IEEE 802.15.3 고속 WPAN 메쉬 네트워크의 멀티-홉 통신을 위한 가용 슈퍼프레임 크기와 디바이스 탐색 성능 분석

준회원 정 쌍 봉*, 임 순 빈*, 김 현 기*, 종신회원 이 태 진*

Performance Analysis of Available Superframe Size and Device Discovery Time for Multi-hop Communications in IEEE 802.15.3 High-rate WPAN Mesh Networks

Ssang-Bong Jung*, Soon-Bin Yim*, Hyun-Ki Kim* *Associate Members*,
Tae-Jin Lee* *Lifelong Member*

요 약

IEEE 802.15.3 High-rate WPAN(Wireless Personal Area Network)은 무선으로 약 10m이내의 근거리 디바이스들을 연결하여 고속 통신을 지원하기 위해 개발되었다. 피코넷(piconet)은 하나의 PNC (Piconet Coordinator)와 하나 이상의 디바이스(device)로 구성된다. 부모 피코넷(parent piconet)에 합류(association)한 디바이스는 PNC가 되어 자식 피코넷(child piconet)을 형성할 수 있다. 부모 피코넷과 자식 피코넷들로 구성된 메쉬(mesh) 네트워크에서는 멀티-홉(multi-hop) 통신이 가능하게 된다. 본 논문에서 메쉬 네트워크의 최대 레벨과 가용 슈퍼프레임 크기를 분석하고, 멀티-홉 전송을 위한 디바이스 탐색시간을 랜덤 메쉬 네트워크 환경에서 분석한다. 일정한 영역에서 디바이스 수가 증가함에 따라 형성되는 메쉬 네트워크의 레벨은 최대 약 1.9까지 가능하며, 가용 슈퍼프레임 크기는 약 52 ms이고, 디바이스 탐색시간은 약 155 ms 소요됨을 확인할 수 있다.

Key Words : WPAN, Mesh networks, Multi-hop, Discovery

ABSTRACT

The IEEE 802.15.3 high-rate WPAN has been developed to communicate with devices within 10m. A piconet consists of one Piconet Coordinator (PNC) and several devices. The devices associated with a parent piconet can become child PNCs in order to form child piconets. A mesh network made up of a parent piconet and several child piconets can support multi-hop communications. In this paper, we analyze the maximum level and the avaliable superframe size to make the best use of bandwidth for multi-hop communications, and compare the analysis with the simulation results in terms of time to discover devices for multi-hop communications. The average number of levels in mesh networks is shown to be about 1.9 when the number of devices increases within a fixed area. We have also shown that the maximum available superframe size is 52ms and the discovery time is approximately 155ms.

※ 이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R01-2006-000-10402-0)
* 성균관대학교 정보통신공학부 네트워크시스템연구실 ({jssbong, sbyim, hidden01, tjlee}@ece.skku.ac.kr)
논문번호 : KICS2006-11-488 접수일자 : 2006년 11월 13일, 최종논문접수일자 : 2007년 6월 3일

Ⅰ. 서 론

정보통신 기술의 발달로 통신, 방송 및 인터넷 등이 융합하는 추세와 함께, 모든 기기와 사용자들이 어디서나 통신이 가능하도록 하기 위해 무선 통신의 발전이 가속화 되고 있다. 이에 따라 사무실이나 주택 등에서 사용되는 가전기기, 사무기기 및 각종 홈 네트워크에서 사용되는 정보기기를 배선 없이 무선으로 신호를 연결하여 통신하는 WPAN (Wireless Personal Area Network) 기술에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 현재 대표적인 WPAN 기술로는 IEEE 802.15.1 (Bluetooth)[1], IEEE 802.15.3 High-rate WPAN[2][4], IEEE 802.15.4 (ZigBee)[3] 등이 있다.

Bluetooth와 ZigBee는 1 *Mbps*이하의 속도로 데이터를 전송하기 때문에, MP3플레이어나 디지털 카메라, PMP(Portable Multimedia Player)등과 같이 수백*Kbps*에서 수십*Mbps* 데이터 전송이 요구되는 고속 WPAN 환경에는 적합하지 않다. 이러한 고속의 데이터 전송을 위한 WPAN 기술로 IEEE 802.15.3 High-rate WPAN 표준이 있다. IEEE 802.15.3 High-rate WPAN 표준은 2003년 IEEE 802.15 working group에서 표준화가 되었으며, 고속의 데이터율과 낮은 복잡성, 낮은 비용, 낮은 전력 소모를 제공하기 위해 만들어진 기술이다[2]. IEEE 802.15.3 High-rate WPAN은 2.4 *GHz*에서 동작하고 최대 55 *Mbps*의 속도를 지원한다. 하나의 PNC(Piconet Coordinator)와 하나 이상의 디바이스(device)로 구성되는 피코넷(piconet)을 형성하여 디바이스들끼리 통신이 가능한 무선 애드-혹(ad-hoc) 통신시스템이다. 피코넷에 있는 많은 다비아스들은 PNC의 제어하에 무선 자원을 공유하며, PNC는 기본적인 타이밍을 제공할 뿐만 아니라 QoS(Quality of Service) 관리도 담당하고 있다.

IEEE 802.15.3 High-rate WPAN에서는 부모 피코넷(parent piconet)과 자식 피코넷(child piconet)을 정의[2]하고 있다. 메쉬(mesh) 네트워크는 부모 피코넷과 자식 피코넷들로 구성되며, 자식 PNC들은 부모 피코넷의 멤버(member)이다. 자식 피코넷들은 부모 피코넷에 의존하는 피코넷들이기 때문에 자식 피코넷 디바이스들과 부모 피코넷 디바이스들 간의 통신 즉, 멀티-홉(multi- hop)[5] 통신은 불가능 하다. 하지만 부모 PNC와 자식 PNC들을 중계기로 이용하면 형성된 메쉬 네트워크[6]에서 멀티-홉 전송이 가능해진다[7]. 멀티-홉 전송을 위해서는 디바이스들에 대한 탐색이 필요하며, IEEE 802.15.3 High-rate WPAN 표준에는 디바이스 탐색을 위한 명령 프레임(command frame)과 비콘 정보 요소(information element)에 대한 정의가 되어있지 않다. 따라서 본 논문에서는 멀티-홉 전송을 위해 필요한 명령 프레임과 비콘 정보 요소에 대해 정의한다. 그리고 형성된 메쉬 네트워크에서 부모 피코넷과 자식 피코넷들의 디바이스들에 대한 디바이스 탐색[8]성능을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 IEEE 802.15.3 High-rate WPAN의 MAC 프로토콜, 부모 피코넷과 자식 피코넷, 그리고 메쉬 네트워크의 디바이스 탐색 과정을 설명한다. 3장에서는 기본 네트워크에서의 디바이스 탐색시간과 메쉬 네트워크에서의 가용 슈퍼프레임 크기 및 디바이스 탐색시간 분석에 대해 설명한다. 성능 분석은 4장에 기술하고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. IEEE 802.15.3 High-rate WPAN

2.1. IEEE 802.15.3 High-rate WPAN의 MAC 프로토콜

IEEE 802.15.3 High-rate WPAN은 피코넷 단위로 네트워크를 형성한다. 하나의 피코넷은 약 10m 이내의 전송범위에서 애드-혹 네트워크를 구성하여 무선 통신을 지원한다. 피코넷의 형성으로 대용량 파일의 무선전송이 가능하며, 이러한 IEEE 802.15.3 High-rate WPAN은 멀티미디어 트래픽에 대한 QoS 보장, 에너지의 효율성, 저비용, 저 복잡성을 목적으로 한다.

피코넷은 PNC와 디바이스로 구성되며, 디바이스들 중에 PNC 기능을 가진 하나의 디바이스가 자식 PNC로 선택되어 자식 피코넷 형성을 위한 PNC 역할을 수행한다. PNC는 주기적으로 비콘(beacon)을 전송하며 그림 1과 같은 슈퍼프레임 구조를 가진다. PNC는 데이터 전송을 위한 CTA(Channel Time Allocation)의 정보를 디바이스에게 제공하고 CTA

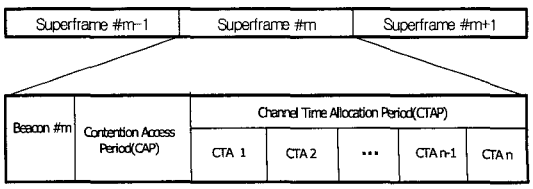


그림 1. IEEE 802.15.3 WPAN의 슈퍼프레임

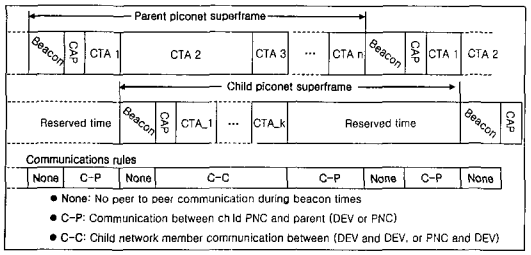


그림 2. 부모 피코넷과 자식 피코넷의 관계

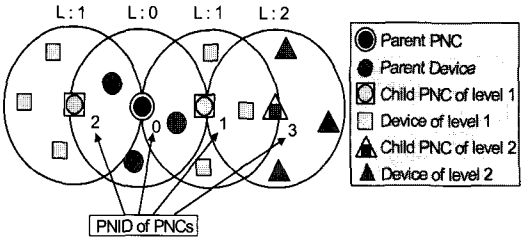


그림 3. 메쉬 네트워크

의 스케줄링과 피코넷에 디바이스들의 합류(association)와 분리, 전력소비 모드 등을 관리한다. 비콘과 관리 프레임은 PNC와 디바이스 사이에서 전송되며, 실제 데이터

프레임은 PNC를 통하지 않고 디바이스 간 peer-to-peer로 전송한다. IEEE 802. 15.3 High-rate WPAN은 비인가 ISM 대역인 2.4 *GHz* 대역에서 5개의 채널(channel)중 하나를 선택하여 피코넷을 형성하며, 사용 가능한 채널 리스트를 가지고 있기 때문에 채널은 동적으로 변화될 수 있다[9].

IEEE 802.15.3 High-rate WPAN의 슈퍼프레임은 비콘구간, 경쟁구간(CAP: Contention Access Period)과 채널 시간 할당 구간(CTAP : Channel Time Allocation Period)으로 나누어진다. 첫째, 비콘구간에서는 PNC가 디바이스들에게 WPAN 기본 정보를 가지고 있는 비콘을 전송한다. 둘째, 경쟁구간에서는 PNC와 디바이스가 네트워크의 합류 및 분리 요청과 허용, 자원할당 요청과 허용, 연결 요청과 허용 등의 명령 패킷을 전송한다. 셋째, CTA 할당 구간에서는 여러 개의 시간 슬롯으로 이루어진 CTA를 디바이스에게 할당한다. CTA를 할당 받은 디바이스는 해당 시간동안 동기 및 비동기 데이터와 명령 패킷을 전송한다.

2.2. 부모 피코넷과 자식 피코넷

IEEE 802.15.3 High-rate WPAN에서 피코넷은 보조 피코넷을 형성할 수 있다. 보조 피코넷 생성 기준이 되는 원래 피코넷(original piconet)을 부모 피코넷이라 하며, 부모 피코넷의 디바이스들 중에서 PNC가 되어 보조 피코넷을 형성하면, 자식 피코넷이라 한다. 부모 피코넷 디바이스들 중PNC 기능을 가진 디바이스가 자식 피코넷을 형성 하기 위해 부모 피코넷의 PNC에게 사설(private) CTA를 요청하면, 요청한 디바이스에게 적절한 CTA구간을 할당해 줌으로서 자식 피코넷을 형성하게 된다. 여기서 자식 피코넷을 형성한 디바이스를 자식 PNC이라

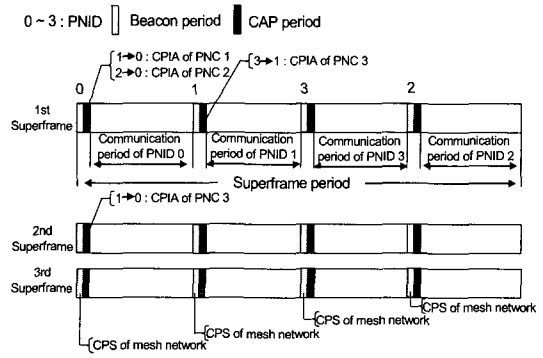


그림 4. 슈퍼프레임에서 할당받은 부모/자식 피코넷들의 CPIA명령과 CPS 정보 전송 흐름

부르며 부모 피코넷의 일반 디바이스와 자식 피코넷의 PNC 역할을 동시에 수행한다. 부모 PNC는 자식 PNC에게 부모 피코넷의 CTA 구간에서 사설 CTA를 할당해주고, 자식 피코넷의 통신은 그 구간에서 독립적인 피코넷으로 동작하게 된다. 그림 2는 부모 피코넷과 지식 피코넷의 관계를 나타낸다. 부모 피코넷의 CTA들중 CTA 2와 CTA 3을 자식 피코넷의 사설 CTA로 할당 받아 통신에 사용된다. C-P구간은 자식 PNC와 부모 피코넷 디바이스들간의 통신 구간이며, C-C구간은 자식 PNC와 자식 피코넷 디바이스들간의 통신 구간이다. 부모 피코넷과 자식 피코넷은 같은 채널을 이용하고 자식 PNC들은 부모 피코넷의 디바이스들이다. 따라서 자식 PNC들과 부모 피코넷의 디바이스들은 직접적인 통신이 가능하고, 자식 PNC들을 통하여 멀티-홉 전송이 가능해져 통신 영역을 확장할 수 있다.

2.3. 메쉬 네트워크의 디바이스 탐색 과정

본 절에서는 메쉬 네트워크의 디바이스 탐색 과정에 대해 알아본다. 그림 3은 IEEE 802.15.3 High-rate WPAN에서 형성되는 메쉬 네트워크를 나타낸다. 그림 3의 메쉬 네트워크를 바탕으로 부모 피코넷과 자식 피코넷들이 슈퍼프레임 내에서 할당

받아 통신할 수 있는 비콘, 경쟁구간 및 CTA는 그림 4에 나타나 있다. PNID(Piconet Identifier) 0을 가지는 하나의 부모 피코넷은 두개의 자식 피코넷(PNID: 1, 2)을 형성하며, 이들을 레벨 1(L: 1)의 피코넷이라 정의한다. 레벨 2(L: 2)에 PNID 1에서 형성된 자식 피코넷(PNID: 3)이 형성된다. 각각의 피코넷 기능은 동일하며, 부모 PNC와 자식 PNC들은 할당 받은 CTA구간의 시작시간부터 비콘을 전송하고 경쟁구간을 거친 뒤, 부모 PNC나 자식 PNC가 할당해주는 CTA내에서 통신이 이루어진다.

메쉬 네트워크 멀티-홉 전송을 정의하기 위해 IEEE 802.15.3 High-rate WPAN 표준에 정의되어 있지 않은 명령 프레임과 비콘 정보 요소를 추가해야 한다. 먼저 자식 피코넷의 정보를 알려줄 자식 피코넷 정보 알림 명령(CPIA: Child Piconet Information Announce)을 추가하고, 그 정보를 비콘에 포함하여 전송할 자식 피코넷 상황(CPS: Child Piconet Status) 정보 요소를 추가해야 한다.

그림 3과 4에서 PNID 0을 부모 PNC라 하고 PNID 1~3을 자식 PNC들이라 한다. CPIA 명령과 CPS 전송 흐름을 설명하면 다음과 같다. 그림 4의 첫 번째 슈퍼프레임에서 PNID 1과 2를 가지는 자식 PNC들은 부모 피코넷의 경쟁구간(CAP)에서 PNID 0인 부모 PNC에게 CPIA 명령을 전송한다(1->0, 2->0). 그리고 PNID 3을 가지는 자식 PNC는 PNID 1을 가지는 자식 PNC에게 CPIA명령을 PNID 1인 PNC의 경쟁 구간에서 전송한다(3->1). 명령 프레임은 경쟁구간에서 전송하며, 자식 피코넷들은 PNID 0을 가지는 부모 PNC에게 CPIA 명령을 전달해야 한다. 두 번째 슈퍼프레임에서 PNID 3인 자식PNC로부터 CPIA를 전달 받은 PNID 1인 자식 PNC는 PNID 3인 자식 PNC의 CPIA 명령을 PNID 0인 부모 PNC에게 PNID 0인 부모 PNC의 경쟁구간에서 전송 한다(1->0). PNID 0을 가지는 부모 PNC는 수신한 CPIA 명령들을 조합하고, 조합한 정보들을 비콘의 CPS에 포함하여 다음 슈퍼프레임에서 전송해야 한다. 세 번째 슈퍼프레임에서 PNID 0인 부모 PNC가 CPS를 포함하여 비콘에 전송하면, 레벨 1의 PNID 1과 2인 자식 PNC들은 비콘을 수신한다. 그리고 PNID 1과 2인 자식 PNC는 수신한 CPS를 비콘에 포함하여 전송 한다. PNID 3인 자식 PNC는 PNID 1인 자식 PNC가 전송하는 비콘을 수신하고 수신한 CPS를 비콘에 포함하여 전송하게 된다. 비콘을 수신한 디바이스들은 메쉬 네트워크의 PNID들과 디바이스들에 대한 정보를 CPS로부터 알 수 있기 때문에 멀티-홉 통신을 위한 디바이스 탐색을 마치게 된다.

Ⅲ. 가용 슈퍼프레임 크기 및 디바이스 탐색 시간 분석

본 절에서는 메쉬 네트워크의 가용 슈퍼프레임 크기 및 멀티-홉 통신을 위한 디바이스 탐색시간 등에 대해서 분석한다. IEEE 802.15.3 High-rate WAPN에서 자식 PNC들은 부모 PNC에 요청하여 자식 피코넷을 형성할 수 있는 사설 CTA를 할당 받아 메쉬 네트워크를 형성 한다. 특정 레벨에 형성된 피코넷들도 다음 레벨을 형성할 자식 PNC들의 요청이 있을 경우, 허용 가능한 CTA 범위에서 사설 CTA를 할당 받는다. 이와 같이 자식 피코넷 형성으로 할당되는 사설 CTA를 계산할 수 있으며, 메쉬 네트워크 형성 뒤 이용 가능한 가용 슈퍼프레임 크기 및 디바이스 탐색시간을 구할 수 있다. 성능분석을 위해 사용된 파라미터는 다음과 같다.

S: 슈퍼프레임의 최대 크기
N: 하나의 피코넷에 합류하는 디바이스 수 (기본 네트워크)
n: 디바이스 수 (랜덤 네트워크)
L: 메쉬 네트워크의 계층
T_B: 하나의 피코넷에 위치하는 슈퍼프레임의 비콘 시간
T_{CAP}: 하나의 피코넷에 위치하는 슈퍼프레임의 경쟁구간
T_{CTA}: 하나의 디바이스에 할당 가능한 CTA 시간
N_{P_DEV}: 부모 피코넷의 디바이스 수
$N^i_{C_PNC}$: 레벨 i에서 자식 PNC 수, $i=1,2,\cdots,L$
$N^i_{C_DEV}$: 레벨 i에서의 디바이스 수, $i=1,2,\cdots,L$
N_{L_DEV}: 슈퍼프레임 마지막에 위치하는 피코넷의 디바이스 수
R^i_{CTA1}: 레벨 i에서 다음 레벨 하나의 피코넷 형성을 위한 여분의 CTA시간, $i=1,2,\cdots,L$
$T^i_{S_size}$: 메쉬 네트워크의 레벨 i에 대한 가용 슈퍼프레임 크기, $i=1,2,\cdots,L$
$T^i_{Discovery}$: 메쉬 네트워크의 레벨 i에 대한 디바이스 탐색시간, $i=0,1,\cdots,L$

3.1. 기본 네트워크의 디바이스 탐색 분석

메쉬 네트워크를 형성했을 때, 레벨과 하나의 피

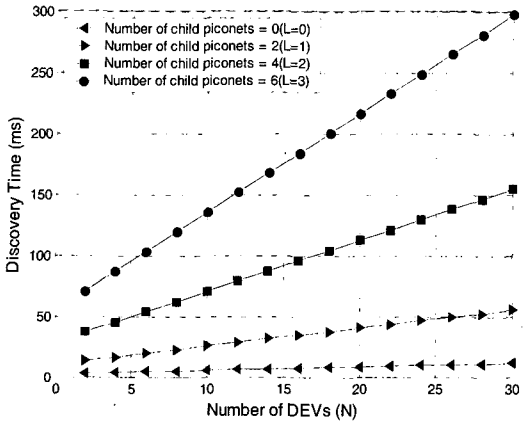


그림 5. 레벨에 형성되는 피코넷 수와 하나의 피코넷에 합류하는 디바이스 수의 변화에 따른 디바이스 탐색시간

코넷에 합류하는 디바이스 수가 일정하게 증가한다고 가정한 기본 네트워크의 디바이스 탐색시간은 그림 5와 같다. 레벨 0에서는 자식 피코넷이 없으며, 레벨이 증가할 경우 각 레벨마다 2개의 자식 피코넷을 형성할 수 있다고 가정하였다. 예를 들면, 그림 5에서 레벨 2까지 메쉬 네트워크를 형성한다면 자식 피코넷 수는 $4(L\times2)$개이다. 그리고 하나의 피코넷에 합류되는 디바이스 수도 같다고 가정한다. 그림 5의 레벨에 형성되는 피코넷 수와 하나의 피코넷에 합류하는 디바이스 수의 변화에 따른 레벨 i에 대한 디바이스 탐색시간은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$T^{i}_{Discovery} = (((2\times i)+1)\times(T_B + T_{CAP} + T_N)) \times(i+1) - ((T_N + T_{CAP}),\ i=0,1,\cdots,L \quad (1)$$

여기서 $T_N = N\times T_{CTA}$이라고 한다.

레벨 2까지 형성했을 경우, 자식 피코넷의 수는 4개이며, 하나의 피코넷에 합류하는 디바이스 수가 각각 15개, 30개일 경우의 디바이스 탐색 시간은 약 90 ms와 155 ms가됨을 확인할 수 있다.

3.2 랜덤 네트워크의 디바이스 탐색 분석

랜덤 네트워크에서 레벨과 가용 슈퍼프레임 크기 및 디바이스 탐색에 대한 수식들은 다음과 이 구할 수 있다. T_{P_size}를 레벨 0에서 구해지는 가용 슈퍼프레임 크기라 하고, 레벨 i에서 구해지는 가용 슈퍼프레임 크기 $T^{i}_{C_size}$는 다음과 같이 구해진다.

$$T_{P_size} = T_B + T_{CAP} + (T_{CTA}\times N_{P_DEV}) \quad (2)$$

$$T^{i}_{C_size} = (T_B + T_{CAP} + R^{i+1}_{CTA1})\times N^{i}_{C_PNC} + (T_{CTA}\times N^{i}_{C_DEV}),\ i=1,2,\cdots,L \quad (3)$$

여기서, R^{i+1}_{CTA1}는 레벨 i에서 부모 피코넷과 자식 피코넷들의 통신 구간이며, 다음 레벨 형성을 위한 여분의 CTA시간이기도 하다. R^{i}_{CTA1}는 다음과 같이 구해진다.

$$R^{1}_{CTA1} = \frac{S - T_{P_size}}{N^{1}_{C_PNC}+1} \quad (4)$$

$$R^{2}_{CTA1} = \frac{R^{1}_{CTA1}\times N^{1}_{C_PNC} - T^{1}_{C_size}}{N^{2}_{C_PNC}+N^{1}_{C_PNC}} \quad (5)$$

$$\vdots \quad (6)$$

$$R^{i}_{CTA1} = \frac{R^{i-1}_{CTA1}\times N^{i-1}_{C_PNC} - T^{i-1}_{C_size}}{N^{i}_{C_PNC}+N^{i-1}_{C_PNC}},\quad i=2,3,\cdots,L$$

그리고, 메쉬 네트워크를 형성했을 때 레벨 i에 대한 가용 슈퍼프레임 크기 $T^{i}_{S_size}$는 다음과 같이 구할 수 있으며, $T^{o}_{S_size}$는 T_{P_size}와 같다.

$$T^{0}_{S_size} = T_B + T_{CAP} + (T_{CTA}\times N_{P_DEV}) \quad (7)$$

$$T^{1}_{S_size} = T^{0}_{S_size} + T^{1}_{C_size} - (R^{1}_{CTA1}\times N^{1}_{C_PNC}) \quad (8)$$

$$\vdots \quad (9)$$

$$T^{i}_{S_size} = T^{0}_{S_size} + R^{1}_{CTA1} + \left(\sum_{n=1}^{i} T^{n}_{C_size}\right) - R^{i+1}_{CTA1}\times N^{i}_{C_PNC},\quad i=1,2,\cdots,L$$

가용 슈퍼 프레임 크기와 레벨 그리고, 슈퍼프레임 마지막에 위치하는 자식 피코넷이 할당 받은 CTA 시간 중 비콘을 제외한 나머지 시간을 T_{L_size}라고 하면, 멀티-홉 통신을 위한 레벨 i에서의 경로 탐색 시간$T^{i}_{Discovery}$는 다음과 같이 구해진다.

$$T_{L_size} = T_{CAP} + T_{CTA}\times N_{L_DEV} \quad (10)$$

$$T^{0}_{Discovery} = T^{0}_{S_size} + T_B \quad (11)$$

$$T^{1}_{Discovery} = (T^{1}_{S_size}\times(1+1)) - T_{L_size} \quad (12)$$

$$\vdots \quad (13)$$

$$T^{i}_{Discovery} = (T^{i}_{S_size}\times(i+1)) - T_{L_size},\quad i=1,2,\cdots,L$$

표 1. IEEE 802.15.3 WPAN 파라미터

Parameter	Value
Channel Bandwidth(B)	55 *Mbps*
디바이스 수(n)	0 ~ 400
경쟁 시간(T_{CAP})	1.0 *ms*
CTA size	2,048 *byte*
CTA 시간(T_{CTA})	0.3 *ms*
비콘 시간 (T_B)	0.6 *ms*
최대 슈퍼프레임 크기(S)	65.5 *ms*

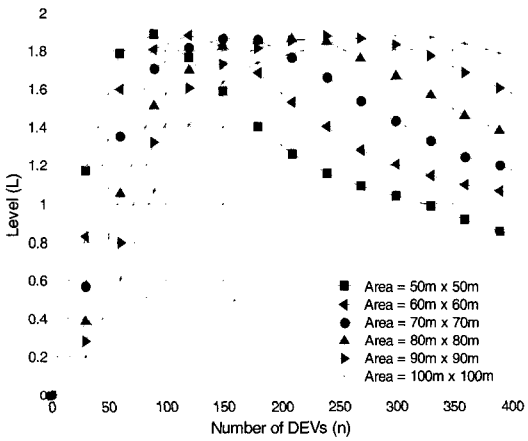


그림 6. 디바이스 수의 변화에 따른 레벨

Ⅳ. 성능 분석

본 절에서는 랜덤 네트워크의 레벨과 가용 슈퍼프레임 크기 및 디바이스 탐색시간의 성능에 대해 3.2절의 수식을 이용해 비교 분석한다. 시뮬레이션은 하나의 피코넷에 합류하는 디바이스 수와 각 레벨에 형성되는 자식 피코넷 수는 일정한 면적에 랜덤하게 형성한다. 랜덤 메쉬 네트워크를 형성하는 과정은 [10]의 과정을 기반으로 한다. IEEE 802.15.3 High-rate WPAN은 최대 55 *Mbps*의 속도를 지원한다. 그리고 비콘시간과 경쟁시간은 각각 0.6 *ms*와 1.0 *ms*이고, 디바이스 하나가 통신할 때 할당 받을 수 있는 최대 CTA는 0.3 *ms*이다. 최대 슈퍼프레임 크기는 65.5 *ms*이며, 시뮬레이션에 사용된 파라미터들은 표 1과 같다.

그림 6, 7, 8은 면적이 50 m×50 m, 60 m×60 m, 70 m×70 m, 80 m×80 m, 90 m×90 m, 100 m ×100 m일 때, 디바이스 수가 일정하게 증가함에 따라 형성되는 메쉬 네트워크의 레벨과 가용 슈퍼프레임 크기 및 디바이스 탐색시간을 나타내고 있다. 가장 높은 레벨의 메쉬 네트워크를 형성하는 디바이스 수는 면적의 변화에 따라 다르다. 그림 6에서 면적이 50 m×50 m일 경우, 디바이스 수가 90개이고, 70 m×70 m일 때의 디바이스 수는 180개, 90 m×90 m일 때는 디바이스 수가 240개일 때 가장 높은 레벨의 메쉬 네트워크를 형성한다. 형성되는 메쉬 네트워크의 레벨은 디바이스 수가 증가함에 따라 최대 1.9까지 증가하지만 일정한 레벨 이상 증가하지 않는다. 이와 같이 디바이스 수가 증가하지만 메쉬 네트워크 레벨이 계속 증가하지 않는 이유는 최대 슈퍼프레임 크기가 65.5 *ms*이기 때문이다. 하나의 피코넷에 합류한 디바이스 수가 많으면, 할당 받은 CTA가 많기 때문에 다음 레벨 형성을 위해 할당할 수 있는 사설 CTA가 부족하여 형성할 수 있는 메쉬 네트워크 레벨은 줄어들게 된다.

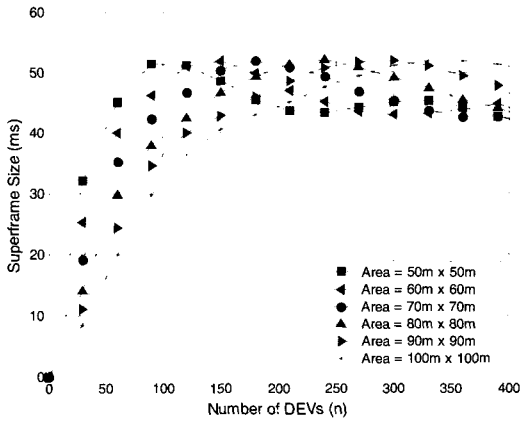


그림 7. 디바이스 수의 변화에 따른 가용 슈퍼프레임 크기

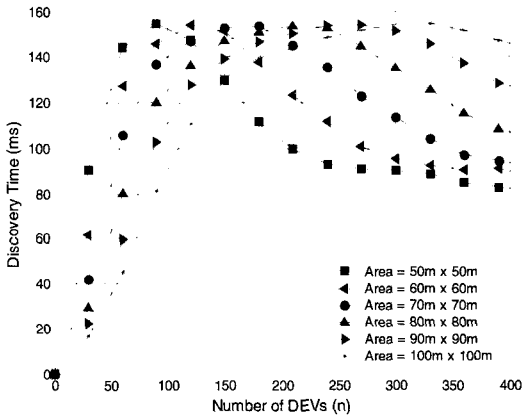


그림 8. 디바이스 수의 변화에 따른 디바이스 탐색시간

디바이스 수에 대한 가용 슈퍼프레임 크기는 그림 7에 나타나 있다. 하나의 슈퍼 프레임 크기가

최대 65.5 ms이지만, 메쉬 네트워크를 형성한 뒤 이용되는 가용 슈퍼프레임 크기는 각각의 면적에 대해 최대 약 52 ms이다. 왜냐하면 다음 레벨 형성을 위해 여분의 CTA 즉, R^{i}_{CTA1}은 다음 레벨을 형성할 충분한 사설 CTA가 없거나, 더 이상 형성할 디바이스가 존재하지 않는 경우 사용하지 않는 CTA이기 때문이다. 그림 7에서 면적이 50 m×50 m일 경우, 최대 가용 슈퍼프레임 크기를 가지는 디바이스의 수는 90개이며, 그 이상의 디바이스 수를 가질 경우에는 가용 슈퍼프레임의 크기는 감소한다. 그러나 디바이스 수가 250~350개 사이에서 약간 증가하는 특성을 보인다. 그 이유는 그림 6에서 면적이 50 m×50 m일 경우, 디바이스 수가 250~350사이에서 메쉬 네트워크 레벨의 감소 비율이 낮고, 디바이스 분포 밀도가 높아져서 메쉬 네트워크 형성으로 피코넷에 합류할 수 있는 디바이스 수가 증가하기 때문이다. 하지만 디바이스 수가 350개 이상이 되면 디바이스 분포 밀도는 증가하지만 메쉬 네트워크 레벨의 감소 비율이 증가하기 때문에 가용 슈퍼프레임 크기는 다시 감소하는 특성을 보인다.

그림 8은 디바이스 수에 대한 디바이스 탐색시간을 나타낸다. 메쉬 네트워크를 형성하여 멀티-홉 통신을 위해 형성된 피코넷들의 정보를 알기 위한 디바이스 탐색시간은 최대 약 155 ms라는 것을 알 수 있다. 디바이스 수가 증가하면, 형성되는 메쉬 네트워크 레벨도 증가한다. 하지만 특정 디바이스 수 이상이 되면 더 이상 레벨은 증가하지 않고 감소한다. 가용 슈퍼프레임 크기는 크게 감소하지 않지만 레벨이 줄어들기 때문에 디바이스 탐색시간은 레벨에 비례하여 감소한다는 사실을 확인할 수 있다. 그리고 그림 8에서 면적이 50 m×50 m일 경우, 디바이스 수가 250~350개 사이일 때 감소되고 있던 디바이스 탐색시간이 일정하게 유지된다. 그 이유는 형성되는 메쉬 네트워크 레벨과 디바이스 수에 영향을 받기 때문이다. 즉, 형성되는 레벨은 감소하여도 특정한 면적에 생성되는 디바이스 수의 밀도가 높아지는 경우, 하나의 피코넷에 합류하는 디바이스 수가 증가하기 때문이다. 따라서 레벨이 감소하더라도 피코넷에 합류하는 디바이스 수가 증가하기 때문에 일정한 면적에서 특정 디바이스 수를 초과하면, 메쉬 네트워크 디바이스 탐색시간은 일정하게 유지되는 특성을 보인다. 그림 7의 가용 슈퍼프레임 크기 역시 이와 같은 특성 때문에 메쉬 네트워크를 형성하고 난 뒤 일정한 가용 슈퍼프레임 크기를 유지하게 된다.

V. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.15.3 High-rate WPAN의 메쉬 네트워크 형성으로 디바이스 수의 변화에 따른 레벨, 가용 슈퍼프레임 크기 및 디바이스 탐색시간을 분석한 값과 시뮬레이션을 통해 얻어진 값을 이용하여 비교 분석하였다. 부모 피코넷과 자식 피코넷들로 형성되는 메쉬 네트워크의 평균 최대 레벨은 약 1.9이며, 가용 슈퍼프레임 최대 크기는 약 52 ms, 최대 디바이스 탐색시간은 약 155 ms이다. 일정한 면적에서 특정 디바이스 수 이상이 되면 레벨과 가용 슈퍼프레임 크기 및 디바이스 탐색시간은 감소한다는 사실도 확인할 수 있다.

본 논문에서 분석한 결과를 토대로 메쉬 네트워크를 형성할 경우, 디바이스 수에 따른 최대 레벨과 가용 슈퍼프레임 크기 및 멀티-홉 전송을 위한 디바이스 탐색에 걸리는 시간 등을 확인하여 IEEE 802.15.3 High-rate' WAPN 메쉬 네트워크 형성에 활용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] IEEE, "Standards for Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs)," Jun. 2002.

[2] IEEE, "Standard for Part 15.3: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for High Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)," Sep. 2003.

[3] IEEE, "Standard for Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," Oct. 2003.

[4] J. Karaoguz, "High-rate Wireless Personal Area Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 12, pp. 96-102, Dec. 2001.

[5] F. Zhong, "Multi-hop Mesh Networking for

UWB-band 802.15.3 Coverage Extension," *in Proc. of IEEE AINA*, vol. 1, pp. 920-925, Apr. 2006.

[6] X. Chen, J. Lu and Z. Zhou, "An Enhanced High-rate WPAN MAC for Mesh Networks with Dynamic Bandwidth Management," *in Proc. of IEEE GLOBECOM*, vol. 6, pp. 3408-3412, Dec. 2005.

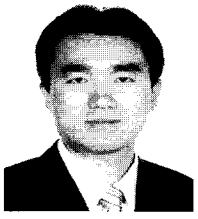
[7] 김영안, 박철현, 홍충선, "무선 메쉬 네트워크 환경에서 효율적인 다중 홉 전달 기법," *한국통신학회논문지*, vol. 31, no. 10B, pp. 872-882, Oct. 2006.

[8] Z. Yin and V. C. M. Leung, "Third-Party Handshake Protocol for Efficient Peer Discovery in IEEE 802.15.3 WPANs," *in Proc. of IEEE* Broadband Networks, vol. 2, pp. 902-911, Oct. 2005.

[9] 이병주, 이승형, 최웅철, 정광수, 이장연, 조진웅, "IEEE 802.15.3 Wireless PAN의 MAC에서 다중채널의 적용," *한국통신학회논문지*, vol. 30, no. 8A, pp. 656-663, Aug. 2005.

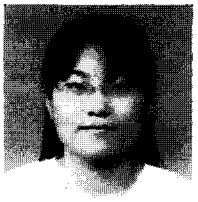
[10] S.-B. Jung, S.-B. Yim, T.-J. Lee, S.-D. June, H.-S. Lee, T.-G. Kwon, and J.-W. Cho, "Multi-piconet Formation to Increase Channel Utilization in IEEE 802.15.3 High-rate WPAN," *Springer -Verlag Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3992, pp. 1041-1049, May. 2006.

정 쌍 봉 (Ssang-Bong Jung) 준회원



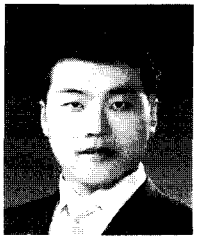
2005년 2월 대구대학교 정보 통신공학부 졸업(학사)
2007년 2월 성균관대학교 전자전기공학과 (석사)
<관심분야> WPAN, WLAN, 메쉬 네트워크, ad-hoc 네트워크

임 순 빈 (Soon-Bin Yim) 준회원



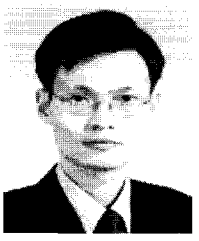
1998년 2월 한서대학교 전자 공학과(학사)
2004년 2월 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과(석사)
2006년 10월~현재 성균관대학교 전자전기공학과 재학 중(박사)
<관심분야> 메쉬 네트워크, 무선 LAN/PAN, ad-hoc 네트워크, 광 네트워크

김 현 기 (Hyun-Ki Kim) 준회원



2003년 2월 단국대학교 전자 공학과(학사)
2006년 3월~현재 성균관대학교 정보통신공학부 재학 중(석사)
<관심분야> 메쉬 네트워크, 무선 LAN/PAN, ad-hoc 네트워크

이 태 진 (Tae-Jin Lee) 종신회원



1989년 2월 연세대학교 전자 공학과 졸업 (학사)
1991년 2월 연세대학교 전자 공학과 졸업 (석사)
1995년 12월 University of Michigan, Ann Arbor, EECS (M.S.E.)
1999년 5월 University of Texas, Austin, ECE (Ph.D.)
1999년 5월~2001년 2월 삼성전자 중앙연구소 책임연구원
2001년 3월~현재 성균관대학교 정보통신공학부 부교수
<관심분야> 통신 네트워크 성능 분석 및 설계, 무선 LAN/PAN/MAN, ad-hoc/센서 네트워크, 무선 통신 시스템, 광 네트워크