

# WiFi 트래픽의 간섭환경에서 IEEE 802.15.4 노드의 프레임 전송 및 채널변경 방법

## Frame Transmission and Channel Changing Methods of IEEE 802.15.4 Nodes in WiFi Traffic Interference Environment

송 명 렬<sup>1\*</sup>

Myong Lyol Song

### 요 약

이 논문에서는 WiFi 트래픽으로 인해 IEEE 802.15.4 노드에서 프레임 전송에 장애가 발생할 때, IEEE 802.15.4 네트워크의 노드들을 새로운 채널에서 동작시키기 위한 프레임 전송방법과 특성에 연구되었다. WiFi 트래픽의 간섭에 대한 평가, 간섭이 적거나 없는 새로운 채널의 탐색 및 동작채널을 변경하기 위한 연구들에 대해 분석하였다. IEEE 802.11 네트워크와 중첩된 무선채널에서 IEEE 802.15.4 프레임의 전송지연과 CSMA-CA 알고리즘을 적용하지 않은 IEEE 802.15.4 프레임 전송시 프레임들의 충돌 및 IEEE 802.11 노드들의 동작에 대해 설명하였다. 충돌된 IEEE 802.15.4 프레임의 잔여부분을 사용하기 위해 프레임형식코드블록들을 포함한 프레임의 전송방법이 제안되었다. 제안된 방법의 실험을 통해, 충돌시 프레임형식코드블록들이 수신기에서 동기화되어 수신되는 현상을 관찰하고, IEEE 802.15.4 프레임에서 충돌을 겪는 위치, 프레임수신율에 대한 특성이 분석되었다. WiFi 트래픽의 간섭을 피하기 위해 IEEE 802.15.4 네트워크의 채널변경명령을 전송하고 응답을 얻기까지 걸리는 시간을 측정하여 실험결과를 제안된 방법이 기존의 방법보다 개선된 성능을 나타낸다.

☞ 주제어 : 간섭, IEEE 802.15.4, WiFi, CSMA-CA, 충돌, 프레임동기

### ABSTRACT

In this paper, a frame transmission method to make IEEE 802.15.4 nodes run at a new channel and its characteristics are studied when they experience difficulties in transmission of frames due to WiFi traffic. The researches on evaluating the interference from WiFi traffic, searching for a new channel with little interference or not, and changing the operating channel are analyzed. In an wireless channel overlapped with IEEE 802.11 network, the transmission delay of IEEE 802.15.4 frames, the collision of frames in sending IEEE 802.15.4 frames without applying CSMA-CA algorithm, and the operation of IEEE 802.11 nodes are explained. A transmission method of frames including frame-formated code blocks in order to use the rest part of collided IEEE 802.15.4 frame is proposed. In the experiments of the proposed method, it is observed that frame-formated code blocks are synchronized and received by receivers in case of collision, and then the collided positions in IEEE 802.15.4 frame and the characteristics of frame reception rate are analyzed. The experimental results show that the performance of the proposed method is improved in comparison to an existing method when we measure the time taken to send a channel change command and get the response in order to avoid the interference from WiFi traffic.

☞ keyword : interference, IEEE 802.15.4, WiFi, CSMA-CA, collision, frame synchronization

## 1. 서 론

최근에 환경의 감시 및 제어, 보안, 물류, 가전제품의 제어 등 다양한 분야의 응용을 갖고 있는 무선센서네트

워크의 개발과 사용이 증가하고 있다. 그리고 노트북컴퓨터, 스마트폰, 프린터, 휴대용 멀티미디어 기기 등과 같이 WiFi 기능을 갖는 장치들이 널리 사용되고 있다. 또한 어떤 무선센서네트워크는 WiFi를 사용하는 네트워크와 동일하거나 서로 인접한 공간에 설치되어 운용되기도 한다. 그런데 무선센서네트워크가 WiFi 네트워크와 주파수가 서로 겹치는 대역을 사용하도록 채널이 설정된 경우 WiFi 네트워크에서 발생하는 트래픽의 신호로 인해 무선센서네트워크의 장치들 간에 데이터를 송수신하는데 전

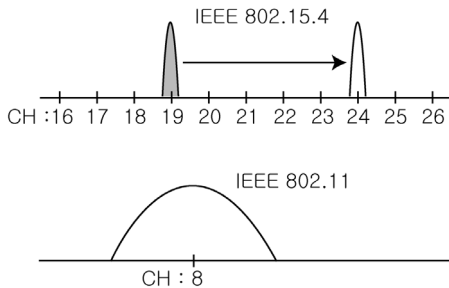
<sup>1</sup> Dept. of Information & Communication Eng., Hoseo Univ., Choongnam-Do, 336-795, Korea.

\* Corresponding author (mlsong@hoseo.edu)

[Received 18 October 2013, Reviewed 20 October 2013, Accepted 21 November 2013]

송지연의 증가, 전송실패, 수신된 프레임에서 오류의 증가와 같은 현상이 발생되어 응용계층에서 무선센서네트워크에 요구되는 전송품질을 보장할 수 없다.

이러한 문제에 대해 일반적으로 두 무선네트워크가 사용하는 채널이 서로 겹치지 않도록 변경하는 방법을 고려할 수 있다. 그런데 WiFi 네트워크는 AP (access point)에서 무선채널을 설정할 수 있는데, AP는 관리자에 의해 수동적으로 채널이 설정된 후에 채널의 상태에 따라 자동적으로 채널을 변경하는 기능이 지원되지 않기 때문에 관리자가 문제를 인식한 후 채널을 변경하기 전까지는 무선센서네트워크의 노드들이 겪고 있는 장애가 해소되지 않는다. 따라서 무선네트워크를 구성하는 노드들에서 무선채널에 발생하는 문제를 스스로 탐지하고 필요할 경우 채널을 변경하고 새로운 채널에서 동작하는 기능이 요구된다.



(그림 1) IEEE 802.11 간섭을 피하기 위한 IEEE 802.15.4 채널변경  
(Figure 1) IEEE 802.15.4 channel change for avoiding IEEE 802.11 interference

예를 들어 (그림 1)과 같이 무선센서네트워크의 전송 수단으로 널리 사용되는 IEEE 802.15.4 프로토콜의 노드들이 채널 19에서 동작하도록 설정되고 WiFi를 지원하는 IEEE 802.11 프로토콜 노드들이 채널 8로 설정되면 IEEE 802.15.4 노드들은 IEEE 802.11 트래픽 신호에 의해 간섭을 받게 된다. 이 때 IEEE 802.15.4 노드들이 채널 24로 변경하면 IEEE 802.11 채널 8과 주파수 스펙트럼이 겹치지 않게 되어 간섭을 피할 수 있게 된다. 이와 같은 기능을 수행하기 위해서는 동작하고 있는 채널에서 간섭이 발생하고 있는지를 판단할 수 있는 기능, 새로운 채널을 탐색하는 기능, 탐색된 새로운 채널로 옮기기 위한 명령을 전송하는 기능이 필요하다.

간섭을 판정하기 위해서 데이터전송률, RTT (round trip time), FER (frame error rate), PLR (packet loss ratio), 매

체접근지연시간 등과 같이 성능과 관련된 요소를 관찰하거나 Texas Instrument사의 CC2520, CC2530과 같이 IEEE 802.15.4 프레임을 송수신할 수 있는 부품에서 제공되는 RSSI (received signal strength indicator)와 LQI (link quality indicator)를 이용하여 무선채널과 수신된 신호를 평가하는 연구가 이루어졌다[1-12].

그리고 새로운 채널을 탐색하기 위한 연구로 순서가 미리 정해진 채널로 옮기는 방법, Wi-Fi 한 채널의 스펙트럼은 다수의 인접한 IEEE 802.15.4 채널의 스펙트럼을 포함하므로 복수의 IEEE 802.15.4 송수신기로 인접한 채널이 동시에 점유되었는지는 확인하는 방법, 각 채널마다 RSSI 값을 측정할 때 전체 샘플에서 기준치보다 큰 샘플수의 비율을 구한 후 비율이 가장 작은 채널을 택하는 방법, AP에서 비콘 신호가 주기적으로 발생되므로 채널에 대해 샘플된 RSSI 값들을 신호처리하여 주기성을 발견하여 WiFi 네트워크 존재여부를 판단하는 방법 등이 알려져 있다[13-16].

새로운 채널로 옮기기 위한 명령을 전달하기 위한 방법으로는 기존과 같이 IEEE 802.15.4 CSMA-CA (carrier sense multiple access - collision avoidance) 알고리즘을 이용하여 채널변경명령을 전송하는 방법, 슈퍼프레임 구조에서 각 슬롯에 대해 서로 충분히 떨어져 있는 두 개의 주파수 스펙트럼 채널 중 하나를 할당하고 한 채널의 슬롯에서 간섭이 발생하면 다른 채널의 슬롯을 통해서 간섭이 발생하는 채널을 변경하기 위한 명령을 전달하는 방법 등이 연구되었다[13, 15]. 그런데 기존의 CSMA-CA 알고리즘을 이용하여 채널변경명령을 전송하는 방법은 WiFi 트래픽 부하가 커질 경우 백오프지연시간이 크게 증가하고 백오프지연이 실패하는 경우도 늘어나서 채널을 신속하게 변경하기 어려운 문제가 있고, 슈퍼프레임 구조에서 두 개의 채널을 사용하는 방법은 평상시에도 일반적인 방법에 비해 두 배의 스펙트럼이 필요하며 노드들 간의 동기가 정확히 유지되어야 한다.

이 논문에서는 기존의 채널변경명령 전송방법의 문제점을 개선하기 위해, CSMA-CA 알고리즘을 적용하지 않고 IEEE 802.15.4 프레임을 전송했을 경우에 발생하는 충돌현상의 특성을 분석한다. 그리고 충돌되지 않은 잔여부분에 IEEE 802.15.4 프레임으로 간주될 수 있는 프레임형 식코드블럭들을 포함하는 프레임의 전송방법을 제안하고 실험적으로 그 특성을 확인하며 이를 응용한 채널변경명령 전송방법과 그 응답특성에 대해서 설명한다.

이를 위해 2장에서 IEEE 802.11과 중첩된 무선채널에서 IEEE 802.15.4 프레임의 전송지연과 CSMA-CA 알고리

음을 적용하지 않아 충돌이 발생한 경우 IEEE 802.11 노드의 동작과 충돌된 IEEE 802.11 프레임의 특성을 설명한다. 3장에서 프레임형식코드블록을 포함한 IEEE 802.15.4 프레임의 전송방법에 대해서 제안한다. 4장에서 제안된 방법의 특성을 확인하기 위한 실험시스템을 설명하고 측정된 결과를 이용하여 제안된 전송방법의 충돌특성과 프레임수신율에 대해서 분석한다. 또한 제안된 전송방법의 특성을 WiFi 트래픽의 부하가 큰 환경에서 채널을 변경하는 방법에 응용하는 경우 채널변경명령을 전송하고 응답을 확인하는데 걸리는 시간을 측정하여 기존전송방법과 비교하고 5장에서 결론을 맺는다.

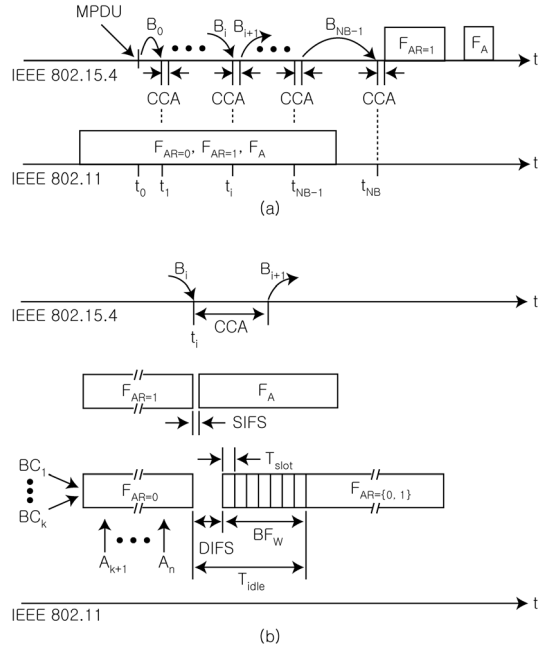
## 2. 중첩된 무선채널에서 프레임의 전송

### 2.1 IEEE 802.11과 중첩된 무선채널에서 IEEE 802.15.4 프레임의 전송

IEEE 802.15.4와 IEEE 802.11 프로토콜은 각 프로토콜이 다수의 노드들이 공유하는 무선채널을 통해 프레임을 전송하기 위해 전송하기 전에 무선채널이 비어있는지 확인하고 전송하는 CSMA-CA라 하는 경쟁적인 방식을 사용한다. 두 프로토콜에서 사용되는 CSMA-CA는 이름은 같지만 각각 서로 다른 특성을 갖는 응용을 지원하기 위해 고안되었기 때문에 프로토콜에 고유한 시정수들이나 자세한 동작에 있어서는 차이를 보인다.

IEEE 802.15.4의 CSMA-CA는 매체 접근 제어계층 프로토콜에 의해 MPDU (MAC protocol data unit)이 생성되면 난수발생기에 의해 백오프타이머 (backoff timer)를 초기화시키고 이 타이머가 줄어들어 0이 될 때 CCA (clear channel assessment) 기능으로 무선채널이 비어있다고 판단되면 프레임을 전송하고 그렇지 않은 경우 새로운 난수를 발생시켜서 다시 지연한다. 단, 백오프타이머가 줄어들고 있는 동안에는 무선채널이 비어있는지 지속적으로 확인하지는 않는다.

IEEE 802.11에서는 MPDU 생성시 채널이 비어있으면 프레임을 전송하고 그렇지 않은 경우 채널을 점유하고 있던 신호가 사라지고 일정시간 후까지 지연하고 난수를 발생시켜 백오프지연과정에 들어간다. 백오프지연과정 중에도 무선채널을 지속적으로 확인하면서 사용 중이면 백오프타이머를 정지시키고 비어있으면 감소시키다가 백오프타이머의 값이 0에 도달하면 프레임을 전송한다. 프레임전송의 성공은 응답 (acknowledgement) 프레임의 성공적인 수신여부로 결정되는데, 송신기는 정해진 시간



(그림 2) WiFi 트래픽의 간섭환경에서 IEEE 802.15.4 프레임의 전송지연  
(Figure 2) Delay of IEEE 802.15.4 frame transmission under WiFi traffic interference environment

이내에 응답프레임을 받지 못하면 재전송을 위해 다시 백오프지연과정에 들어간다.

그런데 만일 IEEE 802.15.4 노드들과 IEEE 802.11 노드들이 공간적으로 그리고 주파수 스펙트럼에 있어서 서로 중첩되는 경우에는 동일한 프로토콜을 사용하는 노드들만 아니라 다른 프로토콜을 사용하는 노드들에서 발생하는 프레임에 의해서 영향을 받게 된다. 그림 2(a)에 IEEE 802.15.4 노드에서 MPDU가 발생했을 때, 무선채널이 IEEE 802.11 프레임에 의해 이미 점유되어 있는 경우, 무선채널이 사용가능할 때까지 백오프절차를 반복하며 프레임전송이 지연되는 경우를 나타냈다. (그림 2)에서  $F_{AR=1}$ 은 수신기로부터 응답이 요구되는 프레임,  $F_{AR=0}$ 은 그렇지 않은 프레임,  $F_A$ 는 응답프레임과 같이 프레임을 수신한 후 주어진 시간 이내에 전송되는 프레임을 의미한다. IEEE 802.11 프레임에 표시된  $F_{AR=0}$ ,  $F_{AR=1}$ ,  $F_A$ 은 무선채널을 점유하고 있는 IEEE 802.11 노드들로부터 무선채널의 점유가 끝날 때까지 발생할 수 있는 프레임들을 의미한다.

(그림 2(b))는 (그림 2(a))에서 백오프지연 중인 IEEE

802.15.4 네트워크의 노드에서 백오프타이머가  $t_i$ 에 종료되어 무선채널이 비어있는지를 판정하는 CCA 기능이 실행되는 구간을 전후로 나타낼 수 있는 IEEE 802.11 프레임들을 확대해서 자세하게 나타낸 것이다. 실제로는 무선채널을 점유하고 있던 IEEE 802.11 프레임  $F_{AR=1}$  또는  $F_{AR=0}$ 이 IEEE 802.15.4 노드의 백오프지연  $B_i$ 가 종료되는 시점과 정확하게 일치할 가능성은 작지만, IEEE 802.15.4 노드의 관점에서 무선채널에 대해 CCA 기능을 적용한 후 채널을 점유할 수 있는지 추정하기 위해 CCA 시간과 IEEE 802.11 프레임들 사이의 간격이 비교될 수 있도록 표현하였다. (그림 2(b))에서 표현된 IEEE 802.11 프레임들 간에 유지되어야 하는 시간간격, 슬롯타임 (slot time), 백오프지연, CCA 시간은 두 프로토콜의 표준을 참조하면 (표 1)과 같이 정리된다[17, 18]. IEEE 802.11g 표준에서 BSS (basic service set)가 ERP (extended rate PHY) 스테이션들로 구성되어 있는 경우에는 길이가 9  $\mu$ s인 짧은 슬롯타임이 선택적으로 지원될 수 있도록 규정되어 있다.

(표 1) 802.11과 802.15.4 프로토콜 시정수, 단위 : (us)  
(Table 1) 802.11 and 802.15.4 protocol time constants, unit : (us)

	SIFS	DIFS	slot time	CCA
802.11b	10	50	20	< 15
802.11g OFDM, (long slot/shot slot)	10	28 / 50	9 / 20	< 4 / < 15
802.15.4	-	-	320	128

IEEE 802.11에서 프레임  $F_{AR=1}$ 은 응답프레임이 요구되므로 (그림 2(b))에 표시한 바와 같이 SIFS (short interframe space) 시간 10  $\mu$ s 후에 응답프레임  $F_A$ 가 나타난다. IEEE 802.15.4 노드는 CCA 시간 128  $\mu$ s 중 10  $\mu$ s 동안만 무선채널에 신호가 없는 경우이므로 무선채널이 사용 중이라고 판단하고 지연  $B_{i+1}$ 에 들어간다.

한편, IEEE 802.11 프레임  $F_{AR=0}$ 이 전송되고 그 프레임에 오류가 없는 경우에는 IEEE 802.11 노드들은 DIFS (distributed coordination function interframe space) 후에 백오프타이머를 감소시켜서 먼저 백오프타이머의 값이 0에 이르는 노드가 프레임  $F_{AR=\{0,1\}}$ 을 전송한다. 이 때, 백

오프지연과정을 거쳐서 다음 프레임이 무선채널에 나타날 때까지 걸리는 백오프지연시간  $BF_W$ 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$BF_W = \min\{BC_1, \dots, BC_k, BC_{k+1}, \dots, BC_n\} \cdot T_{slot} \quad (1)$$

여기서  $T_{slot}$ 은 단위백오프슬롯의 길이이고  $BC_1, \dots, BC_k$ 는 프레임  $F_{AR=0}$ 이 전송되기 전부터 백오프지연하고 있던 MPDU들에 대한 백오프타이머가 프레임  $F_{AR=0}$ 이 전송되면서 멈춘 상태에서 남아있는 백오프지연슬롯의 개수이다. 그리고  $BC_{k+1}, \dots, BC_n$ 은 프레임  $F_{AR=0}$ 가 전송되는 동안 발생한 MPDU  $A_{k+1}, \dots, A_n$ 에 대한 백오프지연슬롯의 개수를 의미한다. IEEE 802.11 표준에는 1회차 백오프지연 슬롯수의 최대값이 7로 규정되어 있으므로  $BC_{k+1}, \dots, BC_n$ 은 7이하의 값을 갖는다. 한편,  $BC_1, \dots, BC_k$ 는 충돌을 겪은 프레임에 대한 MPDU들에 대해서는 7보다 클 수도 있지만 충돌을 겪지 않았던 경우라면 7이하의 값을 갖게 되고 이미 백오프지연이 진행 중이었다라면 더 작은 값을 갖을 수도 있다.

직관적인 고찰을 위해 IEEE 802.11 프레임들 간에 충돌되는 경우를 제외하고 생각하면, 식 (1)에서  $BF_W$ 의 최대치는 7이다. IEEE 802.11 표준에서 슬롯시간이  $T_{slot} = 9 \mu$ s인 경우는 최대로 백오프지연이 되어도 IEEE 802.11 프레임  $F_{AR=\{0,1\}}$ 이 전송될 때까지 DIFS를 포함해서 채널이 비어있는 시간  $T_{idle}$ 의 최대치는  $T_{idle,max} = 91 \mu$ s로 계산되어 IEEE 802.15.4의 CCA시간 128  $\mu$ s보다 짧다. 한편, 슬롯시간이  $T_{slot} = 20 \mu$ s인 표준을 따를 때,  $\min\{BC_1, \dots, BC_n\}$ 가 3과 4인 경우에  $T_{idle}$ 의 값은 각각 110  $\mu$ s와 130  $\mu$ s로 계산된다. 따라서  $\min\{BC_1, \dots, BC_n\}$ 의 값이 3 이하인 경우에는  $T_{idle}$ 는 IEEE 802.15.4의 CCA시간보다 짧고, 4 이상인 경우에는 CCA시간보다 길게 된다.

IEEE 802.11 표준에서 백오프지연을 위해 발생하는 난수는 균일분포 (uniform distribution)를 갖는다고 규정되어 있기 때문에  $BC_1, \dots, BC_n$  각각이 4이상일 확률은 1/2이지만 백오프지연중인 MPDU 수가 증가하면  $T_{idle}$ 이 IEEE 802.15.4의 CCA시간보다 크게 될 확율은  $BC_1, \dots, BC_n$  전체가 동시에 4이상이어야 하므로 기하급수적으로 작아진다. 또한, 실제로 (그림 2(a))에서 IEEE

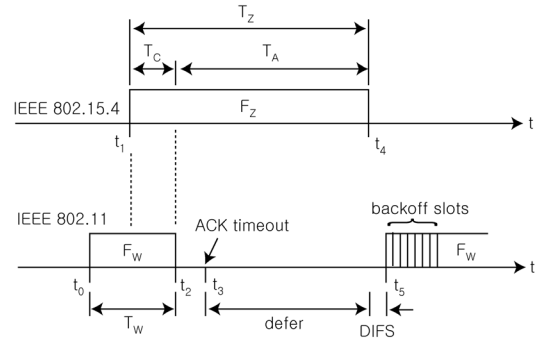
802.15.4 노드의 백오프지연  $B_1$ 가 종료되는 시점이 (그림 2(b))의 IEEE 802.11 프레임  $F_{AR=0}$ 의 종료되는 순간과 일치할 가능성도 작다. 따라서, IEEE 802.15.4 노드의 CCA 판정기준과 방법에 따라 달라지겠지만 단순히 시간적인 길이를 비교해볼 때, WiFi의 부하가 클수록 채널을 점유하며 전송되고 있는 IEEE 802.11 프레임들 사이에서 IEEE 802.15.4 노드가 채널이 비어있다고 판단할 가능성이 줄어들기 때문에 연속되는 IEEE 802.11 프레임들이 채널에서 사라질 때까지 IEEE 802.15.4 프레임의 전송은 지연될 가능성이 커지게 된다.

## 2.2 충돌된 IEEE 802.15.4 프레임과 IEEE 802.11 노드의 동작

IEEE 802.15.4는 데이터전송률이 250 kbps로 일정하지만 IEEE 802.11은 다양한 데이터전송률을 지원하므로 동일한 데이터 크기의 MPDU에 대해서도 물리계층을 통해서 무선채널로 전송되는 프레임의 시간적인 길이는 데이터전송률에 따라 다르고 데이터전송률이 높을수록 짧아진다. 예를 들어 IEEE 802.15.4에서 최대크기인 127 byte의 MPDU와 IEEE 802.11에서 1500 byte 크기의 MPDU의 전송시간을 계산해 보면, IEEE 802.15.4에서는 4,064  $\mu$ s, IEEE 802.11에서는 1 Mbps의 데이터전송률로 12,000  $\mu$ s, 55 Mbps의 데이터전송률로 222  $\mu$ s의 시간이 소요된다.

이 논문은 IEEE 802.11의 트래픽으로 인하여 간섭을 받는 IEEE 802.15.4 노드들에서 데이터를 전송할 수 있는 방법을 찾고 이를 응용할 수 있는 토대를 마련하는 것을 목표로 하기 때문에, IEEE 802.11 노드들에 대해서는 수정을 하지 않고 IEEE 802.15.4 노드들의 프레임전송시기나 프레임에 포함되는 데이터의 형식을 적절하게 정의한다. 그리고 IEEE 802.11 네트워크는 사용자수나 교환되는 데이터의 양이 엄청난 규모로 커지고 있으므로 IEEE 802.11 노드들은 고속의 데이터전송률을 가정한다.

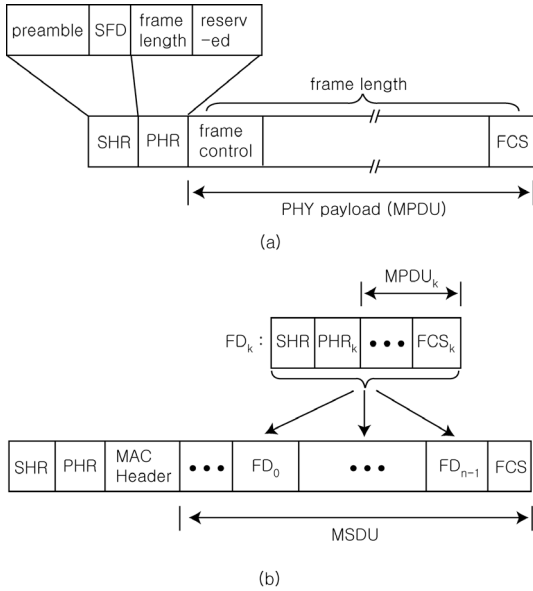
원래 IEEE 802.15.4 프로토콜에서 데이터나 명령프레임을 전송할 경우에는 CSMA-CA 알고리즘이 적용되지만, 이 절에서는 이것을 적용하지 않고 바로 전송하는 경우를 가정한다. 그러면 IEEE 802.15.4 프레임이 전송되는 순간에 무선채널이 비어있으면 그 프레임은 무선채널을 즉시 점유하며 IEEE 802.15.4 수신기에 성공적으로 전달될 수 있다. 반면에 (그림 3)에 나타난 것과 같이 IEEE 802.11 트래픽이 무선채널을 이미 점유하고 있는 상황에서 IEEE 802.15.4 노드가 프레임을 전송하게 되면 충돌이 발생하게 된다.



(그림 3) 충돌된 IEEE 802.15.4 프레임과 IEEE 802.11 노드의 동작  
(Figure 3) Collided IEEE 802.15.4 frame and IEEE 802.11 node's operation

(그림 3)에서 시각  $t_0$ 에 길이가  $T_W$ 인 IEEE 802.11 프레임  $F_W$ 가 무선채널을 점유하고 전송 중인 상황에서 시각  $t_1$ 에 IEEE 802.15.4 노드에서 길이가  $T_Z$ 인 프레임  $F_Z$ 가 전송되면 시각  $t_1$ 부터  $t_2$ 까지 시간  $T_C$ 동안 충돌이 발생한다. 한편 시각  $t_0$ 에서 프레임  $F_W$ 을 전송한 IEEE 802.11 네트워크의 송신기에서는 응답프레임을 받을 수 없기 때문에 응답프레임 수신을 위해 설정된 타이머가 종료되는 “ACK timeout” 사건이 시각  $t_3$ 에서 발생하고 다시 백오프절차에 들어간다. 그런데 시각  $t_2$ 에서 시각  $t_4$  사이의 시간  $T_A$  동안에는 IEEE 802.15.4 프레임  $F_Z$ 의 신호가 채널에 나타나고 있기 때문에 IEEE 802.11 노드들의 백오프타이머는 정지되고 프레임  $F_Z$ 의 신호가 사라질 때까지 전송을 지연한 후 DIFS 시간이 경과한 시각  $t_5$ 에 다시 백오프타이머가 감소되기 시작해서 먼저 0에 이르는 노드가 프레임을 전송한다. 그림 3에서 프레임의 충돌되지 않은 잔여시간  $T_A$  동안 IEEE 802.11 노드들이 프레임을 전송하지 않기 때문에, 이 부분의 신호를 IEEE 802.15.4 노드들이 디코드 (decode)해서 수신할 수단이 있으면, 비록 IEEE 802.15.4 프레임의 앞부분은 충돌로 인해 수신기가 해석할 수 없어서 버려지지만 잔여부분은 데이터를 전송하는데 사용될 수 있다.

이러한 방법으로 IEEE 802.15.4 네트워크의 노드의 데이터 전송에 이용될 수 있는 시간  $T_A$ 는 IEEE 802.15.4 프레임의 길이  $T_Z$ , IEEE 802.11 프레임의 길이  $T_W$ , 그리고 충돌이 시작되는 위치에 따라 달라질 수 있다. IEEE 802.11 네트워크의 데이터전송률이 낮거나 다수의 프



(그림 4) 프레임형식코드블럭이 포함된 IEEE 802.15.4 프레임 구조

(Figure 4) IEEE 802.15.4 frame structure including frame-formatted code blocks

입이 SIFS 간격을 유지하면서 연속적으로 전송되고 마지막에 응답프레임을 받는 경우에는 IEEE 802.11 프레임이 무선채널을 차지하는 시간이 길어져서 충돌 후 IEEE 802.15.4 노드의 데이터 전송에 이용될 수 있는 시간은 확률적으로 줄어들지만, IEEE 802.11의 데이터전송률이 높아질수록 IEEE 802.11 프레임의 길이가 짧아지므로 IEEE 802.15.4 프레임 중 충돌되지 않은 잔여부분은 커지게 되어 더 많은 데이터의 전송에 활용될 수 있게 된다.

### 3. WiFi 트래픽의 간섭환경에서 IEEE 802.15.4 프레임 전송방법과 형식

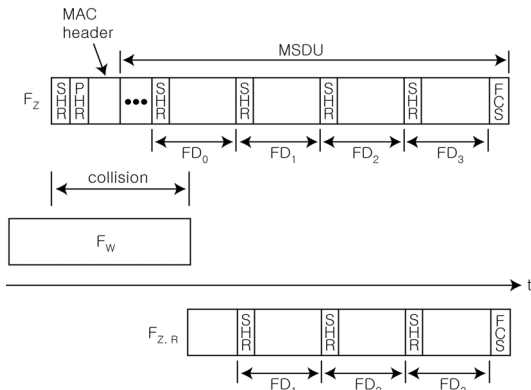
IEEE 802.15.4 프로토콜의 매체접근제어계층에 의해 생성된 MPDU는 하위의 물리계층 헤더가 MPDU의 앞에 추가되면서 무선채널로 전송된다. 그림 4(a)에 물리계층에 의해 전송되는 IEEE 802.15.4 프레임의 형식을 나타냈다. 물리계층에서 추가되는 헤더는 SHR (synchronization header)와 PHR (PHY header)인데, SHR는 수신기에 도달되는 프레임신호에 대해 수신기가 동기를 맞추기 위한 프리앰블 (preamble)과 프레임의 시작을 표시하는 SFD

(start-of-frame delimiter)로 구성되고 각각 16진수로 {0x00, 0x00, 0x00, 0x00}와 0xA7의 코드값으로 표현된다. SHR 다음에 위치한 PHR에는 MPDU의 길이를 의미하는 “frame length”가 포함되어 있다. 따라서 IEEE 802.15.4 프레임 수신기는 평소에 수신대기 상태에 있다가 프리앰블과 SFD 신호가 무선채널을 통해 수신기의 물리계층에 나타나면 동기를 맞추고 그 이후의 프레임신호를 디코드하고 “frame length” 항의 값만큼 데이터를 프레임으로부터 복사하여 수신기의 버퍼에 저장한다. “frame length”는 7 bit 크기로서 FCS (frame check sequence)를 포함해서 크기가 최대 127 byte의 데이터를 나타낼 수 있다. IEEE 802.15.4 프레임 송수신을 지원하는 부품들은 수신되는 프레임을 디코드하면서 수신기의 버퍼에 저장하는 동시에 오류를 검사하는 기능을 수행하는 하드웨어를 갖추고 있어서 마지막에 위치한 FCS 코드의 수신시 수신된 프레임의 오류를 판정할 수 있다. IEEE 802.15.4 표준에는 식 (2)와 같은 다항식을 이용하여 MPDU의 FCS에 기록되는 CRC (cyclic redundancy code) 검사코드를 계산하고 수신되는 프레임의 오류를 검사하도록 규정되어 있다.

$$G_{16}(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1 \quad (2)$$

이 논문에서는 WiFi 트래픽의 간섭이 클 때, IEEE 802.15.4 노드들이 데이터를 전송하기 위한 방법으로서 그림 4(b)에 나타낸 것처럼 IEEE 802.15.4 프레임의 MSDU (MAC service data unit)에 FD<sub>k</sub>와 같이 IEEE 802.15.4 프레임의 SHR부터 FCS까지를 포함하는 프레임형식코드블럭들을 실어서 CSMA-CA 알고리즘을 적용하지 않고 전송하는 방법을 제안한다. 프레임형식코드블럭 FD<sub>k</sub>는 동기를 위한 SHR, 물리계층헤더 PHR<sub>k</sub>, MPDU MPDU<sub>k</sub>로 구성된다. 여기서 k=0, ..., n-1이고 n은 MSDU에 포함된 프레임형식코드블럭들 FD<sub>0</sub>, ..., FD<sub>n-1</sub> 전체가 프레임에 포함될 수 있도록 설정되어야 한다. 그리고 PHR<sub>k</sub>에는 MPDU<sub>k</sub>의 크기를 나타내는 “frame length”가 포함되고 FCS<sub>k</sub>에는 MPDU<sub>k</sub>에 대한 오류검사 코드가 기록된다.

이러한 형식의 IEEE 802.15.4 프레임을 CSMA-CA 알고리즘을 적용하지 않고 전송했을 때 IEEE 802.11 프레임에 충돌을 일으키면, (그림 3)에 나타낸 바와 같이 IEEE 802.11 노드들은 CSMA-CA 알고리즘을 준수하므로 IEEE 802.15.4 프레임이 무선채널에서 사라질 때까지 새로운 전송이 지연된다. 그동안 채널에 나타나는 IEEE



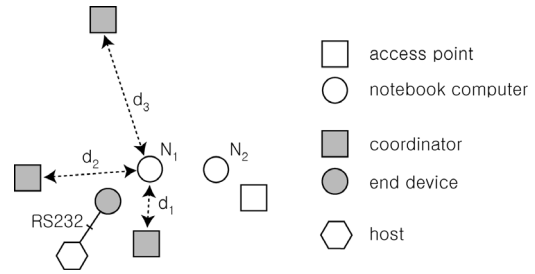
(그림 5) 충돌 후 수신기에 수신되는 프레임  
(Figure 5) Frames received by receivers after collision

802.15.4 프레임 신호부분에 프레임형식코드블럭이 포함되어 있으면 수신기는 이 코드블럭의 헤더에 동기를 맞추고 수신가능하게 된다.

예를 들어 (그림 5)에 나타낸 바와 같이 IEEE 802.15.4 프레임  $F_z$ 의 MSDU에 프레임형식코드블럭  $FD_0$ ,  $FD_1$ ,  $FD_2$ ,  $FD_3$ 가 포함되어 전송되고 프레임  $F_z$ 의 헤더에서부터  $FD_0$ 의 일부분이 IEEE 802.11 프레임  $F_w$ 와 충돌된다고 하면, 프레임  $F_z$  중에서  $F_{z,r}$  부분과 같이 충돌되지 않은  $FD_0$ 의 나머지 부분과  $FD_1$ ,  $FD_2$ ,  $FD_3$ , FCS에 해당되는 신호는 수신기에 도달된다. 그런데  $FD_1$ ,  $FD_2$ ,  $FD_3$ 이 각각 프리앰블과 SFD로 구성된 SHR를 포함하고 있기 때문에 IEEE 802.15.4 노드들의 물리계층에서는 수신되는 신호에 대해 동기를 맞춘 후 SFD에서 시작위치를 인식할 수 있다. 따라서  $FD_1$ ,  $FD_2$ ,  $FD_3$ 는 수신기에 의해서 IEEE 802.15.4의 개별 프레임으로 간주되고 여기에 포함되어 있는 MPDU들  $MPDU_1$ ,  $MPDU_2$ ,  $MPDU_3$ 는 IEEE 802.15.4 노드의 매체접근제어계층에 전달될 수 있게 된다.

#### 4. 실험 및 결과 고찰

(그림 6)에 이 논문에서 제안된 방법을 실험적으로 확인하기 위한 시스템을 나타냈는데, IEEE 802.15.4 프로토콜을 사용하는 네트워크는 코디네이터 (coordinator)와 종단장치 (end device)로 구성되어 있고 WiFi 트래픽을 발생시키는 네트워크는 노트북컴퓨터들과 액세스포인트로 구성되어 있다. WiFi 노드와의 거리가  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ 가 되



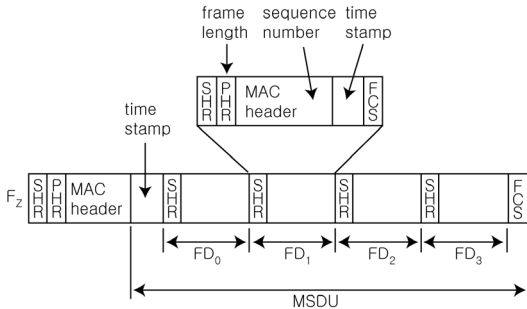
(그림 6) 간섭환경에서 제안된 방법의 시험을 위한 시스템  
(Figure 6) System to test the proposed method under interference environment

록 코디네이터의 위치를 변경하면서 각 위치마다 WiFi 트래픽의 다양한 부하조건에 대해 측정한다.

코디네이터와 종단장치는 IEEE 802.15.4 프레임의 송수신이 가능한 Texas Instrument사의 CC2530 칩이 장착되어 있는 CC2530EM을 입출력기능과 USB, UART를 통한 통신기능이 있는 SmartRF05EB과 결합하여 사용한다. 코디네이터나 종단장치의 내부에서 측정된 데이터는 UART 프로토콜을 사용하여 RS232 포트를 통해 호스트 (host) 컴퓨터로 전송되어 감시되고 사후처리 및 분석을 위해 호스트 컴퓨터 내에 저장된다.

코디네이터에서 제안된 방법의 IEEE 802.15.4 프레임을 발생시키기 위해, Texas Instrument사의 CC2530 칩의 송수신 기능을 시험하기 위한 예제 프로그램 “CC2530-Software-Example-Rev-B”를 수정하여 일정시간마다 프레임을 전송한다. 종단장치에서는 CSMA-CA의 알고리즘과 매체접근제어계층 기능을 지원하고 API (application programming interface)를 편리하게 활용할 수 있는 “TIMAC-CC2530-1.4.0” 프로그램을 이용하여 코디네이터로부터 프레임이 수신될 때마다 프레임에 포함되어 있는 측정 및 분석을 위한 데이터를 RS232 포트를 통해 호스트 컴퓨터로 전송한다. WiFi 네트워크의 노트북컴퓨터에서는 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.

제안된 방법의 특성을 실험적으로 확인하기 위해 코디네이터와 종단장치는 각각 송신기와 수신기로 사용되고 (그림 7)과 같은 형식의 프레임을 주기적으로 전송한

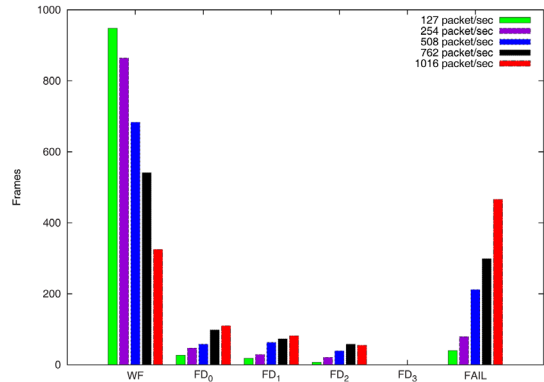


(그림 7) 제안된 방법의 시험을 위한 프레임의 구조  
(Figure 7) Frame structure to test the proposed method

다. 송신기에서 전송되는 각 프레임의 “time stamp” 값들은 프레임에 포함된 프레임형식코드블럭의 위치에 관계없이 동일한 값이 사용되고 프레임이 전송될 때마다 1씩 증가된다. “sequence number”는 송신기에서 전송된 프레임에 포함된 네 개의 프레임형식코드블럭  $FD_0, FD_1, FD_2, FD_3$  중 어느 것이 수신기에 수신되었는지 구분하기 위해 {0x00, 0x01, 0x02, 0x03}의 값을 순차적으로 반복하여 사용한다. 송신기에서 전송된 프레임이 충돌되지 않은 경우는 프레임형식코드블럭들이 개별적인 프레임으로 간주되지 않고 한번에 수신되는데 이 경우는 PHR에 있는 “frame length”항의 값을 이용하여 구별한다.

(그림 8)에 WiFi 트래픽 부하의 크기가 다른 조건에서 제안된 방법으로 IEEE 802.15.4 프레임을 일정시간간격으로 전송할 때, 수신기에서 성공적으로 수신되는 프레임들을 수집하고 송신기에서 전송된 각 프레임마다 충돌을 겪은 후 수신된 첫 번째 위치의 프레임형식코드블럭에 해당되는 프레임의 개수를 히스토그램으로 나타냈다. 그림 8에서 서로 다른 색깔로 표시된 그래프들은 각각 WiFi의 트래픽이 TCP 프로토콜의 MTU가 1500 byte이고 초당 발생하는 패킷수가 각각 127, 254, 508, 762, 1016 개로 설정한 상태에서 측정된 결과를 나타내는데, 여기에서 측정을 위해 사용된 IEEE 802.15.4 프레임의 개수는 각각 1040, 1040, 1055, 1069, 1038이다.

(그림 8)에서 WF는 충돌을 겪지 않고 온전한 프레임이 수신된 경우이고,  $FD_i$ 는 송신기에서 전송된 어떤 프레임의 헤더부터  $FD_i$  이전까지는 충돌을 겪었지만  $FD_i$ 를 포함한 이후의 프레임형식코드블럭들은 크기가 작은 독립된 프레임으로 간주되어 수신된 경우를 의미한다. 여기서  $i = 0, \dots, 3$ 이다. 그리고 FAIL은 프레임이 수신기

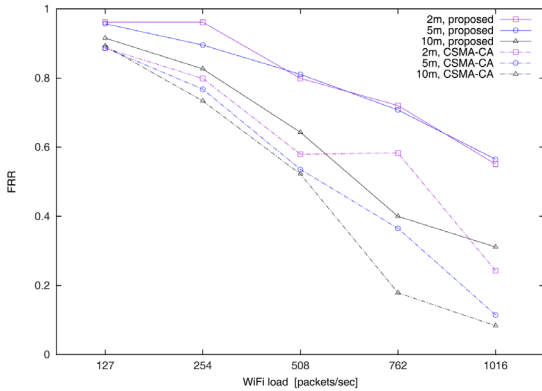


(그림 8) 충돌 후 수신된 첫 번째 프레임의 분포  
(Figure 8) Distribution of the first frame received after collision

에 도착하지 않은 경우를 의미한다. 프레임이 도착하지 않은 경우는 송신기에서 (그림 7)과 같이 “time stamp”가 프레임에 포함되어 전송되기 때문에 수신기에서는 성공적으로 디코드된 프레임에서 “time stamp”값이 건너뛰었을 때 직전에 수신된 값과의 차이를 이용하여 도착되지 않은 프레임 수를 계산하는 방식으로 판단한다.

(그림 8)에서 WiFi의 부하가 초당 127 패킷일 경우와 1016 패킷일 경우에 대해, 전체 프레임이 온전히 수신된 경우 WF는 각각 948과 1016으로 관찰되어 부하가 커질수록 온전하게 수신되는 프레임의 수가 줄어드는 특성을 보이고 있고, 반면에 프레임 수신이 실패한 경우 WF에 대해서는 각각 40과 466으로 부하가 커질수록 프레임 수신실패가 증가하는 것으로 나타나고 있다. 프레임에서 충돌을 겪지 않은 부분에 포함된 프레임형식코드블럭 신호가 디코드되어 수신되기 시작하는 첫 번째 위치  $FD_i$ 의 프레임 수를  $n(FD_i)$ 라 할 때, WiFi의 각 트래픽 부하에 대해 측정된  $\{n(FD_0), n(FD_1), n(FD_2), n(FD_3)\}$ 는 WiFi 트래픽 부하가 초당 127 패킷인 경우에 {27, 18, 7, 0}, 초당 254 패킷인 경우에 {47, 29, 21, 0}, 초당 508 패킷인 경우 {58, 63, 39, 0}, 초당 762 패킷인 경우 {98, 73, 58, 0}, 초당 1016 패킷인 경우 {110, 82, 55, 0}으로 나타난다. WiFi 트래픽 부하가 적은 경우에는 IEEE 802.15.4 송신기에서 전송된 프레임이 대부분 충돌을 겪지 않고 수신기에서 온전한 프레임으로 수신되지만, WiFi 트래픽 부하가 커질수록 온전한 프레임의 수신은 줄어들고 또한 충돌을 겪은 후 프레임형식코드블럭  $FD_i$ 가 프레임으로 간주되어 수신되는 경우가 상대적으로 증가한다. 그리고





(그림 9) 프레임수신율  
(Figure 9) Frame reception ratio

WiFi의 각 부하에서 대체로  $n(FD_0) > n(FD_1) > n(FD_2) > n(FD_3)$  이고  $n(FD_3) = 0$ 인 특성을 보이므로 WiFi 트래픽과의 충돌은 IEEE 802.15.4 프레임의 앞부분에서 주로 발생하는 것으로 추정할 수 있다.

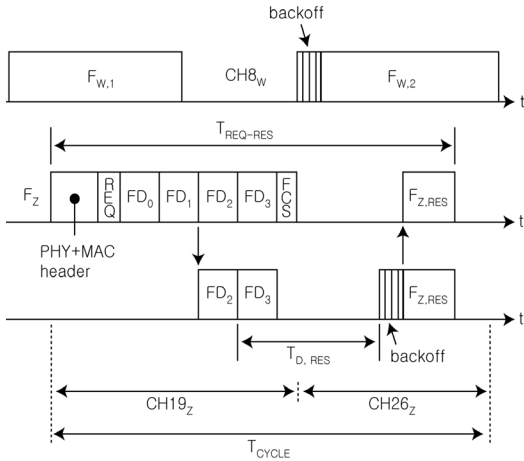
위와 같은 특성을 보이는 제안된 방법은 IEEE 802.15.4 네트워크와 채널이 겹치는 WiFi 네트워크의 트래픽 부하가 큰 환경에서 프레임 전송에 장애를 겪는 IEEE 802.15.4 노드들이 길이가 짧은 데이터를 전송하는데 응용할 수 있다. 예를 들어 WiFi 트래픽으로부터 장애가 심하게 발생되고 있는 것을 탐지한 IEEE 802.15.4 네트워크의 코디네이터가 중단장치들에게 동작하고 있던 채널을 WiFi 트래픽의 간섭이 없거나 약한 다른 채널로 변경해서 새로운 채널에서 동작하기 위한 명령을 전송하는 경우에, 이 논문에서는 (그림 7)과 같은 형식의 프레임에서 "time stamp" 필드를 전송했던 방식과 같이 채널변경명령코드를 IEEE 802.15.4 프레임의 MSDU의 앞부분과 프레임형식코드블럭  $FD_0, FD_1, FD_2, FD_3$ 가 개별적인 프레임으로 수신될 경우 동일한 의미로 해석되는 위치에 배치하여 전송한다. 그러면 IEEE 802.15.4 프레임이 한번 전송될 때, 채널변경명령코드가 연속해서 5번 전송되는 것과 같은 효과를 갖게 되고 IEEE 802.15.4 프레임의 앞부분에서 충돌이 발생하더라도 뒷부분의 프레임형식코드블럭들은 수신기에서 동기를 맞추고 올바르게 수신될 수 있으므로 송신기가 전송된 채널변경명령코드가 수신기에 올바르게 전달될 확률이 커지게 된다. (그림 9)에 이 방법으로 전송한 프레임에 대한 프레임수신율 FRR (frame reception ratio)를 나타냈다.

이 실험은 (그림 9)에서 IEEE 802.15.4 네트워크의 코

디네이터가 WiFi 네트워크의 노드와 거리가  $d_1 = 2m, d_2 = 5m, d_3 = 10m$ 가 되도록 위치를 변경하고 각 위치마다 WiFi 트래픽의 여러 부하조건에 대해서 IEEE 802.15.4 프레임을 1000회 이상 전송했을 때 중단장치에서 성공적으로 수신되는 프레임의 비율을 나타낸 것이다. 여기에서 코디네이터에서 전송한 어떤 프레임이 충돌을 겪어서 MSDU에 포함된 프레임형식코드블럭  $FD_0, FD_1, FD_2, FD_3$ 의 전체 또는 일부분이 독립된 프레임으로 간주되어 여러 개가 중단장치에 수신되더라도 프레임형식코드블럭에 포함되어 있는 명령코드는 동일하기 때문에 1개의 프레임으로 계산하였다. (그림 9)에서 '□', '○', '△' 표시의 그래프는 코디네이터와 WiFi 노드사이의 거리가 각각  $d_1 = 2m, d_2 = 5m, d_3 = 10m$ 을 의미하고 실선으로 표시된 그래프는 이 논문에서 제안된 형식의 프레임을 전송하는 경우이다. 제안된 방법과 비교를 위해 점선으로 표시된 그래프는 프레임형식코드블럭  $FD_1$ 와 내용과 길이가 같은 짧은 IEEE 802.15.4 프레임을 기존의 CSMA-CA 알고리즘을 적용하여 전송한 경우의 결과이다.

비교되는 두 방식이 모두 WiFi 네트워크와 IEEE 802.15.4 네트워크의 코디네이터간의 거리에 관계없이 WiFi 트래픽 부하가 커질수록 프레임수신율이 떨어지는 현상을 나타낸다. 코디네이터와 WiFi 네트워크의 거리가 멀어질수록 프레임수신율이 낮아지는 특성을 보이지만 제안된 방법은 5m의 거리에서는 프레임수신율이 2m의 경우에 비해서 떨어지지 않고 거의 비슷한 성능을 유지하는 것으로 나타난다. 각 거리마다 제안된 방법과 기존의 방법을 비교하면 전체적으로 제안된 방법의 프레임수신율이 높게 나타나는 특성을 보인다. WiFi 트래픽의 부하가 127 packet/sec인 경우에는 제안된 방법이 거리 {2m, 5m, 10m}에 대해 프레임수신율이 {0.97, 0.95, 0.91}, 기존 방법이 {0.88, 0.88, 0.89}로 나타나서 차이가 무의미할 정도로 작지만, WiFi 트래픽 부하가 1016 packet/sec인 경우에는 각각 {0.55, 0.56, 0.31}과 {0.24, 0.11, 0.08}로서 나타나서 프레임수신율이 개선되는 것으로 나타나고 특히 거리가 10m인 경우에는 기존방법으로 0.08로 프레임 전송이 거의 불가능하지만 제안된 방법으로는 0.31까지 개선된 것을 볼 수 있다.

앞에서 설명한 실험 결과는 WiFi 트래픽 부하가 큰 경우에, 제안된 방법으로 IEEE 802.15.4 노드가 크기가 작은 데이터를 성공적으로 전송할 확률이 높은 것을 보여준다. 이제 WiFi 트래픽 부하로 인해 IEEE 802.15.4 네트



(그림 10) 채널변경반응시간 측정방법

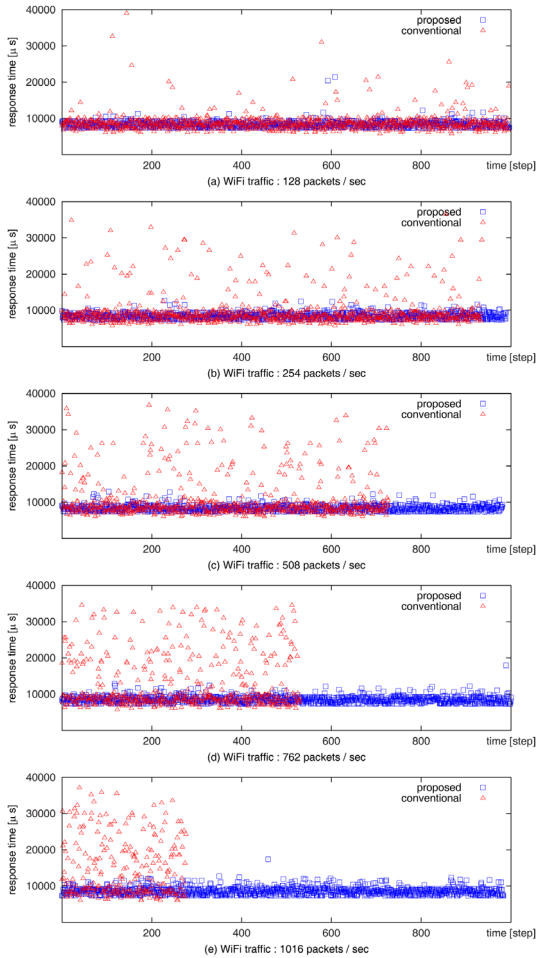
(Figure 10) Method to measure channel change response time

워크의 노드들이 전송에 장애를 겪을 때, IEEE 802.15.4 네트워크의 노드들이 WiFi 트래픽 신호의 간섭이 적거나 없는 다른 채널로 동작하기 위해서는 코디네이터가 채널 변경을 요구하는 명령을 중단장치들에게 전달한 후 코디네이터와 중단장치들이 새로운 채널로 자신의 동작채널을 설정하면 WiFi의 간섭을 피할 수 있게 된다. 여기에서는 제안된 프레임전송방법을 사용해서 이러한 과정이 얼마나 신속하게 이루어지는지 확인하기 위해, (그림 10)에 나타난 바와 같이 코디네이터가 채널변경명령을 전송할 때부터 중단장치로부터 채널이 변경되었다는 것을 확인할 때까지 걸리는 시간인 채널변경반응시간  $T_{REQ-RES}$ 를 측정한다. 이 논문에서는 주파수 스펙트럼이 서로 겹치는 WiFi 채널 8 ( $CH8_W$ )과 IEEE 802.15.4 채널 19 ( $CH19_Z$ )에서 WiFi 네트워크와 IEEE 802.15.4 네트워크를 동작시킨 후 IEEE 802.15.4 네트워크의 노드들이 주파수 스펙트럼이 겹치지 않는 채널 26 ( $CH26_Z$ )에서 동작시키는 실험을 수행한다. (그림 10)에서  $F_{W,1}$ 과  $F_{W,2}$ 는 WiFi 프레임,  $F_Z$ 와  $F_{Z,RES}$ 는 IEEE 802.15.4 프레임을 의미한다. IEEE 802.15.4 프레임  $F_Z$ 는 채널변경명령 “REQ”가 MSDU의 앞부분과 프레임형식코드블럭들에 포함되어 채널 19에서 코디네이터에 의해 브로드캐스트(broadcast) 주소로 전송된다. 코디네이터는 프레임  $F_Z$ 를 전송하는 즉시 채널을 26번으로 바꾸고 중단장치로부터의 응답을 기다린다. 프레임  $F_Z$ 가 WiFi 프레임  $F_{W,1}$

과 충돌을 일으키면 (그림 10)에 나타난 것처럼 충돌되지 않은 부분의  $FD_2$ ,  $FD_3$ 가 프레임으로 간주되어 중단장치에 수신될 수 있다. 중단장치는  $FD_2$ 에 포함되어 있는 “REQ” 명령코드를 해석하고 일정시간  $T_{D,RES}$ 만큼 지연 후 변경된 채널 26에서 “REQ” 명령코드에 대한 응답프레임  $F_{Z,RES}$ 를 CSMA-CA 알고리즘을 사용하여 코디네이터에게로 유니캐스트 (unicast) 방식으로 전송한다.  $T_{D,RES}$ 는 중단장치가  $FD_2$ 를 수신할 때 프레임  $F_Z$  내에서 위치를 알기 때문에  $F_Z$ 의 잔여시간보다 크도록 설정한다.  $FD_2$ 에 이어서 수신되는  $FD_3$ 는 동일한 명령코드 “REQ”를 포함하므로 무시한다. 이 실험은 IEEE 802.15.4 코디네이터와 WiFi 노드 사이의 거리를 약 2m 정도로 유지하고 여러 조건의 WiFi 트래픽 부하에 대해 매회  $T_{CYCLE} = 3.5$  s의 주기로 1000회 이상 반복해서 수행되었다.

(그림 11)에 WiFi 트래픽의 각 부하조건마다 1000회 동안 측정된 채널변경반응시간을 나타냈다. 그림에서 ‘□’와 ‘△’ 표시는 IEEE 802.15.4의 코디네이터가 이 논문에서 제안된 방법으로 전송한 경우와 기존방법으로 전송한 경우를 나타낸다. 성능의 비교를 위해 측정된 데이터를 각 그림의 좌측부터 표시했고 우측 부분에 표시되지 않은 경우는 어떤 측정주기  $T_{CYCLE}$  동안 응답  $F_{Z,RES}$ 를 받지 못한 경우들을 의미한다. 실험결과를 전체적으로 살펴보면, 제안된 방법은 대부분 1000 회의 측정결과가 표시되었지만 기존의 방법은 WiFi의 부하가 증가할수록 측정되지 못한 경우가 많아지는데, 그 이유는 WiFi 트래픽 부하가 커질수록 IEEE 802.15.4 네트워크의 코디네이터가 CSMA-CA 알고리즘을 적용할 때 백오프지연이 실패해서 전송을 하지 못하는 경우가 증가하기 때문이다. 그리고 제안된 방법의 채널변경지연시간은 WiFi 트래픽 부하와 관계없이 대략 7 ms와 10 ms 사이에서 관찰되지만, 기존의 방법은 WiFi 트래픽 부하가 작은 경우에는 제안된 방법과 비슷한 결과를 보이지만 부하가 증가할수록 최대 36 ms의 범위에서 지연이 커지고 그 빈도도 증가하는 것으로 나타난다.

이러한 실험 결과를 볼 때, 이 논문에서 제안된 방법은 WiFi 트래픽 부하가 커서 IEEE 802.15.4 노드들에 장애가 심한 경우에 길이가 짧은 데이터를 전송하거나 이를 응용한 경우로서 IEEE 802.15.4 네트워크의 동작채널을 변경시키는데 효과적임을 알 수 있다.



(그림 11) 채널변경반응시간  
(Figure 11) Channel change response time

## 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 발생할 때, IEEE 802.15.4 네트워크의 노드들을 새로운 채널에서 동작시키기 위한 IEEE 802.15.4 프레임 전송방법과 특성에 서술하였다.

WiFi 트래픽이 IEEE 802.15.4 네트워크에 간섭을 일으키는 환경에서 간섭현상의 판정, 새로운 채널의 탐색, 새

로운 채널로 이동하기 위한 명령의 전달 등 WiFi 트래픽 부하로 인한 간섭에 대처하는 연관된 연구에 대해서 조사하였다.

IEEE 802.11와 중첩된 무선채널에서 IEEE 802.15.4 프레임을 전송할 경우의 동작과 타이밍에 대해서 분석하고, CSMA-CA 알고리즘이 적용되지 않은 IEEE 802.15.4 프레임이 IEEE 802.11 노드들의 프레임전송에 미치는 영향을 설명하였다. IEEE 802.11의 데이터전송률이 높은 경우 IEEE 802.11 프레임의 길이가 짧기 때문에, IEEE 802.11 프레임을 전송하던 중에 IEEE 802.15.4 프레임이 발생하면, IEEE 802.11 노드들은 프레임의 전송 직후부터 IEEE 802.15.4 프레임의 충돌되지 않은 잔여부분이 사라질 때까지 채널을 확인하며 대기하게 된다.

일반적으로 충돌된 IEEE 802.15.4 프레임은 폐기되지만, 충돌되지 않은 잔여부분에 신호로 변화되었을 때 물리계층에서 프레임으로 인식될 수 있는 코드블럭을 포함하고 있으면 IEEE 802.15.4 노드가 그 코드블럭의 물리계층헤더 부분에서 동기를 맞추고 하나의 프레임으로 간주하여 수신가능하게 된다. 이 논문에서는, WiFi 트래픽 부하가 커서 IEEE 802.15.4 노드가 장애를 겪을 때, 이러한 생각이 가능한지 실험적으로 확인하고 그 특성을 분석하기 위한 IEEE 802.15.4 프레임의 형식을 정의하였다.

제안된 방법의 특성을 관찰하고 분석하기 위해, 노트북컴퓨터와 AP로 구성된 WiFi 네트워크와 IEEE 802.15.4 프레임을 송수신할 수 있는 Texas Instrument사의 CC2530 칩이 장착되어 있는 CC2530EM을 사용하여 IEEE 802.15.4 네트워크를 구성한 후, 노트북컴퓨터에서 “Nuts About Nets, LLC”의 “netstress” 프로그램으로 WiFi 트래픽을 발생시켰다. IEEE 802.15.4 네트워크의 수신기에서는 CSMA-CA 알고리즘과 호환성을 유지하고 제공되는 API를 활용하기 위해 Texas Instrument사의 “TIMAC-CC2530-1.4.0” 프로그램을, 그리고 송신기에서는 “CC2530-Software-Example-Rev-B”을 수정하여 제안된 형식의 프레임과 전송방법으로 IEEE 802.15.4 프레임을 주기적으로 발생시켰다.

실험결과 제안된 프레임 형식과 전송방법으로 어떤 IEEE 802.15.4 프레임을 전송했을 때, WiFi 트래픽과의 충돌은 대부분 프레임에서 MSDU보다 앞에서 발생하고 프레임의 뒷부분으로 갈수록 줄어드는 것으로 나타났다. 이 결과는, WiFi 트래픽 부하가 클 때, IEEE 802.15.4 노드가 CSMA-CA 알고리즘을 적용하지 않고 프레임을 전송하면 WiFi 트래픽과 충돌이 발생할 수 있는데, 프레임에서 충돌을 거의 겪지 않는 뒷부분에 프레임형식코드블

력을 배치하여 전송에 활용하는 것이 가능하다는 것을 확인하는 것이다.

이러한 특징에 대한 응용으로서 송신기에서 동일한 데이터를 프레임형식코드블럭에 포함하여 네 개의 프레임형식코드블럭을 MSDU에 실어서 프레임으로 전송했을 때, 수신기에서 프레임수신율은, WiFi 네트워크에서 실질적인 데이터전송률이 더 이상 증가되지 않을 정도로 WiFi 트래픽 부하가 큰 경우에, 기존의 전송방법은 IEEE 802.15.4 코디네이터와 WiFi 노드 사이의 거리에 따라서 최소 0.08에서 최대 0.24로 관찰되는 반면에 제안된 방법은 최소 0.31에서 최대 0.56로 나타나서 개선됨을 보였다.

또한 제안된 방법을 주파수 스펙트럼이 WiFi와 겹치는 채널을 사용하는 IEEE 802.15.4 네트워크의 노드들이 WiFi 트래픽의 간섭을 피해서 새로운 채널로 변경해서 동작하기 위한 채널변경명령을 전달방법으로 사용하는 실험에서는 채널변경반응시간을 측정할 결과, 기존의 방법은 WiFi 트래픽 부하가 증가할수록 CSMA-CA 알고리즘으로 인해 백오프지연이 커져서 반응시간이 최대 36 ms까지 길어지고 백오프지연실패의 빈도도 증가하는 것으로 나타지만 이 논문에서 제안된 방법은 약 7 ms에서 10 ms 사이의 비교적 균일한 반응지연을 보이고 코디네이터가 중단장치의 반응을 성공적으로 확인하는 빈도도 WiFi 트래픽 부하가 클수록 상대적으로 더 높게 나타나 는 특징을 보인다.

한편, 이 방법은 IEEE 802.15.4 송신기에서 프레임형식코드블럭을 생성해서 MSDU에 배치하여 CSMA-CA 알고리즘을 적용하지 않고 프레임을 전송하는 기능이 추가로 요구되고 충돌된 WiFi 트래픽의 재전송 및 IEEE 802.15.4 프레임의 끝부분까지 일시적인 지연이 요구될 수 있지만, 수신기에서는 프레임형식코드블럭에 대한 동기, 코드블럭 내에 포함되어 있는 PSDU (physical layer protocol service data unit)의 수신 및 오류검사 기능은 IEEE 802.15.4 프레임의 송수신을 지원하는 칩에 의해 이루어지기 때문에 프레임을 수신하기 위해 특별한 기능을 추가하지 않아도 되는 장점이 있다.

이 논문에서 제안된 방법을 발전시키고 응용하기 위해서 앞으로 다수의 중단장치를 포함하는 IEEE 802.15.4 네트워크에서 채널을 변경하여 새로운 채널에서 동작시키는 채널유지관리기능을 위한 매체접근제어계층 수준의 프로토콜명령들의 정의와 절차에 대한 연구가 필요하다. WiFi 네트워크의 데이터전송률이 높을수록 IEEE 802.11 프레임의 길이가 짧아지므로 다양한 WiFi 전송속도에 대해서 제안된 방법을 적용할 수 있는지 확인할 필

요가 있다. CSMA-CA 알고리즘을 사용할 경우 백오프지연이 불규칙하기 때문에 수신기의 관점에서 프레임을 수신했을 때 프레임에 포함되어 있는 데이터가 송신기로부터 수신기에 전달되기까지 백오프과정을 포함해서 걸린 시간을 알 수 없지만, 이 논문에서 제안된 방법으로는 백오프지연이 없이 수신기에서 어느 위치의 코드블럭에 대한 프레임을 수신했는지 판단할 수 있기 때문에 데이터의 전달에 소요된 시간을 계산할 수 있다. 따라서 백오프지연으로 인한 노드들 간 전송지연시간의 불확정성을 해소할 수 있게 되므로 노드 간의 클럭 (clock) 동기화의 정확성을 높이기 위한 방법으로서 제안된 방법을 응용하는 연구가 필요하다. 또한 노드 간의 클럭 동기의 정확도가 높아지면 WiFi의 간섭이 없는 새로운 채널을 탐색할 때, 여러 노드가 협력하여 신속하게 탐색하는 방법에 대한 연구도 필요하다.

## 참 고 문 헌(Reference)

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] K. Srinivasan and P. Levis, “RSSI is Under Appreciated”, Proc. of the 3rd Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets), May 2006.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] M. L. Song, “A Detection Method of Interference from WiFi Network in IEEE 802.15.4 Network”, Journal of Korean Society for Internet Information, v. 14, no. 4, pp. 1-12, Aug. 2013.
- [13] Texas Instrument, Z-Stack Developer’s Guide, Document Number : SWRA176 Ver. 1.11.
- [14] J. Ansari, T. Ang, and P. Mähönen, “WiSpot : Fast and Reliable Detection of Wi-Fi Networks using IEEE 802.15.4 Radios”, Proc. of MobiWac’11, pp. 35-44, Nov. 2011.
- [15] Z. Peng, W. Xu, W. Yang, Z. Qiong, and L. Dewei, “Multi-Channel Interference Avoidance Scheme for ZigBee Network in Smart Grid Application”, Proc. of Chinese Control Conference, pp. 6582-6587, Jul. 2012.
- [16] R. Zhou, Y. Xiong, G. Xing, and L. Sun, “ZiFi : Wireless LAN Discovery via ZigBee Interference Signatures”, Proc. of MobiCom’10, pp.49-60, Sep. 2010.
- [17] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, Part 11 : Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, ANSI/IEEE Std 802.11-2012 (Revision of IEEE Std 802.11-2007), Mar. 2012.
- [18] 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.

## ● 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 : mlson@hoseo.edu