
IEEE 802.15.4 MAC 프로토콜의 성능 평가 및 실험

김병호*

Experimental Study on Performance Evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC Protocol

Brian Kim*

요 약

802.15.4 네트워크의 성능 분석에 대한 연구가 활발히 진행되었는데 기존의 연구는 시뮬레이션이나 수학적 모델링에 의한 분석이 대부분이며 실제 동작 환경에서의 실험을 통한 성능 평가는 미미하였다. 본 논문에서는 802.15.4 MAC을 탑재한 센서 노드 장비를 사용하여 다양한 환경에서 그 성능을 실측하였다. 실험을 통해 1) 802.15.4 MAC의 최대 처리율, 2) 여러 개의 노드들이 경쟁할 경우의 MAC 공정성, 3) 동일한 대역폭을 사용하는 무선랜 공존 시 충돌에 따른 성능 변화를 측정하고 패킷손실률과 최대처리율로 분석하였다.

ABSTRACT

In spite of the large interest in the 802.15.4 standard, no realistic experimental research of its behaviour exists to date except a few works by simulations and analytical modeling. In this paper, we have established realistic environment of IEEE 802.15.4 network and analyze its behaviour under various conditions as like 1) maximum throughput of 802.15.4 MAC, 2) MAC fairness, and 3) throughput and error rate under co-existence of 802.11 Wi-Fi wireless networks.

키워드

IEEE 802.15.4, 무선 센서 네트워크, ZigBee

I. 서 론

이동의 편리함과 장소에 제약이 없는 무선네트워크의 발달과 소형 무선 센서노드 기술의 발전으로 무선 센서 네트워크가 실용화 단계에 접어들고 있다. 센서 네트워크는 생태 환경, 가정, 병원, 창고, 군, 구조물 감시 등 다양한 분야에서 실시간 정보 수집 및 제어에 이용될 수 있다. 응용 분야의 다양함에도 불구하고 센서 네트워크의 공통적인 특성의 하나는 저전력, 저속의 무선 통신 방식이다. IEEE 802.15.4 ZigBee는 이러한 요구에 가장 부

합하는 프로토콜로 받아들여지면서 이에 대한 많은 연구가 이어지고 있다[1,2].

응용에 따라 차이는 있지만 무선 센서네트워크 시스템을 구성하는 센서 노드의 수는 적게는 수십에서 많게는 수 만개에 이른다. 따라서, 많은 센서노드들이 조밀한 공간내에 포설될 경우, 무선 통신 채널에 대한 확보경쟁과 상호 간섭 등으로 네트워크의 성능 저하가 필연적으로 수반된다. 이를 분석하기 위한 많은 연구가 수행되었는데 최근에는 센서 네트워크를 위한 802.15.4의 성능 분석에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다[3,4,5].

그러나, 현재까지의 802.15.4. 성능분석에 대한 연구는 시뮬레이션과 수학적 모델링을 통한 접근방식이 대부분이며 실제 운용상의 실험은 많지 않다. 특히, 단순히 충돌에 의한 패킷 손실이나 최대 처리율 외에 노드간 공정성 및 무선랜 공존시의 성능분석에 대해서는 더욱 그러하다.

본 논문에서는 802.15.4의 성능분석을 위해 상용화된 모델을 사용하여 1) 802.15.4 MAC의 최대 처리율, 2) 여러 개의 노드들이 경쟁할 경우의 MAC 공정성, 3) 동일한 대역폭을 사용하는 무선랜 공존 시 충돌에 따른 성능 저하 정도를 실험을 통하여 측정하였다. 실험에 사용된 노드는 CC2420 칩에서 TinyOS로 동작하는 옥타콤사의 NANO-24 장비이며 개발환경은 한국전자통신연구원에서 개발한 NANO-QPLUS를 사용하였다. 실험결과는 새로운 센서 네트워크 응용 시스템을 설계할 때 바로 활용될 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 IEEE 802.15.4 MAC 프로토콜의 구조와 기존의 성능분석 연구에 대하여 살펴보고, III장에서 실험 장비 및 환경을 소개하고, 다양한 실험 조건에 따른 실험결과를 IV장에서 제시하고 분석한다.

II. 관련 연구

2.1. IEEE 802.15.4 MAC 프로토콜 개요

IEEE 802.15.4 표준[6]은 물리계층과 MAC (Medium Access Control Sublay) 계층의 규격을 정의하고 있다. 802.15.4 통신은 세 개의 무선 공용 주파수 대역에서 동작하는데 2.4GHz 대역에서 250 kbps, 915MHz 대역에서 40 kbps, 868MHz 대역에서 20 kbps의 전송대역폭을 갖는다. 채널 수는 그림 1과 같이 2.4GHz 대역에서 16 채널, 915MHz 대역에서 10 채널, 868MHz 대역의 1 채널을 포함하여 모두 27 채널을 할당할 수 있다.

802.15.4 네트워크는 기능적으로 두 가지의 형태의 노드들로 구성된다. 즉, 네트워크의 코디네이터 역할을 담당하는 FFD(full-function device)와 단순 기능의 RFD(reduced-function device)이다. RFD는 오직 FFD를 통해서 통신할 수 있고 자신의 데이터 전송만 담당하기 때문에 기능은 물론 하드웨어 구성을 최소화할 수 있어 가격과 전력소모를 줄일 수 있다.

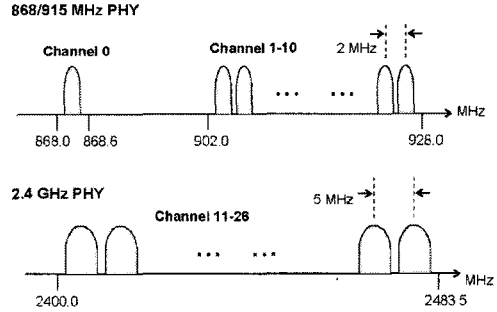


그림 1. IEEE 802.15.4 채널 구성
Fig. 1. Channel Frequency of IEEE 802.15.4

802.15.4 데이터 링크 계층은 MAC 부계층과 LLC (Logical Link Control) 부계층으로 구성된다. MAC 부계층은 SSCS(Service Specific Convergence Sublayer)를 이용하여 802.15.4 LLC Type 1에 서비스를 제공하거나 SSCS를 사용하지 않고 다른 LLC에게 서비스를 제공한다.

가. MAC 프레임 구조

IEEE 802.15.4 MAC 프레임은 비콘, 데이터, 응답 및 명령 프레임 등의 네 가지 형태로 구분된다. 데이터 프레임과 비콘 프레임만이 상위계층에 전달할 정보를 가지고 있으며 확인 프레임과 MAC 명령 프레임은 MAC 계층간의 일대일 통신에 사용된다. MPDU(MAC Protocol Data Unit)로도 일컬어지는 MAC 프레임은 MHR(MAC Header), MSDU(MAC Service Data Unit) 및 MFR(MAC Footer)로 구성된다.

나. 비콘과 슈퍼프레임

IEEE 802.15.4 표준은 보다 짧은 처리시간을 요구하는 서비스에 적합한 슈퍼프레임 구조를 정의하고 있다. 슈퍼프레임 모드에서는 네트워크 코디네이터로 지정된 노드가 주기적으로 비콘을 다른 노드들에게 방송한다.

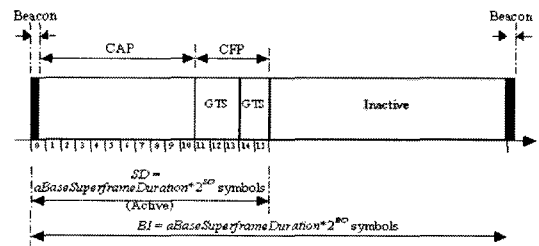


그림 2. 슈퍼프레임 구조
Fig. 2. Structure of Superframe

두 비콘 사이의 활성화(Active) 주기는 슈퍼프레임의 크기에 관계없이 16개의 균등한 슬롯으로 나누어지며, 이들은 비콘과 CAP(contention access period) 및 CFP(contention-free period)의 세 부분으로 구성된다. CAP 구간에서 데이터를 전송하는 노드들은 CSMA-CA 방식에 따라 다른 노드들과의 경쟁에서 발생하는 충돌을 회피한다. 네트워크 코디네이터는 지연없는 처리나 일정 대역폭을 요구하는 노드에 GTS(Guaranteed Time Slots)를 할당할 수 있으며 GTS 슬롯은 그림 2와 같이 다음 비콘 바로 앞에 위치한다.

슈퍼프레임 구조는 비콘 주기(Beacon Order)와 슈퍼프레임 주기(Superframe Order) 값에 의해 결정된다. 슈퍼프레임의 길이를 나타내는 비콘 간격(Beacon Interval)과 활성화 슬롯들의 길이를 나타내는 슈퍼프레임 간격(Superframe Interval)은 다음과 같이 정의된다.

$$BI = aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO}$$

$$SD = aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO}$$

위 식에서 BSD는 슈퍼프레임 주기(SO)가 0일 때의 슈퍼프레임 간격으로써 그 값은 960 심볼이고, BO와 SO의 값은 0에서 14 사이의 정수으로써 SO는 BO보다 작아야 한다.

다. 데이터 전송

비콘을 사용하는 네트워크에서는 각 노드들이 슬롯 기반의 CSMA-CA 방식을 통해 코디네이터로부터 GTS 구간을 할당받을 수 있다. 반면에, 비콘을 사용하지 않는 네트워크에서는 슬롯 구분없는 CSMA-CA 방식을 사용하여 코디네이터로부터 GTS 구간을 할당받을 수 없기 때문에 데이터 전송을 시도하는 노드는 다른 노드가 전송중인지를 확인하고 채널이 사용중이면 랜덤 시간을 대기(Random Backoff)한 후 다시 시도해야 한다.

2.2. IEEE 802.15.4 성능 분석

IEEE 802.15.4 네트워크의 성능 분석에 관한 연구는 비교적 최근에 이루어지고 있다. Zheng[1,7]의 연구는 시뮬레이션에 의한 성능분석 연구의 대표적인 예로써 802.15.4를 위한 NS-2 시뮬레이터를 개발하고 다양한 조건에 대해 성능을 분석하였다. 특히, 슈퍼프레임 구조 변화에 따른 성공 확률, 전송 모드에 따른 패킷 전송률,

802.11과 802.15.4의 성능 비교 등을 분석하였다.

Lu[5]는 802.15.4 MAC의 프로토타입을 NS-2 시뮬레이터에서 구현하고 성능을 평가하였는데 특히, 스타형 네트워크에서의 비콘 사용 모드에 대하여 심층 분석하였다.

Ramachandran[4]는 CSMA-CA에서의 랜덤 시간 대기를 고려한 수학적 확률모델을 제시하였다.

실험을 통한 성능 평가 연구로는, 802.15.4 ZigBee와 802.11 Wi-Fi 무선랜 공존시의 성능을 분석한 Shuaib[8]의 연구와 두 개의 CC2420 모듈을 사용하여 패킷 전송 성능을 측정된 Lee[9]의 연구가 있다.

III. 실험

실험에 사용한 장비는 옥타컴사의 NANO-24 센서 노드 [10]이다. NANO-24의 MCU는 Atmel사의 ATmega128[11] 모듈이며 RF 모듈은 Chipcon사의 CC2420[12]을 사용하였다.

NANO-24는 센서 네트워크를 위한 센서노드 모듈로써 온도, 습도, 적외선, 가스, 초음파, 가속도 등 다양한 센서를 지원한다[10]. 또한, 802.15.4 ZigBee 프로토콜과 TinyOS 센서노드 운영체제를 탑재하였으며 한국전자통신연구원에서 개발한 NANO-QPLUSN 개발환경[13]을 지원한다.

3.1. MAC 최대 전송률

MAC 최대전송률 측정 실험은 그림 3과 같이 하나의 코디네이터 노드와 일반 노드, 그리고 PC로 구성된다. RF 통신의 특성상 거리가 가까울수록 높은 전송률을 보이기 때문에 최대전송률을 측정하기 위해 코디네이터와 노드 간격은 30cm 이내로 하였다.

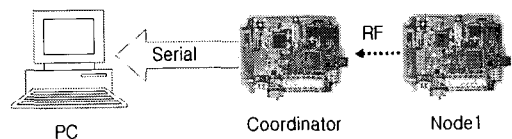


그림 3. MAC 최대 전송률 실험 환경
Fig. 3. Experiment of MAC Throughput

Node1은 127Byte 크기의 패킷을 연속적으로 코디네이터로 전송하고 코디네이터는 Node1으로부터 받은 패킷이 10,000개가 되면 PC에 알려준다. PC는 각각의 데이터가 들어오는 시점을 기억하고 최대전송률을 구하는데, 전송률 R (단위: *bps*)은 아래 식으로 계산된다.

$$R = \frac{10000 \times 27}{T_{end} - T_{begin}} \times 8 \quad \text{수식 2}$$

측정은 다음의 세 가지 환경에서 시행하였다.

- 하드웨어와 하드웨어간
- TinyOS 환경
- NANO-QPLUSN 환경

3.2. MAC 공정성

MAC 공정성(MAC Fairness) 측정에서 각 노드는 일정한 전송률로 코디네이터에게 패킷을 전송하고, 노드의 수를 증가시키면서 각각의 경우의 공정성 유지 정도를 측정하였다. 노드와 코디네이터 간격은 최소로 하였다.

코디네이터는 노드들로부터 받은 총 패킷이 10,000개가 되면 10,000개의 패킷을 수신한 시점과 각 노드별 전송 패킷의 수를 PC로 전달한다. 각 노드의 전송률은 수식 2에 의해 계산된다.

3.3. 802.11 무선랜 간섭

두 대의 PC를 IEEE 802.11 무선랜으로 연결하고 FTP를 통해 트래픽을 발생시킨다. 최대전송률은 5Mbps로 설정하였다. 802.15.4 노드들은 127 바이트의 패킷을 152kbps로 전송한다. 실험은 1,000 프레임 단위로 데이터를 보낼 때의 소요시간과 손실률을 20회 반복하여 측정하였다.

무선랜에서 하나의 채널이 사용하는 대역폭은 22MHz이므로 동일 지역에서 전파 간섭없이 사용할 수 있는 채널은 3 내지 4개이다. 충돌에 따른 손실률 실험은 무선랜과 802.15.4 노드들을 1미터 이내에 설치하고, 802.11 무선랜의 중심 주파수 대역은 2422MHz로 설정하였으며 802.15.4는 11번에서 19번 채널을 이용하였다.

또한, 개방 공간(운동장)과 실내 공간(건물 복도)에서 거리를 달리하며 전송률을 측정하였는데, 이 경우, 무선랜 중심 주파수는 2437MHz이며, 802.15.4의 채널은 무

선랜 중심 주파수와 겹치는 17번과 18번 채널로 실험하였다.

IV. 실험 결과 및 분석

4.1. MAC 최대 전송률 실험

MAC 최대 전송률 측정결과는 표 1과 같다. 운영체제를 탑재하지 않고 단순히 MAC만을 이용했을 때에는 213kbps로써 802.15.4 ZigBee MAC 규격에 명시된 250kbps와 유사한 전송률을 보였다. 그러나, 운영체제를 탑재한 경우에는 TinyOS와 NANO-QPLUSN에서 각각 132kbps와 152kbps로 감소하는 것을 볼 수 있다.

표 1. MAC 최대 전송률 실험 결과
Table 1. MAC Throughput

실험환경	전송률(kbps)
하드웨어와 하드웨어간	213
TinyOS 환경	132
NANO-QPLUSN 환경	152

4.2. MAC 공정성 실험

노드 수에 따른 MAC 공정성 측정 결과는 그림 4와 같다. 노드 수가 일정 수준을 넘어가면 각 노드에서 전송되는 패킷의 수가 서로 달라지는 것을 볼 수 있는데 즉, 공정성이 유지되지 않음을 확인할 수 있다.

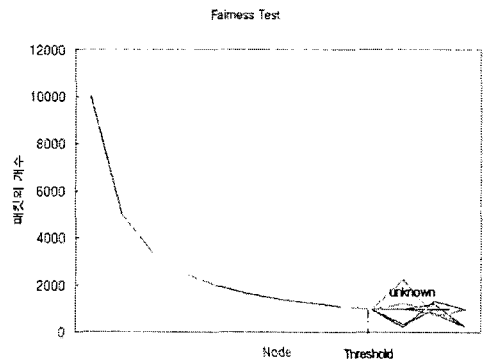


그림 4. MAC 공정성 실험 결과
Fig. 4. MAC Fairness

그림 5는 이 경우의 네트워크 전송률을 나타낸다. 공정성이 깨어지는 경우에 전송률도 하락하는 것을 볼 수 있는데, 그 시점은 각 노드에서 시도된 패킷의 총 합이 NANO-QPLUSN 환경의 최대 전송률인 152kbps를 넘어서는 시점임을 알 수 있다.

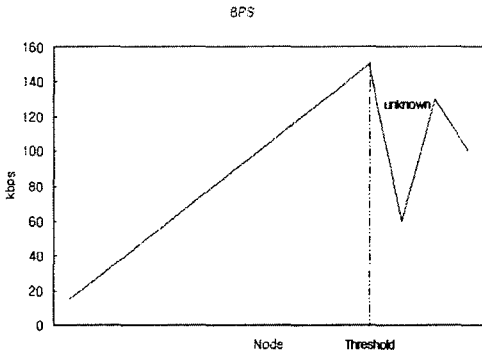


그림 5. MAC 공정성 실험의 전송률
Fig. 5. Throughput in MAC Fairness

4.3. 802.11 무선랜 간섭 실험

그림 6은 802.11 무선랜과의 공존시의 채널별 처리율을 나타낸다. 그림과 같이 802.15.4의 채널 15번이 무선랜의 채널 3번과 겹치고 13번에서 17번 채널이 무선랜의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다.

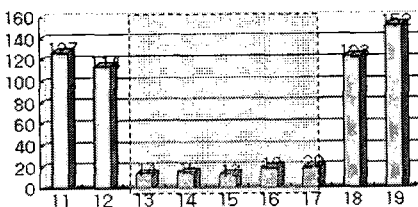


그림 6. 무선랜 간섭시 채널별 처리율
Fig. 6. Throughput under Coexistence

그림 7은 실외에서 측정된 무선랜과의 충돌 실험 결과이다. 그래프에 나타나는 바와 같이 8미터 이상 멀어지면 무선랜의 영향을 거의 받지 않는 것을 알 수 있다.

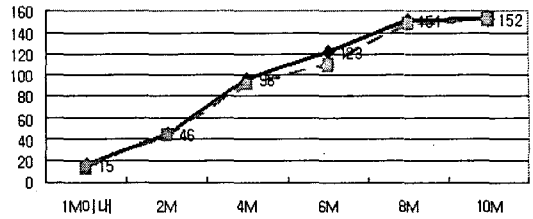


그림 7. 실외에서 무선랜 거리별 처리율
Fig. 7. Throughput in Open Space

반면에 그림 8과 같이 실내(건물 복도)에서의 실험에서는 거리가 30미터 이상이 되어도 무선랜의 영향이 줄어들지 않음을 볼 수 있다.

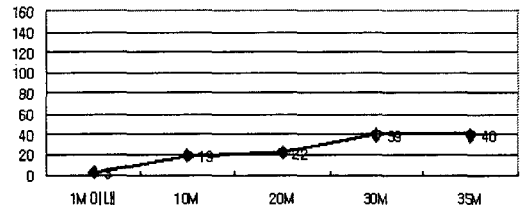


그림 8. 실내에서 무선랜 거리별 처리율
Fig. 8. Throughput in Indoors

V. 결론

본 논문에서는 실험을 통하여 IEEE 802.15.4 MAC의 성능을 측정하고 분석하였다. 노드 간 최대 전송률의 경우, 하드웨어상에서는 표준 규격과 유사한 성능을 보였지만 운영체제를 탑재했을 경우에는 현저한 성능 저하를 확인할 수 있었다.

MAC 공정성 실험에서는 노드들의 총 패킷의 수가 처리할 수 있는 최대 전송률을 넘어서는 경우 공정성이 유지되지 않음을 확인하였다.

또한, 802.11 무선랜과의 충돌 실험을 통하여, 무선랜의 간섭이 실내에서는 심각한 영향을 미치지만 개방된 실외 공간에서는 거리가 8미터 이상이 되면 거의 영향을 받지 않음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] J. Zheng, and M.J. Lee, "Will 802.15.4 Make Ubiquitous Computing a Reality?: A Discussion on a Potential low Power, Low Bit Rate Standard," IEEE Comm. Magazine, vol. 42, no. 6, pp. 140-146, June 2004.
- [2] E. Ferro, F. Fotorti, "Bluetooth and Wi-Fi Wireless Protocols: A Survey and a Comparison," IEEE Wireless Comm., vol. 12, no. 1, pp. 12-16, Feb., 2005.
- [3] Jin-Shyan Lee, "An Experiment on Performance Study of IEEE 802.15.4 Wireless Networks," IEEE Emerging Technologies and Factory Automation, 2005
- [4] I. Ramachandran, "Analysis of the Contention Access Period of IEEE 802.15.4 MAC," ACM Trans. on Sensor Networks, 2006.
- [5] 김동일, 송창안, "에너지 효율을 고려한 다중홉 센서망에서의 MAC 프로토콜 구현," 한국해양정보통신학회논문지, Vol. 8, No. 4, pp. 793-797, 2004.
- [6] IEEE 802.15.4, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for LR-WPANs, IEEE, 2003.
- [7] J. Zheng and M. J. Lee, "A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4," IEEE Press Book, 2004.
- [8] K. Shuaib, M. Boulmalf, F. Sallabi, A. Lakas, "Co-existence of ZigBee and WLAN, A Performance Study," Wireless and Optical Comm. Networks, 2006.
- [9] J. Lee, "An Experiment on Performance Study of IEEE 802.15.4 Wireless Networks," IEEE Emerging Technologies and Factory Automation, 2005.
- [10] 옥타컴, NANO-24, <http://www.octacomm.net/product/product02.php>, 2006.
- [11] Atmel, AVR 8-bit RISC, <http://www.atmel.com/products/AVR/>, 2006
- [12] Chipcon, SmartRF CC2420 ZigBee Development Kit User Manual, 2004.
- [13] 한국전자통신연구원, Nano-Qplus API 설명서, <http://www.qplus.or.kr/>, 2005.

저자소개



김 병 호(Brian Kim)

1990년 연세대학교 전산학과 졸업
1997년 KAIST 전산학과 (공학박사)
1997년-1998년 포스데이타주식회사

1998년-2005년 Brain21 대표이사
2006년 9월-현재 경성대학교 컴퓨터공학과 초빙교수
※ 관심분야: 임베디드시스템, 센서네트워크