고 제한된 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 액티브 구간을 동적으로 할당하는 MRS-DCA 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 IEEE 802.15.4 standard의 액티브구간에 RP(Reservation Period)를 할당하여 사용한다. 또한, EWMA를 이용한 할당 알고리즘으로 트래픽을 예측하고 이것을 기반으로 RP와 CAP를 동적으로 할당함으로써 안정적인 데이터 전송을 보장한다. 제안하는 MRS-DCA 알고리즘의 성능 비교를 위하여 IEEE 802.15.4, DCA scheme과 비교한 결과, 액티브 구간의 단축으로 전력 소모가 적어지고 충돌 회피율의 상승으로 높은 전송률을 보이는 것을 확인하였다.

Abstract

IEEE 802.15.4 standard which has low-speed, low-power, low-cost can be efficiently used in wireless sensor network environment. Among various topologies used in IEEE 802.15.4 standard, a cluster-tree topology which has many nodes in it, transmit delay, energy consumption and data loss due to traffic concentration around the sink node. In this paper, we propose the MRS-DCA algorithm that minimizes conflicts between packets for efficient data transmission, and dynamically allocates the active period for efficient use of limited energy. The MRS-DCA algorithm allocates RP(Reservation Period) to the active period of IEEE 802.15.4 and guarantees reliable data transmission by allocating RP and CAP dynamically which is based on prediction using EWMA. The comparison result shows that the MRS-DCA algorithm reduces power consumption by reducing active period, and increasing transmission rate by avoiding collision.

Keywords : IEEE 802.15.4 standard, Superframe, Sensor Network, Cluster-tree topology

I. 서 론

최근 홈 네트워크와 유비쿼터스에 대한 관심이 높아지면서 저속, 저전력, 저가의 특징을 갖는 ZigBee 통신

이 크게 주목받고 있다^[1]. 지그비(ZigBee)의 기본이 되는 IEEE 802.15.4 표준은 저속 무선 개인 네트워크(LR-WPAN : Low Rate Wireless Personal Network)를 지원하는 프로토콜로서, ISO 7 계층(layer)의 PHY(Physical) 계층과 MAC(Medium Access Control) 계층으로 이루어져 있으며, 지그비의 PHY 계층과 MAC 계층의 표준으로 사용된다. 무선 충돌을 회피하기 위해서 CSMA-CA(Carrier Sensing Multiple Access- Collision Avoidance) 방식을 사용하고, 실시간

* 학생회원, ** 평생회원, 인하대학교 전자공학과
(Dept. of Electronic Engineering Inha University)

※ 이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 중점연구소 지원사업으로 수행된 연구임
(2011-0018394)

접수일자: 2012년3월5일, 수정완료일: 2012년4월26일

어플리케이션(application)을 위해 GTS를 이용하며, 비컨(beacon) 모드와 년-비컨(non-beacon) 모드를 지원한다^[2].

IEEE 802.15.4 표준은 저전력 및 저속을 지원하므로 제한된 배터리를 사용하며 트래픽의 양이 적은 무선 센서 네트워크 환경에서 효율적으로 사용할 수 있다. 무선 센서 네트워크는 홈, 빌딩, 헬스 케어 등의 어플리케이션에 쉽게 적용이 가능하고, 다양한 네트워크 토폴로지(topology)를 지원한다. 이중에서도 광범위한 영역에서 많은 노드들이 참여하는 클러스터-트리(cluster-tree) 토폴로지는 센싱된 정보가 싱크 노드(sink node)로 전달된다. 따라서 싱크 노드 주변에 트래픽이 집중되어 패킷간의 충돌이 빈번하게 발생하게 되고, 이것은 에너지 소모와 전송 지연 및 데이터 손실을 초래하게 된다^[3-6]. 따라서 패킷간의 충돌을 최소화하기 위한 방법들이 필요하다. 이 방법들로는 CSMA, CSMA-CD (Carrier Sensing Multiple Access-Collision Detection)^[7], CSMA-CA, RTS/CTS(Request To Send/Clear To Send)방식^[8]이 있다. 그 중에서도 CSMA-CA방식은 IEEE 802.11이나 IEEE 802.15.4에서 사용하는 충돌 회피 기법으로써, IFS(Inter Frame Space)와 CW(Contention Window)를 이용하여 충돌 가능성을 줄일 수 있지만, 히든 터미널(hidden terminal) 문제나 CW의 동일한 랜덤 시간 선택으로 인한 충돌은 완전히 해결할 수 없다. 이에 반해, RTS/CTS방식은 채널 예약방식으로 이러한 충돌을 해결할 수 있지만, RTS 패킷과 CTS 패킷으로 인한 오버헤드(overhead) 발생으로 에너지 소모가 큰 단점이 있다.

본 논문에서는 효율적인 데이터 전송을 위해 패킷간의 충돌을 최소화하고 제한된 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 액티브 구간을 동적으로 할당하는 MRS-DCA(Modified Reservation Slot-Dynamic Channel Allocation) 알고리즘을 제안한다. 기존의 제안된 DCA(Dynamic Channel Allocation) scheme^[9]을 수정한 것으로, DCA scheme은 IEEE 802.15.4의 슈퍼프레임(superframe)구조에 RTS/CTS방식을 응용한 RP(Reservation Period)를 추가한 것이다. 하지만 RP가 추가되면서 액티브 구간이 늘어나 전송이 지연되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하고자, MRS-DCA 알고리즘은 IEEE 802.15.4 표준의 액티브구간에 RP를 할당하여 사용하며, RP와 CAP에서의 충돌횟수를 기반으로 액티브구간을 동적으로 할당한다. RP에서는 데이터 전

송을 원하는 노드가 RTS 프레임 전송하고, 코디네이터(coordinator)는 RP동안 충돌 없이 RTS 프레임 송신에 성공한 노드들에 대하여 GTS(Guaranteed Time Slot)를 할당한다. 반면, RTS 패킷 충돌로 GTS를 할당받지 못한 노드는 CAP을 이용하여 데이터 전송을 시도한다. 또한, EWMA(Exponentially Weighted Moving Average)^[10]를 이용한 할당 알고리즘을 이용하여 트래픽을 예측하고, 데이터 전송 지연을 시도한 노드들에 대하여 적절한 RP 및 CAP을 할당하여 안정적인 데이터 전송을 보장한다.

본 논문에서 제안하는 MRS-DCA 알고리즘의 성능을 평가하기 위해서 IEEE 802.15.4 표준과 DCA scheme을 대상으로 각 구간별 길이, 전송성공률, 그리고 소비전력을 ATmega128^[11]과 CC2420^[12]으로 구성된 모듈을 사용하여 평가하였다. MRS-DCA 알고리즘은 짧은 액티브구간을 유지하여 에너지 소모가 적고, 발생할 트래픽을 예측하여 사용하기 때문에 높은 전송 성공률을 보이는 것을 확인하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 IEEE 802.15.4 표준과 DCA scheme의 특징에 대해 소개하고 III장에서는 본 논문에서 제안한 MRS-DCA 알고리즘을 설명한다. 그리고 IV장에서는 실험을 통해 제안한 알고리즘의 성능을 평가하고, V장의 결론으로 본 논문을 마무리한다.

II. 관련 연구

이 장에서는 본 논문에서 제안한 알고리즘의 성능평가를 위해 사용한 IEEE 802.15.4 표준과 DCA scheme에 대해 설명한다.

2.1 IEEE 802.15.4 표준

IEEE 802.15.4 표준은 신뢰성 있는 데이터 전송을 위해 CSMA-CA방식으로 데이터를 전송함으로써 데이터 충돌을 최소화한다. 비컨 모드와 년-비컨 모드를 지원하며, 무선 센서 네트워크에서는 비컨 모드를 사용한다. 비컨 모드는 비컨 프레임을 이용하여 슈퍼프레임을 구성하고, 네트워크를 동기화하며 어플리케이션의 종류에 따라 적절한 duty cycle을 설정하여 에너지 소모를 줄일 수 있다.

슈퍼프레임은 데이터 전송 및 경쟁이 이루어지는 액티브(active) 구간과 노드들이 저전력 모드로 동작하는

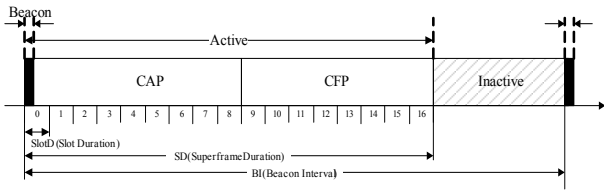


그림 1. IEEE 802.15.4의 슈퍼프레임 구조

Fig. 1. Superframe structure in IEEE 802.15.4.

인액티브(inactive) 구간으로 나뉘어진다. 액티브 구간은 16개의 SlotD(Slot Duration)로 나뉘며, 비컨, CAP, 그리고 CFP로 구성된다. CAP에서는 각 노드가 Slotted CSMA-CA 방식으로 데이터를 전송한다. CAP의 최소 길이는 $aMinCAPLength(440 \text{ symbols})$ 이며, 1 symbol은 4bits의 데이터를 DSSS(Direct Sequenced Spread Spectrum)로 변환한 16bits 코드이다. 즉, CAP의 최소 길이로 7.04ms가 보장되어야 한다. CFP에서는 비경쟁 기반으로 GTS를 할당받은 노드들이 할당받은 채널을 이용하여 충돌없이 데이터를 전송한다. 이때 GTS는 최대 7개까지 지원한다. GTS를 할당받기 원하는 노드는 CAP에서 CSMA-CA 방식으로 코디네이터에게 GTS request 프레임 전송하여 GTS 할당을 요청한다. 코디네이터는 GTS를 할당하고, 다음 슈퍼프레임에서 비컨을 이용하여 할당된 GTS 정보를 알린다. 이렇게 할당된 GTS는 할당받은 노드가 직접 해지하거나, 코디네이터가 강제로 해지하는 방법이 있다.

그림 1은 IEEE 802.15.4 표준의 슈퍼프레임 구조이다. $SlotD$, SD , BI 는 PIB(Pan Information Base)의 SO (Superframe Order), BO (Beacon Order)에 의해서 결정된다. SO 와 BO 는 식 (1)과 같은 범위를 가지며, SO 와 BO 가 15일 경우 널-비컨 모드로 동작한다. $SlotD$, SD , BI 는 각각 식 (2), (3), (4)에 의해 결정된다.

$$0 \leq SO \leq BO \leq 14 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} SlotD &= aBaseSlotDuration \times 2^{SO} [symbols] \\ &= 60 \times 2^{SO} [symbols] = 0.96 \times 2^{SO} [ms] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} SD &= aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} [symbols] \\ &= 960 \times 2^{SO} [symbols] = 15.36 \times 2^{SO} [ms] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} BI &= aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO} [symbols] \\ &= 960 \times 2^{BO} [symbols] = 15.36 \times 2^{BO} [ms] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $aBaseSlotDuration$ 은 가장 작은 CAP의 슬롯

크기이며, $aBaseSuperframeDuration$ 은 SO 가 0일 때 SD 값으로 60 symbols의 길이를 갖는다. Duty cycle은 SD 와 BI 의 비율에 의해 결정된다. 즉, BO 와 SO 에 의해 결정되며, 식 (5)와 같다.

$$DC = \frac{SD}{BI} = 2^{BO-SO} (\%) \quad (5)$$

여기서 BO 값이 증가하면 인액티브 구간의 증가로 전력 소모 측면에서는 효율적이지만, 데이터 전송 지연이 발생하게 된다. 따라서 적절한 SO 와 BO 의 설정이 필요하다.

IEEE 802.15.4 표준에서는 히든 터미널(hidden terminal)문제와 CSMA-CA 방식의 중복으로 인하여 데이터 전송에 실패할 수 있다. 히든 터미널 문제는 싱크 주변과 같이 트래픽이 많은 지역에서 빈번하게 발생하며, LBT(Listen Before Transmit)방식인 CSMA-CA 방식으로는 해결할 수 없다. 또한, CSMA-CA 방식을 수행할 때 두 노드가 같은 슬롯을 선택할 경우, CCA(Clear Channel Assessment)가 충돌하게 된다. CCA가 충돌하면 각 노드는 자신의 백오프 슬롯(backoff slot)을 더블링(doubling)한다. 이것은 데이터의 전송 지연을 초래하며, 전송을 포기하고 다음 액티브 구간에서 전송을 시도하게 될 경우 심각한 전송 지연과 에너지 소모를 일으키게 된다.

2.2 DCA scheme

DCA scheme은 데이터 전송에 GTS를 이용하고, 트래픽을 예측하여 동적으로 채널을 할당하는 것이다. 네트워크의 트래픽을 CFP(Contention Free Period)로 분산시키므로 패킷의 충돌확률을 낮추고, 전송 지연을 줄일 수 있다. 또한 네트워크의 트래픽을 예측하여 동적으로 액티브 구간 길이를 설정하므로 전력 소모를 낮출 수 있다.

그림 2는 DCA scheme의 구조로, 동적으로 GTS를

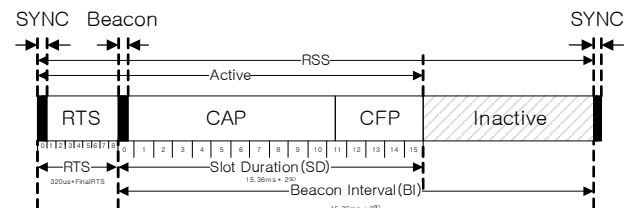


그림 2. DCA scheme 구조

Fig. 2. DCA scheme structure.

할당하기 위하여 IEEE 802.15.4 표준의 슈퍼프레임 앞에 RTS/CTS방식을 응용한 RTS 구간을 삽입한 것이다. 노드간의 동기화를 위하여 SYNC 패킷을 추가하였으며, RTS 구간에서는 GTS 예약을 위하여 RTS 프레임이 사용된다. 전송할 데이터가 있는 노드는 RTS 구간에서 데이터 전송에 필요한 슬롯을 RTS 프레임에 포함시켜 코디네이터로 전송한다. 이때, RTS 프레임은 랜덤하게 전송된다. 코디네이터는 충돌한 RTS 프레임은 제거하고 충돌하지 않은 RTS 프레임에 대하여 GTS를 할당한다. RTS 프레임 충돌은 최소 두 개 이상의 노드가 CAP를 이용하려 한 것으로 판단할 수 있으므로, 노드들의 데이터 전송을 보장하기 위하여 CAP에 하나의 충돌 당 4개의 슬롯을 추가로 할당한다. 이와 반대로, RTS 구간에서 충돌이 없다면 CAP를 이용하는 트래픽이 적다고 판단하여 슬롯을 추가로 할당하지 않는다. RTS 구간의 길이 역시 RTS 프레임의 충돌정보를 이용하여 조절한다. RTS 프레임 충돌이 3회 이상이면 트래픽이 많은 상황으로 판단하여 RTS 구간의 길이를 2 슬롯 증가시키고, 그렇지 않으면 트래픽이 적은 상황으로 보고 2 슬롯 감소시킨다. RTS 구간이 끝나면 할당된 GTS를 비킨 프레임에 삽입하여 브로드캐스팅한다. 코디네이터로부터 비킨 프레임을 수신한 노드는 자신의 GTS가 할당되어 있으면 CFP에 자신에게 할당된 GTS를 이용하여 데이터를 전송하고, GTS를 할당받지 못했다면 CAP에서 CSMA-CA방식으로 데이터 전송을 시도한다.

그림 3은 DCA scheme에서 사용한 SYNC 프레임의 구조를 나타낸다. SYNC 프레임은 RTS 구간을 정의하며, 전체 14bytes의 길이를 갖는다. SYNC 프레임의 MAC Payload에 RTS 구간의 끝이 정의되어 있으며,

Octets: 4	1	1	2	1	2	1	2
Preamble	SFD	Length	Frame Control	Sequence Number	PAN ID	Final RTS	FCS
SHR		PHR	MHR			MAC Payload	MFR

그림 3. SYNC 프레임 구조
Fig. 3. SYNC frame structure.

Octets: 4	1	1	2	2	2	2
Preamble	SFD	Length	Frame Control	PAN ID	Src ID	FCS
SHR		PHR	MHR			MFR

그림 4. RTS 프레임 구조
Fig. 4. RTS frame structure.

Bits 0-2	3	4	5	6	7-9	10-11	12-13	14-15
Frame Type	Security Enabled	Frame Pending	Ack. Request	PAN ID Compression	GTS Slot Request	Dest. Addressing Mode	Frame Version	Source Addressing Mode

그림 5. FCF 구조
Fig. 5. FCF structure.

SYNC 프레임이 전송된 후 RTS 구간이 시작된다.

그림 4는 RTS 프레임 구조를 나타낸다. 총 14 bytes 길이를 가지며, MHR(MAC Header)에서 FCF(Frame Control Field)의 예약된 비트인 7-9번 비트에 데이터 전송시 필요한 슬롯길이를 포함시켜 전송한다. GTS Slot Request는 3비트 길이이므로 0-8까지 표현 가능하다. 예를 들어 데이터 전송에 3개의 슬롯이 필요하다면 FCF의 7-9번 비트인 GTS Slot Request 필드에 3을 써서 RTS 프레임을 전송한다. 그림 5는 DCA scheme에서 사용된 FCF 구조를 나타낸다.

III. MRS-DCA 알고리즘

3.1 MRS-DCA 알고리즘의 구조

기존에 제안된 DCA scheme에서는 GTS의 이용률을 높이고, 전력 효율 향상을 위하여 IEEE 802.15.4 표준의 슈퍼프레임 구조에 채널 예약 및 관리를 위한 RP(Reservation Period)를 추가하였다. 하지만 RP 추가로 IEEE 802.15.4 표준의 슈퍼프레임보다 전체 액티브 길이가 길어져 이에 따른 전송 지연의 오버헤드가 발생하는 문제가 있다. 따라서 이러한 문제를 보완하고자 MRS-DCA 알고리즘에서는 IEEE 802.15.4 표준 슈퍼프레임의 액티브구간에 RP를 할당한다. DCA scheme과 동일한 구조를 갖지만, 슈퍼프레임의 전체 길이가 IEEE 802.15.4 표준과 동일하기 때문에 전송 지연의 오버헤드를 줄일 수 있다.

코디네이터의 SYNC 프레임 전송과 함께 RP가 시작되며, RP의 전체 길이 RD (Reservation Duration)는 식 (6)과 같다.

$$RD = aBaseRPSlotDuration \times N_{RS} [symbols] = 20 \times N_{RS} [symbols] = 0.32 \times N_{RS} [ms] \quad (6)$$

여기서, $aBaseRPSlotDuration$ 은 RS(Reservation Slot)의 크기로, RTS 프레임간의 IFS(Inter Frame Spacing)가 12 symbols임을 고려하여 IEEE 802.15.4 표준의 가장 작은 백오프 슬롯과 동일한 20 symbols의

크기를 갖는다. N_{RS} 는 RD 를 구성하는 RS의 개수로 식 (7)의 범위를 갖는다. 최솟값은 SYNC 프레임과 최소 2개의 RTS 프레임에 대한 전송을 보장하기 위하여 9이상이어야 하며, 최댓값 $\max N_{RS}$ 은 자식노드수를 고려하여 결정한다.

$$9 \leq N_{RS} \leq \max N_{RS} \quad (7)$$

코디네이터가 브로드캐스팅한 SYNC 프레임을 수신한 노드 중, 전송할 데이터가 있는 노드는 GTS를 할당받기 위해서 RP동안 RTS 프레임을 전송한다. GTS 할당에 실패한 노드는 RP의 다음구간인 CAP에서 CSMA-CA방식을 이용하여 데이터 전송을 시도한다. 식 (8)은 하나의 슬롯 길이인 $SlotD$ 를 나타낸다.

$$\begin{aligned} SlotD &= aBaseSlotDuration [symbols] \\ &= 60 [symbols] = 0.96[ms] \end{aligned} \quad (8)$$

식 (9)는 CAP의 전체 길이 CD (CAP Duration)를 나타낸다. 최소 $aMinCAPLength$ 의 길이를 보장하기 위해 N_{CAP} 는 최소 9이상이어야 한다.

$$\begin{aligned} CD &= aBaseSlotDuration \times N_{CAP} [symbols] \\ &= 60 \times N_{CAP} [symbols] = 0.96 \times N_{CAP} [ms] \end{aligned} \quad (9)$$

CFP는 RP에서 GTS를 할당받는데 성공한 노드들이 데이터를 전송하는 구간으로, 각 노드는 GTS를 이용하여 경쟁 없이 데이터를 전송한다. GTS는 백오프 슬롯단위로 할당되며, CFP의 길이는 할당된 GTS에 따라 달라진다. GTS의 길이 GD (GTS Duration)는 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} GD &= aBackoffSlotDuration \times N_{CFP} [symbols] \\ &= 20 \times N_{CFP} [symbols] = 0.32 \times N_{CFP} [ms] \end{aligned} \quad (10)$$

액티브 구간의 길이는 RD , CD , GD 를 합한 것으로, 액티브 구간의 최대 길이인 ACT_{MAX} 는 식 (11)과 같다. 최소 액티브 구간의 길이는 540 symbols이고, SI (Sync Interval)의 길이는 IEEE 802.15.4 표준의 BI (Beacon Interval)와 동일하다.

$$\begin{aligned} ACT_{MAX} &= aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO} [symbols] \\ &= 960 \times 2^{SO} [symbols] = 15.36 \times 2^{SO} [ms] \end{aligned} \quad (11)$$

3.2.3 패킷 프레임 구조

DCA scheme와 같이 MRS-DCA 알고리즘에서도 비컨 프레임과 data 프레임이외에 SYNC 프레임과 RTS 프레임을 추가로 사용하며, DCA scheme과는 다른 정보를 포함한다.

그림 6은 MRS-DCA 알고리즘에서 사용하는 SYNC 프레임의 구조를 나타낸다. 총 14 bytes의 길이를 가지며, 코디네이터가 슈퍼프레임의 RP 길이를 알리기 위하여 MAC payload에 RP slot의 수를 추가하였다. 그림 7은 RTS 프레임의 구조를 나타낸다. MAC payload에 Request slot을 추가하여 데이터 전송 시 필요한 GTS 수를 코디네이터에게 요청한다. 비컨 프레임과 data 프레임은 DCA scheme과 동일하다.

Bytes: 4	1	1	2	1	2	1	2
Preamble	SFD	Length	Frame Control	Sequence Number	PAN ID	Number of RP slots	FCS
SHR		PHR	MHR			MAC Payload	MFR

그림 6. SYNC 프레임 구조

Fig. 6. SYNC frame structure.

Bytes: 4	1	1	2	2	2	1	2
Preamble	SFD	Length	Frame Control	PAN ID	Source ID	Request Slot	FCS
SHR		PHR	MHR			MAC Payload	MFR

그림 7. RTS 프레임 구조

Fig. 7. RTS frame structure.

3.2 MRS-DCA 알고리즘의 동작

MRS-DCA 알고리즘은 RP에서 발생할 네트워크의 트래픽을 예측하여 이를 기반으로 CAP를 동적 할당함으로써 채널 사용률을 높이고, GTS를 이용한 전송으로 데이터의 신뢰성을 보장한다. 이를 위한 MRS-DCA 알고리즘의 동작은 크게 동적 GTS 할당 및 관리, 동적 CAP 할당, 동적 RP 할당으로 나누어 볼 수 있다.

3.2.1 동적 GTS 할당 및 관리

MRS-DCA 알고리즘에서 GTS 할당을 원하는 노드는 RP에서 Slotted ALOHA 방식으로 코디네이터에게 RTS 프레임을 전송한다. RP동안 RTS 프레임이 수신된 노드는 코디네이터에 의해 GTS를 할당받는다. 이때, CAP의 마지막부터 순차적으로 GTS를 증가시키며 채널을 할당한다. 만약 GTS가 해지되었다면 해지된 GTS

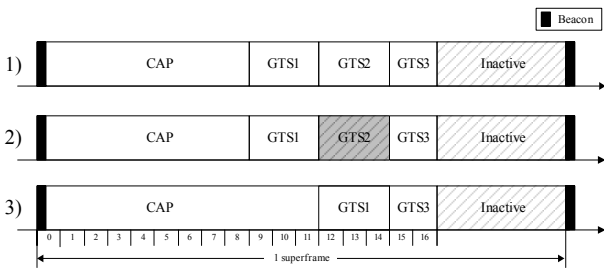


그림 8. IEEE 802.15.4 표준의 GTS 재할당 예
Fig. 8. Example of the GTS reallocation in IEEE 802.15.4 standard.

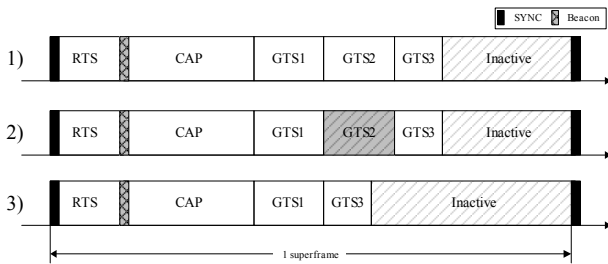


그림 9. MRS-DCA 알고리즘의 GTS 재할당 예
Fig. 9. Example of the GTS reallocation in MRS-DCA algorithm.

의 다음 GTS를 재할당한다. 반면, IEEE 802.15.4 표준은 CAP의 마지막부터 GTS를 줄여가면서 GTS를 할당하고, GTS 할당이 해지된 경우, 해지된 GTS의 이전 GTS를 재할당한다.

그림 8은 IEEE 802.15.4 표준의 GTS 재할당 과정을 보여주고, 그림 9는 MRS-DCA 알고리즘의 GTS 재할당 과정을 보여준다. IEEE 802.15.4 표준은 그림 8의 2)와 같이 GTS2가 해지된 경우, GTS1을 GTS2로 옮겨 CAP를 증가시켜 단편화 문제를 해결한다. 반면, MRS-DCA 알고리즘은 GTS2가 해지된 경우, GTS3을 GTS2에 재할당하여 인액티브 구간을 증가시킴으로써 에너지 소모를 줄인다.

3.2.2 CAP 할당 알고리즘

불필요한 전력 소모를 줄이고 데이터 전송을 보장하기 위하여 적절한 길이의 CAP가 할당되어야 한다. 따라서 MRS-DCA 알고리즘은 RP에서의 RTS 프레임 충돌 정보를 기반으로 CAP의 길이를 결정한다.

그림 10은 동적 CAP 할당을 위한 알고리즘의 의사코드이다. 코디네이터는 RP에서 수신한 RTS 프레임을 기반으로 할당 알고리즘을 수행한다. $i-3 \sim i-1$ 번째 슈퍼프레임의 RTS 프레임 충돌 횟수인 $Col_{R,i-3}$, $Col_{R,i-2}$, $Col_{R,i-1}$ 의 평균인 $AvrCol_{R,i}$ 와 i 번째 슈퍼프레임에서의

```

// Algorithm to dynamically allocate CAP
1  Given a RTS receive result.

//Calculate average collision in RP of the previous
//three frames.
2   $AvrCol_{R,i} = Avr(Col_{R,i-3}, Col_{R,i-2}, Col_{R,i-1})$ 

// Expected number of collisions in RP to use
//EWMA
3   $EsCol_{R,i+1} = (1-weight) \times AvrCol_{R,i} + weight \times Col_{R,i}$ 

// Calculate Base CAP length
4  if  $EsCol_{R,i+1} = 0$  then
5       $BaseCAP_i = BaseCAP_{i-1} - 1$ 
6  else  $EsCol_{R,i+1} \neq 0$  then
7       $BaseCAP_i = BaseCAP_{i-1} + EsCol_{R,i+1} \times 2$ 
8  endif

// Adjust Base CAP length Base
9  if  $BaseCAP_i < \text{Minimum CAP length}$  then
10     Set  $BaseCAP_i$  to Minimum CAP length
11 else if  $BaseCAP_i > \text{Maximum CAP length}$  then
12     Set  $BaseCAP_i$  to Maximum CAP length
13 endif

// Calculate total CAP length
14  $FinalCAP_i = BaseCAP_i + (COL_{R,i} \times SO \times 2)$ 

// Adjust final CAP length
15 if  $FinalCAP_i < \text{Minimum CAP length}$  then
16     Set  $FinalCAP_i$  to Minimum CAP length
17 else if  $FinalCAP_i > \text{Maximum CAP length}$  then
18     Set  $FinalCAP_i$  to Maximum CAP length
19 endif
    
```

그림 10. 동적 CAP 할당 알고리즘의 의사코드
Fig. 10. Pseudo code for dynamically CAP allocation algorithm.

RTS 프레임 충돌 횟수 $Col_{R,i}$ 로부터 EWMA를 이용하여 $i+1$ 번째 슈퍼프레임에서 일어날 충돌을 예측한다. EWMA로부터 예측한 충돌 횟수는 식 (12)와 같다.

$$EsCol_{R,i} = (1 - weight) \times AvrCol_{R,i} + weight \times Col_{R,i} \quad (12)$$

$EsCol_{R,i}$ 가 0일 경우 기본 CAP 길이인 $BaseCAP_i$ 를 줄이고, 충돌이 예상되면 $BaseCAP_i$ 를 예측되는 충돌횟수의 두 배만큼 늘여준다. 이것은 충돌이 2개 이상의 노드에 의해 일어난 것이므로 이 노드들에 대한 전송을 보장해주기 위한 것이다. RP에서 충돌이 발생한 노드의 전송을 보장하기 위해 식 (13)을 이용하여 충돌 횟수의 두 배에 해당하는 노드의 데이터 전송에 필요한 채널을 $BaseCAP_i$ 에 추가로 할당한다.

$$FinalCAP_i = BaseCAP_i + (Col_{R,i} \times SO \times 2) \quad (13)$$

이때, $FinalCAP_i$ 는 최대 액티브 구간의 길이를 넘지 않으며, i 번째 슈퍼프레임의 비컨에 포함되어 브로드캐스팅된다.

3.2.3 RP 할당 알고리즘

효과적인 GTS 할당을 위해서 적절한 RP를 할당해 주어야 한다. 이를 위하여 이전 슈퍼프레임의 CAP에서 발생한 데이터 프레임 충돌 정보를 사용한다. 그림 11은 동적 RP 할당 알고리즘의 의사코드이다. 코디네이터는 $i-3 \sim i-1$ 번째 슈퍼프레임의 CAP에서 발생한 데이터

1	//Algorithm to dynamically allocate RP Given a RTS receive result in RP and Data receive result in CAP.
2	//Calculate average collision in CAP of the previous three frames. $AvrCol_{C,i} = Avr(Col_{C,i-3}, Col_{C,i-2}, Col_{C,i-1})$
3	//Expected number of collisions in CAP to use EWMA $EsCol_{C,i+1} = (1-weight) \times AvrCol_{C,i} + weight \times Col_{C,i}$
4	//Calculate Base RP length if $EsCol_{C,i+1} = 0$ then $BaseRP_{i+1} = BaseRP_i - 1$
5	else $EsCol_{C,i+1} \neq 0$ then $BaseRP_{i+1} = BaseRP_i + EsCol_{C,i+1} \times 2$
6	endif
7	//Adjust Base RP length Base if $BaseRP_{i+1} < \text{Minimum RP length}$ then Set $BaseRP_{i+1}$ to Minimum RP length
8	elses if $BaseRP_{i+1} > \text{Maximum RP length}$ then Set $BaseRP_{i+1}$ to Maximum RP length
9	endif
10	//Calculate total RP length $FinalRP_{i+1} = BaseRP_{i+1} + (Col_{C,i} \times 2 \times 3)$
11	//Adjust final RP length if $FinalRP_{i+1} < \text{Minimum RP length}$ then Set $FinalRP_{i+1}$ to Minimum RP length
12	else if $FinalRP_{i+1} > \text{Maximum RP length}$ then Set $FinalRP_{i+1}$ to Maximum RP length
13	endif

그림 11. 동적 RP 할당 알고리즘의 의사코드
Fig. 11. Pseudo code for dynamically RP allocation algorithm.

프레임 충돌 횟수인 $Col_{C,i-3}$, $Col_{C,i-2}$, $Col_{C,i-1}$ 의 평균인 $AvrCol_{C,i}$ 와 i 번째 슈퍼프레임의 CAP에서 발생한 데이터 프레임 충돌 횟수 $Col_{C,i}$ 를 이용하여 $i+1$ 번째 슈퍼프레임에서 일어날 충돌을 예측한다. 예상충돌 횟수인 $EsCol_{C,i+1}$ 은 식 (14)와 같다.

$$EsCol_{C,i+1} = (1-weight) \times AvrCol_{C,i} + weight \times Col_{C,i} \quad (14)$$

$EsCol_{i+1}$ 이 0일 경우, 기본 RP의 길이인 $BaseRP_{i+1}$ 를 감소시킨다. 반면, 0보다 크면 예상되는 충돌 횟수의 두 배에 해당하는 채널을 RP에 할당하여, $i+1$ 번째 슈퍼프레임에서 예상되는 충돌에 대한 RTS 프레임의 전송을 보장한다. 이렇게 결정된 $BaseRP_{i+1}$ 는 최소 180symbols, 최대 540symbols로 제한된다. 그리고 현재 슈퍼프레임의 CAP에서 데이터 프레임 충돌이 발생한 노드는 다음 슈퍼프레임에서 RTS 프레임 전송이 보장되어야 한다. 따라서 식 (15)를 이용하여 현재 슈퍼프레임의 CAP에서 발생한 충돌 횟수의 두 배에 해당하는 채널을 추가로 할당한다.

$$FinalRP_{i+1} = BaseRP_{i+1} + (Col_{C,i} \times 2 \times 3slot). \quad (15)$$

최종 RP의 길이 $FinalRP_{i+1}$ 은 최소 180 symbols의 길이를 갖고, 최대 길이는 자식 노드수를 고려하여 사용자가 설정한 값을 갖는다. 이때, 최대 RP의 길이를 너무 크게 설정하면 전송을 위한 CAP 부분이 감소하므로, 어플리케이션에 따라 적절한 값을 설정해야 한다. 이렇게 결정된 최종 RP의 길이 $FinalRP_{i+1}$ 은 $i+1$ 번째 슈퍼프레임의 SYNC 프레임에 포함되어 브로드캐스팅된다.

IV. 실험 및 성능 평가

이 장에서는 제안된 MRS-DCA 알고리즘의 성능을 평가하기 위한 실험 환경을 정의하고, 제안한 알고리즘과 IEEE 802.15.4 표준, DCA scheme과의 성능 비교 결과를 기술한다.

4.1 실험환경

제안한 알고리즘의 성능평가를 위하여 그림 12와 같이 클러스터-트리 토폴로지로 구성된 네트워크에서 일정한 주기로 데이터를 전송하는 노드와 특정 상황에서만 동작하는 노드가 싱크 노드로 데이터를 전달하는 상

표 1. CC2420의 전기적 특성

Table 1. Electronic features of the CC2420.

	RX	TX	IDLE	SLEEP
Voltage(V)	1.8	1.8	1.8	1.8
Current(mA)	18.8	17.4	0.426	0.02
Power(mW)	33.84	31.32	0.77	0.036

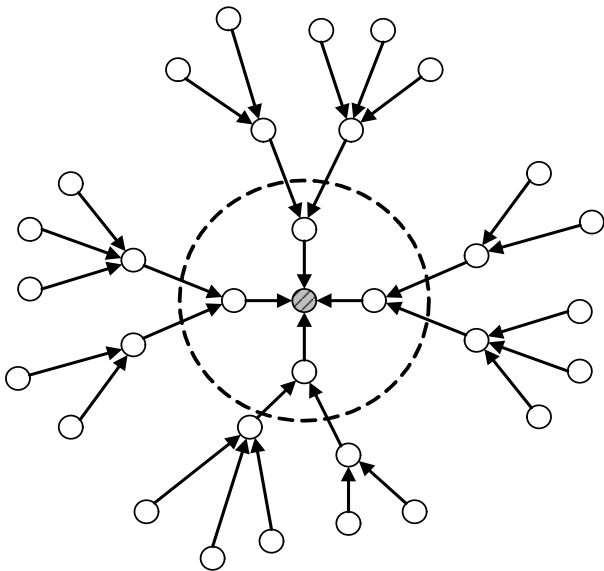


그림 12. 클러스터-트리 토폴로지
Fig. 12. Cluster-tree topology.

황을 가정한다. 이러한 상황에서 그림 13과 같이 싱크 노드와 1홉 거리 내에 있는 14개의 라우터 노드에서 발생하는 트래픽을 분석하여 성능을 평가하였다. 이때, 각 노드의 데이터 생성률을 10%에서 100%까지 증가시켜 10000번 반복 실험하였다.

Atmel사의 ATmega128과 Chipcon사의 CC2420으로 구성된 하드웨어를 이용하였으며, CC2420은 IEEE 802.15.4 표준 PHY규격의 RF 송수신칩으로 전기적 특성은 표 1과 같다. CC2420은 데이터를 수신시 18.8mA, 송신시 17.4mA, 송수신 대기상태인 IDLE에서 0.426mA, 인액티브 구간에서 SLEEP상태일 때 0.02mA의 전류가 소모된다. 이에 따른 소비전력은 각각 33.84mW, 31.32mW, 0.77mW, 0.036mW이다.

성능평가를 위한 실험 환경에 대한 주요 파라미터는 표 2와 같다. 실험은 1개의 싱크 노드와 14개의 라우터 노드로 구성된 네트워크 환경에서 이루어졌다. IEEE 802.15.4 표준에서 한 프레임의 최대 전송 가능한 데이터가 127bytes이므로, 이와 비슷한 크기의 슬롯이 되도록 SO는 3, BO는 6으로 설정하였다. 싱크 노드의 반경 15m내에 위치에서 라우터 노드는 poisson 분포를 갖는

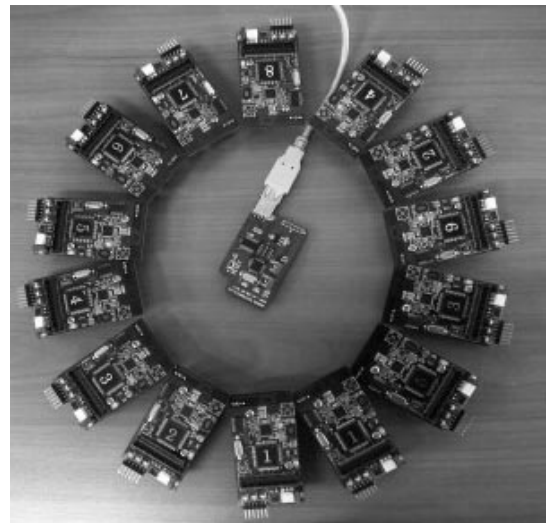


그림 13. 실험에 사용한 네트워크 환경
Fig. 13. Network environment used in experiment.

표 2. 실험 파라미터

Table 2. Experiment parameter.

Parameter	Value
Mode	Beacon Enable mode
Number of Nodes	Sink node 1, Router node 14
SO	3
BO	6
Transmission Range	15 meters
Poisson Data Packet Size	120 bytes
Packet Generation Rate	10% ~ 100%
aGTSDescPersistenceTime	4
aMaxBE	5
aMinBE	3
aMaxFrameRetry	3
EWMA Weight	0.125
Max RP Length	27

데이터를 10%~100%의 확률로 발생시키고, GTS의 만료 주기인 aGTSDescPersistenceTime는 4회, CSMA-CA방식의 백오프 최댓값 aMaxBE를 5, 최솟값 aMinBE는 3으로 설정하였다. 데이터 프레임에 대한 최대 재전송 시도 횟수 aMaxFrameRetry는 3회로 설정하였으며, MRS-DCA 알고리즘에서 RP와 CAP 할당을 위한 EWMA Weight는 0.125로 설정하였다. 그리고 RP의 최대 슬롯 수를 27개로 제한하였다.

표 3은 실험에 사용한 데이터의 길이를 보여준다. 노드의 주소는 2bytes의 ShortAddress를 사용하고, 실험에 사용한 비컨 프레임의 길이는 GTS를 할당받은 노드의 수에 의해 결정된다. 즉, n개의 노드가 GTS를

표 3. 실험에 사용한 데이터의 길이
Table 3. Data length which is used for experiment.

Data type	Length(bytes)
Beacon	16+4×n
SYNC	14
RTS	15
Data	120
Ack	11
GTS request	19

사용한다면, 비컨 프레임은 16+4×n bytes의 길이를 갖는다. MRS-DCA 알고리즘과 DCA scheme에서 사용하는 SYNC와 RTS 프레임은 각각 14bytes, 15bytes이다. 그리고 Data와 Ack 프레임의 길이는 각각 120bytes, 11bytes이며, GTS request 프레임은 IEEE 802.15.4 표준에서만 사용되며 19bytes의 길이를 갖는다.

4.2 각 구간의 길이 비교

그림 14는 CAP 길이를 비교한 것이다. IEEE 802.15.4 표준은 데이터 발생률이 높아질수록 길이가 줄어들지만 길이가 다른 scheme보다 전체적으로 길고, 일정 길이 이하로 감소하지 않는다. 이것은 IEEE 802.15.4 표준의 액티브 구간에서 CFP를 제외한 부분이 CAP로 할당되기 때문에 일정길이 이하로 감소하지 않는 것이다. DCA scheme은 데이터 발생률이 높아짐에 따라 점차 증가하다가 데이터 발생률 30%부터 다시 감소하지만, MRS-DCA 알고리즘보다 긴 길이를 갖는다. 반면, MRS-DCA 알고리즘은 데이터 발생률이 높아지면서 점차 증가하지만, 다른 scheme보다 전체적으로 매우 작

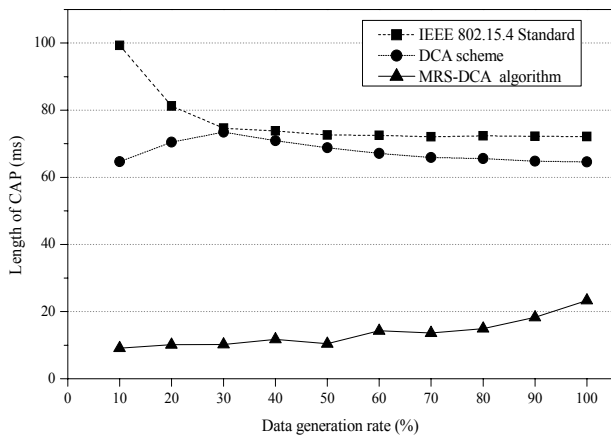


그림 14. CAP의 길이
Fig. 14. Length of CAP.

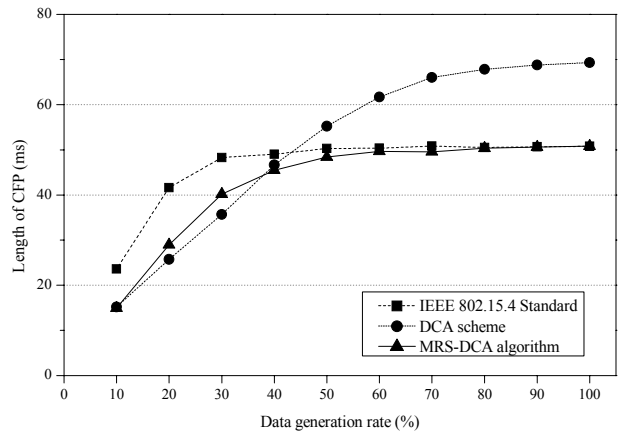


그림 15. CFP의 길이
Fig. 15. Length of CFP.

은 CAP 길이를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이것은 CAP구간에 RP가 추가되어 전체 CAP가 줄어든 것이며, 트래픽의 양에 따라 액티브구간이 동적으로 할당되었기 때문이다.

그림 15는 CFP의 길이를 나타낸 것이다. 데이터 발생률이 10%~40%인 경우, DCA scheme과 MRS-DCA 알고리즘이 IEEE 802.15.4 표준보다 더 짧은 길이를 갖는다. 데이터 발생률이 50%이상인 경우, GTS의 제한이 있는 IEEE 802.15.4 표준과 MRS-DCA 알고리즘은 CFP의 길이가 50ms이상 늘어나지 않는다. 반면, DCA scheme은 GTS의 제한이 없기 때문에 CFP의 길이가 증가하는 것을 알 수 있다. GTS 할당에 제한이 없기 때문에 많은 양의 데이터를 전송할 수 있지만, GTS information field의 크기 증가로 비컨 프레임의 오버헤드가 증가하는 단점이 있다.

그림 16은 실험을 통해 얻은 액티브 구간의 전체 길

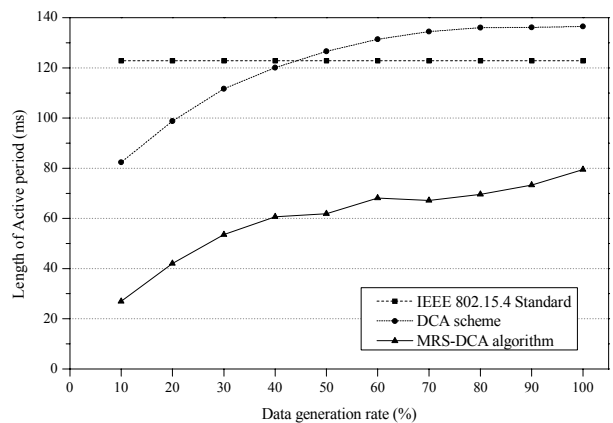


그림 16. 액티브 구간의 길이
Fig. 16. Length of active period.

이를 비교한 것이다. IEEE 802.15.4 표준의 경우, 액티브 구간의 길이가 일정한 것을 알 수 있다. 반면 동적으로 채널을 할당하는 DCA scheme의 경우, 데이터 발생률이 증가함에 따라 액티브 구간의 길이도 증가한다. 하지만, GTS 할당에 제한이 없으므로 데이터 발생률이 50%이상인 경우 IEEE 802.15.4 표준보다 액티브 구간이 길어진다. MRS-DCA 알고리즘은 GTS 할당에 제한이 있고, RP 추가로 CAP가 DCA scheme보다 짧다. 또한, 액티브 구간의 최대 길이가 제한되어 있기 때문에 다른 scheme보다 짧은 액티브 구간의 길이를 갖는다.

4.3 소비 전력 비교

그림 17은 하나의 노드가 100개의 슈퍼프레임동안 데이터를 전송하는데 소비한 전력이다. IEEE 802.15.4 표준과 DCA scheme은 각각 평균 141uW, 157uW를 소모

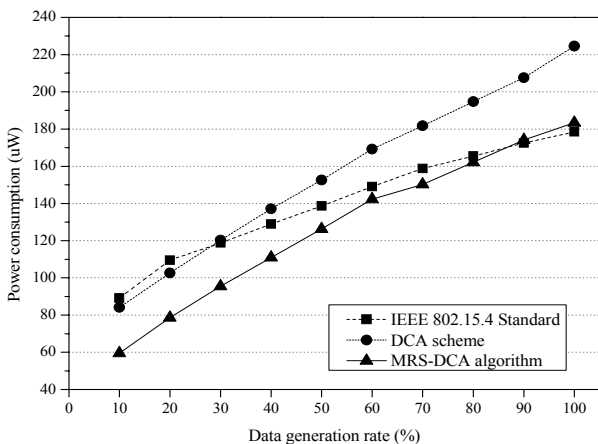


그림 17. 데이터 발생률에 따른 전력 소비
Fig. 17. Power consumption with data generation rate.

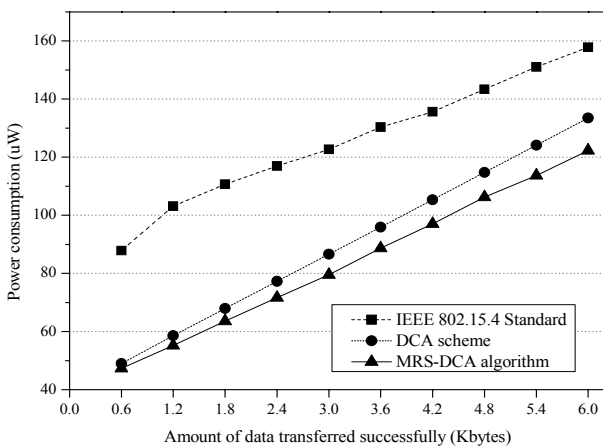


그림 18. 전송 성공한 데이터양에 따른 전력 소비
Fig. 18. Power consumption to amount of successful transmission data.

한다. 그리고 MRS-DCA 알고리즘은 평균 129uW의 전류를 소비한다. GTS 제한이 없는 DCA scheme은 많은 양의 데이터 전송과 비컨 프레임의 오버헤드 증가로 평균 전력 소모가 큰 것을 알 수 있다. 반면, MRS-DCA 알고리즘은 발생할 트래픽을 예측하여 RP, CAP를 동적으로 할당하므로 다른 scheme보다 평균 전력 소모가 낮다. 하지만 데이터 발생률이 높아질수록 RTS 프레임의 전송 증가로 전력 소모가 커지는 것을 알 수 있다.

그림 18은 데이터를 주기적으로 전송하는 경우, 성공적으로 전송된 데이터의 양에 따른 전력 소비를 나타낸다. IEEE 802.15.4 표준은 데이터 전송에 따른 재전송이 많아지므로 전력 소모가 큰 것을 알 수 있다. 반면, DCA scheme과 MRS-DCA 알고리즘은 동적으로 RP와 CAP를 할당하고 재전송률이 낮아 전력 소비가 적다.

V. 결 론

본 논문에서 제안하는 MRS-DCA 알고리즘은 DCA 알고리즘의 단점을 보완한 것으로, CAP에 할당된 채널을 분할하여 RP로 할당한 것이다. 또한, EWMA를 이용하여 RP와 CAP에서의 충돌을 예측하여, 이를 기반으로 RP와 CAP를 동적으로 할당한다. 이때, 액티브 구간의 최대 길이는 IEEE 802.15.4 표준과 동일하며, 할당된 슬롯의 크기를 최소 슬롯 단위로 한다.

제안한 알고리즘의 성능평가를 위하여, ATmega128과 CC2420으로 구성된 모듈을 이용하여 클러스터-트리 토폴로지를 구성하였다. 각 노드에서 발생한 데이터는 싱크 노드로 전달되므로, 싱크노드에서 1홉 거리내의 트래픽이 급격히 증가하게 된다. 따라서, 싱크 노드와 1홉 거리에 위치하는 라우터 노드간에 발생하는 트래픽을 이용하여 IEEE 802.15.4 표준과 DCA scheme을 비교분석하였다. MRS-DCA 알고리즘은 IEEE 802.15.4 표준보다 평균 36% 짧은 액티브 구간을 유지하고, 데이터 전송 성공률이 11.5% 향상하였다. 또한 성공적인 데이터 전송에 따른 소비 전력은 IEEE 802.15.4 표준보다 평균 33% 향상하였고, DCA scheme보다 5% 개선되었다. 따라서, 트래픽의 상황을 고려하여 액티브 구간을 동적으로 사용하는 MRS-DCA 알고리즘이 효율적이라는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 심재창, 김익동, “지그비 기술의 응용과 실습”, 홍릉과학출판사, 2007년 6월.
- [2] IEEE Standard for 802.15.4, “Part 15.4: Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs),” 2006.
- [3] J. Mistic, S. Shafi, and V. B. Mistic, “The impact of MAC parameters on the performance of 802.15.4 PAN,” *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 5, pp.509-528, Sep. 2005.
- [4] S. Pollin, M. Ergen, S. C. Ergen, B. Bougard, “Performance Analysis of Slotted Carrier Sense IEEE 802.15.4 Medium Access Layer,” *IEEE Transaction on Communication*, vol. 7, no. 9, Sep. 2008.
- [5] B. Bougard, F. Catthoor, D. C. Daly, A. Chandrakasan, and W. Dehaene, “Energy efficiency of the IEEE 802.15.4 standard in dense wireless microsensor networks: Modeling and improvement perspectives,” in *Proc. Des. Autom. Test Eur.*, pp. 196-201, Mar. 2005.
- [6] J. S. Lee, “Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for Low_Rate Wireless Personal Area Networks,” *IEEE Transaction on Consumer Electronics*, vol. 52 no. 3, Aug. 2006.
- [7] IEEE standards for local area networks “carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications,” 1985.
- [8] J. Zheng and M. J. Lee, “A comprehensive performance study of IEEE 802.15.4,” *IEEE Press Book*, 2004.
- [9] 임정섭, 윤완오, 서장원, 최한림, 최상방, “LR-WPAN에서 충돌회피를 위한 동적 채널할당 알고리즘,” *대한전자공학회지*, 제47호, TC편, 제6호, 10-21쪽, 2010년 6월.
- [10] J. F. Kurose, *Computer Networking: Top-Down Approach 5th Edition*, Pearson Education, 2009.
- [11] ATMEL, “ATmega128 Datasheet,” Rev. M, 2004. Available: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2467.pdf
- [12] Chipcon AS. CC2420 datasheet, Available at: <http://www.chipcon.com/files/CC2420>.

저 자 소 개



김 지 원(학생회원)
 2007년 건양대학교 전자정보
 공학과 학사 졸업.
 2009년 인하대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 2010년~현재 인하대학교
 전자공학과 박사과정.

<주관심분야 : 멀티미디어 통신, 무선 통신, 센서
 네트워크, 컴퓨터 네트워크>



윤 완 오(학생회원)
 2000년 경기대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 2002년 인하대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 2010년 인하대학교 전자공학과
 박사 졸업.

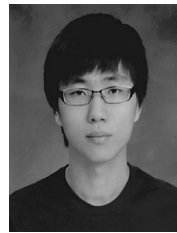
2010년~현재 인하대학교 정보전자공동연구소
 연구교수

<주관심분야 : 병렬 및 분산 처리 시스템, 컴퓨터
 아키텍처, 무선 통신, 컴퓨터 네트워크>



김 강 희(학생회원)
 2011년 인하대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 2011년~현재 인하대학교
 전자공 학과 석사과정

<주관심분야 : 컴퓨터 네트워크, 운영 체제, SoC
 & Embeded System Design>



홍 창 기(학생회원)
 2011년 인하대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 2011년~현재 인하대학교
 전자공학과 석사과정

<주관심분야 : 무선 통신, 센서 네
 트워크>



최 상 방(평생회원)
 1981년 한양대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1981년~1986 LG 정보통신(주)
 1988년 University of washinton
 석사 졸업
 1990년 University of washinton
 박사 졸업.

1991년~현재 인하대학교 전자공학과 교수
 <주관심분야 : 컴퓨터 아키텍처, 컴퓨터 네트워
 크, 무선 통신, 병렬 및 분산 처리 시스템>