

논문 2007-02-06

## IEEE 802.15.4 비컨 가용 방식에 의한 실시간 음성 트래픽 성능 평가

(Performance Evaluation of Real-time Voice Traffic  
over IEEE 802.15.4 Beacon-enabled Mode)

허윤강\*, 김유진, 허재두  
(Yun-Kang Hur, You-Jin Kim, Jae-Doo Huh)

**Abstract** : IEEE 802.15.4 specification which defines low-rate wireless personal area network(LR-WPAN) has application to home or building automation, remote control and sensing, intelligent management, environmental monitoring, and so on. Recently, it has been considered as an alternative technology to provide multimedia services such as automation via voice recognition, wireless headset and wireless camera for surveillance. In order to evaluate capability of voice traffic on the IEEE 802.15.4 LR-WPAN, we supposed two scenarios, voice traffic only and coexistence of voice and sensing traffic. For both cases we examined delay and packet loss rate in case of with and without acknowledgement, and various beacon period varying with beacon and superframe order values. In LR-WPAN with voice devices only, total 5 voice devices could be applicable and in the other case, i.e., coexisted cases of voice and sensor devices, a voice device was able to coexist with about 60 sensor devices.

**Keywords** : IEEE 802.15.4, LR-WPAN, Voice transmission, Beacon-enabled mode

### 1. 서론

LR-WPAN(Low-Rate Wireless Personal Area Network)을 정의하는 표준인 IEEE 802.15.4는 저속의 데이터 전송률과 짧은 통신 거리, 수개월에서 수년의 수명을 요구하는 응용에 적합한 물리계층 및 매체접근제어(Medium Access Control)계층에 대한 기능을 규정하고 있다[1]. 이는 약 10m 내외의 영역에서 소형, 저비용, 저전력, 그리고 네트워크의 유연성 등의 특징을 가지며 현재 홈 자동화, 빌딩 자동화, 재고관리, 원격검침, 산업제어 및 재난발생 감시, 지능형 농작물 관리, 원격의료 및 환자관리 등과 같은 다양한 응용 분야에 활용되고 있다[2][3][4][5]. 최근에는 기존의 응용 분야인 제어나 관리, 감시 분야 뿐 아니라 비디오나 음성과 같은 실시간 데이터를 전송하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 특히 음성의 경우 음성 인식 기술을 적용한 가전 제어나 무선 헤드셋, 무선 핸드프리, 휴대용 무선 스피커 등

과 같은 새로운 응용 기술에 접목되기 위한 연구가 진행되고 있다[6][7][8].

지금까지 음성을 전송하기 위한 무선 기술로 가장 활발히 연구되고 있는 분야는 IEEE 802.11[9]과 블루투스[10] 등을 들 수 있다. IEEE 802.11의 경우 최근 활발히 보급되면서 주로 사무실 환경에서 사용자간의 음성 통화 서비스를 제공하거나 인터넷과 연동하는 "Voice of WiFi"에 관한 연구가 진행 중이다[11][12][13]. 그러나 IEEE 802.11의 경우 수백 미터 이하의 근거리에서 사용되는 무선통신 기술로서 11Mbps에서 54Mbps의 빠른 데이터 속도를 제공할 수 있지만 단말기마다 상시전원을 사용해야 할 정도로 전력 소모가 크며, 크기 또한 상당히 큰 단점을 가지고 있다. 블루투스 역시 최근 음성 통신을 위해 활발히 연구되고 있는 기술로서 IEEE 802.15.1[10]로 표준화되어 있다. 블루투스는 데이터 전송을 위한 비동기형 링크 외에 별도로 음성 전송을 위한

동기형 링크를 가지고 있으나 이로 인해 구현이 상대적으로 복잡하고, 전력 소모와 비용 면에서 불리하다. 특히 블루투스의 경우 최대 7개의 장치와만 네트워크를 형성할 수 있어 최대 65,000여 개의 장치와 네트워크를 형성할 수 있는 IEEE 802.15.4에 비해 네트워크 가용성이 낮다.

본 논문에서 우리는 IEEE 802.15.4의 비컨 가용 모드(beacon-enabled mode)에서 비컨 주기의 변화와 확인(acknowledgement) 메시지의 사용 여부에 따른 slotted CSMA/CA 매체접근제어의 음성 트래픽 수용 능력을 실험한다. 시뮬레이션 환경은 크게 두 부분으로 나누어진다. 첫번째 시뮬레이션은 하나의 LR-WPAN내에 수용할 수 있는 최대 음성 디바이스의 수를 측정하기 위해 코디네이터와 음성 디바이스만 존재하는 LR-WPAN에 대해 이루어지며, 두번째 시뮬레이션은 높은 비트율로 데이터를 생성하는 음성 트래픽과 낮은 비트율로 데이터를 생성하는 센싱 트래픽이 혼재되어 있을 때 음성 트래픽이 센싱 트래픽으로부터 받는 영향을 실험하기 위해 하나의 코디네이터와 하나의 음성 디바이스, 다수의 센서 디바이스로 구성된 LR-WPAN에 대해 이루어진다. 위의 두 환경에서 Beacon Order(BO)와 Superframe Order(SO)의 값을 달리하여 비컨 주기에 따른 slotted CSMA/CA의 음성 트래픽 수용 능력을 측정하며 음성 패킷의 손실률과 지연의 상관관계를 분석하기 위해 음성 데이터 프레임에 확인 메시지를 사용하는 경우와 사용하지 않는 두 경우로 나누어 실험한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 IEEE 802.15.4 표준에 대해 개괄적으로 설명하며 3장에서 시뮬레이션 환경과 관련된 파라미터에 대해 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과를 분석하고 마지막으로 5장에서 성능에 대한 평가와 문제점 및 이에 대한 해결책을 모색하며 마무리한다.

## 11. IEEE 802.15.4의 특징

IEEE 802.15.4는 LR-WPAN을 위한 물리 계층과 매체접근제어 계층을 정의하는 표준으로서 10m 내외의 POS(Personal Operating Space) 내에서 최소한의 에너지 소모로 통신할 수 있는 기능을 제공한다. 다음 절들을 통해 IEEE 802.15.4

의 슈퍼프레임 구조와 CAP(Contention Access Period)에서 CSMA/CA를 이용한 매체접근제어 알고리즘, 그리고 데이터 프레임 구조 등과 같은 IEEE 802.15.4의 주요 특징을 간단히 살펴본다.

### 1. 비컨 가용 모드의 슈퍼프레임 구조

IEEE 802.15.4는 비컨 가용 모드와 비컨 비가용 모드로 동작할 수 있도록 되어 있으며, 이는 PAN(Personal Area Network) 코디네이터가 PAN을 시작할 때 결정하게 된다. 비컨 가용 모드의 경우 PAN 코디네이터는 네트워크가 시작되면 주기적으로 비컨을 전송하여 다른 디바이스들이 동기화할 수 있도록 하며 PAN을 식별할 수 있도록 한다. 비컨 가용 모드는 그림 1과 같은 슈퍼프레임 구조를 갖는다.

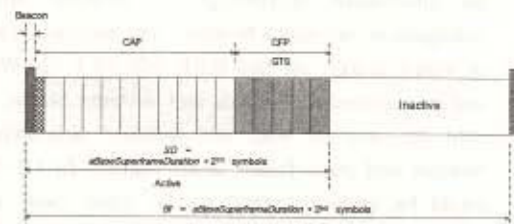


그림 1. 슈퍼프레임 구조

Fig. 1. Superframe structure

그림 1에서 슈퍼프레임은 크게 디바이스들이 데이터를 송수신하는 active 구간과 휴면(sleep) 상태가 되어 에너지를 절약하는 inactive 구간으로 나누어지며 active 구간은 다시 경쟁적 매체 접근 방식인 CSMA/CA를 이용하여 매체접근을 하는 CAP(Contention Access Period)와 코디네이터에 의해 타임 슬롯(Guaranteed Time Slot)을 할당받아 경쟁 없이 정해진 시간 슬롯에 데이터를 송수신하는 CFP(Contention Free Period)로 나누어진다. 슈퍼프레임 구조는 MAC PIB(PAN Information Base)에 정의된 macBeaconOrder와 macSuperframeOrder의 값에 의해서 기술된다. 비컨과 그 다음 비컨 사이의 간격을 정의하는 BI(Beacon Interval)는 식 (1)과 같이 계산되며, 이때 SDbase는 aBaseSuperframeDuration 심볼을 의미한다.

$$BI = SD_{base} \cdot 2^{BO} \text{ symbols, } (0 \leq BO \leq 14)$$

(1)

비컨과 비컨 사이에서 active 구간을 기술하기 위한 SD(Superframe Duration)는 SO를 통해 식 (2)와 같이 계산된다.

$$SD = SD_{base} * 2^{SO} \text{ symbols, } (0 \leq SO \leq BO) \quad (2)$$

계산을 통해 얻어진 비컨 주기(BI) 값에서 active 구간을 기술하는 SD를 빼게 되면 한 슈퍼프레임 내에서 디바이스들이 휴면 상태가 되는 inactive 구간의 길이(Tinactive)를 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$T_{inactive} = BI - SD \quad (0 \leq SD \leq BI) \quad (3)$$

식 (1), (2), (3)을 통해 비컨 프레임울 기준으로 모든 디바이스가 코디네이터와 동기화를 하게 된다. 또한, BO와 SO가 15를 제외한 동일한 값일 경우 디바이스는 inactive 구간 없이 모든 구간에서 코디네이터와 데이터를 송수신할 수 있으며, SO가 15일 경우 비컨 후에 active 구간 없이 모든 디바이스는 바로 sleep 모드로 전환하게 된다. BO가 15일 경우는 슈퍼프레임을 사용하지 않겠다는 의미를 지니며, 이 경우 SO값은 무시된다.

2. IEEE 802.15.4의 CSMA/CA 알고리즘

비컨 가용 모드의 CAP구간은 데이터를 전송하기 위하여 slotted CSMA/CA를 사용하여 대체접근을 시도한다. IEEE 802.15.4의 slotted CSMA/CA는 시간을 20심볼(0.32ms)의 동일한 크기의 슬롯인 BP(Backoff Period)로 나누고 CCA(Clear Channel Assessment)나 데이터의 전송 등과 같은 모든 동작의 시작을 BP의 경계에서 행하게 된다.

Slotted CSMA/CA의 백오프 알고리즘과 관련된 세 개의 변수를 정리하면 다음과 같다.

- NB(Number of Backoff) - 백오프 알고리즘 동작시 0으로 초기화되며 추가적인 백오프가 발생할 경우 1씩 증가한다. 최대 백오프 가능 횟수를 정의하는 macMaxCSMABackoffs에 정의된 값보다 커질 경우 패킷은 폐기된다.
- CW(Contention window) - 데이터를 전송하기 전에 실행되는 CCA의 횟수를 정의한다. CCA에 의해 채널이 비어 있음을 감지하면 1씩 감소하며 0이 되면 데이터를 전송한다.

- BE(Backoff Exponent) - 데이터를 전송하기 전에 백오프할 기간을 정하기 위해 사용된다. 백오프 기간은 0부터  $2^{BE}-1$  사이의 값 중에서 임의의 값을 선택한다.

그림 2는 위의 세 파라미터를 이용하여 동작하는 IEEE 802.15.4의 CSMA/CA 알고리즘을 도식화한 것이다. 처음 CSMA/CA 알고리즘이 시작되면 NB = 0, CW = 2로 초기화되며, BE 값의 경우 Battery Life Extension(BLE) 모드가 활성화되어 있다면  $BE = \min(2, macMinBE)$ 로 초기화되고, 비활성화 되어 있을 경우에는 BE = 2로 초기화된다. 디바이스는  $\text{Random}(0, 2^{BE}-1)$ 에 의해 얻어진 백오프 주기만큼 대기한 후 CCA를 수행하여 채널 상태를 점검하게 되고, 채널이 비어 있다면 한 번 더 반복하여 CW의 값이 0이 될 때 데이터를 전송한다. 채널이 비어있지 않은 경우 CW 값을 2로 초기화하고 NB 값을 1 증가시킨 후  $BE = \min(BE+1, aMaxBE)$  값으로 변경하여 백오프를 다시 하게 된다.

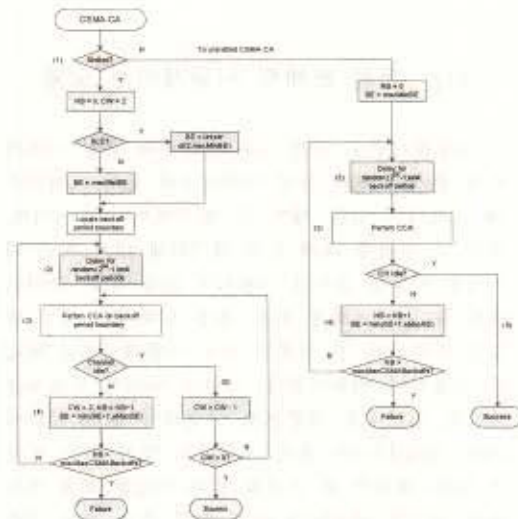


그림 2. IEEE 802.15.4 CSMA/CA 알고리즘  
Fig. 2. IEEE 802.15.4 CSMA/CA Algorithm

3. 데이터 프레임 구조

IEEE 802.15.4의 경우 모든 패킷에 확인 메시지를 사용하는 IEEE 802.11과 달리 확인 메시지의 사용을 각 패킷별로 지정하여 특정 패킷에만 사용할 수 있는 방법을 제공하는데, 이는 중요한 패킷의 경우에만 확인 메시지를 사용하도록 함으

로써 에너지 효율적인 전송을 가능하게 한다.

그림 3은 IEEE 802.15.4의 데이터 프레임에 묘사한 것으로서 2바이트의 프레임 컨트롤 헤더에 5번째 비트를 1로 설정한 후에 데이터를 전송하던 수신자 측에서 헤더를 확인하여 해당 비트가 1로 설정되어 있는 경우 확인 메시지를 전송하고 설정되어 있지 않은 경우 확인 메시지를 전송하지 않는다. 프레임을 전송한 디바이스의 경우 해당 비트를 1로 설정했다면 확인 메시지를 수신하기 위해 타이머를 시작하고 대기하지만 설정하지 않은 경우에는 바로 다음 데이터를 전송한다.

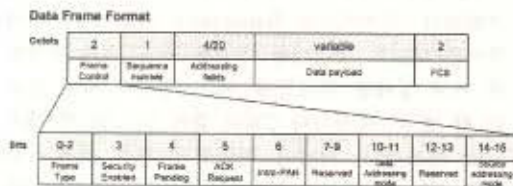


그림 3. 데이터 프레임과 프레임 컨트롤 필드  
Fig. 3. Data frame and frame control subfield

### III. 음성 트래픽 시뮬레이션 모델

시뮬레이션은 비컨 가용 모드에서 음성 디바이스만 존재할 때와 음성 디바이스와 센서 디바이스가 혼재되어 있을 때의 두 환경에서 이루어지며, 위의 두 환경에 대해 음성 데이터에 대해 확인 메시지를 사용할 경우와 사용하지 않을 경우, 그리고 비컨 주기의 변화에 따른 음성 트래픽의 성능 변화를 측정한다. 본 논문의 모든 시뮬레이션은 NS2를 이용하여 이루어졌다. 그러나 NS2의 프로토콜 계층은 인터넷을 기준으로 구현되어 있기 때문에 IEEE 802.15.4의 통신 모델에는 맞지 않는 부분이 있다. 따라서 본 논문을 위해 NS2를 응용 계층에서 생성된 데이터가 바로 매체 접근 제어 계층으로 보내지도록 수정하였으며, ARP(Address Resolution Protocol)가 동작하지 않도록 하였다. 또한, 모든 디바이스들이 코디네이터를 통해서만 통신할 수 있는 스타 토폴로지로 만들기 위하여 라우팅 프로토콜을 사용하지 않도록 수정하였다. 무선 채널은 잡음이 전혀 없는 이상적인 상태로 가정하였으며 무선 환경에서 발생할 수 있는 은닉 노드 문제(hidden node problem)에 의한 성능 저하를 막기 위해 모든 디바이스는 서로를 감지할

수 있는 거리에 놓이도록 하였다. 즉, 본 논문에서 발생한 모든 패킷 손실은 CSMA/CA의 경쟁 과정에서 충돌에 발생한 것이다.

음성 트래픽의 경우 VoIP 용으로 많이 사용되고 있는 ITU-T 표준인 G.711, G.729A, G.723.1 등의 음성 코덱 중에서[13][14] 8kbps의 G.729A를 가정하여 100bytes의 데이터를 0.1초 간격의 고정 비트율로 발생시키게 되며 센싱, 제어 레이어의 경우에는 50bytes의 데이터를 0.8kbps의 가변 비트율로 주고받게 한다. 음성 데이터는 코디네이터와 디바이스간에 양방향으로 전송하며, 센싱, 제어 데이터의 경우 디바이스들 중에 50%는 코디네이터에게 데이터를 전달하며(업로드 방향), 나머지 50%는 코디네이터로부터 제어 데이터를 수신(다운로드 방향)하는 단방향 통신을 한다.

표 1. 음성코덱 비교  
Table 1. Comparison of voice codec

Codec	Properties
G.711	low delay, toll quality, low complexity, higher rate
G.729A	toll quality, acceptable delay, low rate, acceptable complexity
G.723.1	low rate, acceptable quality, relatively high delay
G.722	wideband speech, low delay, low complexity, higher rate

#### 1. 시뮬레이션 환경

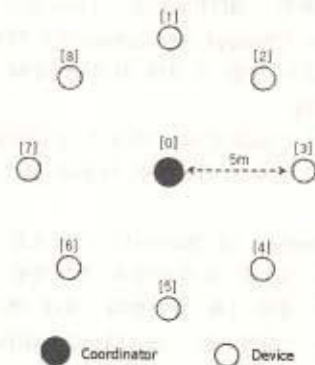


그림 4. 8개의 디바이스와 1개의 코디네이터로 구성된 스타 토폴로지

Fig. 4. Star topology consisted of eight devices and a PAN coordinator

모든 시뮬레이션은 IEEE 802.15.4의 기본 통신 형태인 스타 토폴로지 형태로 이루어지며 매체 접근은 비컨 가용 모드의 slotted CSMA/CA를 통해 이루어진다. 코디네이터를 제외한 모든 디바이스들은 데이터를 라우팅(routing)할 수 있는 능력을 가지고 있지 않으므로 디바이스가 생성한 모든 데이터는 일단 코디네이터로 보내진 후 코디네이터에 의해 목적지로 전송된다.

또한, 온니 노드에 의한 성능 저하를 막기 위해 모든 디바이스들은 서로를 감지할 수 있도록 코디네이터와 5m의 동일한 거리에 위치한다. 모든 시뮬레이션에서 LR-WPAN 내에 코디네이터는 한 개만 존재하며 코디네이터를 포함한 모든 디바이스들은 이동성을 가지지 않고 고정된 노드로 동작한다.

첫번째 시뮬레이션의 경우 1개의 코디네이터가 존재하는 LR-WPAN에 음성 디바이스들 1개부터 6개까지 하나씩 증가시키며 디바이스마다 8kbps의 고정 비트율 음성 트래픽만을 발생시킬 때 BO와 SO값의 변화에 따른 음성 트래픽의 성능을 실험한다. 또한, 확인 메시지를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대해 음성 트래픽의 성능을 측정한다. 두번째 시뮬레이션의 경우 1개의 코디네이터와 1개의 음성 디바이스로 구성된 LR-WPAN에서 0개부터 80개까지 센서 디바이스를 5개씩 추가하며 실험한다. 음성 디바이스는 8kbps 고정 비트율로 코디네이터와 음성 트래픽을 주고받으며, 센서 디바이스의 경우 짝수번째 디바이스는 코디네이터로부터 0.8kbps의 다운로드 트래픽을 수신하고, 홀수번째 디바이스는 코디네이터에게 0.8kbps의 업로드 트래픽을 전달한다. 두 번째 시뮬레이션에서 센싱 트래픽은 항상 확인 메시지를 사용하며 음성 트래픽의 경우만 확인 메시지를 사용할 경우와 사용하지 않을 경우로 나누어 실험한다.

BO와 SO값 사이에 차이가 생길 경우 inactive 구간으로 인해 추가적인 지연과 손실률이 발생할 수 있으므로 모든 실험에서 BO와 SO는 동일한 값을 가지며, 이는 inactive 구간 없이 슈퍼프레임 전 구간에서 모든 디바이스들이 코디네이터와 데이터를 주고받을 수 있음을 의미한다.

2. 시뮬레이션 파라미터

본 시뮬레이션의 파라미터들은 대부분 IEEE 802.15.4에서 정의하고 있는 기본값을 그대로 사용하며 물리계층의 경우 IEEE 802.15.4에 정의된 868MHz(20kbps)와 915MHz(40kbps),

2.4GHz(250kbps) 중 2.4GHz 물리계층을 사용한다. 물리계층과 CSMA/CA에 관련된 중요 파라미터를 정리하면 표 3, 4와 같다.

시뮬레이션은 2.4GHz 대역에서 250kbps의 데이터 전송률을 가지는 물리계층 모델을 사용하여 이루어지며 매체접근제어의 경우 최대 BE 값을 정의하는 aMaxBE값은 5로, 패킷당 최대 재전송 가능 횟수를 정의하는 aMaxFrameRetries는 3으로, 기본 백오프 주기값을 정의하는 aUnitBackoffPeriods는 20 심볼로 설정하며, 최대 가능한 백오프 횟수를 정의하는 macMaxCSMABackoffs 값은 4로 설정한다. 재전송 시도가 aMaxFrameRetries에 정의된 값을 넘거나 백오프 횟수가 macMaxCSMABackoffs에 정의된 값을 넘을 경우 패킷은 폐기된다.

표 3. IEEE 802.15.4의 PHY 파라미터  
Table 3. PHY parameters for IEEE 802.15.4

PHY	2.4GHz
Frequency band	2400~2483.5MHz
Chip rate	2000 kchip/s
Modulation	O-QPSK
Bit rate	250kbps
Symbol rate	62.5 ksymbols/s

표 4. IEEE 802.15.4 CSMA/CA 관련 파라미터  
Table 4. CSMA/CA parameters for IEEE 802.15.4

aMaxBE	5
aMaxFrameRetries	3
aUnitBackoffPeriods	20
macMaxCSMABackoffs	4

표 5. 시뮬레이션 설정  
Table 5. Simulation settings

Range	50m x 50m
Payload length(bytes)	voice: 100, sensor: 50
Topology	star
Distance	5m
Antenna type	omni directional
Channel model	two-ray ground
Transmission range	15m
Simulation time	500 sec

앞서 언급한 시뮬레이션 환경과 관련된 파라미터를 정리하면 표 5와 같다. 시뮬레이션이 이루어지는 전체 범위는 가로, 세로 50m이며, 안테나는 무지향성 안테나를 사용하고 전파의 도달 범위는 15m로 설정한다.

3. 성능 평가 요소

VoIP와 같은 음성 시스템의 성능을 평가하기 위해 주로 사용되는 측정 요소로는 음성 코덱의 종류나 지연(latency), 지연편차(jitter), 패킷 손실률 등을 들 수 있다[14]. 이중 실시간성이 중요시되는 응용인 음성 트래픽의 성능을 가장 크게 좌우하는 요소는 지연과 손실률이다[15]. 이들 지연과 손실률은 각각 200ms, 2%를 기준으로 하여 측정된 지연과 손실률이 이 기준 이하일 경우 사용자는 만족할만한 성능을 체감할 수 있으나 이 기준을 넘어가게 되면 사용자의 만족도는 급격히 낮아지게 된다[16]. 본 논문에서 지연은 데이터가 생성된 시간부터 수신측에서 이를 성공적으로 수신할 때까지의 시간으로 측정한다. 즉, 확인 메시지를 사용한 시뮬레이션의 경우 지연은 생성되어 큐에 저장된 시간부터 확인 메시지가 돌아올 때까지의 시간을 의미하며, 확인 메시지를 사용하지 않은 경우의 지연은 데이터가 생성되어 패킷을 통해 전파될 때까지의 시간으로 정의한다.

IV. 음성 트래픽 성능 분석

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 음성 트래픽을 전송하는 디바이스로만 구성된 LR-WPAN과 음성 트래픽과 센싱 트래픽이 혼재하는 LR-WPAN에서 비컨 주기와 확인 메시지 사용 여부에 따른 지연과 손실률을 분석한다.

1. 음성 디바이스로만 구성된 LR-WPAN에 대한 시뮬레이션

음성 트래픽만 존재하는 LR-WPAN에서 전송된 음성 트래픽에 대해 확인 메시지를 사용하지 않은 경우의 시뮬레이션은 그림 5의 (a)에 보이는 바와 같이 비컨 주기와 트래픽 개수에 영향을 크게 받지 않고 10ms 이하의 지연을 보였다. 그러나 그림 5의 (b)에 보이는 바와 같이, 확인 메시지를 사용한 경우의 지연은 확인 메시지를 사용하지 않은 경우와 비교해 10개의 트래픽에 대해서는

10ms 이하의 지연을 보인 반면 12개의 트래픽에 대해서는 평균적으로 5초가 넘는 급격한 지연의 상승을 보였다. 이는 그림 6을 통해 알 수 있듯이 확인 메시지를 사용하지 않은 경우 재전송을 하지 않기 때문에 재전송에 의한 지연이 발생하지 않으나 확인 메시지를 사용한 경우 반복적인 재전송에 의해 추가적인 지연이 발생하였기 때문이다.

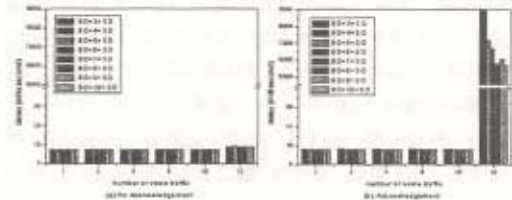


그림 5. 확인 메시지를 사용하지 않은 경우(a)와 사용한 경우(b)의 지연  
Fig. 5. delay (a) without acknowledgement, (b) with acknowledgement

패킷 손실률의 경우 그림 6의 (a)의 그래프와 같이 확인 메시지를 사용하지 않은 경우 음성 트래픽의 수가 6, 8, 10일 때 각각 낮은 BO값을 가진 경우에 한해서 0.1% 이하의 손실률을 보이다가 12개의 음성 트래픽에서는 손실률이 크게 증가하여 BO값이 3일 때 가장 높은 9.6%의 손실률을 보였으며 가장 적은 손실률을 보인 BO값이 7인 경우에는 6.7%의 손실률을 보여 비컨 주기에 상관없이 2%가 넘는 손실률을 보였다.

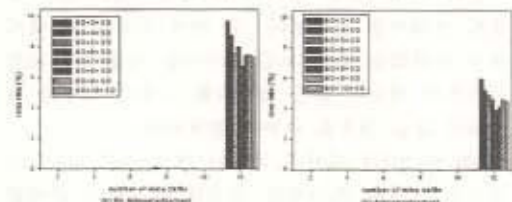


그림 6. 확인 메시지를 사용하지 않은 경우(a)와 사용한 경우(b)의 패킷 손실률  
Fig. 6. packet loss rate (a) without acknowledgement, (b) with acknowledgement

그림 6의 (b)에 보이는, 확인 메시지를 사용한 경우의 패킷 손실률은 10개의 트래픽까지는 거의 손실이 발생하지 않았으나 12개의 트래픽에서 급격히 증가하여 가장 높은 손실률을 보인 BO값이 3일 때 5.9%, 가장 양호한 경우인 BO값이 7일 때

3.9%의 손실률을 보였다. 12개의 음성 트래픽에 대해 확인 메시지를 사용한 경우는 사용하지 않은 경우와 비교해 전체 손실률은 감소하였지만 모든 비컨 주기에 대해 2%를 넘는 손실률을 보였다.

확인 메시지를 사용했을 때 가장 높은 지연과 패킷 손실률을 보인 음성 트래픽이 12개인 경우의 재전송 횟수에 따른 패킷 분포는 그림 7과 같다. 1번의 재전송과 2번의 재전송으로 전송에 성공한 패킷의 수는 비컨 주기에 상관없이 거의 동일한 분포를 보이고 있으나, 3번의 재전송이 이루어진 경우는 BO값이 3일 때 가장 높은 1007개의 패킷이 세 번의 재전송 되었고, BO값이 8인 경우 가장 적은 628개의 패킷에 대해 3번의 재전송이 이루어 졌다. 따라서 그림 6의 BO값에 따른 손실률의 차이는 세 번의 재전송된 패킷의 개수에 의해 발생한 것으로 볼 수 있다.

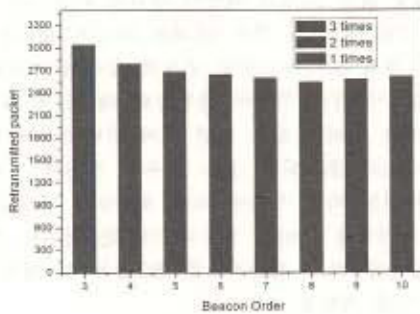


그림 7. 음성 트래픽이 12개인 경우의 BO 값에 따른 재전송 패킷의 비율

Fig. 7. Retransmitted packet rate on the various BO values for 12 voice streams

표 6. 3번의 재전송 후 손실된 패킷의 비율  
Table 6. Packet drop rate after 3 retries

BO	손실 / 시도 (패킷)	비율 (%)
3	358 / 1007	35.5
4	313 / 824	37.9
5	292 / 726	40.2
6	275 / 666	41.3
7	236 / 641	36.8
8	245 / 628	39.0
9	276 / 651	42.4
10	269 / 673	39.9

이 경우, 3번의 재전송 후에도 전송에 실패한 패킷을 조사하면 표 6과 같다. 아래의 표에서 알 수 있듯이 3번의 재전송 후에 평균적으로 39% 정도의 패킷이 폐기되는 것을 알 수 있다.

2. 음성 디바이스와 센서 디바이스가 혼재된 LR-WPAN에 대한 시뮬레이션

음성 트래픽 2개(음성 디바이스 1개)와 0개에서 80개까지의 센서, 제어 트래픽이 혼재하는 LR-WPAN 내에서 음성 트래픽에 확인 메시지를 사용하지 않은 경우 음성 트래픽의 지연은 그림 8의 (a)와 같다. 40개의 센싱 트래픽에 대해서는 그림 6의 음성 트래픽 10개까지의 경우와 유사하게 비컨 주기에 크게 영향을 받지 않고 평균 8ms 정도의 낮은 지연을 보이다가, 서서히 증가하여 70개의 센싱 트래픽 이후로는 급격히 증가하며, 이 경우부터 비컨 주기에 따른 성능 차이가 뚜렷이 나타나 낮은 BO값을 가진 경우에 비해 높은 BO값을 가진 경우에 상대적으로 낮은 지연을 보였다. 75개의 디바이스 경우에는 BO값이 3일 때 가장 높은 2700ms 정도의 지연을 보이고 BO값이 7일 때 가장 낮은 470ms 정도의 지연을 보이며, 80개의 경우 BO값이 3일 때 10초, 그 외의 경우에는 평균 7초 정도의 지연을 보이고 있다.

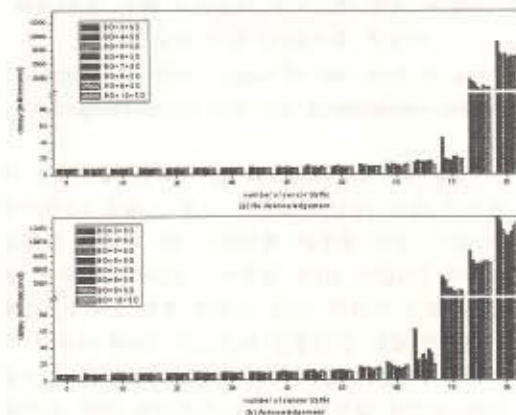


그림 8. 확인 메시지를 사용하지 않은 경우(a)와 사용한 경우(b)의 음성 트래픽 지연

Fig. 8. delay of voice traffic (a) without acknowledgement, (b) with acknowledgement

음성 트래픽에 대해 확인 메시지를 사용한 경우의 지연은 그림 8의 그래프 (b)와 같이 센싱 트

래픽 35개까지는 비컨 주기에 크게 상관없이 10ms 이하의 지연을 보이며 40개부터 서서히 증가하여 60개에서 평균 18ms 정도의 지연을 보였다. 65개에서는 BO값이 3일 때 가장 높은 62ms, BO값이 10일 때 가장 낮은 19ms를 보이며, 확인 메시지를 사용하지 않은 경우 센싱 트래픽이 75개에서 지연이 급격히 증가한 데 비해 확인 메시지를 사용한 경우 센싱 트래픽의 수가 70이 넘어가면서 급격히 증가하는 양상을 볼 수 있다. 확인 메시지를 사용한 경우 역시 지연이 급격히 증가하는 디바이스 70개부터 비컨 주기에 따른 성능 차이를 보이고 있다.

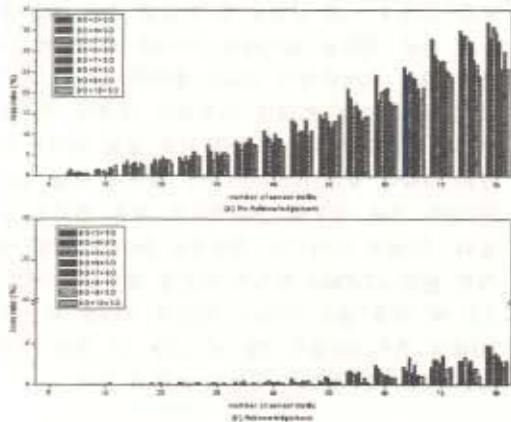


그림 9. 확인 메시지를 사용하지 않은 경우(a)와 사용한 경우(b)의 음성 패킷 손실률

Fig. 9. loss rate of voice traffic (a) without acknowledgement, (b) with acknowledgement

그림 9의 (a) 그래프와 같이 확인 메시지를 사용하지 않을 때의 손실률은 센싱 트래픽 10개까지 BO값이 10인 경우를 제외하고 2% 미만의 손실을 보이며 BO값이 10인 경우는 2.5%의 손실률을 보였다. 센싱 트래픽 15개 이상의 경우 모든 BO값에서 2%가 넘는 손실률을 보였으며, 55개 미만의 디바이스에서는 비컨 주기의 증가에 따라 큰 성능 차이를 보이지 않으나 55개 이상부터는 비컨 주기에 따른 차이가 크게 나타나 BO값이 클수록 적은 손실률을 보였다. 그림 9의 (b)에 보이는 확인 메시지를 사용한 경우의 손실률은 센싱 트래픽 50개까지는 모든 비컨 주기에서 큰 차이 없이 1% 미만의 손실률을 보이다가 55개부터 낮은 BO값을 가진 경우에 2%를 넘는 손실률을 보였다. 이 경우 음성 디바이스로만 이루어진 LR-WPAN에서의 실

험과 달리 높은 BO값을 갖는 경우와 낮은 BO값을 갖는 경우에 손실률의 차이가 뚜렷이 구별되는 현상을 보이고 있으며, 센싱 트래픽의 증가에 따라 이러한 현상은 더욱 커져 80개의 센싱 트래픽일 때 BO값이 3인 경우의 손실률과 BO값이 10인 경우의 손실률 사이에 최대 12% 정도의 차이를 보였다. 80개 이상의 경우 모든 비컨 주기에 대해 2% 이상의 손실률을 보이며, 이는 BO값이 작아질수록 (비컨 주기가 짧아질수록) 상대적으로 동일한 시간 내에 비컨 메시지의 수가 증가하여 데이터 프레임이 전송될 기회를 감소시키기 때문이다.

센싱 트래픽의 수가 70개인 경우의 재전송 패킷 비율은 그림 10과 같다. 한 번의 재전송이 이루어진 패킷의 경우 BO값이 7일 때 가장 많은 210개의 패킷이 재전송 되었으며, BO값이 10일 때 가장 적은 170개의 패킷이 재전송 되었다. 두 번의 재전송이 이루어진 패킷의 경우 BO값이 3일 때 가장 많은 96개의 패킷이 재전송 되었으며, BO값이 7일 때 가장 적은 66개의 패킷이 재전송 되었다. 음성 디바이스로만 구성된 첫번째 시뮬레이션 결과가 비컨 주기와 재전송된 패킷간에 큰 상관관계를 보이지 않은 반면 센서 디바이스와 음성 디바이스가 혼재되어 있을 경우인 두번째 시뮬레이션에서는 비컨 주기에 따른 재전송된 패킷의 수가 큰 차이를 보이고 있으며 이러한 결과는 지연에 영향을 미쳐 평균적으로 BO값이 8이상일 때 가장 낮은 지연을 보였다.

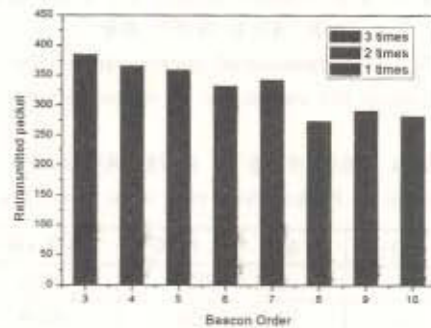


그림 10. 배경 트래픽이 70개인 경우의 BO 값에 따른 재전송 패킷의 비율

Fig. 10. retransmitted packet rate on the various BO value, where in 70 background streams

그림 10의 경우에 3번의 재전송 후에 패킷된



패킷의 비율은 표 7과 같다.

표 7. 3번의 재전송 후 손실된 패킷의 비율  
Table 7. packet drop rate after 3 retries

BO	손실 / 시도 (패킷)	비율 (%)
3	21 / 92	22.8
4	31 / 81	38.2
5	31 / 91	34.0
6	27 / 68	39.7
7	35 / 66	53.0
8	8 / 29	27.6
9	20 / 47	42.5
10	21 / 45	46.6

세 번의 재전송의 경우 BO값이 3일 때 가장 많은 92개의 패킷이 재전송 되었으나 재전송된 패킷 중 손실된 패킷의 비율은 가장 낮은 22.8%를 보였으며, 가장 적은 패킷을 재전송한 BO값이 8인 경우는 27.6%의 재전송에 따른 실패율을 보였다. 그 외의 경우에는 평균 41%의 실패율을 보였다. BO값이 낮은 경우 재전송을 시도한 패킷의 수는 많지만 손실된 개수가 적어 손실 비율은 낮으나, BO값이 증가할수록 손실될 패킷은 변화가 적고 재전송된 패킷의 수는 적어져 상대적으로 높은 손실률을 보이고 있다.

## V. 결 론

본 논문에서 우리는 IEEE 802.15.4의 비컨 가용 모드에서 비컨 주기의 변화와 확인 메시지의 사용 여부에 따른 slotted CSMA/CA 매체접근 제어의 음성 트래픽 수용 능력을 시뮬레이션 하였다. 일반적으로 네트워크에서 음성 트래픽의 성능을 평가하기 위해 사용되는 요소는 지연과 손실률로서 200ms 이하의 지연과 2% 이하의 손실률에 대해 사용자는 만족감을 느끼게 되지만 그 이상 증가할 경우 사용자가 체감하는 성능은 상한선을 넘을수록 급격하게 떨어지게 된다.

8kbps의 G.729A 코덱을 사용하는 음성 디바이스로만 구성된 LR-WPAN의 경우 최대 10개까지의 트래픽을 운용할 수 있었다. 확인 메시지의 사용 여부에 따른 지연과 손실률 사이의 상관관계는 음성 디바이스로만 구성된 LR-WPAN의 경우 지

연은 확인 메시지의 사용 여부에 따라 성능 차이를 보이고 있으나 손실률의 경우 확인 메시지 사용 여부에 크게 상관없이 12개의 음성 트래픽에 급격히 증가하는 것을 볼 수 있었다. 그러나 센서 디바이스와 음성 디바이스가 혼재되어 있는 LR-WPAN의 경우는 확인 메시지의 사용 여부에 따라 지연보다 손실률에서 큰 성능 차이를 보였다. 비컨 주기가 slotted CSMA/CA의 음성 수용 능력에 미치는 영향은 음성 디바이스로만 구성된 LR-WPAN과 센서, 음성 디바이스가 혼재된 LR-WPAN 모두에서 비슷한 형태를 보였으며, 일정 트래픽 이하에서는 모든 비컨 주기에 대해 거의 동일한 성능을 보이나, 특정 트래픽을 넘어 성능이 급격히 낮아지는 구간에서는 비컨 주기에 따라 뚜렷한 성능 차이를 보여, 일반적으로 비컨 주기가 길수록(BO와 SO값이 커질수록) 지연과 손실률 모두에서 비컨 주기가 짧은 경우에 비해 좋은 성능을 보였다.

두 실험 모두에 공통적으로 나타난 특정 트래픽 부하를 넘어가게 되면 성능이 급격히 나빠지는 현상은 IEEE 802.15.4의 경우 IEEE 802.11에 비해 저전력과 낮은 복잡도를 위해 CSMA/CA를 간소화 시킴으로써 효과적인 매체접근이 어렵기 때문에 발생된 현상이다. 이러한 현상으로 인해 한번 손실된 패킷이 반복적으로 다시 손실되어 지연과 손실률 모두에 급격한 성능 하락이 발생한다.

향후 이러한 문제점을 보완하기 위해 채널의 상태를 지시하는 LQ(Link Quality Indication)를 이용한 적응형 전송 기법이나 음성 코덱에 따른 적응적 프레임 사이즈 등에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

## 참고문헌

- [1] IEEE Standard 802.15.4, "Part 15.4: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks," May 2003.
- [2] B. Rose, "Home networks, a standard perspective," IEEE Communications Magazine, vol. 39, no. 12, pp. 78-85, Dec. 2001.
- [3] E. Callaway, P. Gorday, L. Hester, J. Gutierrez, M. Naeve, B. Heile, and V. Bahl, "Home networking with IEEE 802.15.4: a developing standard for low-rate wireless personal area networks," IEEE

- Communications Magazine vol. 40, no. 8, pp. 70-77, Aug. 2002.
- [4] J. Zheng, and M. Lee, "Will IEEE 802.15.4 make ubiquitous networking a reality?: a discussion on a potential low power, low bit rate standard," IEEE Communications Magazine, vol. 42, no. 6, pp. 140-146, June 2004.
- [5] N. Timmons, and W. Scanlon, "Analysis of the performance of IEEE 802.15.4 for medical sensor body area networking," in Proc. of IEEE SECON 2004, pp. 16-24, Oct. 2004.
- [6] E. Choi, J. Huh, K. Kim, M. Cho, and S. Kim, "Frame size adaptive MAC protocol in low-rate wireless personal area networks," in Proc. of ICOIN 2006, icoin-2006-539, Jan. 2006.
- [7] S. Deshpande, "Adaptive low-bitrate streaming over IEEE 802.15.4 low rate wireless personal area networks (LR-WPAN) based on link quality indication," in Proc. of ACM IWCMC 2006, pp. 863-868, July 2006.
- [8] G. Pekhteryev, Z. Sahinoglu, P. Orlik, and G. Bhatti, "Image transmission over IEEE 802.15.4 and ZigBee networks," in Proc. of IEEE ISCAS 2005, vol. 4, pp. 3539-3542, May 2005.
- [9] IEEE Standard 802.11, "Part 11: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications," Nov. 1997.
- [10] IEEE Standard 802.15.1, "Part 15.1: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for wireless personal area networks," Oct. 2002.
- [11] D. Hole, and F. Tobagi, "Capacity of an IEEE 802.11b wireless LAN supporting VoIP," in Proc. of IEEE ICC 2004, vol. 1, pp. 196-201, June 2004.
- [12] O. Awoniyi, and F. Tobagi, "Effect of fading on the performance of VoIP in IEEE 802.11a WLANs," in Proc. of IEEE ICC 2004, vol. 6, pp. 3712-2717, June 2004.
- [13] J. D. Gibson, and B. Wei, "Tandem voice communications: digital cellular, VoIP, and voice over Wi-Fi," in Proc. of IEEE GLOBECOM 2004, vol. 2, pp. 617-621, Dec. 2004.
- [14] J. D. Gibson, "Speech coding methods, standards, and applications," IEEE Circuits and Systems Magazine, vol. 5, no. 4, pp. 30-49, Dec. 2005.
- [15] M. Narbutt, and M. Davis, "An assessment of the audio codec performance in voice over WLAN (VoWLAN) systems," in Proc. of IEEE MobiQuitous 2005, pp. 461-467, July 2005.
- [16] M. Eiger, M. Elaoud, and D. Famolari, "The effect of packetization on voice capacity in IEEE 802.11b networks," in Proc. of IEEE CCNC 2005, pp. 267-271, Jan. 2005.

### 저 자 소 개

#### 허윤강

2005년 충남대 정보통신공학부 컴퓨터 전공 학사. 현재, 과학기술연합대학원대학교 석사 과정.

관심분야: 센서 네트워크, 홈네트워크

Email: ykhur@etri.re.kr

#### 김유진

1996~1999년 LG반도체 MCU설계실 연구원. 2005년 충북대 정보통신공학과 박사. 현재, 한국전자통신연구원 선임연구원.

관심분야: 임베디드 프로세서 설계, 무선 MAC 프로세서 설계.

Email: youjin@etri.re.kr

#### 이재두

1987년 경북대 전자공학과 학사. 1990년 경북대 전자공학과 석사. 2000년 경북대 정보통신공학과 박사. 현재, 한국전자통신연구원 센서네트워킹팀 팀장.

관심분야: 임베디드 하드웨어, WPAN 프로토콜, 센서 네트워크.

Email: jdjuh@etri.re.kr