

# ZigBee 네트워크에서 에너지 효율적인 Inter-PAN 통신을 위한 비컨 간격 및 슈퍼프레임 시간의 분석\*

김민정<sup>o</sup>, 심준호  
 숙명여자대학교 컴퓨터학과  
 chatterer@sookmyung.ac.kr, jshim@sookmyung.ac.kr

## Beacon Interval and Superframe Duration Analysis for Energy-efficient Inter-PAN Communication in ZigBee Networks

Minjeong Kim<sup>o</sup>, Junho Shim  
 Department of Computer Science, Sookmyung Women's University

### 요 약

IEEE 802.15.4는 저전력 무선 개인 네트워크(LR-WPAN, Low Rate-Wireless Personal Area Network)를 위한 표준으로 무선 센서 네트워크 기술에서 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 IEEE 802.15.4는 멀티홉 네트워크나 여러 개의 PAN(Personal Area Network)으로 구성된 네트워크에 대해서는 상세하게 기술하고 있지 않다.

본 논문에서는 IEEE 802.15.4를 기반으로 하는 ZigBee RF4CE 네트워크에서 사용하는 multiple star 토폴로지를 주목하였다. multiple star 토폴로지처럼 여러 개의 PAN 간에 통신이 이루어질 경우, 이를 에너지 효율적으로 수행할 수 있도록 하는 비컨 간격(Beacon Interval)과 슈퍼프레임 시간(Superframe Duration)을 분석한다. 이를 위해 QualNet 시뮬레이터를 이용하여 multiple star 토폴로지 네트워크를 형성하고, 비컨 간격과 슈퍼프레임 시간을 결정하는 요소에 대해 분석하였다.

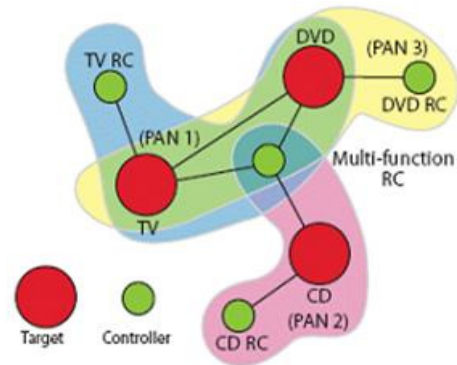
### 1. 서 론

2009년 3월에 RF-Based remote control을 위한 표준으로 제정된 ZigBee RF4CE(Radio Frequency for Consumer Electronics)는 가정 내의 TV, DVD 플레이어, 셋탑 박스(Set-top box)와 같은 기기들을 간편하고 효율적으로 제어하기 위한 메커니즘들을 정의하고 있다.<sup>[1]</sup>

ZigBee RF4CE는 ZigBee 표준과 마찬가지로 IEEE 802.15.4의 PHY 계층과 MAC 계층 위에서 동작하도록 설계되었다. IEEE 802.15.4는 낮은 전력을 이용하는 무선 센서 네트워크를 위한 PHY, MAC 계층을 정의해 놓은 표준이다. ZigBee RF4CE는 여러 개의 PAN으로 구성된 multiple star 토폴로지를 지원하는 반면, IEEE 802.15.4는 star 토폴로지, peer-to-peer 토폴로지를 제공하고 있다.

multiple star 토폴로지는 [그림 1]과 같이 star 토폴로지가 여러 개 연결된 구조이다. 큰 원이 PAN 코디네이터로, 코디네이터 간에도 통신이 이루어지며 각 코디네이터는 자신의 PAN에 속한 노드들과도 통신하는 구조로 되어있다.

기존의 ZigBee와 IEEE 802.15.4에서는 두 개 이상의



[그림 1] Multiple star 토폴로지의 예

PAN이 존재하는 경우에 대해서는 상세하게 언급된 바가 없다. IEEE 802.15.4에서 peer-to-peer 토폴로지를 정의하면서 여러 개의 PAN 간에 통신이 이루어지는 경우를 예로 들고 있기는 하지만, 이 통신에 필요한 여러 메커니즘의 구현은 IEEE 802.15.4의 범위에서 벗어난 것이므로 상위 layer에서 구현되어야 함을 밝히고 있다. ZigBee RF4CE에서는 이러한 IEEE 802.15.4를 기반으로, 가전 기기 스스로 PAN 코디네이터가 되어 자신의 PAN을 구축하고 다른 가전 기기와 통신할 수 있도록 multiple star 토폴로지를 정의하고 있다.

IEEE 802.15.4의 MAC 계층에서는 PAN를 이루는 센서 노드들이 활성 상태(active state)와 비활성 상태

\* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학IT연구센터 육성·지원사업(NIPA-2010-C1090-1031-0002)의 연구결과로 수행되었음.

(inactive state)를 가짐으로써 전력의 소모를 최소화할 수 있는 beacon enabled mode를 제공한다. 센서 노드들이 비활성 상태에 있다면 데이터를 송, 수신할 수 없기 때문에 센서 노드들이 PAN 코디네이터와 통신하기 위해서는 PAN 코디네이터와의 동기화(synchronization)이 필요하다. 이를 위해서 PAN 코디네이터는 PAN에 속한 노드들에게 비컨(beacon)을 전송한다. 비컨과 비컨 사이의 간격을 슈퍼프레임(Superframe)이라고 한다.

비컨을 전송하는 주기를 비컨 간격(Beacon Interval, BI)이라고 하고, 노드가 활성 상태에 있는 시간을 슈퍼프레임 시간(Superframe Duration, SD)이라고 한다. BI와 SD는 슈퍼프레임의 특성을 결정하는 중요한 매개변수이다. 이 두 매개변수의 값에 따라 네트워크의 에너지 소모와 end device 간의 데이터 지연 정도가 결정되기 때문이다.

본 논문에서는 ZigBee RF4CE에서 사용되는 multiple star 토폴로지에서의 인접한 PAN 간의 통신이 에너지 효율적으로 이루어 질 수 있는 BI와 SD의 값을 분석하고자 하며, 시뮬레이션은 네트워크 시뮬레이션 도구인 QualNet<sup>[2]</sup>을 이용하여 수행하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 관련연구에 대해 설명하고 제 3장에서는 QualNet 5.0을 이용한 모의실험에 관해 설명하며 제 4장에서는 결론을 기술한다.

## 2. 관련 연구

### 2.1 ZigBee RF4CE(Radio Frequency for Consumer Electronics)

ZigBee RF4CE는 다수의 제조업자 사이에서도 상호운용이 가능한 원격 제어 솔루션을 제공하는데, 이 솔루션은 양방향 무선 접속을 위한 통신망을 위한 것이다. 오늘날의 많은 RF 원격제어가 중계역할을 하는 기지국(Base station)을 필요로 하는 반면에, ZigBee RF4CE는 가전 기기 내에 기지국이 built된다. 이를 통해 가전기기와 remote control 사이의 양방향 통신이 가능해진다. 또한 ZigBee RF4CE는 간단한 네트워킹 계층과 표준 어플리케이션 프로파일 제공함으로써 다수의 제조업자 사이에서도 상호 운용이 가능해진다.

가정에서 흔히 리모콘이라 부르는 remote control은 적외선으로 명령을 보내는 IR(Infrared) 방식으로 원격 제어를 한다. 이 방식은 널리 사용되고 있지만 여러 문제점을 가지고 있다. 첫 번째로 HDTV에 사용할 경우 빛의 간섭이 생겨 사용하기가 어렵다. 두 번째로 target device를 향해 직선으로 적외선을 쏘아야 작동이 가능해진다. 따라서 리모콘을 사용하는 범위에 제한이 생긴다. 마지막으로 리모콘에서 target device으로 가는 한 방향 통신만 가능하다.

ZigBee RF4CE는 IR 방식의 문제점을 해결하는 솔루션으로, target device 앞에서 일직선으로 리모콘을 사용할 필요가 없으며 적외선보다 더 넓은 범위에서 target device를 동작시키는 것이 가능하다. 또한 IR보다 낮은 전력을 소비하며 속도도 더 빠르다.

ZigBee RF4CE에서는 가전기기들의 종류를 크게 두 가지로 구분한다.

첫 번째는 target device로 자기 자신의 권한으로 네트워크를 시작할 수 있고, 또한 PAN coordinator의 역할을 가지므로 자기 자신의 ZigBee RF4CE PAN을 생성할 수 있다. 이는 IEEE 802.15.4의 FFD(Full Function Device)와 유사하며, 텔레비전이나 셋탑 박스(Set-top box) 등을 예로 들 수 있다. 한 개의 target device는 여러 개의 controller device에 의해 통제될 수 있다.

두 번째는 controller device로 target device가 시작한 네트워크에 join하여 통신할 수 있다. 이는 IEEE 802.15.4의 RFD(Reduced Function Device)와 유사하고, 한 개의 Controller device는 여러 개의 target device와 통신하는 것이 가능하다.<sup>[3]</sup>

### 2.2 IEEE 802.15.4의 superframe

ZigBee RF4CE의 하위 계층에는 IEEE 802.15.4에서 정의된 PHY 계층과 MAC 계층이 놓여있다. IEEE 802.15.4에서는 데이터를 전송할 때 두 가지의 방식으로 전송 가능하다. 첫 번째는 nonbeacon enabled mode로 이 방식에서는 비컨을 사용하지 않으므로 항상 CSMA/CA 메커니즘을 이용하여 채널에 대한 접근이 경쟁적으로 이루어진다. 두 번째 방식은 beacon enabled mode이다. 이 방식에서는 비컨 메시지를 이용하여 센서 노드들을 동기화시킬 수 있게 된다. 따라서 이 방식에서는 노드들이 sleep 상태와 wake 상태에 번갈아 진입하면서 전력 낭비를 막을 수 있게 된다.

Beacon enabled mode에서는 PAN 코디네이터가 비컨을 전송하는데, 비컨 사이의 간격을 BI라고 하며 BO(Beacon Order) 값을 이용하여 식 (1)과 같은 방법으로 계산할 수 있다. 슈퍼프레임은 활성 구간(active portion)과 비활성 구간(inactive portion)으로 나뉘어진다. 활성 구간에서는 PAN 코디네이터가 저전력 모드로 들어가고, PAN 내의 다른 노드들도 Sleep 상태로 진입하여 전력을 절약하게 된다. 슈퍼프레임 내의 활성 구간의 길이를 SD라고 하며 SO(Superframe Order) 값을 이용하여 식 (2)와 같은 방법으로 계산할 수 있다. 아래의 두 식에서  $aBaseSuperframeDuration$ 의 값은 960 슬롯 시간으로 정해져 있다. BO의 범위는  $0 \leq BO \leq 14$ 이고, SO의 범위는  $0 \leq SO \leq BO$ 이다. 만약 BO의 값이 15라면 비컨을 사용하지 않는 네트워크가 nonbeacon enabled mode로 동작함을 의미한다.

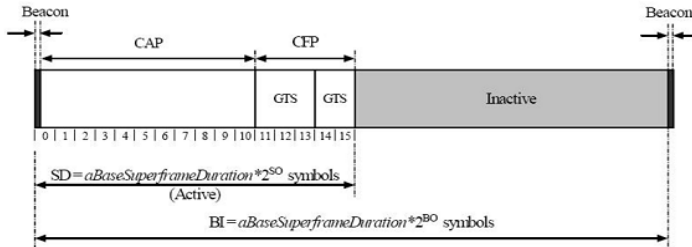
$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO} \quad (1)$$

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO} \quad (2)$$

활성 구간은 같은 크기의 16개의 슬롯으로 나누어지며 slotted CSMA/CA로 동작하는 CAP(Contention Access Period)와 센서 노드들에게 GTS를 할당하여 비경쟁적으로 동작하는 CFP(Contention Free Period)로 구성된다. CAP는 비컨 바로 다음부터 시작하며 CFP 구간이 시작하기 바로 직전에 끝난다. 만약 CFP의 길이가 0이라면, CAP는 활성 구간이 끝날 때까지 계속 유지된다. 노드들

은 CAP가 끝나기 전에 자신의 데이터 전송을 마쳐야 한다. CFP는 최대 7개의 GTS 슬롯을 포함할 수 있으며, GTS 슬롯은 PAN 코디네이터에 의해 슬롯을 신청한 노드들에게 할당된다<sup>[5]</sup>.

IEEE 802.15.4에서 정의하고 있는 슈퍼프레임의 구조는 [그림 2]와 같다.



[그림 2] 슈퍼프레임의 구조

일반적으로 BO가 커지면 PAN 코디네이터가 비컨을 전송하는 횟수는 줄어들지만 데이터가 많이 입력되는 반면, BO가 작아지면 비컨을 전송하는 횟수가 늘어나고 데이터는 상대적으로 적게 입력된다. SO가 큰 경우에는 노드들이 많은 시간동안 깨어있게 되므로 전력 소모가 많은 대신 데이터의 지연시간이 줄어들기 때문에 같은 시간에 많은 양의 데이터를 전송할 수 있다. 반대로, SO가 작아지면 전력소모는 낮아지나 상대적으로 데이터의 지연시간이 늘어나게 되어 상대적으로 적은 양의 데이터를 전송하게 된다<sup>[5]</sup>. BO와 SO를 동시에 늘리게 될 경우 지터(jitter)가 발생하는 문제가 생길 수 있다. 이처럼 BO와 SO 값에 따라 전력 소모나 서비스 지연의 tradeoff가 있고, 지터(jitter) 등의 문제가 생길 수 있으므로 각 어플리케이션의 특성에 따라 최적의 BO와 SO를 찾는 작업이 필요하다.<sup>[6]</sup>

본 연구에서는 가정 내의 가전기기들이 서로 무선 통신하는 상황을 가정하여 ZigBee RF4CE의 multiple star 토폴로지를 구성하고, 여기에 어플리케이션을 추가한 후 시뮬레이션하여 에너지 효율적인 BO와 SO의 값을 제안하고자 한다. 제안된 BO와 SO를 (1), (2)에 대입하면 에너지 효율적인 BI와 SD를 구할 수 있을 것이다.

### 3. 실험 및 분석

#### 3.1 시뮬레이션 시나리오

본 논문에서는 ZigBee RF4CE에서 사용하는 multiple star 토폴로지 환경에서 에너지 효율적인 Inter-PAN 통신이 이루어지는 BO, SO의 값을 구하기 위해서 가정 내의 가전 기기들이 통신하는 상황을 가정하였다. 시뮬레이터로는 QualNet 5.0을 사용하였다. 시뮬레이션의 환경은 [표 1]과 같다.

이 시뮬레이션 시나리오에서의 target device로는 TV, DVD, CD 플레이어와 냉난방기가 있다. 각각의 target device는 자신의 PAN을 구성하며, 전용 RC(Remote Controller)를 PAN의 노드로 갖는다. PAN에 속하는 노드로 전용 RC만 가능한 것은 아니며 센서 노드도 추가할 수 있다. 시뮬레이션 시나리오에도 CD 플레이어와 냉난

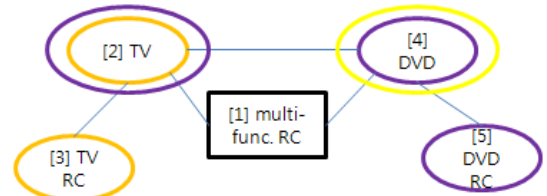
[표 1] 시뮬레이션 시나리오의 환경

시나리오 속성	값
Dimension	15m * 15m
Time	10 minutes
Battery	Linear model, 1000mAh capacity
Energy model	MicaZ
Packet size	50 / 512 Bytes
Channels	15, 20, 25

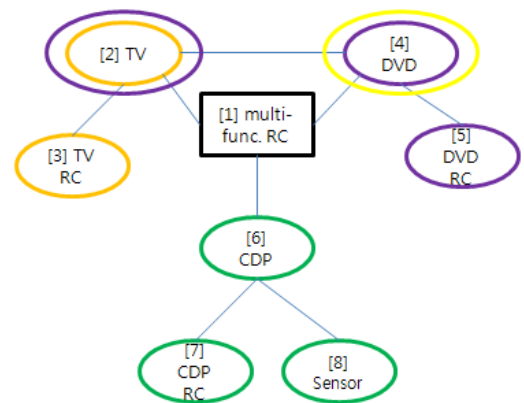
방기의 PAN에 센서 노드를 추가함으로써 인체를 감지하여 음악을 틀거나, 냉난방기의 전원을 켜고 끄는 것이 가능한 상황을 가정하였다. target device 간의 통신도 가능하다. 시뮬레이션 시나리오에서는 DVD가 동작할 때 TV와 연결되어 무선 통신을 하는 상황을 가정하였다.

이제까지 설명한 시뮬레이션 시나리오의 토폴로지는 [그림 3]과 같다. [그림 3]에서 같은 PAN에 속하는 노드들은 같은 색의 타원으로 표시되어 있다. 또한 [그림 3-1], [그림 3-2], [그림 3-3] 에서 사각형으로 표시된 1번 노드는 모든 PAN에 속하는 동시에 multi-function RC의 역할을 한다. ZigBee RF4CE는 이처럼 한 개의 RC가 여러 개의 target device를 제어할 수 있도록 하는 메커니즘을 기술하고 있다. 이렇게 되면 전용 RC와는 달리 여러 개의 target device를 제어할 수 있다.

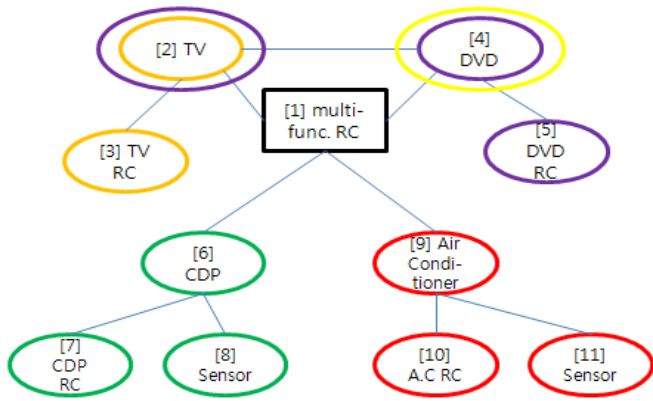
시뮬레이션은 PAN이 2개, 3개, 4개일 때로 나누어 세 번에 걸쳐 진행되었다. 2개일 때는 TV와 DVD가 각각 target device가 되고, 3개일 때는 CD 플레이어가 추가되고, 4개일 때는 냉난방기가 추가되어 각자의 PAN을 형성한다.



[그림 3-1] PAN 2개



[그림 3-2] PAN 3개



[그림 3-3] PAN 4개

[그림 3] PAN 개수에 따른 네트워크 토폴로지

시뮬레이션을 하면서 PAN의 개수와 더불어 값을 바꿔 주는 변수는 BO와 SO의 값이다. 2.2장에서 설명한 대로 BO와 SO는 IEEE 802.15.4의 슈퍼프레임의 구조를 결정하는 중요한 파라미터이다. 본 논문에서는 각 PAN의 개수를 바꿔가며 시뮬레이션할 때마다 [표 2]처럼 BO와 SO의 값을 적용했다.

[표 2] 시뮬레이션에 사용할 BO, SO 값

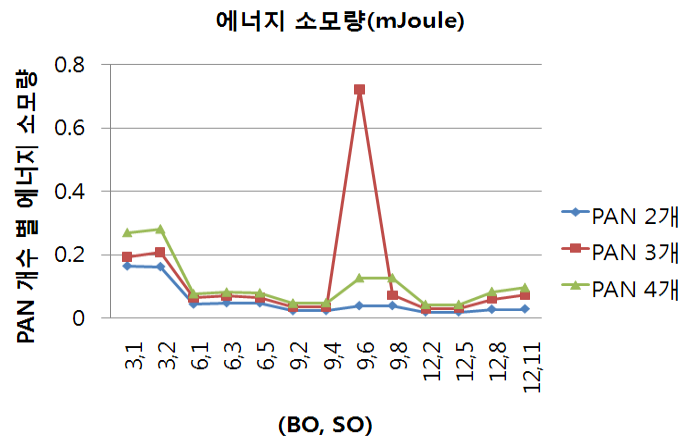
BO	3	6	9	12
SO	1, 2	1, 3, 5	2, 4, 6, 8	2, 5, 8, 11

ZigBee RF4CE의 Application Profile에서는 ZigBee RF4CE 네트워크에서 전송하는 프레임의 크기를 지정하고 있다. 이 Application Profile을 참고할 때, 노드들 간에 전송되는 데이터의 크기는 최대 50 bytes를 넘지 않는다. 따라서 시뮬레이션의 트래픽을 정할 때도 데이터의 크기는 50 bytes로 하였다. 단, DVD에서 TV로 전송되는 데이터는 멀티미디어 데이터이므로 512 bytes로 지정하였다. 각각의 노드가 데이터를 전송하는 주기는 multi-function RC가 15초, 전용 RC와 센서 노드들이 10초이며 이 값은 임의로 할당하였다.

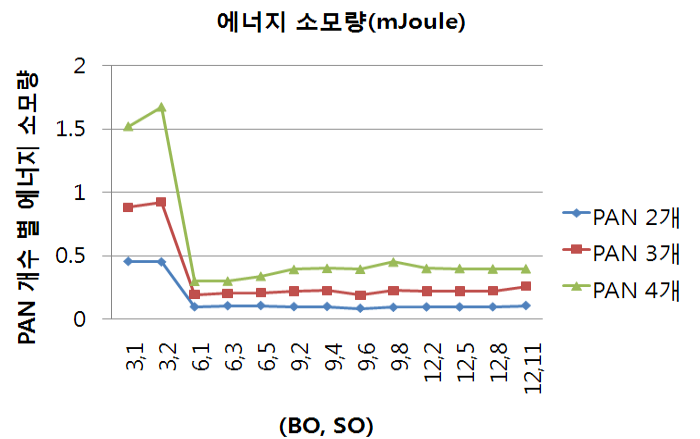
### 3.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서 사용한 MicaZ 에너지 모델에서는 전송(transmission), 수신(receive), 수면(sleep), 유휴(idle) 상태에서의 에너지 소모량을 각각 측정한다. 수면 상태에서의 에너지는 모든 상황에서 동등하기 때문에, 본 논문에서는 수면 상태의 에너지 소모에 대해서는 따로 분석하지 않았다.

[그림 4]와 [그림 5]는 각각 전송 상태, 수신 상태일 때의 에너지 소모량을 나타내는 그림이다. 전송 상태에서 PAN이 3개이고 BO 값과 SO값이 각각 9, 6인 상황에서 에너지 소모량이 급격히 큰 것을 제외하면 두 그래프는 비슷한 양상을 가진다. 이것은 BO 값이 클수록 비컨을 보내서 노드들 간의 동기화가 드물게 일어나서 데

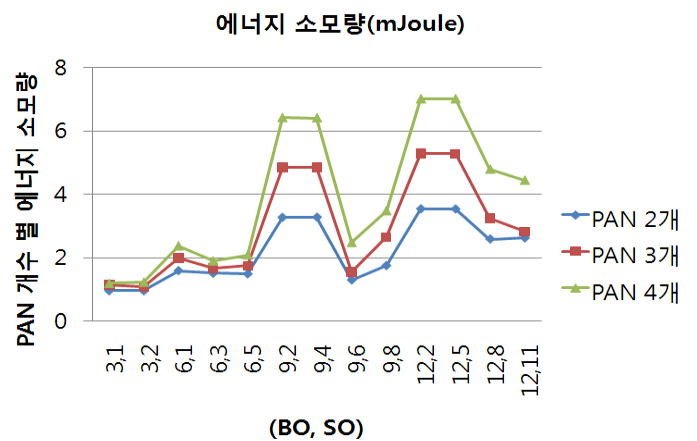


[그림 4] BO, SO 값에 따른 에너지 소모량-전송 상태



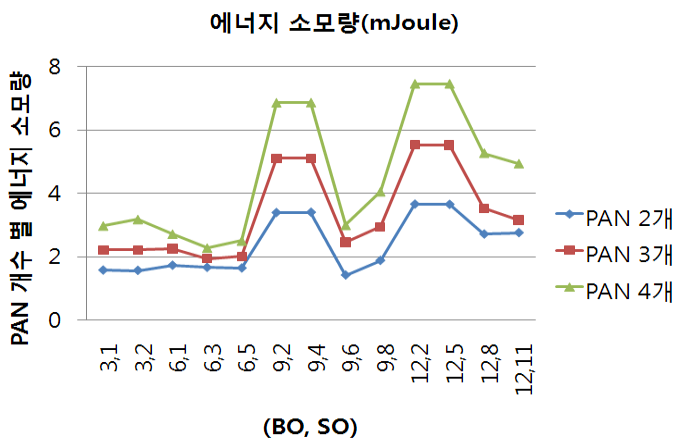
[그림 5] BO, SO 값에 따른 에너지 소모량-수신 상태

이터를 전송하고 수신할 기회도 그만큼 줄기 때문이다. 또한 데이터의 전송과 수신은 공통적으로 BO 값이 3일 때 가장 많은 에너지를 소모한다. BO가 같을 경우에는 SO 값이 증가할수록 소모하는 에너지의 양이 증가하는 경향이 있다. 이것은 SO 값이 증가할수록 활성 구간의 길이가 증가하여 데이터를 전송하고 수신할 수 있는 시간이 길어지기 때문이다.



[그림 6] BO, SO 값에 따른 에너지 소모량-유휴 상태

[그림 6]은 유휴 상태에서의 에너지 소모량을 나타내는 그래프이다. BO 값이 증가할수록 유휴 상태에서의 에너지 소모량이 증가하는 이유는 데이터의 충돌로 인한 패킷 손실과 관련이 있다. BO 값이 증가하여 노드들 간의 동기화가 자주 일어나지 않는 상황이 되면, 전송 가능한 데이터의 양이 줄어들기 때문에 drop 되는 패킷이 증가하게 되고, 이는 데이터의 전송 및 수신을 감소시키는 결과를 가져온다. 따라서 상대적으로 유휴 상태에 들어가는 시간이 길어지게 되므로 위와 같은 결과가 만들어진다. SO 값이 증가할수록 유휴 상태에서 소모되는 에너지는 줄어드는데, 이는 SO 값이 증가하면 활성 구간의 길이가 늘어나서 데이터의 전송 및 수신 횟수가 증가하게 되고, 디바이스가 유휴 상태로 들어가는 시간이 줄어들기 때문이다.



[그림 7] BO, SO 값에 따른 에너지 소모량

[그림 7]에 나타나있는 에너지 소모량은 수면 상태를 제외한 전송, 수신, 유휴 상태에서의 에너지 소모량을 합친 값이다. 그래프를 보면 PAN의 개수에 상관없이 에너지 소모량이 (BO, SO) 값에 따라 일정한 패턴을 가지고 변화한다는 것을 알 수 있다. 이 그래프와 [그림 6]의 유휴 상태에서의 에너지 소모량을 비교해 보면 BO 값이 9와 12일 때의 그래프 변화가 유사하다는 것을 알 수 있다. 이것은 BO가 클수록 유휴 상태에서의 에너지 소모량이 전체 에너지 소모량에 많은 영향을 주는 것을 보여주는 것이다.

BO의 값이 3, 6일 때는 에너지 소모량의 차이가 그리 크지 않다. 한 가지 특징적인 사항은 BO 값이 6일 때, SO 값이 BO 값의 반 정도 되는 지점에서 에너지 소모량이 가장 낮다. 즉 SO 값이 증가할수록 에너지 소모량이 감소했다가 이 지점을 기점으로 하여 에너지 소모량이 다시 증가하는 양상을 보인다.

BO 값이 9, 12일 때는 에너지 소모량이 BO 값이 3, 6일 때보다 증가한다. 특히 SO 값이 BO 값의 반보다 작은 구간에서 에너지 소모량이 현저히 큰 값을 갖는다. SO 값이 BO 값의 반을 넘어서 구간에서는 에너지 소모량이 감소한다.

따라서 위의 그래프와 내용을 종합해보면, PAN의 개수에 상관없이 에너지 효율적인 BO와 SO의 값은 각각 6, 3이다. 이 값을 2.2에서 보았던 식 (1)과 (2)에 각각

대입하면 에너지 효율적인 비컨 구간(BI)과 슈퍼프레임 시간(SD)을 구할 수 있게 된다.

#### 4. 결론

ZigBee RF4CE는 RF를 이용하여 가정 내의 가전 기기들 간의 무선 통신이 가능하도록 적은 비용이 드는 네트워크를 구성하고자 하는 기술이다. 이 기술은 가전 기기들을 PAN 코디네이터로 하여 PAN 간의 Inter-PAN 통신이 가능하도록 하는 multiple star 토폴로지를 이용한다. 이러한 ZigBee RF4CE는 IEEE 802.15.4의 PHY, MAC layer를 기반으로 하고 있다.

IEEE 802.15.4는 노드들이 활성 상태와 비활성 상태에 번갈아 진입하면서 에너지를 절약할 수 있도록 하기 위해서 beacon enabled mode를 지원한다. beacon enabled mode에서는 PAN 코디네이터가 주기적으로 전송하는 비컨 사이의 간격인 슈퍼프레임이 형성되고, PAN 내의 다른 노드들이 수신한 비컨을 통해 코디네이터와의 동기화를 수행한다. 비컨을 전송하는 주기인 비컨 간격(BI)과 슈퍼프레임 내의 활성 구간과 비활성 구간의 길이를 결정하는 슈퍼프레임 시간(SD)은 슈퍼프레임 구조를 결정하는 중요한 파라미터이다. 본 논문에서는 BI와 SD의 값을 결정하는 BO와 SO의 값을 조절하여 시뮬레이션함으로써 Inter-PAN 통신 상황에서 에너지 효율적인 BI와 SD의 값을 얻고자 하였다.

이를 위해 가정 내의 가전 기기들이 무선 통신하는 상황을 가정하여 시뮬레이션을 구성하였으며, 시뮬레이션의 결과로 얻은 에너지 효율적인 BO와 SO의 값은 각각 6과 3이었다. 이를 BI와 SD를 구하는 식에 대입함으로써 에너지 효율적인 BI와 SD를 계산해낼 수 있다.

추후에는 최근에 ZigBee의 사용 용도로 각광받고 있는 U-Health등에 ZigBee RF4CE를 접목시켜서 에너지 효율적이면서 데이터 패킷의 손실이 없도록 슈퍼프레임을 제어하는 방법을 연구할 것이다.

#### 참고문헌

- [1] ZigBee Alliance, <http://www.zigbee.org>
- [2] ZigBee Alliance, "ZigBee RF4CE Specification Version 1.00(ZigBee Document 094945r00ZB)", 2009.3
- [3] Scalable Network Technologies, <http://www.scalable-networks.com>
- [4] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE computer society, "Part 15.4: Wireless Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs)", IEEE Std 802.15.4-2006
- [5] 김정아, 전영호, 박홍성, "IEEE 802.15.4에 있어서 샘플링 주기를 이용한 비컨 구간 및 슈퍼프레임 구간의 적응적 제어방법", 한국통신학회, 2007-01
- [6] 광원근, 이재용, "IEEE 802.15.4 WPAN에서의 Cyclic Contention Free Access 기법", 한국통신학회, 2007-01