

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2023.23.4.23>  
IIBC 2023-4-4

# Wi-SUN에서 비동기 RIT 모드 MAC의 전력소모 분석

## Power Consumption Analysis of Asynchronous RIT mode MAC in Wi-SUN

김동원\*

Dongwon Kim\*

**요약** 무선 스마트 유틸리티 네트워크 통신시스템에서는 비동기 저전력 MAC이 IEEE 802.15.4e에 의해 표준화되어 사용되고 있다. RIT(Receiver Initiated Transmission)라고 불리는 비동기 방식 MAC은 체크인터벌(RIT period)에 따라 지연시간과 전력소모가 크게 영향을 받는 특성이 있다. 체크인터벌 마다 수면에서 깨어나 자신이 수신할 데이터가 있는지 확인함으로써, 수신단 전력 소모는 획기적으로 줄일 수 있지만 송신단에서는 과도한 웨이크업 시퀀스(wakeup sequence)로 전력소모가 발생하는 단점을 가진다. 체크 인터벌을 짧게하여 과도한 웨이크업 시퀀스를 줄이면 너무 빈번한 웨이크업으로 수신단 전력 소모가 많아지게 된다. RIT 비동기식 MAC 기법에서 트래픽 부하와 체크인터벌의 운용에 따른 전력소모 성능을 분석하여 Wi-SUN 구축시 적용코자 한다.

**Abstract** In a wireless smart utility network communication system, an asynchronous low power MAC is standardized and used according to IEEE 802.15.4e. An asynchronous MAC called RIT (Receiver Initiated Transmission) has a characteristic in which delay time and power consumption are greatly affected by a check-in interval (RIT period). By waking up from sleep every check-in interval and checking whether there is data to be received, power consumption in the receiving end can be drastically reduced, but power consumption in the transmitting end occurs due to an excessive wakeup sequence. If an excessive wake-up sequence is reduced by shortening the check interval, power consumption of the receiving end increases due to too frequent wake-up. In the RIT asynchronous MAC technique, power consumption performance according to traffic load and operation of check-in interval is analyzed and applied to Wi-SUN construction.

**Key Words** : Wi-SUN, IEEE802.15.4e, Receiver Initiated Transmission, power consumption analysis

### 1. 서론

(Wi-SUN) 통신 시스템에 대한 수요가 증가하고 있다.<sup>[1]</sup>  
2, 7, 8, 9]

근래에 스마트 유틸리티를 탑재 한 전기, 가스, 수도 계량기 등과 같은 무선 스마트 유틸리티 네트워크

Wi-SUN 무선 장치는 다중 흡 작업을 통해 측정 데이터를 데이터 수집 기지국(BS)에 효과적이고 자동으로 릴

\*정회원, 충북도립대학교 반도체전자과  
접수일자 2023년 6월 10일, 수정완료 2023년 7월 10일  
게재확정일자 2023년 8월 4일

Received: 10 June, 2023 / Revised: 10 July, 2023 /  
Accepted: 4 August, 2023

\*Corresponding Author: won@cpu.ac.kr  
Dept. of Semiconductor Electronics, Chungbuk Prov. University,  
Korea

레이 할 수 있다. BS는 데이터를 다음과 같은 무선 WAN (Wide Area Network)을 통해 인트라넷 또는 인터넷의 클라우드 또는 데이터 서버로 전송한다. Wi-SUN의 물리 (PHY) 계층 사양은 주로 실외에서 낮은 데이터 전송률 무선 스마트 계량 유틸리티 네트워크에 대한 대체 물리 계층 사양을 정의하는 IEEE 802.15.4g를 기반으로 한다. 또한 Wi-SUN에는 여러 애플리케이션을 지원하기 위해 IEEE 및 IETF에서 표준화 한 MAC (Media Access Control), 적응, 네트워크 및 전송 계층 프로토콜의 추가 사양이 포함되어 있다.

Wi-SUN 얼라이언스에서 정의한 기술 사양을 Wi-SUN 프로파일이라하며 Wi-SUN 프로파일 중 하나는 일본 전기 스마트 미터의 무선 장치와 HEMS (Home Energy Management System) 간의 통신 사양으로 성공적으로 사용되고 있다. 향후 Wi-SUN의 새로운 응용 분야가 고려되고 있는 분야로써는 현재 농업, 방재 및 지능형 교통 시스템이 제안되고 있다.

본 논문에서는 Wi-SUN MAC인 IEEE802.15.4e 의 비동기 RIT모드 성능분석을 위한 분석적 모델을 살펴보고 앞서 다른 모드와 상호 성능을 비교분석한다.

## II. Wi-SUN<sup>[1,2]</sup>

Wi-SUN 통신시스템은 광역 개방 공간 또는 이동 통신 환경에서 정보 감지 및 모니터링을 위한 응용, 광역 이동 통신 환경에서 정보 감지 및 모니터링 시스템으로 응용이 되고 있다. 관련 핵심 표준은 IEEE 802.15.4g 및 IEEE802.15.4.4e이다.

IEEE 802.15.4g<sup>[3]</sup>는 IEEE 802.15.4의 수정 사항을 정의한다. 주로 실외 저속 데이터 무선 스마트 미터링 유틸리티 네트워크 요구 사항을 해결한다. 대체 PHY 및 구현을 지원하는 데 필요한 MAC 수정 만 정의한다. IEEE 802.15.4g는 multi-rate and multi-regional (MR-) FSK, MR-offset QPSK 그리고 MR-OFDM의 세 가지 PHY를 채택한다. PHY에서 MR-FSK는 가장 상용화 된 PHY이다.

IEEE 802.15.4e<sup>[4]</sup>는 IEEE 802.15.4TM-2006MAC 에 기능을 강화하고 추가하기 위한 수정안을 정의한다. 기능 중 하나는 저에너지 소비 MAC이다.

IEEE 802.15.4 및 IEEE 802.15.4e MAC은 동기 및 비동기의 두 가지로 분류된다.

동기식 MAC에는 비콘 기반 및 채널 호핑 기반 MAC

의 두 가지 범주가 있다.

또한 비동기 MAC에는 CSMA/CA, CSL (Coordinated Sampled Listening) 및 RIT (receiver initiated transmission)의 세 가지 MAC이 있다.

CSMA 프로토콜은 발신자에서 데이터 생성이 발생하면 무선 장치는 반송파 감지라는 수신 작업을 수행한 후, 기기가 반송파 신호를 감지하지 못하면 기기는 원하는 파트너, 즉 수신기로 데이터를 전송한다.

기기가 반송파 신호를 감지하면 데이터 전송을 중단하고 임의로 결정된 일정 시간 동안 기다린 후 재전송을 시도하는 가장 간단한 방식으로 무선액세스의 기본 방식이지만 효율성이 떨어진다.

CSMA에서 저전력 운영 MAC으로 개선된 CSL과 RIT가 제안되었고 주기적인 웨이크 업 및 절전 동작은 채널당 높은 시간 활용 효율과 전력 소비에 이점이 있는 RIT 프로토콜은 지연 허용 오차가 있는 다중 홉 Wi-SUN 네트워크에 효율적이어서 Wi-SUN 표준으로 채택되었다.

## III. Power Consumption Analysis

### 1. IEEE802.15.4 전력소모

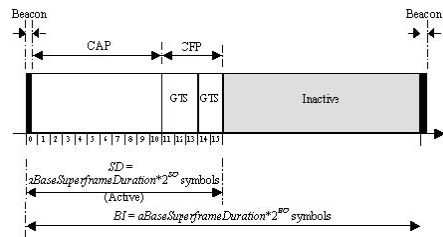


그림 1. IEEE802.15.4 송수신 타이밍도  
Fig. 1. Send/Receive timing diagram in IEEE802.15.4

그림1과 같이 수퍼프레임사이클 구조를 가지며 송수신 타이밍 파라미터가 주어질 때 송수신 활동시 소비전력은 다음과 같다.<sup>[8]</sup>

수신모드의 전력은 다음과 같다.<sup>[8]</sup>

$$P_{15.4\_rx} = \eta_{rx} (t_{SI} - t_{SLEEP}) / t_{SI} \quad (1)$$

송신시 전력소모는 다음과 같다.<sup>[8]</sup>

$$P_{15.4\_tx} = \eta_{tx} \rho_{15.4} \quad (2)$$

슬립구간동안의 전력 소모는 다음과 같다.<sup>[8]</sup>

$$P_{15.4\_sleep} = \eta_{sleep} t_{SLEEP} / t_{SI} \quad (3)$$

센서노드의 한 수퍼프레임 사이클 동안 소모되는 단위 시간당 전력소모는 송신, 수신, 슬립 동작에 따른 전력

소모의 합으로 다음과 같다.<sup>[8]</sup>

$$P_{15.4\_device} = P_{15.4\_Tx} + P_{15.4\_Rx} + P_{15.4\_sleep} \quad (4)$$

## 2. CSL 전력소모

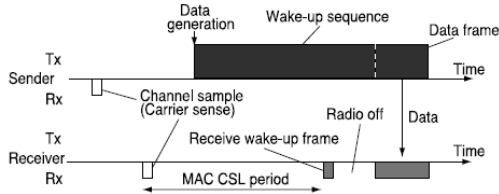


그림 2. CSL 프로토콜  
 Fig. 2. CSL protocol

그림 2는 CSL 프로토콜의 작동을 보여준다. 각 무선 장치는 MAC CSL 기간이라고하는 고정 된 간격으로 채널 샘플링이라는 주기적 수신 작업을 수행한다.

발신자에서 데이터 생성이 발생하면 발신자는 웨이크업 시퀀스의 연속 전송을 수행한다. 웨이크업 시퀀스는 MAC CSL 기간(MAC CSL period)을 초과하는 기간 동안 지속적으로 전송되어야 한다. 웨이크업시퀀스(wakeup sequence) 전송이 끝나면 발신자는 생성된 데이터 프레임을 원하는 파트너, 즉 수신자에게 전달한다.

수신시 전력소모는 트래픽 측정 인터벌( $Mt_{CSL}$ : traffic measure interval)마다 캐리어센싱을 위한 Rx 디바이스를 On이 N번이 발생하며, 데이터 수신 시간 동안 Rx On을 시키는 횟수는 네트워크내에서 발생하는 총 트래픽 발생률에 비례하므로 다음 식과 같다.<sup>[9]</sup>

$$P_{CSL\_carriersense} = \eta_{rx} M_{carriersense} (1 - \rho_{CSL}) / M_{CSL} \quad (5)$$

$$P_{CSL\_Tx} = \eta_{Tx} (N-1) \lambda_s T_{D-DATA} / M_{CSL} \quad (6)$$

송신시 전력 소모는 다음과 같다.<sup>[9]</sup>

$$P_{CSL\_Tx} = \eta_{Tx} \rho_{CSL} \quad (7)$$

슬립시 전력소모는 다음과 같다.<sup>[9]</sup>

$$P_{CSL\_sleep} = \eta_{sleep} M_{CSL\_sleep} (1 - \rho_{CSL}) / M_{CSL} \quad (8)$$

단위시간당 전력소모는 다음과 같이 송, 수신, 수면시 전력소모, 오버헤더링으로 인한 전력소모, 체크인터벌마다의 캐리어센싱 소모 전력의 합으로 주어진다.<sup>[9]</sup>

$$P_{CSL\_device} = P_{CSL\_Tx} + P_{CSL\_Rx} + P_{CSL\_sleep} + P_{CSL\_carriersense} \quad (9)$$

## 3. RIT 전력소모

그림 3은 RIT 프로토콜의 작동을 보여준다. RIT 프로토콜에서 각 무선 장치는 MAC RIT period라고 하는 고정

된 간격으로 RIT data request 프레임을 전송한다.

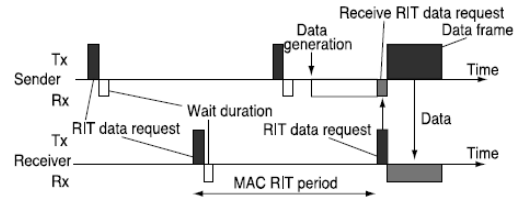


그림 3. RIT 프로토콜  
 Fig. 3. RIT protocol

RIT 데이터 요청 전송 직후 MAC RIT 데이터 대기 기간이라고하는 짧은 시간 청취가 수행된다.

RIT 데이터 요청 프레임은 IEEE 802.15.4의 MAC 헤더를 준수하며 대상 네트워크 ID, 대상 주소, 소스의 네트워크 ID 및 소스 주소와 같은 몇 가지 선택적 정보로 구성된다.

발신자에서 데이터 생성이 발생하면 발신자는 먼저 수신 작업을 진행한다. 이를 LRDR(Listening for RIT Data Request) 구간이라고 표현하겠다.

원하는 수신자로부터 RIT 데이터 요청 프레임을 수신한 후 송신자는 데이터 프레임을 리플렉스로 수신자에게 전송하여 데이터 전송 프로세스를 완료한다.

$T_{D-DATA}$ ,  $T_{D-ACK}$  은 각각 DATA, ACK 패킷 하나를 전송하는데 걸리는 평균 시간을 뜻한다.

$P_{RIT\_Tx}$ ,  $P_{RIT\_Rx}$ ,  $P_{sleep}$ ,  $P_{wait\_duration}$ ,  $P_{LRDR}$ ,  $P_{data\_request}$  는 센서노드가 각각 RIT방식의 전송모드, 수신모드, 슬립(sleep)모드, 웨이트구간(wait duration), LRDR 구간, RIT data request 모드에서의 평균 전력소모를 나타낸다.

RIT 방식에서 그림 3과 같이 송수신시 정의된 타이밍 파라미터가 주어질 때 소비전력을 구하여 본다.

수신시 전력소모는 트래픽 측정 인터벌( $Mt_{RIT}$ : traffic measure interval)마다 RIT data request 후 자기에게 송신되어 오는 Data frame을 수신하기 wait duration 시간 만큼 Rx 디바이스를 On이 N번이 발생하며, 데이터가 있다면 상대 노드로 부터의 RIT data request를 감지하는데 까지 걸리는 시간( $t_{LRDR}$ , 즉, 그림 3에서 Data generation부터 상대방 RIT data request를 감지하는데 까지 시간)동안 Rx On을 시키게 되고, 그 횟수는 네트워크내에서 발생하는 총 트래픽 발생률에 비례하므로 다음 식과 같다.

$$P_{wait\_duration} = \eta_{rx} Mf_{wait\_duration} (1 - \rho_{RIT}) / Mf_{RIT} \quad (10)$$

$$P_{RIT\_tx} = \eta_{rx} (N-1) \lambda_s T_{D-DATA} / Mf_{RIT} + \eta_{tx} Mf_{data\_request} (1 - \rho_{RIT}) / Mf_{RIT} \quad (11)$$

송신시 전력소모는 안정 조건을 넘어가지 않는 범위에서 송신패킷 도착률(arrival rate)에 따라 패킷 송신을 할 것이므로 다음과 같은 트래픽 부하가 발생할 것이다.

$$\rho_{RIT} = N \lambda_s (t_{LRDR} + T_{D-DATA} + T_{D-ACK} + 2\tau) \quad (12)$$

여기서  $t_{LRDR}$ 은 평균적으로  $0.5t_{RIT}$ 가 될 것이며 안정조건  $\rho_{RIT} \leq 1$  이다.

따라서 송신시 전력 소모는 트래픽 부하에 비례해서 늘어나는 송신 전력 소모와 수신단의 data request를 감지하기위해 LRDR 구간 동안 수신모드 전력소모의 합으로 다음식과 같다.

$$P_{RIT\_tx} = (\eta_{tx} N \lambda_s T_{D-DATA} + \eta_{rx} N \lambda_s t_{LRDR}) / Mf_{RIT} \quad (13)$$

슬립시 전력소모는 트래픽 측정 인터벌(traffic measure interval)인  $Mf_{RIT}$  동안 자신의 스케줄링에 따라 RIT data request를 한후 wait duration 동안 수신 데이터가 없으면 수면으로 들어가게되며 M번의 수면을 하는 것이 되므로 다음과 같이 주어진다.

$$P_{RIT\_sleep} = \eta_{sleep} Mf_{sleep} (1 - \rho_{RIT}) / Mf_{RIT} \quad (14)$$

여기서  $t_{RIT\_sleep} = t_{RIT} - t_{data\_request} - t_{wait\_duration}$  이다.

한 트래픽 측정 인터벌 동안 어떤 한 디바이스의 단위 시간당 전력소모는 다음과 같이 송, 수신, 수면시 전력소모, 체크인터벌마다의 캐리어센싱 소모 전력의 합으로 주어진다.

$$P_{RIT\_device} = P_{RIT\_tx} + P_{RIT\_rx} + P_{RIT\_sleep} + P_{waitduration} \quad (15)$$

## V. 성능평가

성능해석에 사용된 네트워크 파라미터는 다음 표와 같다.

표 1. 네트워크 파라미터<sup>[4, 5, 6, 8]</sup>  
Table 1. Network parameter<sup>[4, 5, 6, 8]</sup>

parameter	value
$R_{ate}$	250Kbps
$\tau$ (propagation delay)	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
$t_{SI}=t_{CF}=t_{CSL}=t_{RIT}$	450ms
$t_{wakeupsquence}(CSL)$	$\geq t_{CSL}$
$t_{carriersense}(CSL)$	40symbols=640us
$t_{waitduration}(RIT)$	40symbols=640us
$t_{data\_request}(RIT)$	40symbols=640us

ATMEL AT86RF231 라디오칩을 사용할 경우 송신수신시 약 12mA정도, 슬립시에는 0.4mA 정도의 전류가 흐른다.<sup>[6]</sup> 따라서 전력소모를 계산하기위해 다음과 같이 가정한다.  $\eta_{tx}=40mW(12mA)$ ,  $\eta_{rx}=40mW(12mA)$ ,  $\eta_{sleep}=1.3mW(0.4mA)$

또한 IEEE802.15.4와 CSL모드와 RIT 모드 MAC을 동일조건에서 비교하기 위해 채널은 1개만 사용한다고 가정하고 수퍼프레임구간과  $Mf_{CSL}$  길이를 같게 하기 위해  $t_{SI} = Mf_{CSL}$  라고 설정한다.  $t_{SI} = 450ms$ , N(the number of devices)은 송신과 수신 노드 2개만 있을 때 체크인터벌( $t_{CSL}$ )를 변화시키면서 전력소모를 살펴보면 체크인터벌이 작아질수록 전력소모가 줄어드는데 이는 웨이크업시퀀스의 길이를 체크인터벌 크기로 최소한 설정하여야하므로 웨이크업시퀀스의 길이가 줄어들어서 전송 전력이 감소하는 현상이다.

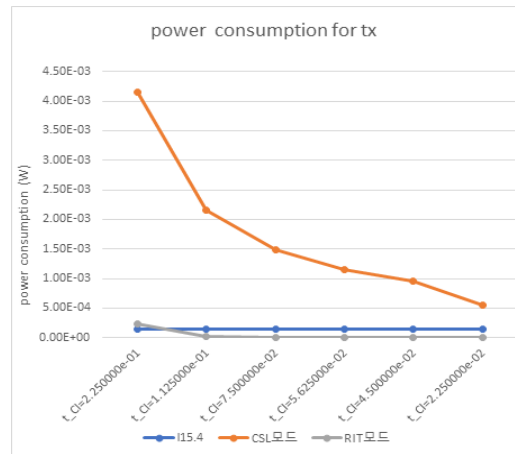


그림 4. 체크인터벌에 따른 Tx 전력소모 비교  
Fig. 4. Power Consumption comparison according to check interval

그림4에서는 패킷 도착율이 높을수록 네트워크에서 송신과 수신을 위한 전력소모가 늘어나므로 동일 체크인터벌상황에서는 네트워크 트래픽이 많을수록 전력 소모가 커짐을 보여준다.

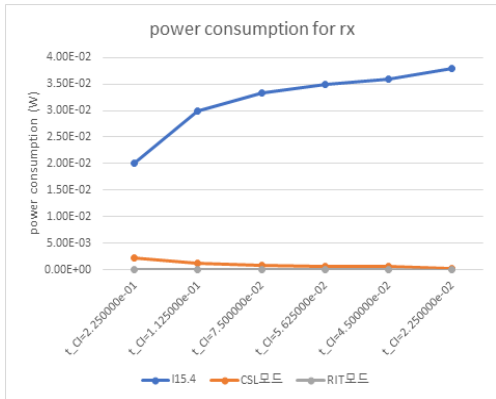


그림 5. 체크인터벌에 따른 Rx 전력소모 비교  
 Fig. 5. Power Consumption comparison according to check interval

그림 5는 IEEE802.15.4와 CSL-MAC, RIT-MAC을 동일 트래픽 부하상황에서 네트워크가 부하를 처리할 수 있는 상황내에서 수퍼프레임을 슬립 길이를 조절하면서 전력 소모를 분석하였다. 듀티사이클 50%일 때 (즉, IEEE802.15.4의 수퍼프레임 길이 중 50%를 수면으로 설정했을 때와 CSL-MAC 및 RIT-MAC의 체크인터벌 길이를 같이 했을 때) 전송 능력과는 상관없이 동일 전력 소모를 나타냄을 알 수 있다. 체크인터벌을 길게 할수록 CSL-MAC와 RIT-MAC은 전력소모가 늘어나고, 슬립 길이를 짧게 할수록 IEEE802.15.4의 전력소모가 늘어남을 알 수 있다. 특히 체크인터벌이 길수록 CSL-MAC의 Tx 전력소모가 RIT-MAC의 Tx 전력소모에 비하여 아주 커짐을 볼 수 있다. 수면 길이를 크게 할수록 IEEE802.15.4의 전력 소모 특성은 좋은 것으로 나타나나 수면 동안은 네트워크 트래픽 처리가 불가능하므로 수면이 길수록 스루풋이 현저히 떨어지게 될 것으로 다른 추정된다.

그림 6에서는 방식에 따른 디바이스의 평균 전력소모를 보여준다. 전력소모 측면에서 RIT-MAC이 가장 우수함을 볼 수 있고, 부하가 클수록 전력소모가 커짐을 보이는데 이때 트래픽 부하가 동일하다면 체크인터벌을 길게 할수록 더 많은 전력 소모가 일어남을 볼 수 있다. 이런 경우 체크인터벌을 짧게 하는 것이 전력 소모를 줄일 수

있음을 볼 수 있다. 즉, 부하가 적을 경우는 체크인터벌을 길게 하고 부하가 클 경우는 체크인터벌을 짧게 운영하는 것이 네트워크 전력소모를 줄이고 네트워크 수명을 연장시킬 수 있다. 이때 트래픽 부하에 따라 체크 인터벌을 조절하는 방법을 적용하면 효과적으로 전력소모를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

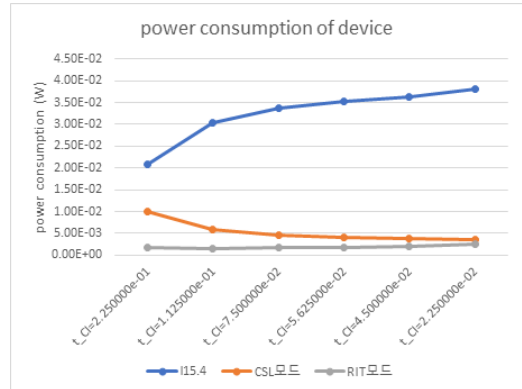


그림 6. 체크인터벌에 따른 전력소모 비교  
 Fig. 6. Power Consumption comparison according to check interval

## VI. 결 론

무선 스마트 유틸리티 네트워크 (Wi-SUN)를 위한 저 전력 MAC 표준으로 제안되어 있는 CSL모드와 RIT 모드 MAC을 센서네트워크 표준의 기본이 되는 IEEE802.15.4 표준과 전력소모 측면에서 성능을 비교하여 보았다. IEEE802.15.4는 동기화로 인한 전력소모가 많은 단점을 가지며 전력소모를 줄이기 위한 수면과 각성을 반복하는 수퍼프레임 동작으로 지연시간이 길어지는 단점이 있다. CSL 및 RIT-MAC은 비동기 방식으로 수신단에서 전력소모를 획기적으로 줄일 수는 있지만 송수신단에서는 과도한 웨이크업시퀀스로 전력소모가 발생하는 단점을 가지는 것을 알 수 있었다. 특히 체크인터벌이 길수록 CSL-MAC의 Tx 전력소모가 RIT-MAC의 Tx 전력소모에 비하여 아주 커짐을 볼 수 있다. 이러한 CSL 및 RIT-MAC들의 전력소모 불균형으로 인한 단점을 보완하기 위해 비동기식 MAC 기법에 체크인터벌을 트래픽 부하 상황에 따라 적응형으로 운용하는 방법이 필요할 것으로 보인다.

## References

- [1] [http:// www.wi-sun.org](http://www.wi-sun.org), Wi-SUN Alliance
- [2] H. Harada, K. Mizutani, K. Mochizuki, and K. Obata, "IEEE802.15.4g based wide area and mobile Wi-SUN communication systems," IEICE TRANS. COMMUN., VOL.E100-B, NO.7 JULY 2017
- [3] IEEE 802.15.4g-2012 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 3: Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks, IEEE Std 802.15.4g-2012, April. 2012.
- [4] 802.15.4e-2012 - IEEE Standard for Local and metropolitan area networks--Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer, IEEE Std 802.15.4e-2012, April. 2012.
- [5] Dongwon Kim, Mi-Hee Youn, "Delay time Analysis by Adjusting of Check Interval in Asynchronous Wireless Sensor Network," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), VOL. 20 NO. 2, pp. 75~80, 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2020.20.2.75>
- [6] <http://www.atmel.com/images/doc8111.pdf>, AT86RF231 datasheet
- [7] Lim Joonsun, , You Sebok, Cho Soojin, Park Byungho, Kim Yangsoo, and Jang Jinwoon, "Based on Intelligent Wireless Sensing System for Safety of Urban Facilities," Journal of KIIT. Vol. 18, No. 1, pp. 143-156, 2020.  
DOI : <https://doi.org/10.14801/jkiit.2020.18.1.143>
- [8] Dongwon Kim, "Delay Time Analysis of Asynchronous CSL Mode MAC in Wi-SUN," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (JIIBC), VOL. 21 NO. 3, pp. 23~28, 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.3.23>
- [9] Mi-Hee Youn, Dongwon Kim, "Power Consumption Analysis of Asynchronous CSL mode MAC in Wi-SUN," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), Vol. 22, No. 1, pp.-, Feb. 28, 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.1>

### 저 자 소 개

김 동 원(정회원)

•2018년 제18권 제1호 참조