

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.5.43>

IIBC 2017-5-6

IEEE802.15.4e TSCH의 스케줄링 방식 및 성능분석

Scheduling Scheme and Performance Analysis of IEEE802.15.4e TSCH

박미룡*, 김동원**

Mi-Ryong Park*, Dongwon Kim**

요약 본 논문에서 QoS가 보장될 수 있는 IoT 망을 위한 IEEE802.15.4e TSCH(Time-Slotted Channel Hopping) 기술을 살펴보고 표준에서 다루지 않는 디바이스들 간의 협력에 의한 링크 스케줄링 방법에 대해서 제안한다. 네트워크에 조인하는 디바이스는 개선된 비콘을 스캔한다. 광고노드로부터 수신 한 개선된 비콘프레임은 디바이스들 간에 직접 통신이 가능한 링크 정보를 포함하고 있으며, 새로운 디바이스는 이를 통해 자신의 채널오프셋과 타임슬롯을 결정하게 된다. 기존 단일채널 IEEE802.15.4와 본 제안을 활용한 TSCH 방식의 성능을 최대 스루풋과 최소 지연시간 관점에서 비교 분석한다.

Abstract In this paper, we propose the scheduling scheme of IEEE802.15.4e TSCH which is not specified in standard specification. The proposed scheme schedules the link by cooperating among the devices. A new device scans EBs(Enhanced Beacons) from network. An advertiser device broadcasts an enhanced beacon frame including links information on allocated channel offset and time-slots, and a new device can determine its own channel offset and time-slot. It's performance on maximum throughput and minimum delay is evaluated by comparing the proposed approach with a typical single channel IEEE802.15.4.

Key Words : IEEE802.15.4e, TSCH, scheduling, performance analysis

1. 서론

정보 통신 기술(ICT; Information & Communication Technology)의 발전에 따라 주변에 존재하는 대다수의 기기들은 통신 네트워크를 통해 상호 연결되어 연동하는 구조로 변화하고 있으며, ICT의 급속한 발전을 통해 만물이 모바일과 인터넷을 통해 연결되어 서로 소통하는 사회, 즉 사물과 사람이 네트워크로 연결되는 초 연결사회(Hyper Connected Society)로 언제든지(anytime)와 어디든지(anyplace)라는 연결 세계에 무엇이든지

(anything)라는 연결 차원을 추가하는 새로운 연결 생태계인 사물인터넷(IoT; Internet of Things)을 구축해가고 있다.

사물인터넷은 기존의 유선통신기반 인터넷 및 모바일 인터넷보다 진화된 단계의 인터넷으로서, 초기 유선통신 시대에는 PC와 같은 사물간의 연결을 통해서만 데이터 교환이 발생함으로써 매개체로서 사람의 개입이 요구되었으나, 점차적인 무선통신 기술의 발달로 사람과 사람, 사람과 사물, 사물과 사물로 통신 가능 범위가 확대되고, 나아가 사물 간의 자율적 통신도 가능한 사물통신(M2M)

*정희원, 한국전자통신연구원 자동차IT플랫폼연구실

**정희원, 충북도립대학 반도체전자과

접수일: 2017년 8월 16일, 수정완료일: 2017년 9월 26일

게재확정일: 2017년 10월 13일

Received: 16 August, 2017 / Revised: 26 September, 2017 /

Accepted: 13 October, 2017

*Corresponding Author: won@cpu.ac.kr

Professor, Dept. of Semiconductor Electronics, Chungbuk Prov. Univ., Korea

으로 발전하였다.

M2M을 통해서 주요 구성 요소 간 센싱, 제어, 정보 교환 및 처리 등이 가능한 지능적 관계가 형성되고, 이것이 서비스 형태로 변화되었으며, 더 나아가서 사물인터넷을 통해 이러한 M2M의 개념이 무선통신을 넘어 인터넷 구조상에 적용됨으로써, 현실과 가상세계의 모든 정보와 상호작용하는 개념으로 차세대 인터넷 환경이 진화되고 있다.

이러한 사물 인터넷으로의 진화에 따라서 다양한 기가들이 IoT 디바이스로 변화되고 있는데, IoT 디바이스들은 다양한 네트워크 방식으로 서로 연결되어 인터넷 망을 구축하게 된다. 이들 IoT 디바이스는 다양한 네트워크의 접속을 위한 통신 수단이 구비되며, 이러한 네트워크의 접속을 위해서 IoT 디바이스의 통신 수단에 대한 네트워크 접속 정보의 설정이 필요하며 여러 모듈들이 필요하다.

특히 산업용 무선 IoT 모듈 및 이를 활용한 공정제어, 재난안전관리시스템 등의 구축 시 무선 MAC의 효율성에 관한 연구 또한 중요하게 다뤄지고 있다. 또한 기존의 무선 IoT 모듈들을 이용하기 위해서는 IEEE802.15.4 혹은 Zigbee와 같은 방법을 사용하였으나, 수용노드 개수의 한계 및 채널 간섭으로 인한 문제점이 발생하였다.^{[1][3][4]}

TSCH라고도 알려진 IEEE802.15.4e는 QoS를 보장할 수 있는 대안으로 제시되었으며, TSCH무선 MAC의 표준 규격은 IEEE802.15.4를 통해 제시되어 있으나, 코디네이터와 디바이스들 간에 협력에 의한 스케줄링 방법에 대해서는 표준에서 다루지 않고 있으며, 각자 고유한 방법으로 구현하는 실정이다.^{[2][5]}

본 논문에서는 TSCH 코디네이터와 단말의 효과적인 스케줄링 방법을 제안하고, 기존 단일채널 IEEE802.15.4와 본 제안을 활용한 TSCH 방식의 성능을 최대 스루풋(throughput)과 최소 지연(delay) 관점에서 성능을 비교 분석한다.

II. IEEE802.15.4e TSCH 개요^[2]

1. 슬롯프레임 사이클 구조

타임슬롯 동안 하나의 노드는 한 프레임을 보내고 상대 노드는 프레임을 잘 받은 경우 Ack로 응답한다. 만약

Ack가 주어진 시간 내에 오지 않으면 다음 할당된 전송 타임슬롯 때까지 재전송을 기다린다.

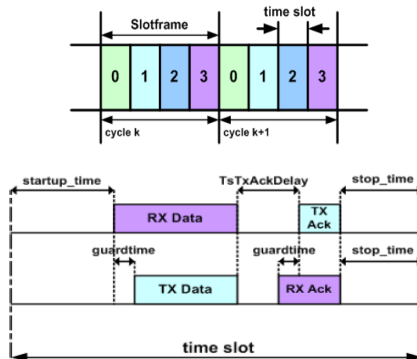


그림 1. TSCH 슬롯프레임 사이클 구조
Fig. 1. Slotframe Cycle structure of TSCH

2. Enhanced Beacon

광고노드(Advertiser node)들은 EBs(Enhanced Beacons)을 정기적으로 송출한다. EBs는 동기정보(synchronization information), 채널호핑정보(channel hopping information), 타임슬롯정보(Timeslot information), 및 초기 링크/슬롯프레임 정보(Initial link and slotframe information)을 포함하고 있다.

- synchronization information: 새 디바이스가 네트워크에 동기를 맞출 수 있도록 한다.
- channel hopping information: 새 디바이스가 채널 호핑순서를 알 수 있도록 한다.
- Timeslot information: 프레임의 전송과 애크놀리지먼트를 전송할 수 있는 시간을 나타낸다.
- Initial link and slotframe information: 새 디바이스가 광고노드로부터 전송을 들을 수 있는 시점과 광고노드에게 전송할 수 있는 시점을 알 수 있게 해준다.

3. 조인 절차

네트워크에 조인하는 디바이스는 EBs를 스캔한다. 광고노드로부터 어떤 한 EB를 받는 즉시, 상위계층에게 이를 통지하고, 상위계층은 받은 EB에 포함된 정보를 이용하여 slotframe과 link를 초기화하며, 디바이스를 TSCH 모드로 전환시킨다. 그런 후, 디바이스는 통신자원들(slotframe들과 link들)을 할당한다. 그리고 자기차례에 광고를 시작할 수도 있다.

디바이스들 간에 직접 통신이 가능한 한 링크(link)는 t (slot in the frame)와 $chOf$ (Channel offset)의 쌍으로 다음과 같이 주어진다.

$$a \text{ link}[t, chOf]$$

ASN은 네트워크가 설치 동작된 이래로 지나간 슬롯의 총 개수를 나타내며

$$ASN=(k \cdot S+t),$$

여기서 S 는 the slotframe size, k the slotframe cycle을 뜻한다. 채널 오프셋은 동작주파수 f 로 다음 식과 같이 변환된다.

$$f = F \{ (ASN + chOf) \bmod n_{ch} \},$$

여기서 n_{ch} 는 channel의 총 개수를 뜻한다. F 는 Channel Hopping Seq. Table을 통한 look-up 함수이다. S 와 n_{ch} 는 서로 소(prime)이다.

각 링크는 k 사이클을 도는 동안에 k 가능 채널들을 순환하게 된다. 예를 들어, $n_{ch}=16, S=7$ 인 네트워크에서 $link[t=3, chOf=1]$ 의 채널 시퀀스를 보면 다음과 같다.

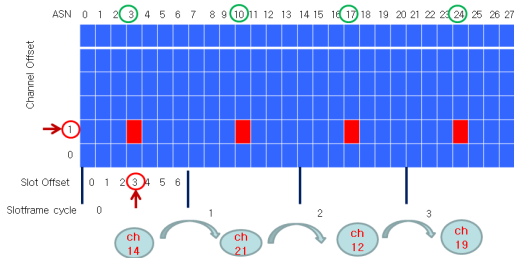


그림 2. $n_{ch}=16, S=7$ 인 네트워크에서 $link[t=3, chOf=1]$ 의 채널 시퀀스

Fig. 2. Channel sequence of a link[t=3, chOf=1] in network having $n_{ch}=16, S=7$

$link(t=3, chOf=1)$ 은 다음 표와 같이 매 slotframe cycle마다 f 주파수로 호핑하고 채널매핑에 따라 채널이 할당된다.

k	ASN	chOf	f	Channel
0	3	1	4	14
1	10	1	11	21
2	17	1	2	12
3	24	1	9	19

그림 3. k 사이클 동안에 채널 매핑 예
 Fig. 3. Channel mapping example during k -cycle

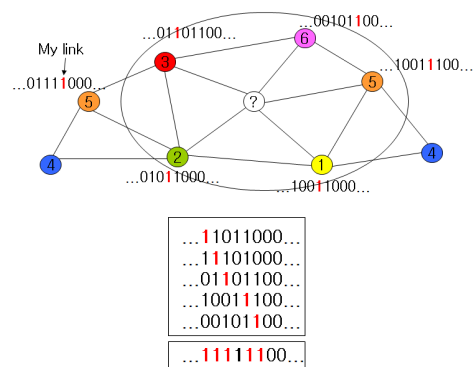
따라서 충돌이 일어나지 않는 링크(non conflict link)는 유일한 값의 t 와 $chOf$ 의 쌍을 할당해주면 된다는 것이다.

한 슬롯프레임내에 타임슬롯의 개수 S 와 채널 개수 n_{ch} 인 네트워크에서 전체 링크의 쌍 표현을 $S \times n_{ch}$ (집합요소가 타임슬롯 오프셋 k 와 채널오프셋 j 의 쌍, 여기서 $0 \leq k \leq S-1, 0 \leq j \leq n_{ch}-1$) 집합으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{link } \{t=k, chOf=j\} \in \Phi \\ & \Phi = \{ \{0, 0\}, \{0, 1\}, \dots, \{0, j\}, \dots, \{0, n_{ch}-1\}, \\ & \quad \{1, 0\}, \{1, 1\}, \dots, \{1, j\}, \dots, \{1, n_{ch}-1\}, \\ & \quad \vdots \\ & \quad \{k, 0\}, \{k, 1\}, \dots, \{k, j\}, \dots, \{k, n_{ch}-1\}, \\ & \quad \vdots \\ & \quad \{S-1, 0\}, \{S-1, 1\}, \dots, \{S-1, j\}, \dots, \{S-1, n_{ch}-1\} \} \end{aligned}$$

광고노드는 집합 Φ 의 요소에 한 비트씩을 할당하여 그 링크가 점유이면 1, 그렇지 않으면 0으로 표현한다. 광고노드는 해당 링크의 점유여부를 포함하는 비트열(집합 Φ 를 비트표현)을 EBs(enhanced beacons)에 포함시켜 광고를 하게 된다.

4. 유일한 값 link {k, j}의 할당방법



Free link # = 7,8
 Allocate 7 or 8 to new device(?)

그림 4. 채널 스케줄링 방법
 Fig. 4. Channel scheduling Scheme

다음 그림을 통해 선택 알고리즘을 설명한다.[4] 각 노드의 번호는 현재 자기가 점유한 쌍값(=링크)이다. 쌍값

으로 표현된 집합의 요소들 각각에 비트 값을 할당하고 집합 전체를 이진열 표현으로 바꾼다. 빨간색 1은 자신이 점유한 링크 값이고 검정색 1은 1홉으로 떨어진 이웃 노드들이 점유한 링크를 나타낸다.

새롭게 디바이스가 조인하려고할 때 EBs들의 집합 요소들의 값을 모두 OR 시켰을 때 1로 표시되는 링크는 1홉 또는 2홉 이내에서 점유되어 사용되는 링크를 뜻한다. 따라서 이러한 링크를 제외한 0으로 표시되는 링크 중에서 하나를 랜덤(random)하게 선택하면 된다. 결과적으로 7번과 8번 요소가 프리(free)하게 남으며 이중 하나 7을 선택하면, 새로운 노드는 자신의 스케줄을 요소 7번에 해당하는 link (k, j)를 취득하고 $f = F\{(ASN + chOf) \bmod n_{ch}\}$ 식과 채널매핑 테이블을 통해 채널호핑 시퀀스 절차에 따라 부모노드에 조인하고 통신할 수 있다.

2홉 이내의 자기 주변에서 관찰되는 스케줄을 피해서 자신의 스케줄을 잡게 됨으로 인해 TSCH에서 유일한 링크를 할당하여 충돌이 없는 링크 설정이 가능하게 할 수 있다.

III. 성능 분석

1. IEEE802.15.4 throughput 및 delay

가능한 최대 throughput 및 최소 지연을 구하기 위하여 시스템은 최적의 전송 조건에 있다고 다음과 같이 가정한다.

- 1) 채널 에러가 없는 이상 채널로 가정
- 2) 어떤 전송 사이클에서도 단지 한 개의 액티브 스테이션이 항상 전송하고자하는 한 개의 패킷을 가지고 있고, 나머지 다른 스테이션들은 그 패킷을 받고 ACK를 제공할 수 있다고 본다.

- 평균 최소 backoff 시간

$$Backoff_Time = aRandomNumber[0 :: 2^{BE} - 1] \times BackoffSlot_Time$$

으로 주어지므로 평균 backoff 시간은 다음 식과 같다.

$$\overline{Backoff_Time} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=0}^{NB} (2^{macMinBE+i} - 1) \times BackoffSlot_Time \right) \quad (1)$$

여기서, $(macMinBE=3) \leq BE \leq (macMaxBE=5)$, NB: Number of Backoff $\leq macMaxCSMABackoffs$ 이다. 백오프(backoff) 후 채널 클리어(clear) 정보를 검출했을 때 CW(Contention Window)가 0이 될 때까지 2연속 CCA(Clear Channel Assesment) 동작으로 $2 \times BackoffSlot_Time$ 이 걸린다. 따라서 하나의 충돌 윈도우 $CW = 2 \times BackoffSlot_Time = 640\mu s$ 가 된다.

- DATA 전송지연시간

$$T_{D-DATA} = \frac{L_{SHR} + L_{MHR-DATA} + L_{DATA} + L_{MFR} + L_{PHR}}{R_{ate}} \quad (2)$$

- ACK 전송지연시간

$$T_{D-ACK} = \frac{L_{SHR} + L_{MHR-ACK} + L_{ACK} + L_{MFR} + L_{PHR}}{R_{ate}} \quad (3)$$

- 최대 throughput

한 개의 데이터 패킷을 완전히 상대방에게 전달시키기 위해 소요되는 시간을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{ToDin15.4} = T_{D-DATA} + t_{ack} + T_{D-ACK} + 2\tau + \overline{Backoff_Time} + 2BackoffSlot_Time + LIFS + SIFS \quad (4)$$

최대 throughput은 다음과 같다.

$$Max.Throughput = \frac{L_{DATA}}{T_{ToDin15.4}} \quad (5)$$

이때 안정조건(stable condition)은 $T_{ToDin15.4} \leq t_{SI} - t_{SLEEP}$ 이 만족되어야 한다.

- 최소 delay

$$Min.Delay = T_{D-DATA} + \tau + \overline{Backoff_Time} + 2BackoffSlot_Time \quad (6)$$

2. IEEE802.15.4e TSCH

TSCH에는 TxDataRxAck, TxData, RxDataTxAck, RxData, Idle, 및 Sleep의 6가지 다른 타입의 타임슬롯이 존재한다.

- TxDataRxAck: A timeslot during which the node sends some data frame, and receives an acknowledgment (ACK) indicating successful reception.
- TxData: Similar to the previous, but no ACK is

expected. This is typically used when the data packet is broadcast.

- RxDataTxAck: A timeslot during which the node receives some data frame, and sends back an ACK to indicate successful reception.
- RxData: Similar to the previous, but no ACK is exchanged.
- Idle: Time slot during which a node listens for data, but receives none.
- Sleep: Time slot during which the node's radio stays off.

그림 5는 송신측 TxDataRxAck slot과 수신측에서 RxDataTxAck slot에서 노드 액티비티를 나타내고 있다. 송신기는 macTsTxOffset 동안, 데이터를 보낼 준비를 하고 라디오를 스케줄로부터 부여된 주파수로 설정하는 동안, 기다리면서 스타트한다. 이때 라디오는 켜지고 패킷을 전송한다.

패킷의 마지막 바이트가 라디오를 떠난 후 송신기는 수신기에게 얼마의 시간(어크날리지먼트를 준비할 수 있는) macTsRxAckDelay 동안 기다린다.

만약 AGT(Acknowledgment Guard Time)에 해당하는 macTsAckWait 기간 후에도 어크날리지먼트가 없다면 디바이스는 라디오를 끄고 전송실패로 간주한다.

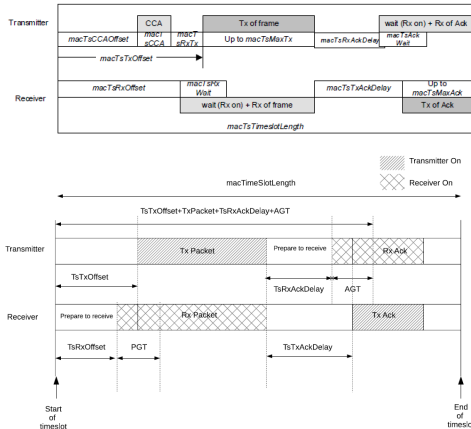


그림 5. TSCH 송수신 타이밍도
 Fig. 5. Send/Receive timing diagram in TSCH

수신단에서는 디바이스는 macTsRxOffset 동안 기다린 후 라디오를 켜고, 패킷 리스닝을 한다. PGT(Packet

Guard Time)에 해당하는 macTsRxWait 후에 패킷이 수신 없을 경우 디바이스는 라디오를 끄고 해당 슬롯의 나머지 동안 대기한다. 만약 유효한 패킷 수신 있다면, 노드는 마지막 바이트의 수신 후 macTsTxAckDelay 동안 기다렸다가 라디오를 켜고 어크날리지먼트를 송신한다.

IEEE802.15.4e의 경우 슬롯 전환 시 스케줄에 의한 라디오 주파수 전환 설정과 켜기 등을 위한 offset 시간들 (macTsTxOffset, macTsRxOffset)이 요구된다.

단일채널 IEEE802.15.4모드와 비교하기 위하여 TxDataRxAck와 대응되는 RxDataTxAck 타임슬롯만 존재하고 그렇지 않은 슬롯은 모두 Sleep 으로 간주하면 다음식과 같다.

- 최대 throughput

TSCH 모드에서 한 개의 데이터 패킷을 완전히 상대방에게 전달시키기 위해 소요되는 시간을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$TToDinTSCH = macTsTxOffset + T_{D-DATA} + macTsTxAckDelay + T_{D-ACK} + 2\tau \quad (7)$$

TSCH 네트워크를 싱글 채널 싱글 타임슬롯만 운용할 경우 최대 throughput은 다음과 같다.

$$Max.Throughput = \frac{L_{DATA}}{TToDinTSCH} \quad (8)$$

그렇지 않고 TSCH 네트워크 일반 운용모드인 한 슬롯프레임내에 타임슬롯의 개수 S 와 채널 개수 n_{ch} 로 운용한다면 다음 식과 같이 된다.

$$Max.Throughput = \frac{S \times \eta_{ch} \times L_{DATA}}{TToDinTSCH} \quad (9)$$

위 두식의 안정조건은 $TToDinTSCH \leq \frac{t_{SI}}{S}$ 이다.

- 최소 delay

$$Min.Delay = T_{D-DATA} + \tau + macTsTxOffset \quad (10)$$

여기서, $macTsTxOffset$ 은 $macTsCCAOffset$, $macTsCCA$, $macTsRxTx$ 들의 합으로 주어진다.

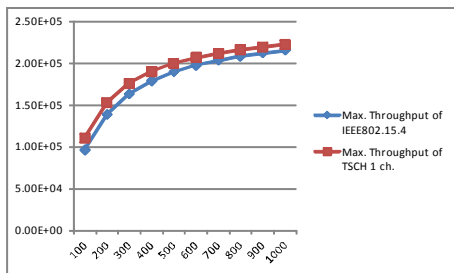
3. Analysis

성능해석에 사용된 네트워크 파라미터는 다음 표와 같다.

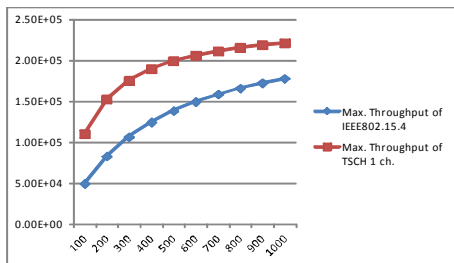
표 1. 네트워크 파라미터^{[2][5][6]}
Table 1. Network Parameter^{[2][5][6]}

parameter	tsch	802.15.4
R_{ate}		250Kbps
τ		1us
L_{SHR} (5B)		160us
L_{PHR} (1B)		32us
t_{ack}		$12symbol(192\mu s)$ $\leq t_{ack} \leq 32Symbol(512\mu s)$
LIFS	-	40 symbol=640us
SIFS	-	12 symbol=192us
macMaxCSMABackoffs	-	2
macMinBE	-	3
macMaxBE	-	5
BackoffSlotTime	-	20symbols=320us
macTsTxOffset	2120us	-
macTsTxAckDelay	1000us	-

그림 6과 그림 7에서 BE(Backoff Exponent)는 한 노드가 채널 접근을 위해 대기할 백오프 대기시간으로, BE의 크기가 작을 때는 throughput이나 delay는 TSCH 방식과 IEEE802.15.4방식이 비슷하게 나타난다. 하지만 BE가 커질수록 IEEE802.15.4는 백오프의 영향이 커지는 반면 TSCH는 백오프 영향이 없는 스케줄드 타이슬롯 방식으로 TSCH가 효과적인 성능을 보인다.

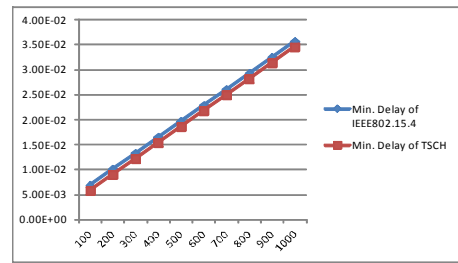


(a) BE=3

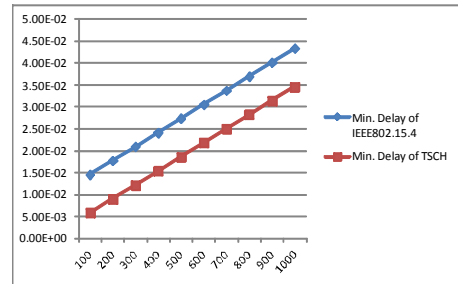


(b) BE=5

그림 6. 스루풋
Fig. 6. Throughput



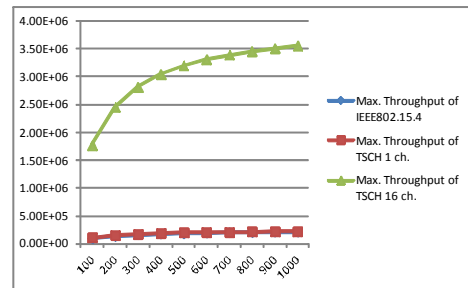
(a) BE=3



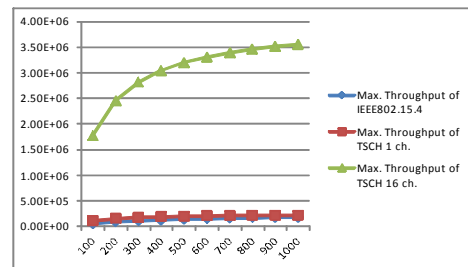
(b) BE=5

그림 7. 지연
Fig. 7. Delay

그림 8에서는 TSCH를 S=1, $n_{ch} = 16$ 일 경우 throughput을 보여준다. 멀티채널과 스케줄드 타임슬롯에 의해 단일채널에 비해 성능이 매우 우수함을 보여준다.



(a) BE=3



(b) BE=5

그림 8. $n_{ch}=16$ 경우 스루풋
Fig. 8. throughput in $n_{ch}=16$

IV. 결론

TSCH무선 MAC의 표준 규격은 IEEE802.15.4를 통해 제시되어 있으나, 코디네이터와 디바이스들 간에 협력에 의한 스케줄링 방법에 대해서는 표준에서 다루지 않고 있으며, 각자 고유한 방법으로 구현하는 실정이다.

본 논문에서는 채널 타임슬롯 스케줄링 방법을 제안하고 기존 단일채널 IEEE802.15.4와 본 제안을 활용한 TSCH 방식의 성능을 최대 throughput과 최소 delay 관점에서 살펴보고 비교하였다.

BE의 크기가 작을 때는 throughput이나 delay에서 TSCH 방식과 IEEE802.15.4방식이 비슷하게 나타난다. 하지만 BE가 커질수록 IEEE802.15.4는 백오프의 영향이 커지는 반면 TSCH는 백오프 영향이 없는 스케줄드 타임슬롯 방식으로 우월한 성능을 나타낸다.

멀티채널과 스케줄드 타임슬롯에 의해 단일채널에 비해 성능이 매우 우수함을 보여준다.

References

- [1] Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE Std 802.15.4-2006, Sep. 2006.
- [2] IEEE Std 802.15.4eTM-2012(Amendment to IEEE Std 802.15.4TM-2011)
- [3] D. W. Kim, T. G. Park, "An Energy Efficient MAC Protocol Providing Guaranteed Service for Wireless Sensor Network," KSII TIS Vol. 5, Issue 1, 2011.1.31, pp. 123-140
- [4] D. W. Kim, "Multi-Channel Time Division Scheduling for Beacon Frame Collision Avoidance in Cluster-tree Wireless Sensor Networks," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), VOL. 17 NO. 3, June 2017.
- [5] Xavier Vilajosana, Qin Wang, Fabien Chraim, Thomas Watteyne, Tengfei Chang, and Kristofer S. J. Pister, "A Realistic Energy Consumption Model for TSCH Networks," IEEE SENSORS

저자 소개

박 미 룡(정회원)

• 2016년 제16권 제4호 참조

김 동 원(정회원)

• 2016년 제16권 제4호 참조