

An Efficient Wireless Sensor Network Design considering the different preamble detection capability

Young-myung Kang*

*Staff Researcher, Network Business, Samsung Electronics, Suwon, Korea

[Abstract]

This paper proposes a method of applying an advanced preamble detection technology to wireless sensor nodes and analyzes the trade-off relationship between throughput and fairness that may occur when sensor nodes equipped with the MIM function compete with the legacy IEEE 802.15.4 sensors. Sensor nodes employing the MIM capability have more chances of concurrent transmissions than the legacy IEEE 802.15.4-based sensor nodes, resulting in gains in terms of throughput, whereas the transmission opportunities of 802.15.4 sensor nodes might be limited due to the additional simultaneous transmissions of the MIM sensor nodes. The extensive evaluation results performed under a test environment built using Python program with reflecting the setting value of a commercial sensor node shows MIM sensor nodes outperform up to 40% over the legacy 802.11 sensors. Meanwhile, it was confirmed that a balance can be achieved in terms of throughput and fairness by properly adjusting the concurrent transmission threshold.

▶ **Key words:** wireless sensor network, mim, capture effect, 802.15.4, temporal fairness

[요 약]

본 논문에서는 진보된 프리앰블 탐지 기술인 MIM을 무선 센서 노드에 적용하는 방안을 제시한다. 또한 MIM 기능을 탑재한 센서 노드들이 IEEE 802.15.4 방식의 센서와 경쟁할 경우 발생할 수 있는 처리량과 공정성 사이의 트레이드오프 관계를 분석한다. MIM 센서들은 IEEE 802.15.4 기반의 센서에 비해 추가적인 동시전송 기회를 가져 처리량 측면에서 이득이 생기는 반면 IEEE 802.15.4 방식의 센서 노드들은 MIM 센서 노드들의 동시다발적인 추가 전송으로 인해 전송 기회를 제한받는다. 성능 평가를 위해 파이썬으로 시험환경을 구축하고 상용 센서 노드의 설정값을 반영하여 모의시험을 수행한 결과 MIM을 적용한 경우 최대 40% 수준의 처리량 향상을 확인하였다. 한편 동시전송 임계값을 적절히 조절함으로써 처리량과 공정성 측면에서 균형을 맞출 수 있음을 확인하였다.

▶ **주제어:** 무선 센서 네트워크, 메시지인메시지, 캡처 효과, 802.15.4, 시간 공정성

-
- First Author: Young-myung Kang, Corresponding Author: Young-myung Kang
 - *Young-myung Kang (kang.youngmyoung@gmail.com), Network Business, Samsung Electronics
 - Received: 2020. 10. 13, Revised: 2020. 11. 10, Accepted: 2020. 11. 10.

I. Introduction

IoT로 인해 무선 연결을 지원하는 기기들이 폭발적으로 늘어나고 있다. 이와 더불어 무선망의 연결성을 개선하고 효율적인 전송 기법을 통해 한정적인 무선자원의 한계치까지 전송 능력을 증가시키는 노력이 계속되고 있다 [1-8]. 특히 대규모로 배포 및 설치되는 무선 센서망의 전송 성능을 개선하는 것은 또 하나의 중요한 연구 주제다. 본 연구에서는 무선 센서의 동시전송 성능을 개선하는 방안을 제시하고 이로 인한 시스템 측면의 영향을 분석한다.

기존의 IEEE 802.15.4에 기반한 MAC 프로토콜을 사용하는 무선 센서들은 그림 1과 같이 인접 기기 간 패킷 충돌을 방지하기 위해 CCA (Clear Channel Assessment)를 사용한다. 따라서, 다른 센서 노드가 전송 중인지를 확인한 다음 무선 채널에 다른 센서의 전송이 없다고 판단할 때 자신의 전송을 시작한다. IEEE 802.11을 사용하는 무선랜도 동일한 이유로 패킷 전송 간 간섭과 충돌로 인한 전송 실패를 방지하기 위해서 동시전송을 허용하지 않는다. 그러나 실험을 통해 밝혀진 바와 같이 무선망에서 동시 전송된 패킷들도 전송 순서와 상대적인 신호세기에 따라 전송이 모두 성공할 수 있다는 연구결과는 무선망의 시스템 처리량을 극대화 할 수 있다는 기반을 마련해주었다[6-8].

무선 랜카드는 자신이 목적지인 신호가 충분한 신호 대 간섭 잡음비 (Signal to Interference plus Noise Ratio, 이하 SINR)을 가지고 간섭 신호보다 먼저 도착하거나 혹은 간섭 신호의 프리앰블 (preamble) 시간 이내에 도착하면 물리계층의 캡처 효과 (PHY Capture Effect)를 통해 성공적인 전송이 가능하다 [3][5]. 한편, MIM (Message In Message)[8] 기능이 구현되어 있는 Qualcomm Atheros사의 칩셋[9]을 사용하는 무선 랜카드의 경우 향상된 프리앰블 탐지기 (Advanced Preamble Detection)의 효과로 인해 의도한 신호가 충분히 큰 SINR 값을 가지는 경우 간섭 신호의 프리앰블 시간 이후에 도착해도 캡처가 될 수 있다. 이것을 MIM 캡처 효과 (MIM Capture Effect)라고 한다. 그림 2는 앞서 설명한 물리계층의 캡처와 MIM 캡처의 차이를 보여주고 있다. [7]을 통해 MIM 캡처 가능한 임계값을 확인할 수 있다.

본 논문에서는 무선 센서망에 MIM (Message In Message) 기능을 적용하는 방안을 제시하고, 기존의 IEEE 802.15.4를 기반으로 하는 센서들과 MIM 센서들이 경쟁할 때 발생할 수 있는 처리량(t-put)과 공정성

(fairness) 간의 트레이드오프(trade-off) 관계를 분석해 보았다. MIM을 통한 동시전송 기능은 MIM 노드들의 처리량면에서는 유리하게 작용할 수 있지만 IEEE 802.15.4 방식의 센서 노드들의 전송 기회를 지연시키거나 혹은 동시전송으로 인한 패킷 충돌로 인해 전송된 패킷 전체의 실패를 초래하는 부작용을 초래할 수도 있다[10][11].

본 논문에서는 성능 평가를 위해 다음과 같은 모의시뮬을 했다. 파이썬(Python)으로 다양한 시험환경을 구축하고 상용 센서 노드의 설정값을 반영하여 MIM을 센서 노드에 적용한 결과, 최대 40%의 처리량 측면의 개선을 확인할 수 있었다. 한편 실험 결과를 통해 동시전송 임계값이 시스템 성능에 직접적으로 영향을 주는 요소임을 확인하였고 동시전송 임계값을 적절히 조절하면 시스템 처리량 및 공정성 면에서도 균형을 맞춘 결과를 도출할 수 있음을 확인하였다.

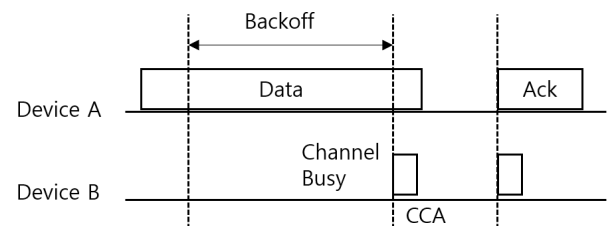


Fig. 1. IEEE 802.15.4 CCA

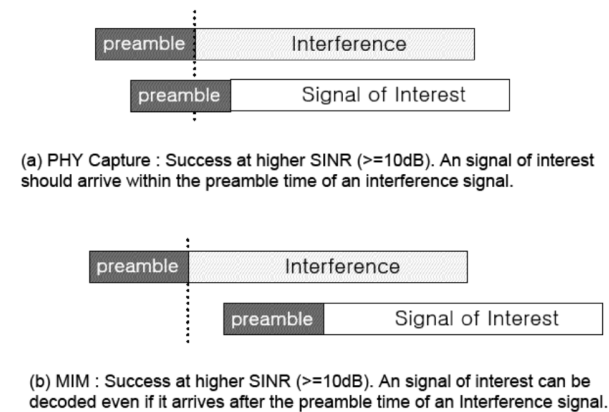


Fig. 2. PHY Capture vs. MIM Capture

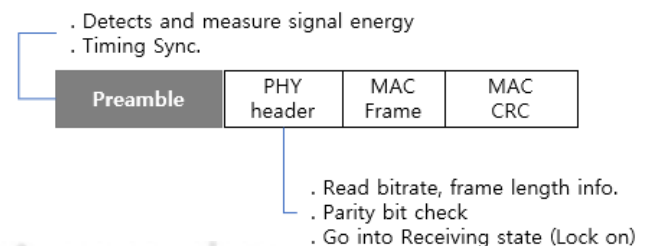


Fig. 3. IEEE 802.11 WLAN frame structure

논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 관련 연구를 소개하고 III장에서는 802.11 무선랜의 MIM 프리앰블 기법을 무선 센서 네트워크에 적용하는 방법을 논한다. IV장에서는 성능 평가를 통해 시스템의 동작을 분석하고 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. Related Work

1. MIM in WLANs

무선랜의 MIM 기능을 이해하기 위해서 무선랜의 프레임 수신 절차를 설명한다. 그림 3을 통해 알 수 있듯이 수신자 입장에서는 우선 프리앰블을 탐지해야 한다. 프리앰블은 프레임의 시작을 알려주며 동시에 시간 동기화를 위해서 사용된다. 다음으로는 물리계층 헤더 정보를 읽어서 전송률 (bit rate) 및 프레임의 길이 등에 대한 정보를 얻는다. 만일 CRC에 문제가 없고 자신이 목적지라고 판단하면 데이터 수신을 시작하기 위해 수신 모드 상태로 라디오를 전환한다. MIM 기능이 탑재되지 않은 기존의 랜카드는 더 이상 프리앰블을 탐지하지 않는다. 이 상태를 Lock On (또는 engagement) 상태라고 말한다. 반면 MIM 기능을 탑재한 Qualcomm Atheros사의 랜카드는 자신이 목적지인 프레임의 전송이 있는지 새로운 프리앰블을 계속 탐지한다. 따라서, 자신이 목적지가 아닌 프레임을 수신하는 도중에 새로운 강한 프레임을 탐지할 경우 수신 중인 프레임을 버리고 새로운 프레임에 재동기화하여 수신을 시작할 수 있다. 이는 수신 성능을 개선하여 프레임의 성공적인 수신율을 높이려는 시도이다. 왜냐하면 한번 Lock On 상태에서 프레임 수신에 실패하면 더 좋은 신호 강도를 가진 다른 프레임을 받을 수 있는 기회를 상실하기 때문이다.

2. Fairness

IEEE 802.11 a/b/g/ac/be 등의 무선랜 표준들은 채널 상태에 따른 다양한 전송률을 지원한다. 동일한 무선랜에 서로 다른 데이터 전송률을 사용하는 여러 개의 단말들이 접속되어 있을 때 낮은 전송률로 전송하는 단말이 채널 자원을 오래 점유하여 높은 전송률을 사용하는 단말의 처리량을 낮추어 결과적으로 시스템 전체의 성능을 저하시키는 성능 이상 (Performance Anomaly)[10]을 유발하게 된다. 이 문제를 해소하기 위해 각 단말별 처리량의 공정성이 아닌 각 단말의 전송시간을 공평하게 보장하는 시간 공정성 (Temporal Fairness) 개념이 제안되었다[10][11]. 이를 활용하는 가장 대표적인 예는 그림 4

의 IEEE 802.11e EDCA의 TXOP (Transmission Opportunity)로 기기별로 전송률과 상관없이 동일한 시간만큼 채널을 점유하는 것이다. 이로 인해 전송률이 높은 기기가 채널을 사용하는 시간이 많아져 시스템 처리량은 증가하고 시간 공정성은 높아지게 된다.

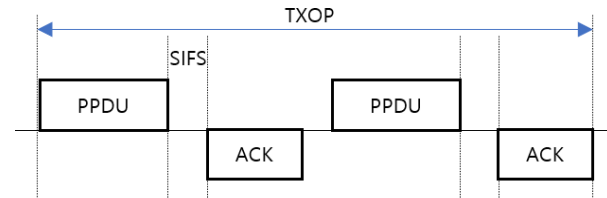


Fig. 4. TXOP in 802.11e

무선 센서망에서도 MIM을 적용한 단말과 적용하지 않은 단말 사이에 전송 기회가 달라 특정 단말이 전송 기회를 점점 더 상실하는 문제(starvation)가 발생할 수 있다. 따라서 시스템 처리량과 공정성 사이의 트레이드오프를 고려해서 시스템을 디자인하는 것이 중요하다. [7][10] 등의 최신 연구에서도 MIM의 캡처 효과에 대해서는 다루었으나 MIM 적용으로 인한 공정성 문제에 대해서는 특별한 언급이 없었다. 반면에 본 논문에서는 MIM 적용으로 인한 전송 기회의 차이를 공정성 측면에서 다루었다는 점에서 차별점이 있다.

본 연구에서는 시간 공정성을 확인하기 위해 MAC 프로토콜의 공정성 척도(metric)로 널리 사용되고 있는 Jain의 공정성 지표 (Fairness Index)[12]를 이용하였다.

$$FairnessIndex = \frac{(\sum x_i)^2}{(n \sum x_i^2)} \quad (1)$$

식 (1)에서 x_i 는 i 번째 노드의 처리량 (t-put), n 은 망에 있는 센서 노드들의 수를 말한다. 즉 전체 망의 각 센서 노드들이 동일한 조건하에서 얼마나 트래픽을 균등하게 처리하는지 보여줄 수 있으며, 이는 곧 동일한 조건하에서 각 노드별 전송 기회의 공정함이 어느 정도인지를 확인할 수 있는 지표가 된다. 공정성 지표는 0에서 1 사이의 값을 가지며 1에 가까운 값일수록 시스템이 공정하다는 것을 의미한다.

III. Adopting MIM in Wireless Sensors

그림 5는 무선 센서 노드에 기본으로 사용되는 802.15.4 프레임 구조를 보여주고 있다. 무선 센서 노드

들도 신호의 시작을 탐지하고 동기화를 하기 위해서 802.11 방식과 동일하게 프리엠블을 사용한다. 32bit의 프리엠블은 특정 비트 스트림의 약속된 순서(bit stream sequence)로 구성되며 가장 낮은 전송률로 전송되어 수신자 측에서 패킷의 시작을 쉽게 탐지할 수 있도록 한다. 8bits의 Start of Packet Delimiter는 PHY 헤더가 시작 되는 지점을 알리는 역할을 한다. PHY 헤더는 CRC(Cyclic Redundancy)를 포함한 MAC 데이터 부분 전체 길이를 나타낸다. 이는 수신자 노드가 언제까지 라디오를 수신 상태로 유지해야 하는지를 나타낸다. 따라서 802.15.4 프레임의 프리엠블을 그림 6과 같이 MIM기능이 가능하도록 변경하여 (MIM-aware 또는 MIM-capable Preamble) CCA를 통한 채널의 상태를 기준으로 동시전송 가능성을 판단하고 성공적인 전송이 예측될 때는 동시전송을 허용한다. 이러한 동시전송 기능은 신호의 세기를 나타내는 캡처 임계값과 전송 타이밍을 나타내는 캡처 윈도우에 영향을 받는데 예를 들어 2.4GHz에서 O-QPSK 모듈레이션을 사용하는 802.15.4 라디오에서는 2~3dB의 임계값과 128us 캡처 윈도우 값을 설정하는 경우 동시전송이 가능함이 실험적으로 알려져 있다[7]. MIM 기능의 탑재를 위해서는 캡처 임계값 및 캡처 윈도우에 대한 알고리즘이 필요하며 이 값들은 MAC 계층의 소프트웨어 수정으로 처리될 수 있기 때문에 하드웨어의 변경을 필요로 하지 않는다는 장점이 있다.

그림 7을 통해 프리엠블 수신과정에 대해서 조금 더 자세하게 설명한다. 프리엠블은 특정 비트 스트림의 순서로 구성되어 특정 패턴 (그림 7의 Reference Data에 해당)이 감지되면 상관관계 계수값 (correlation coefficient)의 순간적인 변화 (peak detection)를 통해 탐지할 수 있는데 기존 802.15.4 라디오에서는 수신자가 일단 프리엠블을 탐지하면 즉시 패킷을 수신 상태로 전환하므로 더 좋은 신호강도를 가진 패킷이 들어와도 추가로 수신하지 못한다. MIM 기능을 위해서 수신자는 프리엠블 탐지를 연속적으로 할 수 있도록 프리엠블 탐지 조건에 대한 하드웨어 또는 소프트웨어 알고리즘을 변경해야 한다. 즉, 프리엠블 Lock On을 풀어주는 방법으로 구현할 수 있을 것이다. 그러나 구현상 내부동작에 해당하는 이 부분은 상용 센서 제조업체들의 몫으로 남겨둔다. 관련하여 이 방법을 무선랜에 적용한 사례가 [9]에 소개되어 있다.

다음 장에서는 MIM을 적용한 센서 노드들과 802.15.4 기반의 센서 노드들이 하나의 센서망에서 동작할 때 발생할 수 있는 문제점에 대해서 논한다.

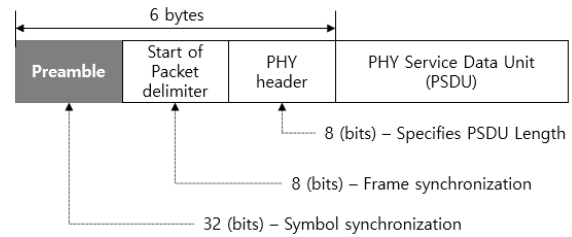


Fig. 5. IEEE 802.15.4 CCA

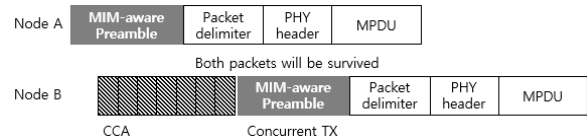


Fig. 6. Employing the MIM functionality in IEEE 802.15.4

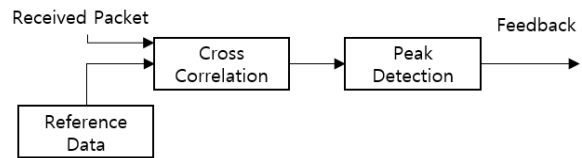


Fig. 7. Preamble detection procedure

IV. Performance Evaluation

1. Topology and Settings

N개의 노드로 구성된 무선 센서망에 무선 센서들이 100 x 100 (m) 공간에 일정하게 무작위 (uniformly randomly)로 분포되어 있고, 서로의 전송 신호는 서로에게 간섭을 줄 수도 있고 주지 않을 수도 있다. 각 센서 노드들의 전송에 대한 신호 세기는 게이트웨이 노드에서 간섭 맵 (RF interference map)을 형성하고 관리하고 있음을 가정한다. 간섭맵에 대해서는 [13][14]를 참고한다. 기타 다른 설정값들은 상용으로 사용되는 CC2420 [15]의 설정값을 그대로 적용하였다. 모든 시험은 파이썬으로 구현하여 진행하였다.

2. Comparing MIM and 802.15.4

우선 MIM 노드들만으로 구성된 환경과 802.15.4만으로 구성된 환경, 마지막으로 MIM 기능을 탑재한 비율을 50%로 설정하고 시스템 전체 처리량(t-put)을 비교하였다. N의 개수를 각각 20, 40, 60으로 변경하여 시험하였다. 그림 8의 결과를 보면 MIM기능을 탑재한 센서 노드로 구성된 경우에 802.15.4로 구성된 센서 노드들의 전송에 비해 평균적으로 40% 정도 더 많은 시스템 처리량을 얻을 수 있었다. 이는 모두 동시전송 기회의 차이로 인한 결과로 해석할 수 있다. 하지만 802.15.4와 MIM 센서 노드들의 비율을 각각 50%로 설정한 경우에는 시스템 처리량이 기대만큼 높지 않았고

특히 $N=40$, $N=60$ 일 경우에는 오히려 802.15.4를 사용하는 것보다 낮아지는 현상도 보였다. 이것은 무작위로 배치한 센서 노드들의 간섭으로 인해 동시전송 충돌로 인한 전송 실패와 MIM 노드들의 동시전송이 802.15.4 센서들의 전송 기회를 지연시킨 복합적인 요인의 결과로 해석된다.

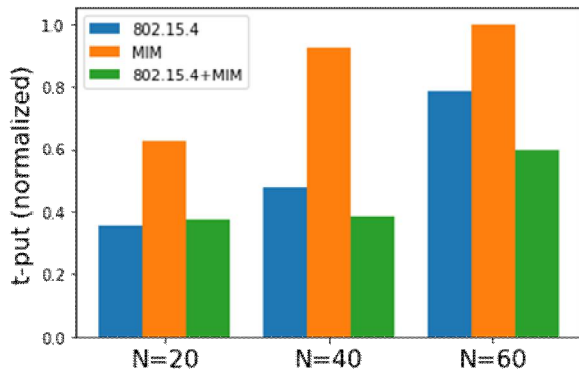


Fig. 8. System Throughputs according to the difference schemes (MIM vs. 802.15.4 vs. Mixed)

3. Tuning the MIM threshold values

동일한 시험 조건에서 MIM 동시 전송 임계값을 변화시켜 동시전송이 발생하는 조건을 조금 더 엄격하게 제한하였다. 그림 9에서 보는 바와 같이 802.15.4+MIM의 경우 전체 시스템 처리량이 약 15% 개선되었다. 이 시험결과를 통해 동시전송 임계값이 시스템 성능에 직접적으로 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 대규모 센서 시스템의 토폴로지를 미리 알 수 없는 한계가 있으므로 이 부분은 무선 센서 시스템 관리자를 통한 정교한 튜닝이 요구된다.

Table 1. Fairness Index (Mixed case)

Item	Before Tuning	After Tuning
N = 20	0.79	0.84
N = 40	0.61	0.88
N = 60	0.58	0.84

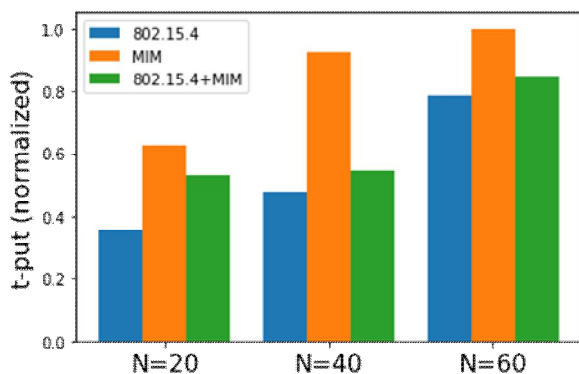


Fig. 9. System throughputs after adjusting the MIM Capture Threshold

4. Fairness Analysis

시스템의 각 센서별 처리량에 대한 공정성을 평가하기 위해서 Mixed Case (802.15.4 + MIM)에 해당하는 공정성 지표 측정값을 Table 1에 정리하였다. 그림 8에 해당하는 공정성 지표를 보면 N 이 20, 40, 60인 모든 경우에 대해 동시전송 임계값을 조정하여 동시전송 기회를 낮춘 그림 9의 결과에 비해 공정성이 다소 개선된 것을 볼 수 있다. MIM 노드들은 자신의 전송기회 이외에 다른 노드의 전송중에도 적극적으로 동시전송을 시도하기 때문에 자신의 전송기회도 많아지고 처리량 역시 증가된다. 반면 CCA를 사용하여 동시전송을 허용하지 않는 802.15.4 노드들은 MIM 노드들의 잦은 동시전송으로 자신의 전송은 지속적으로 지연시키고, 한편 자신이 먼저 전송을 시도한 경우에도 MIM 노드들의 동시전송으로 인한 전송 실패를 겪게 되는 손해를 보게 된다. 이 결과를 통해 알 수 있는 것은 MIM과 같은 탐욕적 알고리즘(greedy algorithm)을 사용하면 공정성 훼손이라는 부작용이 따른다는 것이다. 처리량에 이득이 있으면 공정성이 훼손되는 트레이드오프 관계가 일반적인데 MIM과 같은 동시전송을 사용하는 경우에는 충돌로 인한 복합적인 요소가 추가되어 상관관계를 명확히 확인하기에 어려운 부분이 있었다.

V. Conclusion and Future Work

본 논문에서는 무선 센서망에 MIM (Message In Message) 기능을 적용하는 방안을 제시하고 기존의 IEEE 802.15.4를 기반으로 하는 센서들과 MIM 센서들이 경쟁할 때 발생할 수 있는 처리량과 공정성 사이의 트레이드오프를 분석하였다. MIM 센서 노드들은 IEEE 802.15.4 방식의 센서 노드에 비해 동시전송 기회를 더 많이 가짐으로써 처리량 측면에서 이득을 볼 수 있으나 IEEE 802.15.4 방식의 센서 노드들의 전송 기회를 박탈하는 트레이드오프 관계가 존재한다. 본 논문에서는 실험을 통해 동시전송 임계값이 시스템 성능에 직접적으로 영향을 주는 요소임을 확인하였다. 그러나 무선 센서망의 토폴로지는 선결정 되지 않으므로 보편적인 임계값을 적용하기에는 한계가 있어 정교한 임계값 설정에 대한 방안은 추가 연구가 필요하다. 향후에는 802.15.4 노드들과 MIM 노드들이 공존할 때의 처리량과 공정성 간의 트레이드오프 관계를 더욱 명확히 규명하기 위해 시스템 레벨의 전송 성공률과 충돌률 그리고 전송 지연 시간에 대한 추가 연구를 실시할 예정이다. 이러한 추가 연구는 최적화

된 시스템 설정값을 도출하여 무선 센서망 전체 성능을 향상시키는 기초가 될 것으로 전망한다.

REFERENCES

- [1] H. Lee, J. Kim, C. Joo, and S. Bahk, "BeaconRider: Opportunistic Sharing of Beacon Air-Time in Densely Deployed WLANs", IEEE 27th International Conference on Network Protocols (ICNP), pp 1-11, Chicago, Illinois, USA, Oct. 2019. DOI: 10.1109/ICNP.2019.8888044
- [2] J. Choi, "Detection of Misconfigured Wi-Fi Tethering in Managed Networks", Applied Sciences, vol 10, no 2, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10207203>
- [3] M. Mohammad, and M. C. Chan, "Codecast: Supporting Data Driven In-Network Processing for Low-Power Wireless Sensor Networks", ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, pp. 72-83, Apr, 2018, Porto, Portugal, DOI: 10.1109/IPSNS.2018.00014
- [4] T. Atia, M. Heusse, B. Tourancheau, and A. Duda, "Experimental Characterization of LoRaWAN Link Quality", in 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pp. 252-261, HI, USA, Feb 2019. DOI: 10.1109/GLOBECOM3843.7.2019.9013371
- [5] B. Khan, R. A. Rehman, and B-S. Kim, "A Joint Strategy for Fair and Efficient Energy Usage in WLANs in the Presence of Capture Effect", Electronics vol 8. Issue 4, 386, Mar 2019. DOI: 10.1145/3067665.3067672
- [6] I. Selinis, K. Katsaros, S. Vahid, R. Tafazolli., "Exploiting the Capture Effect on DSC and BSS Color in Dense IEEE 802.11ax Deployments", in WNS3 '17: Proceedings of the Workshop on ns-3 June 2017, pp. 47-54, NY, US, <http://dx.doi.org/10.1145/3067665.3067672>
- [7] M. Zimmerling, L. Mottola, and S. Santini, "Synchronous Transmissions in Low-Power Wireless: A Survey of Communication Protocols and Network Services", 2020, arXiv:2001.08557
- [8] J. Manweiler, N. Santhapuri, S. Sen, R. R. Choudhury, S. Nelakuditi and K. Munagala. "Order Matters: Transmission Reordering in Wireless Networks", IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 20, pp. 353-366. Apr 2011. DOI:10.1109/TNET.2011.2164264
- [9] Qualcomm Atheros communication. <https://www.qualcomm.com/>
- [10] X. Ma, P. Zhang, O. Theel, and J. Wei, "Gathering data with packet-in-packet in wireless sensor networks" Journal of Computer Networks, vol 170, Apr 2020, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107124>
- [11] F. Safdari, and A. Gorbenko, "Experimental Evaluation of Performance Anomaly in Mixed Data Rate IEEE802.11ac Wireless Networks", in Proceedings of The 10h IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, pp. 82-87, June 2019. Leeds UK, DOI: 10.1109/DESSERT.2019.8770038
- [12] R. Jain, D.-M. Chiu, and W. R. Hawe, "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system", vol. 38. ERL, Digital Equipment Corporation Hudson, MA, Sep 1984. arXiv:cs/9809099v1
- [13] Y. Kang, J. Yoo, J. Lee and C. Kim, "A distributed message in message aware concurrent transmission protocol in IEEE 802.11 WLANs", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol 2, Article number: 325, Oct 2012. DOI:10.1186/1687-1499-2012-325
- [14] J. A. Ayala-Romero, J. J. Alcaraz, A. Zanella, and M. Zorzi, "Online Learning for Energy Saving and Interference Coordination in HetNets", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol 37, Issue 6, June 2019. DOI:10.1109/JSAC.2019.2904362
- [15] CC2420 Spec. <https://www.ti.com/product/CC2420>

Authors



Young-myoung Kang received his M.S. and Ph.D. degree in Computer Science and Engineering from Seoul National University in 2003 and 2013, respectively. Young-myoung Kang is currently a research

engineer at Samsung Electronics, Suwon, Korea. He was with LG Electronics as an engineer from Jan. 2003 to Sept. 2006. His research interest includes wireless systems, 5G, IoT with emphasis on WLAN, data science, data analysis and AI.