

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.6.159>

IIBC 2016-6-20

LQI를 이용한 IEEE 802.15.4 MAC 기반의 스케줄링 슈퍼프레임 설계

Design of Scheduling Superframe based on IEEE 802.15.4 MAC using LQI

천영조*, 인치호**

Young-Jo Cheon*, Chi-Ho Lin**

요약 본 논문에서는 기존의 IEEE 802.15.4 MAC 계층 표준으로 사용되는 슈퍼프레임 구조에서 1:N 상황의 네트워크를 대상으로 배터리 효율과 통신 성능이 개선된 슈퍼프레임 구조를 제안한다. 제안하는 슈퍼프레임은 2가지 구조를 변형 및 추가한다. 첫 번째, 비컨 도착 후에 제안하는 스케줄링 구간을 추가한다. 두 번째, 한 개의 경쟁 접근 구간을 2개로 분할한 구조로 변경한다. 엔드 디바이스의 LQI의 값에 따라 활성화 구간의 경쟁 접근 구간과 비경쟁 접근 구간으로 나누게 된다. 본 논문에서 기존의 CSMA/CA와 GTS할당에서의 배터리 소모와 비효율적인 프레임 전송 그리고 우선순위 고려에 대해 보완한다. C++로 작성된 시스템 레벨 시뮬레이션을 통해, 그 결과 배터리 소모와 전송 성능이 향상되었음을 보여준다.

Abstract This paper proposes an improved superframe structure with one : N situation of the network as a target for efficiency battery and communication performance used in the existing standard IEEE 702.15.4 MAC layer. The proposed superframe transforms and adds a two structures. First, we add the proposed scheduling interval after the arrival of the beacon. Second, we change to a structure in which one of the contention access period is divided into two. The contention access period and the contention-free access period of active portion are divided according to the LQI value of the device. Through this system-level simulation written by c++, as a results show that the battery consumption and transmission performance has been increased.

Key Words : IEEE 802.15.4, ZigBee, Superframe, LQI, Energy efficiency

1. 서론

최근 전 세계적으로 IoT(Internet of Things)에 대한 관심이 높아지면서, 다양한 디바이스에 여러 가지 기능을 넣으며 IP를 이용한 이더넷을 통해 다양한 디바이스끼리 연결되어 데이터 통신을 할 수 있게 되었다. 하지

만 다양한 IoT(Internet of Things)는 배터리, 신호, 크기에 따른 제한된 자원과 장애물, 주파수 대역 등 다양한 환경적 특수성에 대한 고려를 해야 한다.

ZigBee는 세계적으로 무선 센서 네트워크로 사용되는 저가, 저속, 저전력을 위한 IEEE 802.15.4 기반의 통신 프로토콜이며 20m내외의 근거리 통신을 위주로 하는 기술

*준희원, 세명대학교 컴퓨터학과

**정희원, 세명대학교 컴퓨터학과

접수일자: 2016년 11월 11일, 수정완료: 2016년 12월 3일

게재확정일자: 2016년 12월 9일

Received: 11 November, 2016 / Revised: 3 December, 2016

Accepted: 9 December, 2016

**Corresponding Author: ich410@semyung.ac.kr

Dept. of Computer Science, Semyung University, Korea

이고 주파수 대역은 2.4GHz를 많이 사용한다. 최근에는 홈 네트워크나 산업용으로 많이 사용됨으로서 재조명 받고 있다^[1].

ZigBee에 이용되는 IEEE 802.15.4 표준은 *Low-Rate WPAN(Wireless Personal Area Network)*으로써 디바이스들의 PHY계층과 MAC계층을 정의한다^[2]. 본 논문에서는 MAC protocol에 정의되어있는 데이터 전송방법과 슈퍼프레임 구조를 개선하여 제안하는 ZigBee를 위한 맞춤형 슈퍼프레임에 대하여 제안하고 실험을 통해 데이터를 전송하는 과정의 통신 성능과 에너지 소모에 대해 알아볼 것이다.

II. IEEE 802.15.4 슈퍼프레임 구조

802.15.4에서 사용되는 슈퍼 프레임 구조는 그림 1과 같다. 코디네이터는 슈퍼 프레임 구조를 이용하여 선택적으로 채널 시간을 묶을 수 있습니다. 그리고 크게 슈퍼프레임은 활성화 부분(Active portion)과 비활성화 부분(Inactive portion)으로 나누어져있으며, 활성화 부분은 11개의 슬롯으로 구성된 경쟁 접근 구간(Contention Access Period)과 5개의 슬롯으로 구성된 비경쟁 구간(Contention-Free Period)으로 다시 나누어진다. 디바이스는 비활성 부분 동안 배터리 효율성을 위해 슬립 모드로 작동한다.

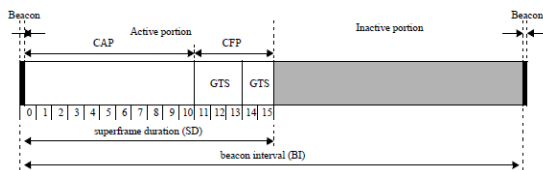


그림 1. IEEE 802.15.4 슈퍼 프레임 구조
Fig. 1. IEEE 802.15.4 Superframe structure

CAP에서는 그림 2의 CSMA(Carrier Sense Multiple Access)/CA(Collision Avoidance) 알고리즘을 사용하여 엔드 디바이스끼리 경쟁시켜 충돌이 나지 않도록 CCA(Clear channel assessment)를 수행한 후에 채널을 할당시켜 데이터 전송을 한다. 하지만 CSMA/CA는 디바이스끼리 충돌시키다 보니 데이터 전송이 보장되어 있지 않다. 그래서 데이터 전송에 실패할 경우 다음 채널에서 데이터를 재전송한다. CFP에서는 전송을 원하는

노드에 GTS(Guaranteed Time Slot)를 할당하여 노드 간 경쟁을 하지 않기 때문에 보장된 데이터 전송을 할 수 있다.

그리고 모든 디바이스는 PAN안의 슈퍼프레임 활성화 부분 동안에는 함께 상호작용을 한다. 디바이스는 자신의 비컨과 코디네이터로 송신하는 비컨과는 겹쳐서는 안 되고 비컨과 슈퍼프레임 순서는 PAN안의 모든 슈퍼프레임이 동일해야 한다.

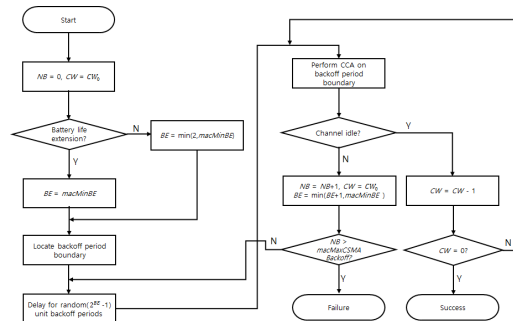


그림 2. CSMA/CA 알고리즘
Fig. 2. CSMA/CA Algorithm

기존 슈퍼프레임의 문제점으로는 1:N 상황에서 엔드 디바이스들의 트래픽이 집중되어 있는 경우 N만큼의 디바이스가 CSMA/CA를 수행하면서 서로 충돌을 회피하기 위해 일어나는 Back-off로 인한 딜레이 현상이 발생되며, 기존 송수신 프레임에 대한 정적인 구조로 인하여 수신 상태와 송신 상태에 따른 프레임의 상태 구별 없이 전송 및 할당하기 때문에 전체적인 통신 효율이 저하된다. 그리고 GTS의 할당 과정 중 FIFO 방식으로 인해 프레임에 대한 우선순위가 고려되지 않으며 긴급 프레임의 경우 일반 프레임과 같이 큐에 삽입되기 때문에 빠른 전송이 불가피하다. 최종적으로는 할당을 계속 받지 못하는 디바이스의 반복적인 CSMA/CA로 인하여 동일 PAN 내의 에너지 효율이 저하된다^[3-4].

기존 구조에서는 스캔을 통해 디바이스들의 파라미터를 수집할 수 있다. FFD(Full Function Device)는 ED(Energy Detection) 스캔과 Active 스캔을 수행할 수 있으며, 모든 디바이스는 Passive 스캔과 Orphan 스캔을 수행할 수 있다. 스캔은 모두 상위 계층에서 MLME-SCAN.request 프리미티브를 받게 되면 스캔을 수행할 수 있다. 코디네이터가 Active 스캔을 한 후에 모든 디바이스는 채널이 명시된 리스트를 통해 Passive 스

캔을 수행한다. Active 또는 passive 스캔은 디바이스가 무선 통신 범위 안의 코디네이터가 전송하는 비컨 프레임을 탐색할 수 있다. Active 스캔은 코디네이터의 비컨을 추출하는 beacon request 명령을 사용하는 반면에 passive 스캔은 beacon request 명령을 송신하지 않는다는 차이점이 있다.

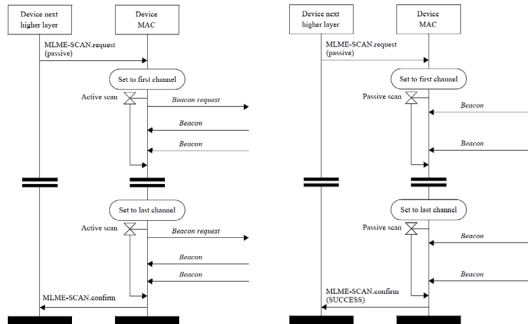


그림 3. Active 스캔과 Passive 스캔의 순서도
 Fig. 3. Sequence chart of Active scan and Passive scan

스캔을 통해 PAN 속한 엔드 디바이스의 파라미터들을 받아온 후에 ED 스캔으로 장치들의 PHY 계층의 파라미터나 각각의 장치의 에너지에 관한 정보를 받아들일 수 있다. IEEE 802.15.4 LR-WLAN에는 스캔으로 얻은 값을 이용하여 LQI(Link Quality Indicator) 값을 측정할 수 있다고 정의되어 있다. LQI는 수신된 패킷의 품질과 수신 감도의 세기라고 할 수 있다. 엔드 디바이스가 받은 패킷의 바이트에서도 얻을 수 있으며, IEEE 802.15.4 표준에서 LQI 값의 구체적 측정 방법은 명시 되지 않았고 0x00부터 0xff 사이의 값으로 나타낸다.

에너지 소모를 알아보기 위해 CSMA/CA와 GTS를 이용한 전송 성공확률을 비교하는 것을 수식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다. ($\alpha, \beta > 1$)

$$T_{gts} = \alpha P_{csma}, T_{csma} = \beta P_{csma} \times P_{ts} \quad (1)$$

$$P_{csma} = 2P_{cca} \quad (2)$$

수식 (1)에서 T_{gts} 는 GTS를 이용하는 전송과정이며, α 번의 P_{csma} 과정을 통해 전송한다. T_{csma} 는 CSMA/CA를 이용한 전송과정이고, β 번의 P_{csma} 와 P_{ts} 를 거쳐 전송한다. P_{csma} 는 CSMA/CA과정이 성공할 확률이며 P_{ts} 는 패킷을 오류 없이 전송할 확률이다. CSMA/CA는 2번의 CCA를 성공적으로 수행해야하므로 수식 (2)와 같이

표현할 수 있다.

n 개의 패킷 중 m 개의 패킷을 CSMA/CA를 통해 전송하는 과정을 확률로 수식으로 표현하면 수식 (3)과 나타낼 수 있다.

$$(T_{csma})^m \times (T_{gts})^{n-m} = (2\beta P_{cca} P_{ts})^m \times (2\alpha P_{cca})^{n-m} \quad (3)$$

$$\frac{\beta^m P_{ts}^m \times 2^n P_{cca}^n}{\beta^m} \approx P_{cca}^n \times P_{ts}^m$$

상수를 제외하게 되면 패킷 전송과정은 CCA의 성공 확률과 오류 없이 전송할 확률이 영향을 크다는 것을 보여준다. 즉, CCA의 횟수와 패킷 전송성공률을 높인다면 에너지효율성을 높일 수 있다.

III. 3장 제안하는 슈퍼프레임

1. 제안하는 슈퍼프레임 구조

본 논문에서 제안하는 슈퍼프레임의 구조는 크게 그림 4와 같이 기존 구조에서 2가지를 변경한다.

첫째, 기존의 IEEE 802.15.4 슈퍼프레임 Active 구간에 속한 16개 슬롯 중 비컨 뒤의 2개 슬롯 자리에 스케줄링 구간을 넣는 것과 둘째, 하나의 CAP구간을 두 개의 CAP 1과 CAP 2로 분할하는 것이다.

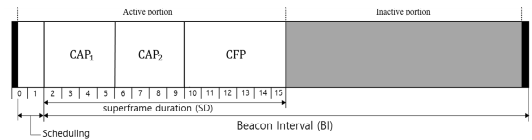


그림 4. 제안하는 슈퍼프레임 구조
 Fig. 4. Proposed Superframe structure

기존의 슈퍼프레임에서는 CSMA/CA의 경쟁을 통해서만 슈퍼프레임을 할당했지만 제안된 구조에서는 데이터의 전송 전 스케줄링 구간을 넣어 데이터를 전송하려는 엔드 디바이스의 정보에 따라 CAP와 CFP 어디서 전송할지 스케줄링 하여 할당되지 않은 디바이스나 CAP 2에 설정된 디바이스는 CAP 1구간에서는 슬립 모드를 통해 에너지 효율을 향상 시키고 중요 프레임의 경우 두 번의 CAP구간에 할당을 할 수 있으므로 전송 성공 확률이 향상된다. 그리고 송수신 상태에 따른 프레임이 선호하는 전송 방법이 다른데, 1:N 상황에서의 PAN 구조에서는 코디네이터로 전송을 송신하는 상태일 때 많은 트래픽이 집중되어 전체 적인 신뢰도가 감소하고 많은 디바

이들이 과도한 CSMA/CA를 통해 할당받기 위해서 딜레이 현상이 발생한다. 수신 상태 일 때는 반대로 많은 디바이스에게 프레임이 보내기위한 슬롯이 부족하기 때문에, 스케줄링을 통해 디바이스의 상태에 따른 할당을 통해, 전체적인 통신 성능 상승이 가능하다.

2. Link Quality Indicator 이용

LQI는 이용되는 IEEE 802.15.4 LR-WLAN에서 신호와 파워의 세기로 0x00 - 0xff값으로 정의되어 있다.

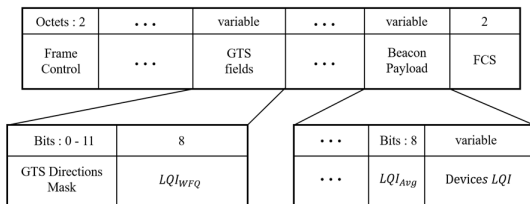


그림 5. LQI 필드를 추가한 비컨 프레임
Fig. 5. Beacon Frame with added LQI field

본 논문에서는 크게 두 가지에서 LQI를 사용한다. 첫째로 CAP 1과 CAP 2구간을 분할할 때 디바이스들의 평균 LQI와 디바이스의 LQI를 기준으로 나눌 때 사용되며, 두 번째로는 GTS 할당 과정에서 WFQ를 이용할 때 LQI를 가중치로 사용한다. LQI는 LR-WLAN에 정의되어 있으므로 ZigBee에서 LQI를 사용하여 본 논문에서 제안하는 스케줄링에 이용하기 위해 비컨 프레임을 그림 5와 같이 변경할 필요가 있다. 기존의 비컨 프레임 포맷에서 가변 길이의 GTS 필드에 WFQ에서 사용할 LQI 필드를 LQI의 최대 값을 저장할 수 있는 8 bit만큼 할당하고 Beacon Payload 필드 안에 평균 LQI 값을 마찬가지로 8 bit만큼 할당하고 PAN내의 디바이스만큼 가변 길이로 장치들의 LQI 리스트를 저장할 수 있도록 필드를 추가했다.

3. LQI를 이용한 Weighted Fair Queuing

CAP 및 CFP 구간에서 사용되는 CSMA/CA를 통한 전송과 할당은 엔드 디바이스들의 경쟁을 통해 패킷을 전송한다. 경쟁에 실패하게 되면 반복되는 CSMA/CA와 그로인한 CCA를 다시하기 때문에 엔드 디바이스는 슬립 모드를 하지 못하여 에너지 소모가 많아진다. 불필요한 경쟁 횟수를 낮추고 슬립 상태를 늘리게 되면 불필요한 전력을 낮추게 되고 소비전력이 감소한다. CFP 구간에서 사용되는 데이터 전송방법으로 GTS를 할당하는 방법

이 있고 코디네이터로부터 GTS를 요구하는 장치에게 FIFO로 할당하여 CFP 구간에서 엔드 디바이스끼리의 경쟁 없이 보장된 패킷을 전송할 수 있다. 하지만 GTS는 할당을 받기 위해서는 CAP 구간에 CSMA/CA를 통해 요청을 해야 하고 큐에 들어온 순서대로 GTS할당이 되기 때문에 전송하는 패킷에 대한 우선순위가 전혀 고려되지 않는다.

WFQ는 패킷이나 트래픽 별로 가중치를 이용해 가중치에 비례하는 처리 비율을 제공하여 차별화되는 큐잉 방법이다^[5]. 본 논문에서는 가중치를 디바이스의 LQI로 하며, 처리 비율은 모든 디바이스의 LQI 합 분에 각 디바이스 LQI로 계산하여 디바이스마다 GTS를 할당할 비율로 처리한다^[6]. 그로인해 GTS할당을 장치별 우선순위로 차별화하여 프레임 전송을 가능하게 해준다.

4. 제안하는 스케줄링

제안하는 슈퍼프레임의 구조에서 스케줄링은 스캔 과정과 비컨프레임을 통해 얻은 LQI를 이용하여 그림 6와 같은 순서도를 수행합니다.

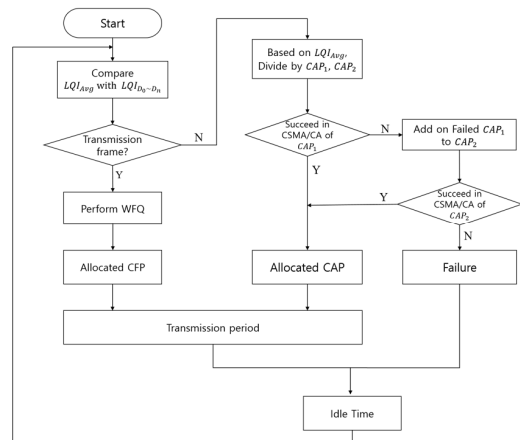


그림 6. 스케줄링 순서도
Fig. 6. Scheduling flow chart

우선 동일한 BI내의 비컨 프레임에서 얻어온 LQI 정보를 가지고 PAN내에 존재하는 디바이스들의 LQI와 코디네이터가 가지고 있는 평균 LQI를 비교하여 내부 실행에 필요한 값을 정의합니다. 그 다음으로는 전송하려는 프레임이 수신 프레임인지 송신 프레임인지를 구별하고 송신프레임인 경우에는 WFQ를 수행하여 GTS를 장치의 처리비율 만큼 처리하여 CFP 구간을 할당합니다. 수

신 프레임인 경우에는 평균 LQI를 토대로 우선순위가 높은 프레임이나 전송이 될 확률이 높은 프레임을 CAP 1에서 전송하도록 선택합니다. 그 다음 순위인 프레임의 경우에는 CAP 2에서 수행할지 나누고 CAP 1에서의 CSMA/CA를 수행하여 성공한 디바이스는 CAP구간을 할당하고 실패한 장치는 CAP 2로 합류하게 됩니다. CAP 1에서 할당이 이루어지고 있는 경우 CAP 2에 할당된 디바이스는 그만큼 슬립시간을 더 갖게 하고 CAP 1에서의 작업이 모두 끝난 뒤에 CAP 2의 CSMA/CA를 수행하여 성공한 경우에는 마찬가지로 CAP을 할당하고 실패한 경우에는 Inactive 상태로 들어서 슬립모드가 됩니다.

IV. 실험 및 결과

1:N의 네트워크 상황에서의 디바이스들의 에너지 소모와 데이터 전송 효율성을 실험하기 위해 System level 시뮬레이터는 C++로 구현하였다. 표 1은 슈퍼프레임을 구현하기 위한 파라미터이다. 실험에 이용한 네트워크 환경은 스타토폴로지의 PAN안에 하나의 코디네이터와 30개의 엔드 디바이스로 실험하였으며, 하나의 슬롯마다 60심볼로 설정하였으며 총 슈퍼프레임의 슬롯은 스케줄링에 2슬롯을 할당한 14개가 된다. 표 1의 파라미터를 토대로 하나의 비컨 인터벌은 수식 (4)로 구할 수 있다.

$$SuperframeDuration \cdot 2^{MACBeaconOrder} \quad (4)$$

시간이 지남에 따른 에너지 유출은 없으며 외부환경 때문에 CSMA/CA의 실패확률은 없다고 가정한다.

표 1. 실험 파라미터
 Table 1. Simulation Parameters

Parameter	Value
Slot Duration	60
Superframe Slot	14
Superframe Duration (Slot Duration * Superframe Slot)	840
MAC Beacon Order	5
MAC Superframe Order	3
Beacon Interval	26880
Number of End Device	30
Total number of Event Time	70000

기존 구조에서는 CSMA/CA수행 결과 데이터 전송 성공확률이 8%, CAP 구간에서 68%, CFP에서 31% 비율로 전송되었고 제안하는 구조에서는 데이터 전송확률 및 CFP가 증가되었고 상대적으로 CAP 구간의 감소로 인하여 데이터 신뢰성이 향상되었다.

표 2. 구조에 따른 전송 비율
 Table 2. Transmission ratio by structure

슈퍼프레임 타입	IEEE 802.15.4 구조	제안하는 구조
프레임 전송 성공 비율	8.48	13.8
CAP 전송 비율	68.75	31.25
CFP 전송 비율	53.57	46.42

그림 7은 기존의 슈퍼프레임 구조와 제안하는 구조의 슈퍼프레임을 코디네이터를 기준으로 수신하는 프레임과 송신하는 프레임으로 나누어 프레임의 상태에 따른 에너지를 소모 값을 실험한 결과이다. 그 결과 송신 프레임은 10%, 수신 프레임은 25%가량 에너지 소모가 감소하는 것을 볼 수 있다.

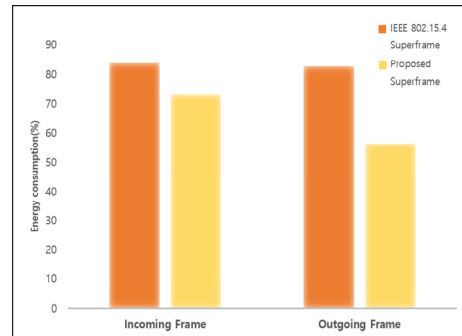


그림 7. 실험 결과
 Fig. 7. Simulation result

V. 결론

사물 인터넷 시장이 점차 산업용에서 홈 네트워크로 개인이 하나의 장치에서 다수의 장치를 가지듯이 하루가 달리 시장 넓어지는 것과 동시에 웨어러블 디바이스까지 하루가 달리 새롭게 발명되고 있다. 그로인해 블루투스나 NFC 그리고 ZigBee에 이르기까지 저가, 저전력 디바이스가 중요시 연구되고 있다. 본 논문에서는 기존의 IEEE 802.15.4 슈퍼프레임 구조에서 스케줄링 구간과 분리된 CAP 구조를 가진 슈퍼프레임 구조와 LQI 그리고 WFQ를 통해 기존의 ZigBee에서 좀 더 에너지 소모를

감소하고 데이터 성능을 향상시킬 수 있을지 실험하였다.

향후에는 mBed을 통해 실제 전력소모와 다양한 환경과 복잡한 데이터 전송에 대해 시뮬레이션을 해볼 필요성이 있다. 또한 다양한 변수를 통해 시뮬레이터에 대한 보완과 구현되지 않은 NWK, APL 계층에 대해 확장이 필요하다.

References

- [1] Alliance, ZigBee. "ZigBee Specification, 2008.", 2008.
- [2] IEEE 802 Working Group. "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)." IEEE Std 802, 2011.
- [3] Park, Pangun, Carlo Fischione, and Karl Henrik Johansson, "Performance analysis of GTS allocation in beacon enabled IEEE 802.15.4." 2009 6th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, pp.1-9, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1109/sahcn.2009.5168958>.
- [4] Paso, Tuomas, Juha-Pekka Makela, and Jari Iinatti. "Enhancing the IEEE 802.15.4 MAC with dynamic GTS allocation for medical applications." Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), pp.1-5, 2011.
- [5] Mustafa, Mustafa El Gili, and Samani A. Talab, "The Effect of Queuing Mechanisms First in First out (FIFO), Priority Queuing (PQ) and Weighted Fair Queuing (WFQ) on Network's Routers and Applications.", Wireless Sensor Network, Vol.8, pp.77-84, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.4236/wsn.2016.85008>.
- [6] Diallo, Chérif, Michel Marot, and Monique Becker, "Using LQI to improve clusterhead locations in dense zigbee based wireless sensor networks.", 2010 IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. IEEE, pp.137-143, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1109/wimob.2010.5644979>.
- [7] Aduayom-Ahego Kovi, Takouda Bleza, Inwhee Joe, "A GTS Scheduling Algorithm for Voice Communication over IEEE 802.15.4 Multihop Sensor Networks", JASC, Vol. 1, No. 2, pp.34-38, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.7236/jasc2012.1.2.7>.
- [8] Seung-Dae Lee, Yong-Chae Jung, "Spatial Reuse based on Power Control Algorithm Ad hoc Networ", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society(JKAIS), Vol. 11, No 1, pp.119-124, 2010.
- [9] Young-II Kim, "A Study on Data Processing Methodology of Picking System using Zigbee Wireless Communication", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), Vol. 13, No. 6, pp. 269-274, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.7236/jiibc.2013.13.6.269>.
- [10] Choon-Sung Nam, Kyung-Soo Jang, Dong-Ryeol Shin. "Energy-Efficient Data Aggregation and Dissemination based on Events in Wireless Sensor Networks", JIIBC, VOL. 11, No. 1, pp.35-40, 2011.

저자 소개

천 영 조(준회원)



- 2015년 : 세명대학교 컴퓨터학부 이학사
- 2015년 ~ 현재 : 세명대학교 일반대학원 석사과정 (컴퓨터학 전공)

인 치 호(정회원)



- 2014년 제14권 제6호 참조