

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.1.59>
JIIBC 2022-1-9

Wi-SUN에서 비동기 CSL 모드 MAC의 전력소모 분석

Power Consumption Analysis of Asynchronous CSL mode MAC in Wi-SUN

윤미희*, 김동원**

Mi-Hee Yoon*, Dongwon Kim**

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 CSL(Coordinated Sampled Listening) 모드 MAC(Media Access Control)의 전력소모 측면의 성능을 분석하고 효율적 운용을 위한 고려 사항을 살펴본다. CSL-MAC은 비동기 방식으로 수신단에서 전력소모를 획기적으로 줄일 수는 있지만 송신단에서는 과도한 웨이크업시퀀스로 전력소모가 발생하는 단점을 가지는 것을 알 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 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 CSL(Coordinated Sampled Listening) Mode MAC(Media Access Control) in terms of power consumption and looks at considerations for efficient operation. Although CSL-MAC can dramatically reduce power consumption at the receiving end in an asynchronous manner, it has been found that the transmitting end has a disadvantage in that power consumption occurs due to an excessive wake-up sequence.

Key Words : Wi-SUN, IEEE802.15.4g/e, Coordinated Sampled Listening, performance analysis

1. 서론

근래에 스마트 유틸리티(Smart Utility)를 탑재 한 전기, 가스, 수도 계량기 등과 같은 무선 스마트 유틸리티 네트워크 (Wi-SUN) 통신 시스템에 대한 수요가 증가하고 있다.^{1), 2), 7), 8), 9)}

Wi-SUN 구조를 살펴보면 유틸리티 무선 장치는 다중 홉 작업을 통해 측정 데이터를 무선으로 데이터 수집 기지국에 효과적이고 자동으로 릴레이 하는 것이며, 기지국은 데이터를 무선 WAN (Wide Area Network)을 통해 인트라넷 또는 인터넷의 클라우드 또는 데이터 서버로 전송하는 일반적인 구조를 취하고 있다.

*정회원, 충북도립대학교 컴퓨터학과

**정회원, 충북도립대학교 반도체전자과

접수일자 2022년 1월 17일, 수정완료 2022년 1월 31일

계재확정일자 2022년 2월 4일

Received: 17 January, 2022 / Revised: 31 January, 2022 /

Accepted: 4 February, 2022

*Corresponding Author: won@cpu.ac.kr

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

여기서 무선 스마트 유틸리티 네트워크 Wi-SUN의 물리 (PHY) 계층 사양은 주로 실외 저속 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, 적응, 네트워크 및 전송 계층 프로토콜의 추가 사양이 포함되어 있다.

Wi-SUN 얼라이언스에서 정의한 기술 사양을 Wi-SUN 프로파일이라 하며 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 IEEE802.15.4e의 비동기 CSL모드 성능분석을 위한 분석적 모델을 살펴보고 전력소모 측면의 효율적 운용을 위한 고려 사항을 살펴본다.

II. Wi-SUN^[1, 2]

Wi-SUN 통신시스템은 응용에 따라 크게 3개의 범주로 나누어진다. 범주 (a)는 광역 개방 공간 환경에서 정보 감지 및 모니터링 시스템이다. 이 범주는 고정 지점 간 통신을 기반으로 하며 적용 범위는 1-5km이다.

범주 (b)는 광역 도시 환경에서 정보 감지 및 모니터링 시스템이다. BS는 건물에 장착되어 있으며 Wi-SUN의 주택 및 / 또는 상점이 설치된 센서, 미터 및 / 또는 모니터의 무선 장치와 통신한다. 통신은 주로 가시선이 아니므로 BS와 무선 장치 간의 직접 통신을 사용할 수 없다. 이 경우 무선 장치간에 Wi-SUN 라우터를 통해 다중 홉 작업을 사용할 수 있다.

범주 (c)는 광역 이동 통신 환경에서 정보 감지 및 모니터링 시스템이다. BS는 건물에 장착되어 있으며 자동차 및 버스와 같은 차량이 장착된 센서 및 / 또는 모니터의 무선 장치와 통신한다. 시스템의 타당성 문제는 Wi-SUN 무선 장치에 기능을 추가하여 모바일 환경에서 센서, 미터 또는 모니터 정보를 수신하는 것이다.

Wi-SUN 통신 시스템 요구 사항을 달성하기 위한 핵심 표준은 IEEE 802.15.4g^[3] 및 IEEE802.15.4.4e^[4]이다. 이들은 각각 PHY 및 MAC 계층 표준을 말한다.

IEEE 802.15.4g는 IEEE 802.15.4의 수정 사항을 정

의한다. 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 802.15.4e는 IEEE 802.15.4TM-2006MAC에 기능을 강화하고 추가하기위한 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.

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.

CSL 모드는 발신자에서 데이터 생성이 발생하면 발신자는 웨이크 업 시퀀스의 연속 전송을 수행한다. 웨이크 업시퀀스는 MAC CSL 기간(MAC CSL period)을 초과하는 기간 동안 지속적으로 전송하며, 수신자는 MAC CSL period 마다 깨어나서 carrier sensing을 통해 자기가 수신할 데이터가 있는지 웨이크업 프레임을 감지하고 수신준비를 한다. 발신자의 웨이크업시퀀스(wakeup sequence) 전송이 끝나면 발신자는 생성된 데이터 프레임을 원하는 파트너, 즉 수신자에게 전달한다. 수신자는 주기적 웨이크업 시퀀스를 따르므로 수신이 없을 동안에는 sleep을 통해 전력을 절감할 수 있으며, 발신자는 발신데이터가 있을때만 웨이크업시퀀스 전송을 함으로써 전력소모를 절감할 수 있는 장점이 있다.

III. Power Consumption Analysis

모든 노드들이 서로 신호의 범위내에 있다고 가정한다.

η_{tx} , η_{rx} , η_{sleep} , $\eta_{wakeupsequence-tx}$, $\eta_{wakeupsequence-rx}$, $\eta_{carrier sense}$ 은 각각 전송모드, 수신모드, sleep 모드,

wakeup sequence 송신모드, wakeup sequence 수신 모드, carrier sense 모드에서 단위시간당 소모되는 에너지(the energy dissipated per unit time)를 나타낸다. λ_s 센서 노드측 패킷 도착율을 각각 나타낸다.

1. IEEE802.15.4 전력소모^[8]

t_{SI} 는 superframe interval. t_{SLEEP} 은 sleep 인터벌을 나타낸다. N은 네트워크내의 디바이스 개수를 나타낸다. T_{D-DATA} , T_{D-ACK} 은 각각 DATA, ACK 패킷 하나를 전송하는데 걸리는 평균 시간을 뜻한다.

IEEE802.15.4 센서노드의 수신모드 평균 전력 소모를 나타낸다.

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

$$\rho_{15.4} = N\lambda_s (T_{D-DATA} + t_{ack} + T_{D-ACK} + 2\tau + Backoff_Time + 2BackoffSlot_Time + LIFS + SIFS) \quad (2)$$

여기서,

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

으로 주어진다.^[8]

전송모드의 평균전력소모는 다음과 같이 주어진다.

$$P_{15.4_{tx}} = \eta_{tx} \rho_{15.4} \quad (3)$$

한 수퍼프레임 사이클내에 슬립구간동안의 전력 소모는 다음과 같다.

$$P_{15.4_{sleep}} = \eta_{sleep} t_{SLEEP} / t_{SI} \quad (4)$$

따라서 센서노드의 한 수퍼프레임 사이클 동안 소모되는 단위시간당 전력소모는 송신, 수신, 슬립 동작에 따른 전력 소모의 합으로 다음과 같다.

$$P_{15.4_{device}} = P_{15.4_{tx}} + P_{15.4_{rx}} + P_{15.4_{sleep}} \quad (5)$$

2. CSL 전력소모

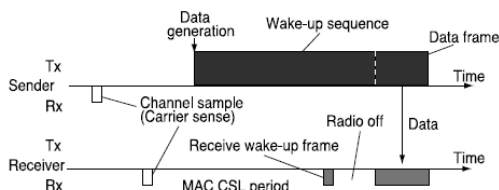


그림 1. CSL모드 송수신 타이밍도
 Fig. 1. Send/Receive timing diagram in CSL mode

그림 1은 CSL 프로토콜의 작동을 보여준다. 각 무선 장치는 MAC CSL 기간이라고하는 고정 된 간격으로 채

널 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.

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 프레임의 유효성을 파트너, 즉 수신자에게 전달한다.

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

$P_{CSL_{tx}}$, $P_{CSL_{rx}}$, $P_{CSL_{sleep}}$, $P_{CSL_{carriersense}}$ 는 센서노드가 각각 전송모드, 수신모드, 슬립(sleep)모드, 캐리어센싱(carrier sensing)모드에서의 평균 전력 소모를 나타낸다.

CSL 방식에서 그림 1와 같이 송수신시 정의된 타이밍 파라미터가 주어질 때 소비전력을 구하여 본다.

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.

$$P_{CSL_{carriersense}} = \eta_{rx} M t_{carriersense} (1 - \rho_{CSL}) / M t_{CSL} \quad (6)$$

$$P_{CSL_{rx}} = \eta_{rx} (N-1) \lambda_s T_{D-DATA} / M t_{CSL} \quad (7)$$

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

$$\rho_{CSL} = N\lambda_s (\overline{Backoff_Time} + t_{wakeupsequence} + T_{D-DATA} + T_{D-ACK} + 2\tau) \quad (8)$$

단, 여기서 안정조건은 $\rho_{CSL} \leq 1$ 이다.

따라서 송신시 전력 소모는 트래픽 부하에 비례해서 늘어남으로 전송을 위한 전력소모는 다음식과 같다.

$$P_{CSL_{tx}} = \eta_{tx} \rho_{CSL} \quad (9)$$

슬립시 전력소모는 트래픽 측정 인터벌(traffic measure interval)인 Mt_{CSL} 마다 캐리어센싱후 수면으로 들어가면 M번의 sleep 을 하게 되므로 다음과 같이 주어진다.

$$P_{CSL_{sleep}} = \eta_{sleep} M t_{sleep} (1 - \rho_{CSL}) / M t_{CSL} \quad (10)$$

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

$$P_{CSL,device} = P_{CSL,tx} + P_{CSL,rx} + P_{CSL,sleep} + P_{CSL,carriersense} \quad (11)$$

V. 성능평가

성능해석에 사용된 네트워크 파라미터는 다음 표와 같다.

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

표 1. 네트워크 파라미터^[4, 5, 6, 8]
Table 1. Network parameter^[4, 5, 6, 8]

parameter	value
R_{ate}	250Kbps
τ (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_{SI}	450ms
t_{CSL}	450ms
$t_{wakeupsquence}(CSL)$	$\geq t_{CSL}$
$t_{carriersense}(CSL)$	40symbols=640us

또한 IEEE802.15.4와 CSL모드 MAC을 동일조건에서 비교하기 위해 채널은 1개만 사용한다고 가정하고 수퍼프레임구간과 M_{CSL} 길이를 같게 하기 위해 $t_{SI} = M_{CSL}$ 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 이

는 웨이크업시퀀스의 길이를 체크인터벌 크기로 최소화 설정하여야하므로 웨이크업시퀀스의 길이가 줄어들어 전송 전력이 감소하는 현상이다.

그림2에서는 패킷 도착율이 높을수록 네트워크에서 송신과 수신을 위한 전력소모가 늘어나므로 동일 체크인터벌상황에서는 네트워크 트래픽이 많을수록 전력 소모가 커짐을 보여준다.

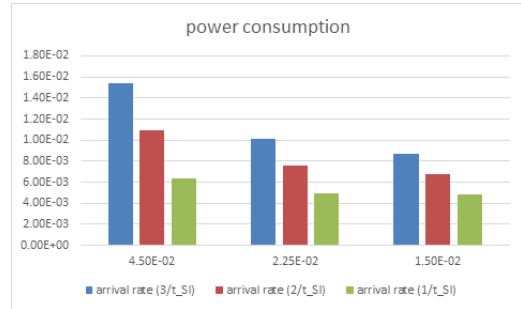


그림 2. CSL모드의 패킷 발생률과 체크인터벌에 따른 전력소모
Fig. 2. Power Consumption according to packet arrival rate and CSL interval in CSL

그림 3는 IEEE802.15.4와 CSL-MAC을 동일 트래픽 부하상황에서 네트워크가 부하를 처리할 수 있는 상황내에서 수퍼프레임을 슬립 길이를 조절하면서 전력소모를 분석하였다. 듀티사이클 50%일 때 (즉, IEEE802.15.4의 수퍼프레임 길이 중 50%를 수면으로 설정했을 때와 CSL-MAC의 체크인터벌 길이를 같이 했을 때) 전송 능력과는 상관없이 동일 전력소모를 나타낼 수 있다. 체크인터벌을 길게 할수록 CSL-MAC은 전력소모가 늘어나고, 슬립 길이를 짧게 할수록 IEEE802.15.4의 전력소모가 늘어남을 알 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 추정된다.

그림 4에서는 네트워크에 가해지는 패킷발생률이 커져 부하가 클수록 전력소모가 커짐을 보이는데 이때 CSL 체크인터벌을 고정으로 운영하면 동일 트래픽 부하에서 더 큰 전력 소모가 일어남을 볼 수 있다. 이럴 경우 CSL 체크인터벌을 더 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 인

터벌을 조절하는 방법을 적용하면 효과적으로 전력소모를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

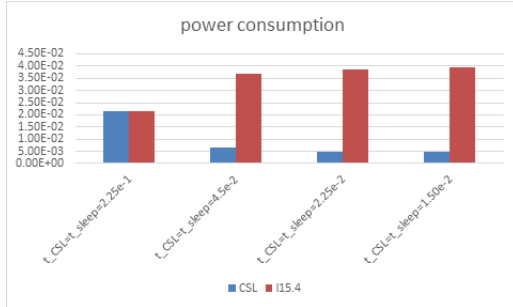


그림 3. 수면 길이와 CSL 길이가 같은 조건에서 전력 소모 비교
 Fig. 3. Comparison of power consumption under conditions of the same sleep length and CSL interval length

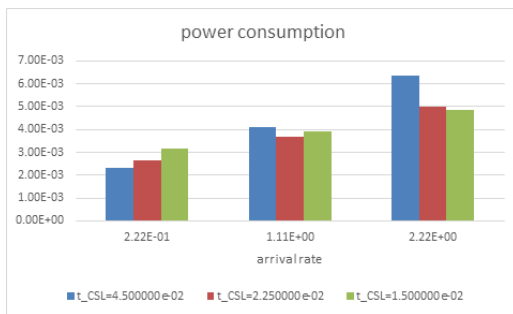


그림 4. 트래픽 부하에 따른 전력소모
 Fig. 4. Power Consumption according to the traffic load

VI. 결 론

Wi-SUN을 위한 저전력 MAC 표준으로 제안되어 있는 CSL 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-MAC은 비동기 방식으로 수신단에서 전력소모를 획기적으로 줄일 수는 있지만 송신단에서는 과도한 웨이크업시퀀스로 전력소모가 발생하는 단점을 가지는 것을 알 수 있었다. 이러한 CSL 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(IIBC)*, VOL. 20 NO. 2, pp. 75~80, 2020. DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2020.20.2.75>
- [6] <http://www.atmel.com/images/doc81111.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 (IIBC)*, VOL. 21 NO. 3, pp. 23~28, 2021. DOI: <https://doi.org/10.7236/IIBC.2021.21.3.23>
- [9] 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>

저 자 소 개

윤 미 희(정회원)

- 2018년 제18권 제1호 참조

김 등 원(정회원)

- 2018년 제18권 제1호 참조