

# IEEE 802.15.4 네트워크에서 WiFi 네트워크의 간섭 탐지 방법

## A Detection Method of Interference from WiFi Network in IEEE 802.15.4 Network

송 명 렬<sup>1\*</sup>  
Myong Lyol Song

### 요 약

IEEE 802.15.4 네트워크와 WiFi 네트워크가 서로 중첩되게 설치되고 인접한 주파수 대역을 사용하도록 설정된 경우 IEEE 802.15.4 네트워크의 노드들에서 프레임전송지연이 불규칙하게 커지고 프레임 전송이 자주 실패하므로 응용에서 요구되는 전송서비스 품질을 보장할 수 없다. 이 논문에서는 WiFi 트래픽으로 인한 간섭현상을 평가하기 위해 IEEE 802.15.4 네트워크 노드의 전송지연모델과 실험 시스템을 설명한 후 간섭평가요소들을 측정하고 그 특성에 대해서 분석하였다. WiFi 네트워크로부터의 간섭을 판정하기 위해 IEEE 802.15.4 매체접근제어계층과 물리계층 프로토콜 요소를 순차적으로 사용하는 방법이 제안되었다. 제안된 방법은 송신기에서 프레임의 전송실패와 전송지연을 변수로 하는 평가함수가 기준치를 넘는 경우 무선채널의 전력을 집중적으로 측정하여 계산된 평균채널전력으로 간섭을 최종적으로 판정하는 방식이다. 이 방식에 대한 실험결과는 다른 유사한 방식에 비해 간섭에 대한 판정시간은 줄어들고, 판정빈도는 증가함을 보인다.

주제어 : 간섭, IEEE 802.15.4, WiFi, CSMA-CA, 수신신호세기

### ABSTRACT

IEEE 802.15.4 network and WiFi network are installed to overlap each other and configured to use adjacent frequency bands in which case the communication service required by applications can not be guaranteed because of randomly increased frame transmission delay and frequent frame transmission failures at nodes in IEEE 802.15.4 network. In this paper, transmission delay model at IEEE 802.15.4 nodes and an experimental system to evaluate the interference from WiFi traffic are described, then elements for the evaluation of interference are measured with the analysis of their characteristics. A sequential method of using medium access layer and physical layer elements of IEEE 802.15.4 protocols is proposed to decide interference from WiFi network. With the proposed method, if an evaluation function having frame transmission failures and transmission delay as variables returns a value greater than a threshold, intensive measurements of wireless channel power are carried out subsequently and the final decision of interference is made by the calculated average channel power. Experimental results of the method show that the decision time is reduced with increased frequency of decision in comparison to an other similar method.

☞ keyword : interference, IEEE 802.15.4, WiFi, CSMA-CA, RSSI

## 1. 서 론

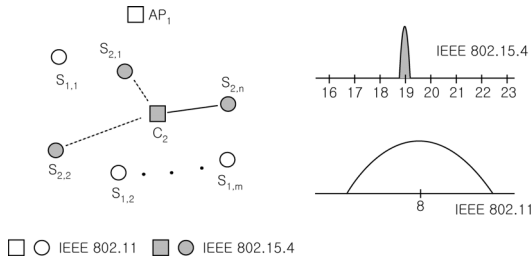
최근에 RFID (radio frequency identification), USN (ubiquitous sensor network) 등과 같은 분야의 연구들이 주목받고 있고 산업체에서는 카드, 보안, 물류 등 RFID의 다양한 제품들이 출시되고 있으며 USN 관련 분야에서도

센서네트워크나 소량의 데이터를 전송하는 네트워크 및 응용에 연구가 활발하게 진행되어 왔다. USN을 지원하는 한 방법으로 IEEE 802.15.4 프로토콜을 사용하는 무선 네트워크가 고려되는데, 데이터 트래픽을 많이 발생시키는 IEEE 802.11 네트워크와 동일한 주파수 영역을 점유하고 공간적으로 중첩되는 경우 간섭이 발생하여 IEEE 802.15.4 노드의 데이터 전송에 장애가 발생한다[1-4]. (그림 1)에  $\{AP_1, S_{1,1}, \dots, S_{1,m}\}$ 로 구성된 IEEE 802.11 네트워크와  $\{C_2, S_{2,1}, \dots, S_{2,n}\}$ 로 구성된 IEEE 802.15.4 네트워크가 중첩되게 설치된 것을 나타냈는데,  $AP_1$ 과

<sup>1</sup> Dept. of Information & Communication Eng., Hoseo Univ., Choongnam-Do, 336-795, Korea.

\* Corresponding author (mlsong@hoseo.edu)

[Received 30 May 2013, Reviewed 9 June 2013, Accepted 5 July 2013]



(그림 1) IEEE 802.15.4와 IEEE 802.11 네트워크의 간섭 (Figure 1) Interference between IEEE 802.15.4 and IEEE 802.11 networks

{ $S_{1,1}, \dots, S_{1,m}$ }은 각각 IEEE 802.11 네트워크에서 AP (access point)와 스테이션을 의미하고  $C_2$ 와 { $S_{2,1}, \dots, S_{2,n}$ }는 각각 IEEE 802.15.4 네트워크에서 코디네이터 (coordinator)와 종단장치 (end device)를 의미한다[5,6]. 예를 들어 사무실에서 WiFi가 지원되는 다수의 노트북 컴퓨터, 스마트폰 등이 IEEE 802.11 네트워크를 구성하고 보안을 위한 각종 센서, 건물의 냉난방 관리를 위한 센서, 절전 관리를 위한 센서들이 IEEE 802.15.4의 네트워크를 구성할 경우 서로 다른 프로토콜을 사용하지만 공간적으로 서로 중첩된다. 그리고 동시에 (그림 1)의 우측에 나타낸 바와 같이 두 네트워크가 사용하는 무선채널이 서로 겹치는 인접한 주파수 대역을 사용하도록 설정된 경우 서로 간에 간섭이 발생하게 된다. IEEE 802.11 프로토콜을 사용하는 WiFi 네트워크로부터 간섭이 발생할 경우, IEEE 802.15.4 네트워크가 공존하기 위해서는 IEEE 802.15.4 네트워크의 노드들이 간섭이 발생하지 않는 다른 채널로 변경하여 간섭을 피하는 것이 일반적인 방법이다. 이와 같이 간섭을 피하기 위해서는 먼저 간섭이 발생하고 있다는 것을 IEEE 802.15.4 네트워크의 노드에서 판단해야 한다.

ZigBee 노드는 매체접근제어 (medium access control) 계층과 물리 (physical) 계층을 IEEE 802.15.4 표준을 사용하고 그 위에 ZigBee의 상위계층 프로토콜들이 구현된다 [7]. 어떤 ZigBee 채널에서 동작하는 ZigBee 네트워크의 노드에 WiFi의 트래픽으로 인해 간섭이 일어날 때, ZigBee 노드 내부에서는 프로토콜의 각 계층마다 서로 다른 요소들을 사용하여 간섭을 판단할 수 있다. IEEE 802.15.4 매체접근제어계층 보다 상위계층에서는 데이터 전송률 (throughput)이 저하되고, 하위계층 프로토콜을 통해 전송을 요청한 데이터에 대해 응답을 받기까지 걸리는 시간 RRT (round trip time)이 증가한다. 그리고 상위계

층 프로토콜에서 데이터 패킷의 순서번호 (sequence number)를 사용할 경우에는 그 값이 1씩 순차적으로 증가되지 않고 몇 단계를 건너 뛴 번호의 패킷이 수신되는 현상이 발생한다. 송신기의 IEEE 802.15.4 매체접근제어계층에서는 데이터프레임의 전송지연이 증가하고 심할 경우에는 몇 번의 백오프 (backoff) 지연과정을 거치더라도 무선채널이 비어있지 않아 해당 데이터프레임에 대해 전송을 포기하게 된다. 그리고 데이터프레임 전송시 프레임헤더에 수신기로부터 응답 (acknowledgement) 프레임 요청한 경우에는 데이터프레임 전송시 동작시켰던 응답프레임의 수신을 기다리기 위한 타이머가 종료되기도 한다. 한편, 수신기의 IEEE 802.15.4 매체접근제어계층에서는 수신된 프레임의 오류가 증가하고, 순서번호에 불연속적인 오류가 발생하기도 하고 물리계층에서는 사용하는 무선채널의 잡음이 커지고 프레임을 수신했을 때 신호의 품질이 저하되고 수신된 신호세기가 변화하는 현상이 발생한다.

이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 관점에서 연구가 이루어져 왔는데, IEEE 802.15.4 매체접근제어계층 보다 상위계층에서 관찰되는 데이터 전송을 저하한 RTT의 증가와 같은 현상은 수신 노드에 부하가 커지거나 멀티홉 (multi-hop) 네트워크에서 송신기와 인접하지 않은 중간 위치의 노드에서 간섭이 발생해도 비슷한 현상이 관찰될 수 있기 때문에 ZigBee 네트워크와 공간적으로 인접하거나 중첩된 WiFi 네트워크로 인한 간섭이 진행 중이라는 것을 판정하는데 사용하기에는 적합하지 않을 수 있다. 매체접근제어계층의 관점에서는 일정시간동안 FER (frame error rate)를 측정하면서 측정된 값들이 정해진 몇 개의 시간구간동안 연속적으로 기준치를 넘으면 간섭으로 판정하는 방법[8], 손실된 패킷과 전송된 패킷의 비율 PLR (packet loss ratio)이 기준치를 넘을 경우 간섭으로 판정하는 방법[9], 데이터프레임을 전송한 후 일정시간 이내에 응답프레임을 수신하지 못하는 경우 NACK로 판정하고 NACK로 판정된 횟수가 연속적으로 기준치 이상 발생할 경우에 간섭으로 판정하는 방법, 연속적으로 수신하지 못한 비콘 (beacon)의 개수가 기준치를 넘을 때 간섭으로 판정하는 방법, 규칙적으로 테스트 프레임을 주고받을 때 연속적으로 테스트 프레임을 수신하지 못하면 간섭으로 판정하는 방법[10] 등등 많은 연구가 이루어졌다. 한편, 무선센서네트워크를 구성하는 노드를 실제로 구현하는데 IEEE 802.15.4 프레임을 송수신할 수 있는 Texas Instrument사의 CC2420, CC2430이 널리 사용되어왔고 최근에는 이 부품의 후속으로 CC2520, CC2530

이 사용되고 있다. 따라서 물리계층의 관점에서는 CC2420, CC2430으로부터 얻을 수 있는 무선채널과 수신된 신호의 특성을 평가하는데 사용될 수 있는 변수들, 예를 들어 프레임이 수신할 때 그 프레임의 일부분에 해당하는 신호의 세기 RSSI (received signal strength indicator), LQI (link quality indicator), 상관계수 (correlation)와 무선채널의 잡음전력 등과 같은 요소의 특성과 WiFi 네트워크 트래픽의 간섭과의 연관성에 대해서 많은 연구가 이루어졌다[11-18]. 프레임이 수신될 때마다 RSSI와 상관계수는 SFD (start-of-frame delimiter) 바로 다음의 8 심볼을 기초로 구해지고, LQI는 상관계수를 기초로 계산된다. 프레임이 수신되지 않는 동안에는 무선채널의 잡음전력의 세기를 구하는데 RSSI값이 기록되는 레지스터가 사용된다[19]. 물리계층에서 관찰되는 요소들을 활용하는 연구는 대부분 실험적으로 관찰된 RSSI나 LQI의 PRR (packet reception rate)과의 관계를 분석하고 있고 PRR이 기준치 보다 작거나 PER (packet error rate)이 기준치 보다 클 경우에 간섭이 있다고 판정하고 추가적으로 RSSI나 LQI의 값을 더 조사하는 방법을 사용하기도 한다. 그런데 이 방법들은 수신된 프레임 및 그 프레임의 일부분에 해당되는 시간동안의 신호 및 무선채널의 조건을 반영하기 때문에 수신기에 도착한 어떤 프레임에 대해 그 프레임이 송신기 내부에서 발생되어 무선채널의 점유상태에 따라 영향을 받는 IEEE 802.15.4 프로토콜의 CSMA-CA (carrier sense multiple access with collision avoidance) 알고리즘에 의해 송신기에서 전송되기 직전까지 겪을 수 있는 백오프지연이나 최대백오프지연 후 실패과정은 알 수 없다. 실제로 실험적인 측정에 의하면 WiFi 트래픽 부하가 커지는 경우 WiFi 채널과 겹치는 ZigBee 채널에는 WiFi 트래픽신호로 인해 무선채널의 전력세기가 증가하고 WiFi 트래픽신호가 채널을 점유하는 시간도 증가하게 되어 ZigBee 장치들이 프레임을 전송하려고 할 때 CSMA-CA 알고리즘에서 백오프지연 여부를 결정하기 위해 CCA (clear channel assessment) 기능을 수행하면 채널이 사용 중이라고 판정할 가능성이 높게 되어 백오프지연과정을 반복하는 횟수가 증가해서 프레임의 전송지연이 커지고 최대백오프지연 횟수에 이르러도 CCA 기능이 사용 중이라고 판정하여 매체접근제어계층에서 프레임의 전송을 포기하기도 한다.

따라서 이 논문에서는 IEEE 802.15.4 네트워크에서 WiFi 트래픽으로 인해 발생하는 간섭을 판단하기 위해 앞에서 기술된 대부분의 수신기 중심의 판단방법과는 다르게 송신기의 관점에서 판단하는 방법을 제시한다. 그

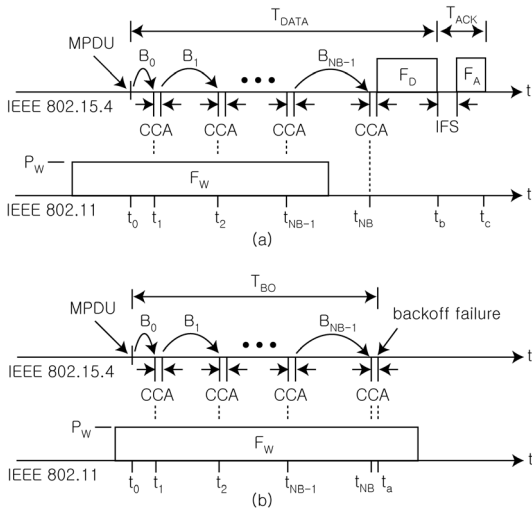
리고 실제 WiFi 네트워크 및 ZigBee 개발키트를 이용하여 제시된 방법이 WiFi 트래픽의 간섭판단에 사용될 수 있는지 실험적으로 확인한다. 이러한 목표를 위해 2장에서 IEEE 802.15.4 프로토콜의 전송지연모델, IEEE 802.15.4 네트워크에서 WiFi 트래픽의 간섭현상을 평가하기 위한 시스템의 구성, 주요 변수들, 그리고 측정방법을 설명하고 측정된 데이터의 특성을 분석한다. 3장에서 송신기에서 IEEE 802.15.4 프로토콜의 매체접근제어계층 및 물리계층의 요소들을 이용한 WiFi 트래픽의 간섭을 판단하기 위한 수단을 정의한다. 4장에서는 3장에서 정의한 방법이 WiFi 트래픽의 간섭여부를 판단하는데 사용될 수 있는지 여부에 대한 실험결과 및 그 특성에 대해서 분석하고 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. IEEE 802.15.4 네트워크에서 WiFi 트래픽의 간섭 현상

### 2.1 IEEE 802.15.4 프로토콜에서 프레임 전송

IEEE 802.15.4 표준에는 코디네이터가 주기적으로 비콘을 전송하는 “beacon-enabled PAN (personal area network)”과 전송요청이 있을 경우에만 비콘을 전송하는 “nonbeacon-enabled PAN”이 정의되어 있다. “Beacon-enabled PAN”은 비콘으로 시작되고 CAP (contention access period) 구간, CFP (contention free period) 구간 그리고 비활성 (inactive) 구간으로 구성되는 슈퍼프레임 (superframe) 구조를 갖는다. 매체접근제어 기능은 CAP 구간에서 CSMA-CA (carrier sense multiple access - collision avoidance) 알고리즘을 사용하여 채널에 대해 서로 경쟁하는 “contention-based access” 방식을 따르고 CFP 구간에서는 코디네이터가 채널의 사용을 제어하여 미리 예약된 GTS (guaranteed time slot)를 사용하는 “contention-free access” 방식을 따른다. “Nonbeacon-enabled PAN”에서는 CSMA-CA 방식이 사용되는데 응답프레임과 데이터 전송요청을 받고 응답프레임이 전송된 직후 이어지는 데이터프레임 외에는 모든 프레임이 CSMA-CA 절차를 거쳐서 전송된다[6]. 이 논문에서는 두 가지 방식의 PAN 중 “nonbeacon-enabled PAN”의 노드들이 WiFi 무선랜과 서로 겹치는 무선채널을 사용할 경우, WiFi 트래픽으로 인해 IEEE 802.15.4 프로토콜을 사용하는 노드들에게 야기되는 간섭현상을 측정하고 분석한다.

(그림 2)에 서로 중첩된 무선채널에 WiFi에서 발생하는 IEEE 802.11 프레임이 존재할 때 IEEE 802.15.4 프레



(그림 2) IEEE 802.11 트래픽 부하가 있을 때 IEEE 802.15.4 프레임의 전송  
(Figure 2) Transmission of IEEE 802.15.4 frames under IEEE 802.11 traffic load

임이 전송되는 과정을 나타냈다. 그림에서  $F_W$ 은 WiFi에서 발생된 프레임,  $F_D$ 와  $F_A$ 은 IEEE 802.15.4 네트워크에서 발생되는 데이터 또는 명령프레임과 이에 대한 응답프레임을 의미한다. (그림 2)에서 IEEE 802.15.4의 매체 접근제어계층에서 MPDU (medium access control protocol data unit)가 시점  $t_0$ 에서 생성되었는데, 이미 WiFi에서 발생된 IEEE 802.11 프레임  $F_W$ 가 채널을 점유하고 전송중인 상황을 나타냈다. (그림 2) (a)에는 MPDU는 총 NB횟수의 백오프지연을 거친 후 비로서 채널이 비는 상황을 맞게 되고 프레임  $F_D$ 의 형태로 전송되어 채널을 점유하며 이에 대한 응답으로서 수신기가 전송한 응답프레임  $F_A$ 가 채널에 나타난다. IEEE 802.15.4 표준에는 응답프레임은 CSMA-CA 알고리즘을 적용하지 않고 전송하는 것으로 규정되어 있다. 매번 백오프지연 후 실행되는 CCA기능은 채널이 비어있는지 확인하는 기능인데, 채널이 비어있다고 판정되면 즉시 전송하고 그렇지 않은 경우에는 한 번 더 백오프지연에 들어간다. 채널에 대한 사용여부 판정은 채널에서 측정되는 에너지가 기준치를 넘거나 IEEE 802.15.4 특성을 갖는 신호를 탐지하거나 또는 이 두 가지가 혼용된 방법이 사용되는데, 널리 알려진 CC2520과 CC2530 칩에서는 채널의 에너지 수준을 기준치와 비교하는 방법이 사용된다. (그림 2)에서  $i$ 번째 백

오프지연 시간  $B_i$ 는 식 (1)과 같이 결정되고 여기에서 표시되는 단위는 단위백오프지연 (unit backoff period)을 의미한다.

$$B_i = \text{random}(2^{BE_i} - 1) \quad (1)$$

여기서  $0 \leq i \leq NB - 1$ 이고 함수  $\text{random}(2^{BE_i} - 1)$ 는 0과  $2^{BE_i} - 1$  사이의 난수로 결정된다. 그리고  $BE_i$ 는 식 (2)와 같이 결정된다.

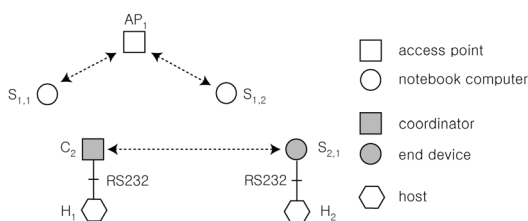
$$BE_i = \min(BE_{i-1} + 1, \text{macMaxBE}) \quad (2)$$

여기서 함수  $\min(a, b)$ 는  $a$ 와  $b$ 중 최소값을 택하며,  $BE_0 = \text{macMinBE}$ 이고  $1 \leq i \leq NB - 1$ 이다. 그리고  $\text{macMinBE}$ 와  $\text{macMaxBE}$ 는 각각 백오프지연 알고리즘에서 지수항에 적용될 수 있는 최소값과 최대값을 의미한다. IEEE 802.15.4 표준에는 백오프지연 횟수의 최대치를  $\text{macMaxCSMABackoffs}$ 로 규정하고 있고 (그림 2) (b)와 같이 백오프지연 횟수가 이 값 보다 커질 경우, 즉  $NB > \text{macMaxCSMABackoffs}$ 인 경우에는 채널접근이 실패했다고 판정한다.

(그림 2)와 같이 WiFi에서 트래픽이 발생하는 경우에 채널에서는 WiFi 트래픽의 신호가 점유하는 빈도가 높아지고 물리계층의 특성이 WiFi와 다른 IEEE 802.15.4 노드에서는 WiFi 신호를 디코드 (decode)할 수 없고 전력 (그림 2에서  $P_W$ 로 표시)이 증가된 것으로 관찰된다. 그러므로 채널의 에너지를 측정하여 기준치와 비교하는 방식의 CCA 기능을 사용하는 IEEE 802.15.4 노드에서는 WiFi 트래픽이 채널을 점유하고 있을 때 백오프지연을 하도록 결정하기 때문에 (그림 2)에서 MPDU가 발생한 순간부터 백오프지연을 거쳐서 프레임이 전송될 때까지 걸리는 시간  $T_{DATA}$ 가 증가하게 된다.

## 2.2 IEEE 802.15.4 노드에서 WiFi 트래픽의 영향 측정 및 분석

(그림 3)에 IEEE 802.15.4 노드에서 WiFi 트래픽의 간섭을 측정하기 위한 시스템을 나타냈는데, IEEE 802.15.4 프로토콜을 사용하는 네트워크는 각각 코디네이터와 종단장치 기능을 수행하는  $C_2$ ,  $S_{2,1}$ 으로 구성되어 있다. 실험을 위해  $C_2$ 와  $S_{2,1}$ 는 IEEE 802.15.4 프레임의 송수신



(그림 3) IEEE 802.15.4 노드에서 WiFi 트래픽의 간섭 측정 시스템

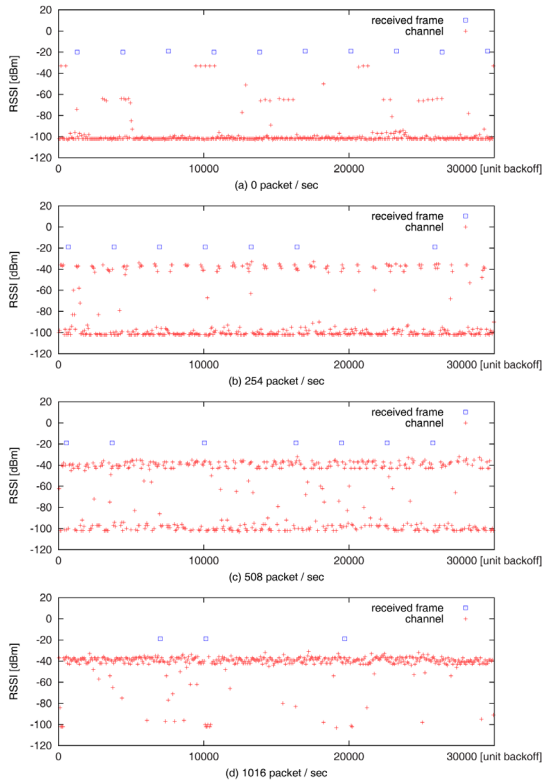
(Figure 3) WiFi traffic interference measurement system at IEEE 802.15.4 nodes

이 가능한 Texas Instrument사의 CC2530 칩이 장착되어 있는 CC2530EM을 입출력기능과 USB, UART를 통한 통신기능이 있는 SmartRF05EB과 결합하여 사용한다. IEEE 802.15.4 프로토콜의 동작과 관련된 코디네이터와 종단장치의 내부 상태 및 측정데이터는 UART 프로토콜을 사용하여 RS232 포트를 통해 호스트 (host) 컴퓨터로 전송되어 감시되고 사후처리 및 분석을 위해 호스트 컴퓨터 내에 저장된다. CC2530을 사용하는 IEEE 802.15.4 프로토콜의 동작, 시험을 위한 MAC-SDU (MAC service data unit)의 발생 및 처리, 측정을 위해 정의한 이벤트 (event)의 발생시 그와 연관된 내부 상태변수를 감시하기 위한 기능은 Texas Instrument사의 TIMAC-CC2530-1.4.0 프로그램을 수정하여 사용한다. 간섭을 발생시키는 WiFi 네트워크는 (그림 3)에서 나타난 바와 같이 AP<sub>1</sub>, S<sub>1,1</sub>, S<sub>1,2</sub>로 구성되어 있는데, AP<sub>1</sub>은 AP, S<sub>1,1</sub>과 S<sub>1,2</sub>는 노트북 컴퓨터를 사용하고 노트북 컴퓨터에서는 유무선 네트워크에 대한 벤치마킹 도구인 “Nuts About Nets, LLC”의 “netstress” 프로그램으로 WiFi 트래픽을 발생시킨다. “netstress” 프로그램에서는 패킷의 MTU (maximum transfer unit), TCP 세그먼트 크기 (segment size), 초당 발생되는 패킷수, TCP 접속 개수 등과 같은 요소들을 원하는 조건으로 설정하여 트래픽을 발생시킬 수 있다.

측정을 위해 IEEE 802.15.4 네트워크를 구성하는 코디네이터와 종단장치 중 하나를 송신기 그리고 다른 하나를 수신기로 설정했다. 송신기에서는 1 sec마다 “MAC payload”의 크기가 20 bytes인 고정된 길이의 데이터프레임을 발생시키고 수신기가 이 프레임을 받자마자 응답프레임을 전송하도록 프레임 제어필드의 “Ack Request” 비트를 1로 설정한다. TIMAC-CC2530-1.4.0는 매체접근 제어계층에서 백오프지연이 실패하면 스스로 재전송을 결정하지 않고 상위계층에 전송실패를 보고하고 측정을 위

한 시험용 프로그램에는 매체접근제어계층에서 전송실패가 보고되더라도 재전송을 하지는 않는다. 간섭을 발생시키기 위해 IEEE 802.15.4 네트워크와 WiFi 네트워크 사이에 스펙트럼이 서로 겹치고 중심주파수의 차이가 적은 채널들이 몇 개 있는데, (그림 1)의 우측에 나타난 것과 같이 IEEE 802.15.4 네트워크에서는 채널번호 19 (중심주파수 2445 MHz), WiFi의 AP는 채널번호 8 (중심주파수 2447 MHz)에서 동작하도록 설정하였다. WiFi로부터 발생되는 다양한 크기의 부하에 대해 IEEE 802.15.4 네트워크에 나타나는 현상을 관찰하기 위해서 WiFi 네트워크의 한 컴퓨터에서 발생하는 트래픽을 MTU 1500 byte, TCP 세그먼트 크기 131072 byte, TCP 접속을 1개로 설정한 상태에서 초당 발생되는 패킷수를 변화시키면서 실험하였다.

(그림 4)의 (a), (b), (c), (d)에 WiFi 네트워크에서 몇 가지 경우의 초당 발생되는 패킷수에 대해, IEEE 802.15.4 네트워크의 수신기로 설정된 장치에서 시간의 단위가 단위백오프로 표현된 시간의 경과에 따라 RSSI를 측정된 결과를 나타냈다. (그림 4)에서 대략 -20 dBm의 값을 갖는 사각형표시는 IEEE 802.15.4 네트워크의 송신기가 전송한 프레임을 수신할 때 수신된 프레임의 SFD 바로 다음의 8 심볼에 해당하는 시간동안 나타난 신호의 세기를 의미한다. 그리고 나머지 십자표시는 수신기가 20 ms간격으로 IEEE 802.15.4 네트워크의 채널의 전력을 측정하는 것이다. CC2520, CC2530 칩에서는 RSSI 레지스터의 값을 읽는 방법으로 채널의 순간전력을 측정할 수 있고 송신기에서 1초 간격으로 프레임을 전송하기 때문에 수신기에서는 채널의 전력을 1초당 50회 측정할 수 있게 된다. (그림 4) (a)에는 초당 발생되는 패킷수가 0인 경우로서 WiFi 네트워크의 트래픽 발생용 컴퓨터에서 패킷을 전혀 발생시키지 않는 경우에 측정된 결과이다. 수신된 프레임 신호의 RSSI는 -20 dBm 정도의 값을 갖고 일정 간격마다 나타나고 있는 반면 채널에 대해 측정된 전력은 거의 -100 dBm 부근의 값을 나타내고 있는데 이것은 채널에 어떤 신호도 나타나고 있지 않는 것을 의미한다. 측정된 전력이 -100 dBm과 -20 dBm 중간에 간헐적으로 관찰되는 것은 부하발생을 위한 WiFi 네트워크 외에 다른 WiFi 네트워크들이 WiFi의 거의 전 채널에서 여러 위치에 설치되어 있는 건물에서 실험을 수행했기 때문에 비록 부하발생용 WiFi 네트워크의 채널이 기존에 이미 설치된 나머지 WiFi 채널과 다른 채널을 사용한다고 할지라도 그들 네트워크에서 발생된 WiFi 트래픽 신호가 유입되는 것으로 추정된다. (그림 4) (b)는 초당 발생되는 패킷수가 254로서 (그림 4) (a)와 비교할 때 채널에 대해



(그림 4) WiFi 트래픽 부하조건에 대해 IEEE 802.15.4 수신기에 측정된 RSSI  
 (Figure 4) RSSI measured at IEEE 802.15.4 receiver under WiFi traffic load conditions

측정한 전력이 -40 dBm 주변에 새롭게 나타나고 있다. 이것은 WiFi 네트워크에서 시험용으로 발생된 트래픽 신호가 채널에 나타나고 있을 때 IEEE 802.15.4 네트워크의 수신기에서 측정된 전력을 의미한다. 그리고 IEEE 802.15.4 네트워크의 프레임도 20000 [unit backoff] 전후의 시간에서 두 개가 관찰되지 않는 것으로 보아 송신기에서 백오프지연이 실패했거나 프레임이 전송 중에 오류가 발생한 것으로 추정된다. (그림 4) (c)는 (그림 4) (b)에 비해서 WiFi 네트워크에서 부하를 두 배 증가시킨 초당 발생되는 패킷이 508로 설정한 경우이다. (그림 4) (b)의 경우에 비해서 측정된 채널의 전력이 대략 -40 dBm 정도의 값을 갖는 경우가 더 많아지고 수신기에 수신되지 못한 프레임도 증가하는 것으로 나타나고 있다. (그림 4) (d)는 WiFi 네트워크에서 초당 1016개의 패킷을 발생시킨 경우로서 채널의 전력이 거의 대부분 -40 dBm으로 측정되고

있고 프레임은 거의 수신되지 않고 있기 때문에 IEEE 802.15.4 네트워크의 장치들은 실질적으로 통신이 불가능하다고 판단할 수 있다. (그림 4) (a), (b), (c), (d)에 표현된 측정결과를 볼 때, WiFi 네트워크에서 발생하는 트래픽이 증가하면 IEEE 802.15.4 네트워크에서 RSSI로 측정되는 채널전력이 증가되고 IEEE 802.15.4 네트워크의 수신기에 수신되지 못하는 프레임이 증가하게 된다는 것을 알 수 있다.

한편 WiFi 트래픽의 간섭으로 인해 IEEE 802.15.4 네트워크의 송신기의 매체접근제어계층에서 나타나는 현상을 관찰하기 위해 (그림 2)에 표시한 백오프실패지연시간  $T_{BO}$ , 프레임전송지연시간  $T_{DATA}$ , 응답지연시간  $T_{ACK}$ 을 측정하였다. IEEE 802.15.4 매체접근제어기능이 구현되어 있는 TIMAC-CC2530-1.4.0 프로그램을 실행할 때 (그림 2)에 나타난 것처럼 MPDU 발생시각  $t_0$ , 백오프타이머 종료시각  $\{t_1, t_2, \dots, t_{NB}\}$ , CCA 기능으로 채널이 점유되어 있다고 판정하는 시각, 백오프실패 판정시각  $t_a$ , 데이터프레임 전송완료 시각  $t_b$ , 응답프레임 수신 확인시각  $t_c$ 마다 이벤트가 발생하는데, 그 순간 발생시각을 저장하고 식 (3), (4), (5)와 같이 관찰대상이 되는 시간들을 측정한다.

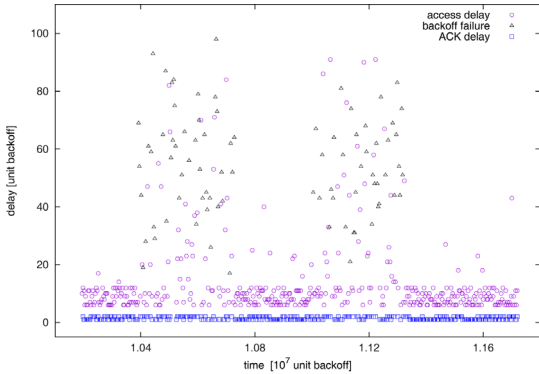
$$T_{BO} = t_a - t_0 \quad (3)$$

$$T_{DATA} = t_b - t_0 \quad (4)$$

$$T_{ACK} = t_c - t_b \quad (5)$$

WiFi 트래픽이 발생할 때 IEEE 802.15.4 네트워크에서 송신기로 동작하는 노드의 매체접근제어계층에서 관찰되는 현상을 분석하기 위해, (그림 4) (d)에 나타난 결과를 측정할 때 주어진 것과 같이 MTU 1500 byte, TCP 접속 1개, 초당 1016 패킷을 발생시킬 수 있도록 WiFi 트래픽 발생 조건을 설정하고 또한 측정되는 변수들의 동적인 특성을 분석하기 위해 WiFi 트래픽을 일정기간 발생시켰다가 일정기간 중단하는 방식으로 IEEE 802.15.4 네트워크에 간섭을 발생시켰다.

(그림 5)에 시간의 진행에 따라 측정된 결과를 나타냈는데, 삼각형 표시는 백오프실패지연시간, 원형표시는 프레임전송지연시간, 사각형표시는 응답지연시간을 의미한다. (그림 5)에서 가로축과 세로축의 시간단위는 각각  $[10^7 \text{ unit backoff}]$ 과  $[\text{unit backoff}]$ 으로 표현되었다. 시간구간 (1.04, 1.07)과 (1.10, 1.14)에서 백오프실패지연시간과 프레임전송지연시간이 서로 혼재되어 있으면서 급격

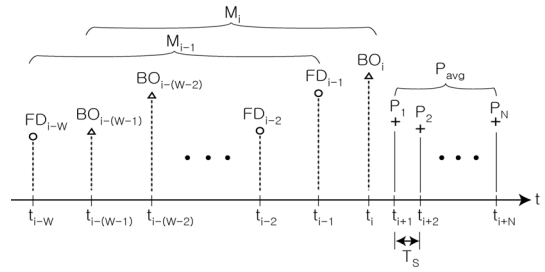


(그림 5) WiFi 트래픽이 발생될 때 IEEE 802.15.4 네트워크 송신기에서 측정된 지연시간  
(Figure 5) Delay times measured at IEEE 802.15.4 network transmitter while WiFi traffics are generated

히 증가되어 최대값이 약 100에 이를 정도로 관찰된다. 이 현상은 이 구간에서 시험용 WiFi 트래픽을 발생시켜서 WiFi 트래픽 신호가 채널이 겹치는 IEEE 802.15.4 네트워크의 채널을 점유하는 시간이 증가하게 되어 IEEE 802.15.4 네트워크의 노드가 실행하는 CSMA-CA 알고리즘에서 CCA 기능이 채널이 점유되고 있다고 판단할 경우가 증가하기 때문에 관찰되는 것이다. WiFi 트래픽이 발생하는 두 구간을 제외한 나머지 구간에서는 백오프지연실패는 관찰되지 않고 프레임의 전송지연시간이 대략 5에서 13사이에서 집중적으로 나타난다. 이와 같은 결과를 통해서 볼 때, IEEE 802.15.4 네트워크의 노드들은 WiFi에서 발생하는 트래픽 부하가 클 경우 전송이 심각하게 지연되고 심지어 실패하는 빈도도 증가하는 것을 알 수 있다. 한편, 응답지연시간은 WiFi 트래픽 부하에 관계없이 전 구간에서 1 또는 2의 값을 갖는 것으로 관찰되는데 이것은 WiFi 트래픽 부하가 아무리 크더라도 송신기에서 CSMA-CA 절차를 성공적으로 거쳐서 전송된 IEEE 802.15.4 프레임에 대해서 수신기는 응답프레임을 CSMA-CA 알고리즘을 적용하지 않고 즉시 보내고 WiFi의 IEEE 802.11 매체접근제어계층도 IEEE 802.15.4와 비슷하게 동작하는 CSMA-CA 알고리즘을 사용하기 때문이다.

### 3. IEEE 802.15.4 네트워크에서 WiFi 트래픽의 간섭 판단 방법

2장에서 기술한 WiFi 트래픽에 의해 IEEE 802.15.4 네



(그림 6) WiFi 트래픽의 간섭판단에 사용되는 요소 데이터  
(Figure 6) Element data used for the decision of WiFi traffic interference

트워드의 장치들에서 관찰되는 현상에 대한 분석을 볼 때, WiFi 트래픽의 변화에 따라 IEEE 802.15.4 네트워크의 송신기에서 프레임전송지연시간, 백오프실패지연시간 등과 같은 요소들과 수신기에서는 IEEE 802.15.4 프레임의 송수신 기능이 있는 칩의 RSSI 레지스터를 이용해 측정되는 채널전력과 같은 요소에 있어서 변화가 발생하는 것이 관찰되었다. 특히 WiFi 트래픽이 증가하면 IEEE 802.15.4 노드의 송신기에서 프레임전송지연시간이 증가하고 백오프실패가 자주 관찰되었고 수신기에서는 증가된 채널전력의 빈도가 높아지는 것으로 나타났다. 이 장에서는 이와 같은 분석을 기초로 하여 IEEE 802.15.4 네트워크의 장치가 WiFi 네트워크로부터 간섭이 일어나고 있다는 것을 판단하기위해 (그림 6)에 나타난 바와 같이 송신기에서 매체접근제어계층의 요소들과 물리계층의 요소를 단계적으로 사용하는 방법을 제안한다.

먼저 1단계에서는 식 (6)에 나타난 바와 같이 프레임 전송지연시간과 백오프실패지연시간 등과 같은 매체접근제어 계층에서 관찰되는 요소들을 이용하여 WiFi 네트워크로부터 간섭이 발생하고 있는지 평가한다.

$$M_i = \sum_{k=0}^{W-1} \{u(FD_{i-k} > T_{TH}) + \alpha \cdot v(BO_{i-k})\} \quad (6)$$

여기서  $u(x)$ 는  $x$ 가 참이면 1, 거짓일 경우에는 0의 값을 갖는 함수이고  $FD_i$ 는  $i$ 번째 프레임의 전송지연시간,  $T_{TH}$ 는 프레임의 전송지연시간이 WiFi 트래픽으로 인한 간섭이 없는 경우 보다 컸다고 판단되는 기준치를 의미하고,  $v(BO_i)$ 는  $i$ 번째 프레임 전송시 시각  $t_i$ 에서 백오프실패가 발생하여 백오프실패지연시간  $BO_i$ 이 측정되면 1 그렇지 않으면 0을 갖는다. 프레임전송지연시



간을 구하게 되는 사건과 백오프실패라고 판정되는 사건은 서로 동시에 발생할 수 없는 배타적인 관계이다. 그리고 식 (6)은 현재 사건에 대한 측정치를 포함해서 저장된 과거  $W$ 개의 프레임전송시간 또는 백오프실패 사건에 대해 계산된다. 식 (6)은 송신기에서 데이터프레임을 전송할 때, 데이터프레임의 전송지연시간이 기준치 보다 커지거나 백오프실패가 발생하는 경우의 시각  $t_i$ 에서 계산되고, 계산된 값  $M_i$ 이 기준치  $M_{TH}$  보다 크게 되면 WiFi 트래픽으로 인한 간섭의 가능성이 있다고 판단하고 채널의 전력을 집중적으로 측정하는 2단계 과정으로 들어간다. 여기에서 제안되는 방법은 간섭의 여부를 수신기가 판단한 정보를 받아서 사용하지 않고 송신기 자체적으로 측정된 데이터를 근거로 판정하는 방법이므로 송신기에서 일정주기마다 데이터프레임이나 시험용 프레임 전송할 필요성은 없다.

2단계에서는 채널에서 측정되는 전력의 특성을 평가하기 위해 식 (7)과 같은 방법으로 측정된 전력의 평균  $P_{avg}$ 을 구한다.

$$P_{avg} = \frac{1}{N}(P_1 + P_2 + \dots + P_N) \quad (7)$$

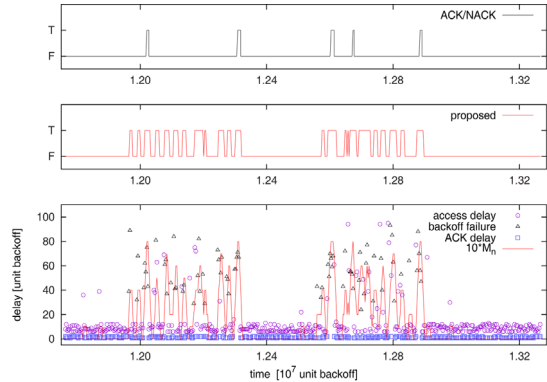
여기서  $P_j$ 는, (그림 6)에 나타난 것과 같이 시각  $t_i$  직후 간섭판단과정의 두 번째 단계로 들어가기로 결정한 후에 일정한 시간간격  $T_s$ 마다 무선채널의 전력이 측정되는데, 시각  $t_{i+j}$ 에 송신기에서 측정된 채널전력을 의미하고  $1 \leq j \leq N$ 이다. 이제, 2단계에서 측정된  $N$ 개의 채널전력 샘플값에 대해 구한 평균값을 이용하여 간섭을 판단하는 함수  $I(x)$ 를 식 (8)과 같이 정의한다.

$$I(x) = u(x > P_{TH}) \quad (8)$$

여기서  $P_{TH}$ 는 무선채널에 간섭이 있다고 판정하는 평균 채널전력의 기준치를 의미한다. 그러면 측정된 평균채널 전력  $P_{avg}$ 에 대해  $I(P_{avg})$ 의 값이 1로 계산되는 경우 WiFi 네트워크로부터 간섭이 발생하고 있다고 판정한다.

#### 4. 실험 및 결과 고찰

이 논문에서 제안된 WiFi 트래픽의 간섭을 판단하기 위한 1단계 방법에 대한 실험결과를 (그림 7)에 나타냈다. (그림 7)에서 아래의 그림에 나타난 원표시 (access

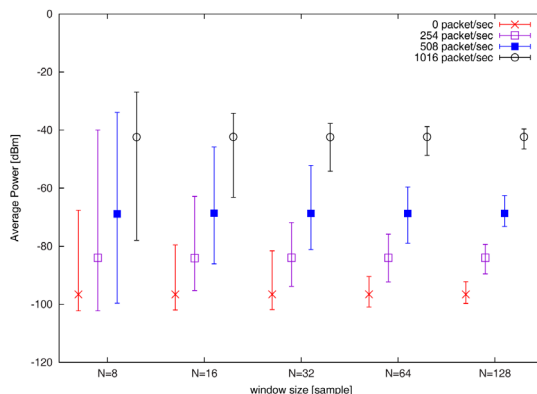


(그림 7) 간섭판단의 1단계 방법에 대한 실험 결과  
(Figure 7) Experimental results of the first stage method for interference decision

delay), 삼각형표시 (backoff failure), 사각형표시 (ACK delay)는 각각 IEEE 802.15.4 네트워크의 송신기에서 측정된 프레임전송지연시간, 백오프실패지연시간, 성공적으로 전송된 프레임에 대한 응답지연시간을 의미하는데, 측정하는 동안 WiFi에서 초당 508개의 패킷을 두 차례에 걸쳐서 집중적으로 발생시켰다. 시구간 (1.19, 1.23)과 (1.26, 1.29)에서 프레임전송지연시간이 급격히 증가하고 백오프실패지연이 집중적으로 발생하고 있는 것을 볼 수 있는데, 이것은 이 구간에서 시험용 WiFi 트래픽을 발생시켰기 때문이다. 그리고 실선으로 표시한 부분은 이 논문에서 제시한 간섭판단의 1단계에서 사용되는 프레임전송, 백오프실패 사건이 발생될 때마다 측정된 지연시간을 기초로 하여 식 (6)에 정의한  $M_n$ 값의 변화를 표현한 것인데, 그림에서 보기 쉽게 10배 크게 표시했고, 지연이 크다고 판정되는 프레임전송지연시간 기준치를  $T_{TH} = 20$ 로 설정하고  $\alpha = 2$ 로 설정하여 지연이 큰 프레임전송사건보다 백오프실패사건에 두 배의 가중치를 부여했다. 계산된  $M_n$ 의 값은 평소에는 0이나 1을 유지하다가 WiFi 트래픽 부하가 발생하는 구간에서 크게 증가하여 최대값이 8에 이르며 변화가 심하게 나타나는 특성을 보이고 있다. 가운데에 나타난 그림은 그림 7의 아래에 나타난  $M_n$ 의 값을 토대로 기준치  $M_{TH}$ 을 4로 설정한 후  $M_n > M_{TH}$ 로 계산된 경우는 참(T)로 그렇지 않은 경우는 거짓(F)으로 표시한 것이다. 그림에서 참으로 표시된 경우에는 간섭판단의 1단계를 통과한 것을 의미하므로 채널의 전력을 집중적으로 판단하는 2단계 판정단계로 들어가야 한다.



한편, 이 논문에서 제안된 방법과 비교를 위해 WiFi의 간섭에 대한 판단을 위해 연구된 기존의 방법 중 송신기에서 간섭을 판단하는 ACK/NACK를 이용한 판단방법에 대해서 실험을 수행하였다. 이 방법은 송신기가 프레임을 전송한 후 응답프레임을 기다리는데 정해진 시간 이내에 응답프레임을 수신하지 못하고 타이머가 종료된 경우에 NACK가 발생한다고 한다. 그런데 실험결과 WiFi의 트래픽 부하가 발생해도 매체접근제어계층에서 프레임을 전송한 후에 응답프레임을 기다리는 동안 NACK 사건은 관찰되지 않았고 오히려 수신기가 프레임을 수신한 후 정해진 시간 안에 응답하지 못하는 경우에 송신기에서 타이머가 종료되어 NACK 사건이 관찰되었다. 따라서 이 논문에서 제안된 방법과 비교하기 위해서 ACK/NACK 방식을 매체접근제어계층 보다 상위계층에서 적용하고, 상위계층에서 매체접근제어계층에 MSDU (MAC service data unit)을 전달하고 WiFi의 트래픽으로 인해 간섭이 발생할 때 백오프실패를 상위계층에 보고하면 이것을 NACK 사건으로 간주하는 방식으로 ACK/NACK 알고리즘을 평가했다. (그림 7)의 상단에 ACK/NACK 방식으로 이 논문에서 제안된 방법과 동일한 WiFi 트래픽을 발생시킬 때 간섭을 판단한 결과를 나타냈다. (그림 7)에 나타난 실험결과를 볼 때, 이 논문에서 제안된 방법은 WiFi 트래픽이 발생하는 구간 동안 지속적으로 간섭을 판단하는데 비해서, ACK/NACK 방식은 간섭을 판단하는 시점이 늦고 WiFi 트래픽이 지속적으로 발생하고 있는 구간에서도 간섭으로 판정하는 경우가 적게 나타나고 있다. 기존의 ACK/NACK 방식을 적용할 때 이러한 결과가 나타나는 이유는 ACK/NACK 방식은 카운터를 0으로 초기화시키고 NACK 사건이 발생할 때마다 카운터를 1씩 증가시키고 응답프레임을 수신할 때마다 카운터를 0으로 리셋 (reset)시키는데 카운터 값이 기준치를 넘을 때 간섭으로 판정한다. 그런데 송신기의 매체접근제어계층에서 데이터프레임을 전송하는 경우에는 CSMA-CA 알고리즘을 적용하지만 수신기에서 수신된 데이터프레임에 대한 응답프레임은 CSMA-CA 알고리즘을 적용하지 않고 즉시 전송한다. 따라서 WiFi 트래픽이 발생하고 있을지라도 백오프지연을 거처서 무선채널에서 측정되는 전력이 CCA 기능에서 평가하는 기준 보다 낮아서 프레임이 성공적으로 전송되는 순간부터 응답프레임이 되돌아 올 때까지의 기간 동안에는 IEEE 802.15.4 데이터프레임과 응답프레임이 채널을 점유하게 되므로, 송신기의 입장에서는 CCA기능을 통과하여 성공적으로 전송된 프레임에 대해 응답프레임을 수신하게 되고 간섭을 판단하는 카운터



(그림 8) WiFi 트래픽 부하에 따라 측정된 평균채널전력 (Figure 8) Average channel power measured with respect to WiFi traffic loads

는 0으로 리셋되기 때문에 카운터 값이 간섭을 판정하는 기준치 보다 낮게 유지될 가능성이 커서 기존의 ACK/NACK 방식으로는 이 논문에서 제안된 방식에 비해 WiFi 트래픽의 간섭을 판단하기 쉽지 않다.

간섭을 판정하는 2단계에서는 식 (7), (8)을 이용하여 무선채널의 평균전력을 측정하고 평가한다. (그림 8)에 WiFi 트래픽 부하가 초당 0, 254, 508, 1016 패킷이 발생하는 경우에 대해서 IEEE 802.15.4 노드에서 측정한 채널전력의 평균치를 나타냈다. 채널전력은  $T_s = 20\text{ms}$  간격으로 측정되고 측정된 N 개의 샘플에 식 (7)에 표현된 바와 같이 평균채널전력이 구해진다. (그림 8)에는 평균채널전력을 구하는데 사용되는 샘플수 N이 8, 16, 32, 64, 128인 경우에 WiFi에서 초당 발생하는 패킷수의 각 경우에 대해 평균채널전력을 나타냈는데, 수직선으로 표현되는 각 경우는 평균채널전력의 최소값에서부터 최대값을 의미하고 직선 위에 표시된 기호의 위치는 평균값을 의미한다. 평균채널전력을 계산하기 위한 샘플 수를 2의 지수로 표현 가능한 8, 16, 32, 64, 128로 설정한 이유는 IEEE 802.15.4 노드가 일반적으로 연산속도가 빠르지 않은 작은 MCU (microcontroller unit)를 이용해 구현되기 때문에 데이터비트 쉬프트 (shift) 연산방식으로 나눗셈에 소요되는 시간을 줄이기 위함이다. (그림 8)에서 N=8인 경우는 평균채널전력을 계산하는데 사용되는 데이터 샘플수가 적기 때문에 주어진 WiFi 트래픽 부하에 대해 측정, 계산된 평균채널전력의 값이 변화하는 범위가 넓게 나타나므로 평균채널전력값으로 WiFi의 트래픽 부하가 어떠한 상태인지 판단하기가 어렵다. 이러한 이유로

인해 평균채널전력의 계산에 사용되는 데이터 샘플수를 증가시켜서  $N = 64$ 와  $N = 128$ 인 경우에는 WiFi 트래픽 부하의 각 경우에 대해 측정된 평균채널전력의 범위가 서로 구분될 수 있게 나타나는 것을 볼 수 있다. 2장에서 분석한 결과에 의하면 WiFi에서 발생하는 패킷에 대해 실험한 경우 중에서 초당 254개 이상의 패킷이 발생하는 경우에 수신기에서 패킷의 수신에 오류가 발생하는 현상이 관찰되었는데, 그림 8에 나타난 결과를 보면 평균채널전력 계산에 사용되는 데이터 샘플수  $N$ 을 64 이상, 기준치  $P_{TH}$ 를 대략 -75 dBm으로 설정하면 2단계에서 측정된 평균채널전력이 -75 dBm 이상으로 나타나는 경우에 WiFi 트래픽으로 인해 IEEE 802.15.4 네트워크의 노드들에 간섭이 발생하고 있다고 판단할 수 있다. 이 논문에서 측정한 데이터는 WiFi 네트워크를 구성하는 노트북 컴퓨터, AP, 그리고 IEEE 802.15.4를 구성하는 노드들이 서로 수 m 이내의 공간에 중첩되게 설치된 상태에서 얻은 것이므로 만일 두 네트워크가 중첩되게 설치되는 공간이 더 넓은 경우에는 기준치  $P_{TH}$ 를 낮추어야 할 것이다.

## 5. 결 론

이 논문에서는 IEEE 802.15.4 프로토콜을 사용하는 네트워크가 IEEE 802.11 프로토콜을 사용하는 WiFi 네트워크와 겹치는 주파수 영역을 점유하고 공간적으로 중첩된 상황에서 WiFi에서 발생하는 트래픽으로 인해 간섭을 받아 IEEE 802.15.4 노드에서 프레임 전송에 장애가 발생하는 문제를 서술하였다. 간섭이 될 정도의 WiFi 트래픽이 발생하면 간섭을 탐지한 IEEE 802.15.4 네트워크의 노드들이 새로운 채널을 찾아 옮겨서 동작하거나 기존의 채널을 계속 사용할 경우에는 프로토콜이 서로 다른 WiFi 네트워크와 IEEE 802.15.4 네트워크가 공존하는 방법을 찾는다. 이 논문에서는 채널을 바꾸거나 사용하던 채널에서 서로 공존하기 위한 방법을 취하기 전 단계에서 WiFi 네트워크로부터의 간섭이 발생하는 것을 판단하기 위한 수단을 찾기 위해, 매체접근제어계층에서 관찰되는 요소들과 물리계층에서 관찰되는 요소들에 대해 이루어진 기존의 연구들에 대해 분석하였다.

WiFi 네트워크로부터 간섭이 발생할 때 영향을 받는 IEEE 802.15.4 프로토콜의 매체접근제어계층과 물리계층의 요소들의 특성을 관찰하고 분석하기 위해, 노트북 컴퓨터와 AP로 구성된 WiFi 네트워크와 IEEE 802.15.4 프

래임을 송수신할 수 있는 Texas Instrument사의 CC2530 칩이 장착되어 있는 CC2530EM을 사용하여 IEEE 802.15.4 네트워크를 구성한 후, WiFi 네트워크에서는 “Nuts About Nets, LLC”의 “netstress” 프로그램으로 트래픽을 발생시키고 IEEE 802.15.4 노드에서는 Texas Instrument사의 TIMAC-CC2530-1.4.0 프로그램을 수정하여 매체접근제어계층의 요소들과 물리계층의 요소들을 측정하였다. 실험적으로 측정된 결과는 WiFi 네트워크로부터 트래픽이 증가함에 따라 IEEE 802.15.4 네트워크의 노드들 중 송신기에서는 프레임전송지연시간과 백오프지연실패가 증가하고 수신기에서는 증가된 채널전력값이 측정되는 빈도가 커지며 수신되지 않는 프레임이 증가하는 특성을 보인다.

이 논문에서는 이와 같이 WiFi 트래픽의 부하에 따라 변화하는 특성을 보이는 요소들을 이용하여, IEEE 802.15.4 네트워크의 송신기에서 실행되는 방법으로서, 1단계에서는 매체접근제어계층에서 관찰되는 프레임전송지연시간과 백오프실패를 반영하는 평가함수값이 기준보다 커지는 경우에 2단계에서 물리계층에서 측정되는 무선채널의 전력을 집중적으로 조사하는 방법으로 WiFi 네트워크로부터의 간섭을 판단하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법으로 WiFi 네트워크의 간섭에 대해 판단할 때, WiFi 네트워크에서 발생하는 트래픽의 특성이 1500 byte 크기의 MTU와 1개의 TCP 접속을 가정하고 초당 254개 이상의 패킷이 발생하는 경우에 WiFi 네트워크로부터의 간섭을 판정할 수 있음을 보였다. 그리고 송신기에서 간섭판단이 이루어지는 ACK/NACK를 기초로 하는 기존의 방법에 비해서 성능이 개선된 특성을 보였다.

이 논문에서 제시된 방법은 WiFi 네트워크와 IEEE 802.15.4 네트워크에서 발생하는 신호의 범위가 서로 중첩되는 공간에서 서로간의 거리가 가깝게 설치되고 각 네트워크가 사용하는 채널의 스펙트럼이 겹치는 경우에 WiFi 트래픽 신호로 인해 IEEE 802.15.4 네트워크의 노드에서는 측정되는 채널전력이 크게 나타나고 또한 CSMA-CA 알고리즘의 CCA 기능이 채널을 사용 중이라고 판정할 가능성이 크기 때문에 나타나는 매체접근제어계층과 물리계층의 요소들의 특성을 이용한 것이다. 이 논문에서 제안된 방법을 일반적으로 적용하기 위해서 앞으로 각 네트워크의 신호가 중첩되지만 일부 WiFi 노드로부터 발생하는 신호의 세기가 상대적으로 적은 값으로 측정될 정도의 거리에 설치된 경우에 간섭에 대한 판단을 위해 사용한 요소들의 특성의 변화와 이를 반영한 간섭판단방법에 대한 연구가 필요하다. 그리고 WiFi 네트워크로부터의 간섭을 판정한 이후 IEEE 802.15.4 네트워

크를 새로운 채널에서 동작시키려고 할 때, 다른 채널에서 동작하는 기존의 IEEE 802.15.4 네트워크들에 대한 탐색방법, 다른 채널에 간섭을 일으키는 WiFi 네트워크에 대한 신속한 평가방법, 선택된 새로운 채널로 IEEE 802.15.4 네트워크의 노드들이 빠르게 이동해서 동작하기 위한 절차를 포함한 프로토콜에 대해서 연구가 이루어져야 한다.

## 참 고 문 헌(Reference)

- [1] K. Shuaib, M. Alnuaimi, M. Boulmalf, I. Jawhar, F. Sallabi, and A. Lakas, "Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 : Experimental and Simulation Results", *Journal of Communications*, vol. 2, no. 4, pp. 29-37, Jun 2007.
- [2] G. M. Tamilselvan and A. Shanmugam, "Probability Analysis of channel collision between IEEE 802.15.4 and IEEE 802.11b using Qualnet Simulation for various Topologies", *International Journal of Computer Theory and Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 59-64, 2009.
- [3] D. G. Yoon, S. Y. Shin, W. H. Kwon, and H. S. Park, "Packet Error Rate Analysis of IEEE 802.15.4 under IEEE 802.11b Interference", *Proc. VTC*, pp. 1186-1190, 2006.
- [4] ZigBee Alliance, "ZigBee and Wireless Frequency Coexistence", *ZigBee White Paper*, Jun. 2007.
- [5] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, *Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications*, ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition, 1999.
- [6] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, IEEE Std 802.15.4-2006, Sep. 8, 2006.
- [7] ZigBee Standards Organization, *ZigBee Specification*, Document 053474r13, Dec. 1, 2006.
- [8] S. M. Kim, J. W. Cho, C. Y. Jung, T. H. Jeon, J. H. Park, Y. J. Kang, S. H. Jeong, M. J. Kim, and D. K. Sung, "Experiments on Interference and Coexistence between Zigbee and WLAN Devices Operating in the 2.4 GHz ISM Band", *Proc. NGPC*, pp. 15-19, Nov. 2005.
- [9] M. U. Memon, L. X. Zhang, and B. Shaikh, "Packet Loss Ratio Evaluation of the Impact of Interference on ZigBee Network caused by Wi-Fi (IEEE 802.11b/g) in E-health Environment", *IEEE 14th International Conference on eHealth Networking, Applications and Service (Healthcom)*, pp. 462-465, 2012.
- [10] M. S. Kang, J.W. Chong, H. Hyun, S.M. Kim, B.H. Jung, and D.K. Sung, "Adaptive Interference-Aware Multi-Channel Clustering Algorithm in a Zigbee Network in the Presence of WLAN Interference," *Int. Symposium on Wireless Pervasive Computing 2007*, Feb. 2007.
- [11] C. A. Boano, T. Voigt, A. Dunkels, F. Osterland, N. Tsiftes, L. Mottola, and P. Suarez, "Exploring the LQI Variance for Rapid Channel Quality Assessment", *Proc. of the 8th Int. Conf. on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pp. 369-370, Apr. 2009.
- [12] C. A. Boano, M. A. Zuniga, T. Voigt, A. Willig, and K. Romer, "The Triangle Metric : Fast Link Quality Estimation for Mobile Wireless Sensor Networks", *Proc. of 19th Int. Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, pp. 1-7, Aug. 2010.
- [13] C. Gomez, A. Boix, and J. Paradells, "Impact of LQI-Based Routing Metrics on the Performance of a One-to-One Routing Portocol for IEEE 802.15.4 Multihop Networks", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2010.
- [14] Z. Jindong, S. Wu, C. Mu. B. Fan, and Y. Lu, "Study and Prediction of Wireless Link Quality for Adaptive Channel Hopping", *Journal of Networks*, vol. 7, no. 11, pp. 1884-1891, Nov. 2012.
- [15] R. Musaloiu-E and A. Terzis, "Minimising the Effect of WiFi Interference in 802.15.4 Wireless Sensor Networks", *Int. Journal of Sensor Networks*, vol. 3, no. 1, 2008.
- [16] K. Srinivasan and P. Levis, "RSSI is Under Appreciated", *Proc. of the 3rd Workshop on*

- Embedded Networked Sensors (EmNets), May 2006.
- [17] C. Won, J. H. Youn, H. Ali, H. Sharif, and J. Deogun, "Adaptive Radio Channel Allocation for Supporting Coexistence of 802.15.4 and 802.11b", Proc. VTC, vol. 4, pp. 2522-2526, Sep. 2005.
- [18] P. Yi, A. Iwayemi, and C. Zhou, "Developing ZigBee Deployment Guideline Under WiFi Interference for Smart Grid Applications", IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 2, no. 1, pp. 110-120, Mar. 2011.
- [19] Texas Instrument, CC253x System-on-Chip Solution for 2.4-GHz IEEE 802.15.4 and ZigBee Applications : User's Guide, 2012.

## ○ 저 자 소 개 ○



### 송 명 렬

1985년 연세대학교 전자공학과 졸업(학사)

1988년 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사)

1996년 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사)

1996년~현재 호서대학 정보통신공학과 교수

관심분야 : coexistence of wireless networks, wireless sensor networks, WLAN, embedded systems

E-mail : mlsong@hoseo.edu