

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2024.24.2.65>  
JIIBC 2024-2-10

## Wi-SUN에서 비동기 RIT모드 MAC의 지연시간 분석

### Delay time Analysis of Asynchronous RIT Mode MAC in Wi-SUN

김동원\*, 윤미희\*\*

Dongwon Kim\*, Mi-Hee Yoon\*\*

**요약** 근래에 와서 유틸리티들을 무선으로 원격제어 하는 스마트 팩토리 무선 이동 통신 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Wi-SUN(Wireless Smart Utility Network) 얼라이언스에서는 IEEE802.15.4g/e에 기반한 새로운 무선 통신 표준화 규격으로 스마트팩토리와 같은 플랫폼 구축에 적합한 Wi-SUN 프로토콜 구조를 제시하였다. IEEE802.15.4e의 RIT(Receiver Initiated Transmission) 모드 MAC(Media Access Control)의 throughput 및 지연시간 측면의 성능을 분석하고 효율적 운용을 위한 고려 사항을 살펴본다. RIT 모드는 체크 인터벌이 길어질수록 지연시간과 throughput이 떨어짐을 볼 수 있다. 트래픽 부하가 커질수록 RIT 체크 인터벌을 짧게 운용하면 지연시간도 짧아지면서 throughput을 높일수 있음을 보였다. RIT 모드는 전력소모가 작은 장점을 가지고 있으면서 지연시간이나 throughput 측면에서 IEEE802.15.4와 CSL 모드 사이의 중립적 특징을 가지는 것을 볼 수 있었다.

**Abstract** In recent years, research on smart factory wireless mobile communication technology that wirelessly remotely controls utilities is being actively conducted. The Wi-SUN (Wireless Smart Utility Network) Alliance proposed a Wi-SUN protocol structure suitable for building a platform such as a smart factory as a new wireless communication standardization standard based on IEEE802.15.4g/e. It analyzes the performance of the IEEE802.15.4e Receiver Initiated Transmission(RIT) Mode Media Access Control (MAC) in terms of throughput and latency, and looks at considerations for efficient operation. RIT mode shows that as the check interval becomes longer, delay time and throughput decrease. It was shown that as the traffic load increases, if the RIT check interval is shortened, the delay time can be shortened and throughput can be increased. RIT mode has the advantage of low power consumption and has neutral characteristics between IEEE802.15.4 and CSL mode in terms of delay time and throughput.

**Key Words** : Wi-SUN, IEEE802.15.4g/e, Receiver Initiated Transmission, performance analysis

\*정희원, 충북도립대학교 반도체전학과

\*\*정희원, 충북도립대학교 컴퓨터전학과

접수일자 2024년 3월 7일, 수정완료 2024년 3월 29일

게재확정일자 2024년 4월 5일

Received: 7 March, 2024 / Revised: 29 March, 2024 /

Accepted: 5 April, 2024

\*Corresponding Author: won@cpu.ac.kr

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

## I. 서 론

근래에 Smart Utility를 탑재 한 전기 / 가스 / 수도 계량기 등과 같은 무선 스마트 유틸리티 네트워크(Wi-SUN) 통신 시스템에 대한 수요가 증가하고 있다.

네트워크(SUN) 무선 장치는 다중 홉 작업을 통해 측정 데이터를 데이터 수집 기지국(BS)에 효과적이고 자동으로 릴레이 할 수 있다.<sup>[1, 2, 7, 8, 9]</sup>

Wi-SUN 무선 장치는 다중 홉 작업을 통해 측정 데이터를 데이터 수집 기지국(BS)에 효과적이고 자동으로 릴레이 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 분야로서는 현재 농업, 방재 및 지능형 교통 시스템이 제안되고 있다.

본 논문에서는 Wi-SUN MAC인 IEEE802.15.4e의 비동기 RIT모드 지연시간 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 수정만 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-2006MAC에 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 MAC의 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 무선 액세스의 기본 방식이지만 효율성이 떨어진다. CSMA에서 저전력 운영 MAC으로 개선된 CSL과 RIT가 제안되었고 주기적인 웨이크업 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. 성능 분석

### 1. IEEE802.15.4 throughput 및 delay<sup>[5]</sup>

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.

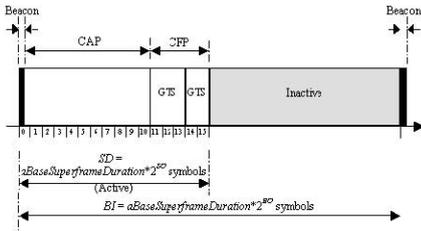


그림 1. IEEE802.15.4 송수신 타이밍도  
Fig. 1. Send/Receive timing diagram in IEEE802.15.4

- 평균 최소 backoff 시간

$$Backoff\_Time = \quad (1)$$

$$a\_Random\_Number[0 :: 2^{BE} - 1] \times Backoff\_Slot\_Time$$

으로 주어지므로 평균 backoff 시간은 다음 식과 같다.

$$Backoff\_Time = \quad (2)$$

$$\frac{1}{2} \left( \sum_{i=0}^{NB} (2^{macMinBE+i} - 1) \times Backoff\_Slot\_Time \right)$$

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 2 연속 CCA(Clear Channel Assessment) 동작으로  $2 \times Backoff\_Slot\_Time$ 이 걸린다. 따라서 하나의 충돌 윈도우  $CW = 2 \times Backoff\_Slot\_Time = 640\mu s$ 가 된다.

- DATA 전송지연시간

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

- ACK 전송지연시간

$$T_{D-ACK} = \frac{L_{SHR} + L_{MHR-ACK} + L_{ACK} + L_{MFR} + L_{PHR}}{R_{dat}} \quad (4)$$

- 최대 throughput

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

$$TToDin15.4 = T_{D-DATA} + t_{ack} + T_{D-ACK} + 2\tau + Backoff\_Time + 2Backoff\_Slot\_Time + LIFS + SIFS \quad (5)$$

최대 throughput은 다음과 같다.

$$Max.Throughput = \frac{L_{DATA}}{TToDin15.4} \quad (6)$$

이때 안정조건(stable condition)은  $TToDin15.4 \leq t_{sr} - t_{SLEEP}$  이 만족되어야 한다.

- 최소 delay

$$Min.Delay = T_{D-DATA} + \tau + Backoff\_Time \quad (7)$$

$$+ 2Backoff\_Slot\_Time + \frac{t_{SLEEP}}{2}$$

## 2. CSL 모드 throughput 및 delay<sup>[8]</sup>

그림 2는 CSL 모드 프로토콜의 작동을 보여준다. 각 무선 장치는 MAC CSL Period 라고하는 고정 된 간격으로 채널 샘플링이라는 주기적 수신 작업을 수행한다. 이러한 주기를 CSL체크인터벌( $t_{CSL}$ )이라하며 carrier sense 시간을 나타내는  $t_{carriersense}$  과 sleep 시간을 나타내는  $t_{sleep}$  의 합으로 주어진다.

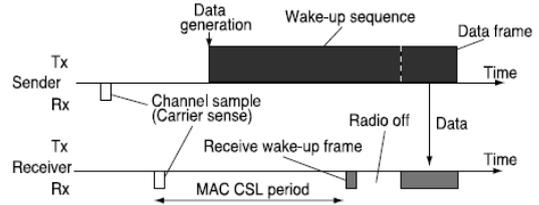


그림 2. CSL모드 송수신 타이밍도  
Fig. 2. Send/Receive timing diagram in CSL mode

발신자에서 데이터 생성이 발생하면 발신자는 웨이크업 시퀀스의 연속 전송을 수행한다. 웨이크업시퀀스는 MAC CSL 기간(MAC CSL period)을 초과하는 기간 동안 지속적으로 전송되어야 한다. 웨이크업시퀀스(wakeup sequence) 전송이 끝나면 발신자는 생성된 데이터 프레임의 원하는 파트너, 즉 수신자에게 전달한다. 송신단의 경우는 송신할 패킷이 도달했을 경우 채널을 확인하기 전에 백 오프 시간 동안 대기한다. 채널이 깨끗하면 노드는 전송한다. 그렇지 않으면 두 번째 백 오프를 시작한다. 각 노드는 LPL을 사용하여 주기적으로 채널을 확인해야 합니다. 채널이 idle 상태이고 노드가 전송할 데이터가 없다면, 노드는 sleep하게 된다. 따라서 CSL 모드에서의 백오프는 IEEE802.15.4의 백오프 방식과 CCA 동작을 그대로 쓴다고 가정한다. 동일한 조건하에서 미디어 접근 성능의 비교를 위하여 IEEE802.15.4와 동일한 TD-DATA, TD-ACK를 쓴다고 가정한다.

- 최대 throughput

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

$$TToDinCSL = t_{wakeupsequence} + T_{D-DATA} + t_{ack} \quad (8)$$

$$+ T_{D-ACK} + 2\tau + Backoff\_Time$$

$$+ 2BackoffSlot\_Time + LIFS + SIFS$$

여기서  $t_{wakeupsequence} \geq t_{CSL}$ 가 되어야 된다. 안정조건은 offered load  $\rho = \lambda \cdot TToDinCSL < 1$  이 될 때 이다.

CSL모드의 최대 throughput은 다음과 같다.

$$Max.Throughput = \frac{L_{DATA}}{TToDinCSL} \quad (9)$$

- 최소 delay

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

$$+ Backoff\_Time + 2BackoffSlot\_Time$$

### 3. RIT 모드 throughput 및 delay

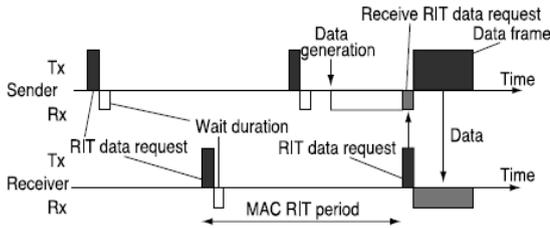


그림 3. RIT 모드 송수신 타이밍도

Fig. 3. Send/Receive timing diagram in RIT mode

그림 3은 RIT 모드의 작동을 보여준다. RIT 프로토콜에서 각 무선 장치는 MAC RIT period라고 하는 고정된 간격으로 RIT data request 프레임을 전송한다.

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 수

신 작업을 진행한다. 이를 LRDR(Listening for RIT Data Request) 구간이라고 표현 하겠다.

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

동일한 조건하에서 미디어 접근 성능의 비교를 위하여 IEEE802.15.4와 동일한 TD-DATA, TD-ACK를 쓴다고 가정하고 RIT data request는 노드간 스케줄링에 의해 충돌이 발생하지 않는다고 가정한다.

- 최대 throughput

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

$$TToDinRIT = t_{LRDR} + T_{D-DATA} + t_{ack} \quad (11)$$

$$+ T_{D-ACK} + 2\tau + LIFS + SIFS$$

여기서 안정조건은 offered load  $\rho = \lambda \cdot TToDinRIT < 1$  이 될 때 이다.

RIT 모드의 최대 throughput은 다음과 같다.

$$Max.Throughput = \frac{L_{DATA}}{TToDinRIT} \quad (12)$$

- 최소 delay

$$Min.Delay = t_{LRDR} + T_{D-DATA} + \tau \quad (13)$$

### 4. Analysis

성능해석에 사용된 네트워크 파라미터는 다음 표와 같다.

그림 4에서 RIT 체크 인터벌( $t_{CI}$ ) 길이와 sleep 길이를 동일하게 설정한후 100바이트 단일 패킷을 일정율로 전송하는데 따른 offered load를 비교하면 RIT 체크인터벌이 짧을수록 웨이크업시퀀스의 길이가 짧아도 됨으로 offered load에 영향이 적다. 즉, RIT 체크 인터벌을 길게하면 긴 웨이크업시퀀스가 오버헤드 부하로 작용하여 offered load를 크게 하고 throughput을 감소하게 된다. 반면 IEEE902.15.4는 이러한 오버헤드가 발생하지 않으므로 동일한 트래픽에 대해 동일한 offered load를 나타낸다.

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
$BackoffSlot\_Time$	20symbols=320us
$t_{SF}$ (superframe duration)	450ms
$t_{CI}=t_{CSL}=t_{RIT}$	variable $\leq t_{SF}$
$t_{wakeupsquence}(CSL)$	$\geq t_{CSL}$
$t_{carriersense}(CSL)$	40symbols=640us
$t_{waitduration}(RIT)$	40symbols=640us
$t_{data\_request}(RIT)$	40symbols=640us

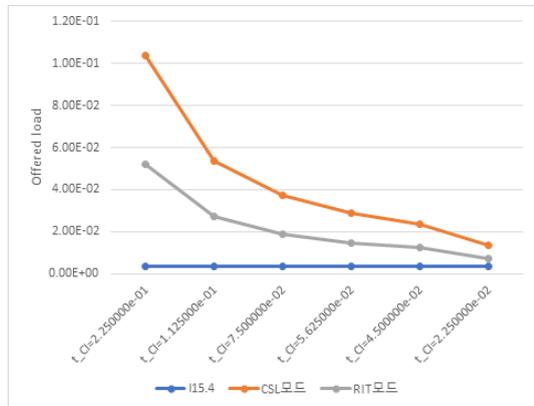


그림 4. CSL, RIT 인터벌에 따른 offered load  
 Fig. 4. Offered load according to CSL and RIT interval

동일 조건에서 지연시간과 throughput을 비교하면 그림 5, 그림 6과 같다. 그림 5에서 RIT의 RIT체크인터벌이 짧아질수록 지연시간이 작아지며 IEEE802.15.4는 sleep 길이가 짧아질수록 지연시간이 적게 걸림을 알 수 있다.

이는 IEEE802.15.4의 sleep 길이가 짧아질수록 네트워크 전대역을 트래픽 수송에 쓸 수 있게 됨으로 throughput은 올라가고 delay는 감소하게 된다. RIT의 RIT체크인터벌을 짧게 가져갈수록 웨이크업시퀀스 길이가 감소하게 되고 매 타임슬롯 캐리어 센싱을 통해 수신

을 확인하는 sleep이 없는 IEEE802.15.4와 특성이 같아 지게 됨을 볼 수 있다.

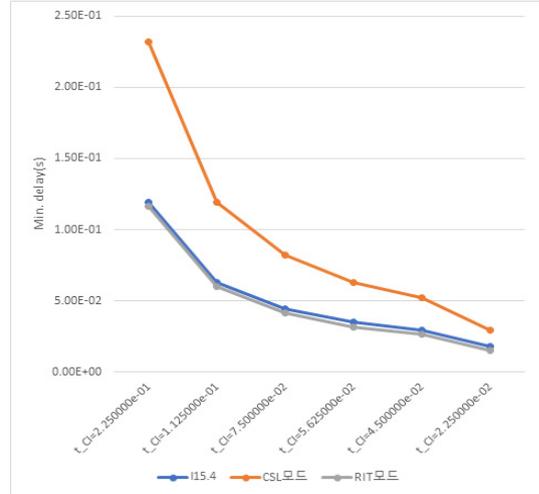


그림 5. CSL, RIT 인터벌에 따른 지연시간  
 Fig. 5. Delay according to CSL and RIT interval

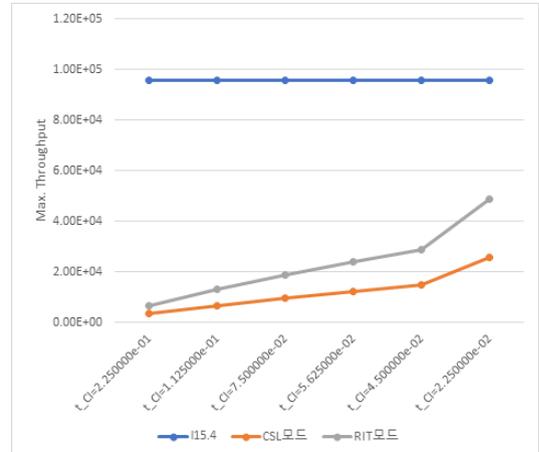


그림 6. CSL, RIT 인터벌에 따른 스루풋  
 Fig. 6. Throughput according to CSL and RIT interval

그림 6에서는 CSL<sup>[8]</sup>이나 RIT의 최대 throughput은 CSL, RIT 체크인터벌을 짧게 할수록 IEEE802.15.4의 최대 throughput과 같아지며, CSL, RIT 체크 인터벌이 길어질수록 웨이크업시퀀스 전송 길이가 길어짐으로 인해 오버헤드가 커져 throughput이 감소한다.

따라서 CSL과 RIT는 CSL, RIT 체크인터벌을 짧게 가져갈수록 IEEE802.15.4와 throughput은 비슷하게 나타나며, 패킷길이가 길어질수록 오버헤드의 영향이 줄어들므로 최대 throughput을 나타내게 된다.

## IV. 결 론

Wi-SUN을 위한 저전력 MAC 표준으로 제안되어 있는 CSL, RIT 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 송신단에서는 과도한 웨이크업시퀀스로 전력소모가 발생하는 단점을 가지는 것을 알 수 있었다.<sup>[9], [10]</sup>

기존 단일채널 IEEE802.15.4과 CSL 모드를 RIT 모드와 최대 throughput과 최소 delay 관점에서 살펴보고 비교하였다. 단일 패킷을 전송하는데 따른 throughput과 지연시간을 비교하면 sleep 길이가 길어질수록 IEEE802.15.4의 지연시간이 길어지며, RIT 모드는 체크 인터벌이 길어질수록 지연시간과 throughput이 떨어짐을 볼 수 있다. 트래픽 부하가 커질수록 RIT 체크 인터벌을 짧게 운용하면 지연시간도 짧아지면서 throughput을 높일수 있음을 보였다.

RIT 모드는 전력소모가 작은 장점을 가지고 있으면서 지연시간이나 throughput 측면에서 IEEE802.15.4과 CSL 모드 사이의 중립적 특징을 가지는 것을 볼 수 있었다. 트래픽에 따라 RIT 체크 인터벌을 적응제어하면 기존의 IEEE802.15.4이나 CSL모드 보다도 우수한 특성을 나타남을 보여준다.

## References

- [1] [http:// www.wi-sun.org](http://www.wi-sun.org)
- [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 Std 802.15.4gTM-2012," April 27, 2012.
- [4] "IEEE Std 802.15.4eTM-2012," April 16, 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, Apr. 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/kiit.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>
- [10] Dongwon Kim, "Power Consumption Analysis of Asynchronous RIT mode MAC in Wi-SUN," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), Vol. 23, No. 4, pp.23-28, Aug. 31, 2023.  
DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2023.23.4.23>

## 저 자 소 개

김 동 원(정회원)

- 2018년 제18권 제1호 참조

윤 미 희(정회원)

- 2018년 제18권 제1호 참조