

IEEE 802.15.7 스타 토폴로지 VPAN 시스템을 고려한 비콘 모드 기반 MAC 프로토콜 성능 평가

황준호*, 유명식^o

A Simulation Study of MAC Protocol Based on Beacon Mode for Considering IEEE 802.15.7 Star Topology Visible Personal Area Network System

Junho Hwang*, Myungsik Yoo^o

요 약

2011년 9월 IEEE 802.15.7 워킹그룹(Working group)을 통해 LED와 PD를 이용하는 가시광 무선 통신 기술에 대한 물리 계층과 MAC 계층에 대한 표준 규격이 완성됨에 따라 가시광 무선 통신 기술을 이용한 다양한 응용 서비스 기술 개발의 토대가 마련되었다. 이에 따라 가시광 무선 통신 기술은 상용화를 위한 응용 연구 단계로 진입하였으나 대부분의 가시광 무선 통신 환경 개발 현황이 PtP(Peer to peer) 환경을 고려하고 있다. 따라서 보다 다양한 응용 서비스의 개발을 위해서는 PtMP(Point to multi-point) 환경에 대한 연구가 요구된다. 이에 따라 본 논문에서는 IEEE 802.15.7 표준에서 정의한 물리계층과 MAC 계층의 특성을 반영한 스타 토폴로지 기반의 VPAN(Visible personal area network) 시스템 시뮬레이터를 구현하였고, 이를 기반으로 MAC 프로토콜에 영향을 끼치는 주요 파라미터들에 대한 네트워크 성능을 분석하였다.

Key Words : IEEE 802.15.7, visible light communication, LED, MAC protocol, Beacon

ABSTRACT

According to the complete standard document for PHY/MAC layer of visible light communication through the IEEE 802.15.7 WG on Sept. 2011, visible light communication lays a good foundation for developing a variety of application services. Thus, visible light communication moves to the advanced research period for developing application services, but most of applications are limited only to PtP service model. However, PtMP communication environment for VLC is required to accommodate more various applications. In this paper, we analyze an effect of key parameters on network performance in the star topology based visible personal area network system. We implement a simulator with considering attributes of PHY and MAC layer which are defined by IEEE 802.15.7 standard documents, and analyze the VLC performance.

I. 서 론

가시광 무선 통신 기술(VLC : Visible Light Communication)은 차세대 광원으로 인식되고 있는

LED(Light Emitting Diode)를 이용해 조명 빛에 데이터를 실어 전송하는 새로운 무선 통신 기술이다. 이러한 가시광 무선 통신은 디지털 반도체 특성을 갖는 LED에 의해 발생된 빛의 켜짐(ON)과 꺼짐

※ "본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정지원사업의 연구결과로 수행되었음"
(NIPA-2013-H0401-13-1004)

- ◆ 주저자 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 통신망 설계 및 분석 연구실, jhwang@ssu.ac.kr, 정희원
- 교신저자 : 숭실대학교 정보통신전자공학부, myoo@ssu.ac.kr, 종진희원

논문번호 : KICS2013-03-138, 접수일자 : 2013년 3월 26일, 최종논문접수일자 : 2013년 4월 17일

(OFF)을 반복함으로써 1과 0을 표현하는데, 이러한 반복이 초당 200번 이상이 될 경우 사람의 눈에는 빛이 켜져있는 것으로 인식되어 조명의 역할은 물론 무선 통신 기능을 동시에 만족시킬 수 있다¹⁻³⁾.

이러한 가시광 무선 통신 기술은 LED 조명이 사용되는 어느 곳에서나 사용이 가능하기 때문에 실외는 물론 실내 환경에서도 다양한 응용 서비스 제공이 가능하다^{4,5)}. 이를 위한 가시광 무선 통신 기술의 국제 표준 규격인 IEEE standard 802.15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light (이하 ; IEEE 802.15.7 표준)에서는 다양한 서비스 제공을 위한 물리 계층(Physical Layer)과 MAC 계층(Medium Access Network Layer)에 대한 기술 표준을 정의하였다⁶⁾. 이에 따르면 가시광 무선 통신 시스템은 블루투스 와 유사하게 단말(Mobile Node; MN) 간 양방향 통신을 목적으로 하는 PtP (Peer to Peer) 토폴로지 (Topology), 단방향 방송을 목적으로 하는 브로드캐스트(Broadcast) 토폴로지 그리고 코디네이터 (Coordinator)와 단말 간 양방향 통신이 가능한 스타(Star) 토폴로지 등의 세 가지 통신 토폴로지를 제시하였다.

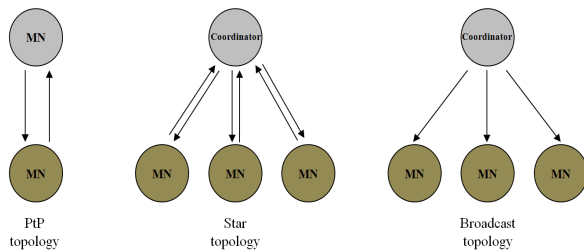


그림 1. VLC 시스템의 MAC 토폴로지 형태
Fig. 1. MAC Topologies of VLC system

이를 위해 IEEE 802.15.7 표준에서는 다음과 같이 MAC 부계층 (Sublayer) 내 다양한 기술을 이용하여 세 가지 형태의 토폴로지를 지원한다.

- 코디네이터 기반의 비콘 (Beacon) 신호 생성
- 비콘 신호를 이용한 동기화 (Synchronizing)
- 접속 허용 (Association) 및 해제 (Disassociation)
- 색깔 기능 (Color function), 가시성 (Visibility), 디밍 (Dimming)
- 깜빡임 완화 기법 (Flicker-mitigation scheme)
- 채널 품질 (Channel quality) 및 단말의 상태 (Status)에 대한 가시성 지원

- 단말기 보안 (Security)
- MAC 엔티티 (Entities) 간의 신뢰적 링크 제공
- 이동성 (Mobility)

이중 MAC 부계층의 가장 핵심 기능은 VPAN 시스템의 단말 접속 및 해제를 포함한 MAC 프로토콜을 운용하는 것이다. 하지만 세 개의 토폴로지 형태 중 MAC 프레임의 구조나 MAC 부계층의 파라미터의 영향을 받는 것이 스타 토폴로지이다. 즉, 세 가지 토폴로지 모두 슈퍼프레임(Superframe)을 사용하긴 하나, PtP 토폴로지의 경우 1:1 통신을 목적으로 하기 때문에 데이터 전송 이외에 단말 간 충돌이나 비콘 동기화 등의 부가적인 기능이 요구되지 않는다. 또한 브로드캐스트 토폴로지의 경우 코디네이터가 단방향으로 비콘 신호와 데이터만을 전송하기 때문에 단말간의 자원 할당 및 MAC 프레임의 슬롯 운영에 대한 제어가 요구되지 않는다. 이에 따라 기존 가시광 무선 통신 시스템의 구현 모델은 대부분 PtP 환경을 고려하였다¹⁷⁻⁸⁾.

하지만 스타 토폴로지의 경우 하나의 코디네이터와 다수의 단말간의 슈퍼프레임을 공유하여야 하고, 단말간 충돌이 발생하기 때문에 PHY/MAC 부계층에서 관리하는 파라미터에 따라 네트워크 성능에 영향을 받게 된다. 이에 기존 연구에서는 스타 토폴로지 환경을 고려하여 다양한 MAC 프레임 운용 방법을 연구하였다.

먼저, IEEE 802.15.7 표준에서는 MAC 프레임의 운용을 크게 Non-beacon 기반 MAC 프로토콜과 Beacon 기반의 MAC 프로토콜을 정의하고 있다. 하지만 Non-beacon 기반의 MAC 프로토콜의 경우 코디네이터에 의해 설정된 별도의 MAC 프레임을 사용하는 반면, Beacon 기반의 MAC 프로토콜의 경우 슈퍼프레임을 이용한 MAC 프로토콜을 사용하도록 권장하고 있다. 하지만 표준에서 정의한 슈퍼프레임을 사용할 경우 CSMA/CA 기반의 CAP (Contention Access Period)와 비경쟁 기반의 CFP(Contention Free Period) 슬롯을 사용하기 때문에 단말의 수와 트래픽 부하 정도 그리고 충돌에 따른 백오프 값의 설정이 통신 성능에 민감한 영향을 끼친다.

이에 본 논문에서는 IEEE 802.15.7 표준 규격을 토대로 스타 토폴로지 환경에서 Beacon 기반의 MAC 프로토콜을 사용함에 있어서 MAC 부계층의 주요 파라미터와 사용자 수가 통신 성능에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 기존 연구와 관련된 분석으로 Non-beacon 기반의 MAC 프로토콜 연구 분석과 IEEE 802.15.7 표준에서 제시한 Beacon 기반의 MAC 프로토콜을 상세 분석하였다. 이어 3장에서는 본 논문에서 고려한 MAC 프로토콜 성능 평가를 위한 시뮬레이션 구조에 대해 상세히 설명하고, 4장에서는 시뮬레이션을 통해 도출된 결과를 분석한다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

2.1. Non-beacon 기반 MAC 프로토콜

IEEE 802.15.7 표준에서는 다양한 서비스 제공을 위한 Non-beacon 기반의 MAC 프로토콜을 제시하였다. 다만, 표준 문서 자체에서는 Non-beacon 기반 MAC 프로토콜에 대한 표준 규격은 명시하지 않았지만 다음과 같은 기존 연구를 통해 MAC 프로토콜 설계의 연구 동향을 분석할 수 있다. 먼저 [9]에서는 빔포밍(Beamforming) 기술을 적용한 MAC 프로토콜을 제안하였으며, 이를 위해 LED AP에 공간 광 변조기를 설치하고, 데이터 전송 방향에 대한 코드를 부여함으로써 비경쟁 기반의 MAC 프로토콜을 제시하였다. [10]의 경우 단말기와 AP간의 초기 접속을 위한 경쟁 기반의 C_Slot을 이용해 TDD(Time Division Duplex)와 FDD(Frequency Division Duplex) 환경을 고려한 두 가지 형태의 MAC 프로토콜을 제시하였다. 이와 더불어 [11]에서는 앞선 [10]의 MAC 프로토콜을 개선하여 통신 지연 감소를 위한 시간 차(Time Difference) 기반의 MAC 프로토콜을 제시하였다. [12]에서는 IEEE 802.15.7 VLC 표준에 가장 근접한 환경에서 우선순위 접속을 부여하기 위한 파라미터를 분석하였으나, Non-beacon 환경을 가정하였으며, [13]에서는 IEEE 802.15.7 VPAN 슈퍼 프레임의 CFP 구간의 효율적인 할당을 위한 자원 할당 기법을 제안하였다.

이와 같은 Non-beacon 기반의 MAC 프로토콜들은 주로 가시광 무선 통신 환경에서 반송파 감지(Carrier Sensing)가 어렵다는 점을 해결하기 위해 다양한 방법으로 MAC 프로토콜을 설계하였다. 하지만 Non-beacon 기반의 MAC 프로토콜은 연구 분야로서의 가치는 가질 수 있으나 통일된 응용 서비스를 제시하기 위해서는 표준화된 MAC 프로토콜의 이해하고, 이를 적용하는 것이 중요하다.

2.2. Beacon 기반 MAC 프로토콜

앞서 살펴본 바와 같이 IEEE 802.15.7 표준에서는 Beacon 기반의 MAC 프로토콜을 사용하여 다양한 모드의 서비스를 제공하고자 한다. 이에 표준화에서 제시한 Beacon 기반의 MAC 프로토콜의 메시지 구조와 전송 모드 형태에 따른 전송 메시지 등을 보다 자세히 살펴보면 다음과 같다.

2.2.1. MAC 프로토콜 메시지 구조

Beacon 기반의 MAC 프로토콜은 그림 2와 같이 다수의 슬롯으로 구성된 슈퍼프레임을 이용하며, 각 슬롯은 데이터 전송 및 제어 신호 송수신을 위한 최소의 시간을 구성된다. 이때 단말의 데이터 링크 허용 및 해제 등을 관리하는 코디네이터는 채널 전송 시간을 이용해 TDD 기반의 슈퍼프레임을 사용한다. 이를 보다 자세히 살펴보면, 슈퍼프레임은 총 16개의 슬롯으로 구성되며, 각 슬롯은 비콘 구간, CAP 구간 그리고 CFP 구간으로 운용된다. 먼저 비콘 구간의 경우 슬롯 0번에 위치하며, 경쟁 없이 고정적으로 할당된다. 또한 CAP 구간은 비콘 프레임이 전송된 후 곧바로 발생하며, CFP의 경우 코디네이터의 설정에 따라 적응적으로 설정하는데, 만약 사용한다면, CAP 구간 이후에 설정한다.

또한 그림에서 보는 바와 같이 세 개의 토폴로지 형태에 따른 MAC 프레임의 구조를 도시하였는데, P2P 토폴로지의 경우 전체 슬롯을 데이터 슬롯으로 사용하며, 브로드캐스트 토폴로지의 경우 첫 슬롯을 비콘 프레임으로 사용하고, 다른 프레임을 모두 하향 링크 프레임으로 사용한다. 반면, 스타 토폴로지의 경우 비콘 프레임, 경쟁 프레임, 상향/하향 링크 데이터 전송 슬롯으로 사용한다. 마지막으로 가시성

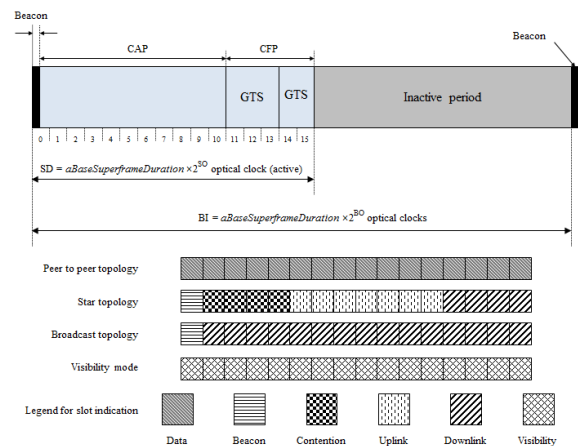


그림 2. 슈퍼 프레임 구조 및 전송 모드별 슬롯 할당 예
Fig. 2. Example of the Superframe Structure and Slot Allocation Method with Transmission Mode

표 1. 슈퍼프레임의 파라미터 속성
Table 1. Parameter Attributes of Superframe

| Variable | Para. | Exp. | Value |
|--------------------------------|---|---|--|
| <i>macBeaconOder</i> (BO) | BO | transmit interval of beacon frames of coordinator | $0 \leq BO \leq 14$ |
| | BI | beacon interval | $aBaseSuperframeDuration \times 2^{BO}$ optical clocks |
| | if BO = 15, the coordinator shall not transmit beacon frames (Nonbeacon based VPAN) | | |
| <i>macSuperframeOrder</i> (SO) | SO | value of <i>macSuperframeOrder</i> | $0 \leq SO \leq BO \leq 14$ |
| | SD | superframe duration | $aBaseSuperframeDuration \times 2^{SO}$ optical clocks |
| | if SO = 15, the coordinator shall not transmit beacon frames (Nonbeacon based VPAN) | | |

모드는 단말기의 전력 감소를 위한 비활성(Inactive) 구간의 조명 역할을 위해 사용된다.

이러한 슈퍼 프레임 구조를 운용하기 위해서 표 1과 같이 MAC 파라미터를 정의하였다. 표에서 보는 바와 같이 Beacon 기반의 MAC 프로토콜 운용을 위한 슈퍼프레임은 두 개의 변수를 기반으로 운용된다. 먼저, *macBeaconOder*(BO)의 경우 BO와 비콘 간격을 나타내는 BI로 구성되며, *macSuperframeOrder*(SO)의 경우 SO와 슈퍼 프레임의 길이를 나타내는 SD로 구성된다. 이들 각 파라미터에 대한 상세 설명은 표 1과 같다. 이때 광 클럭(Optical Clocks)은 IEEE 802.15.7 표준에서 사용하는 물리 계층의 형태에 따라 최소 200kHz(PHY I -OOK 변조)에서 최대 120MHz (PHY II -OOK 변조)로 운용될 수 있다.

2.2.2. 스타 토폴로지를 위한 슈퍼프레임 운용 방법

앞서 살펴본 바와 같이 가시광 무선 통신 시스템은 통신 모드에 따라 각기 다른 구조의 슈퍼 프레임을 사용하는데, 스타 토폴로지 환경은 PtP와 방송 토폴로지와 달리 비콘 뿐만 아니라 경쟁, 상향 하향 링크 슬롯이 복합적으로 사용된다. 따라서 스타 토폴로지 환경에의 슈퍼프레임은 경쟁 기반의 CAP의

구간과 비경쟁 기반의 CFP 구간을 모두 사용한다.

먼저 CAP 구간의 경우 각 슬롯의 길이는 *aMinCAPLength* optical clocks로 표현되며, 슬롯 무작위 접속(Slotted random access) 기법에 따라 경쟁 기반으로 다수의 단말이 하나의 슬롯을 점유하기 위해 경쟁한다. 반면 CFP 구간은 모든 슬롯이 코디네이터에 의해 결정되며, 단말의 요청에 따라 CFP 구간 안에서는 복수의 슬롯을 하나의 단말에게 할당하여 연속적인 데이터 전송을 지원한다. 이때 보다 효과적인 CFP 구간 사용을 위해 자원 할당 기법(Resource Allocation Algorithm)을 사용할 수 있다.

2.2.3. VPAN을 위한 무작위 접속 방법

보다 효과적인 프레임 운용을 위해 슈퍼프레임 내 CAP 구간은 슬롯마다의 무작위 접속 방법에 의해 데이터를 전송하는데, 각 단말은 무작위 접속 시도를 위한 다음과 같은 두 개의 파라미터를 사용한다.

- NB (Number of Backoffs) : 무작위 접속 알고리즘이 현재의 전송을 시도하기까지 소요된 백오프 횟수. 이때 NB는 새로운 접속 시도에 전에 0으로 초기화됨
- BE (Backoff Exponent) : 단말이 해당 채널에 접속을 시도하기 까지 대기한 백오프 시간. 이때 백오프 시간은 하나의 슬롯 간격 단위로 운용하며, *macMinBE*로 초기화됨

그림 3은 이러한 VPAN 시스템에서의 무작위 접속 방법의 흐름도(Flowchart)를 도시하고 있는데, 이를 보다 자세히 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 단말이 전송하고자 하는 데이터가 발생하면 NB와 BE를 각 파라미터의 초기값인 0과 *macMinBE*로 설정한다. 이후 슈퍼 프레임이 슬롯 기반으로 운용되는 경우 다음 백오프 구간의 경계를 찾고 해당 구간을 시작으로 무작위 백오프 시간을 결정한다. 이후 백오프 시간이 종료되면, 반송파 감지 기법을 사용하는 경우 CCA(Clear Channel Assessment)를 수행하고, 그렇지 않은 경우 데이터를 전송한다. 만약 CCA를 사용하는 경우 사용하는 채널의 사용 여부에 따라 사용되지 않을 경우 데이터를 전송하는데, 이때 전송된 데이터의 ACK(Acknowledgement)가 필요할 경우 ACK가 *maxAckWaitDuration* 이내에 수신될 경우 데이터 전송을 성공으로 판단한다. 하지만 채널이 사용되고 있거나 ACK가

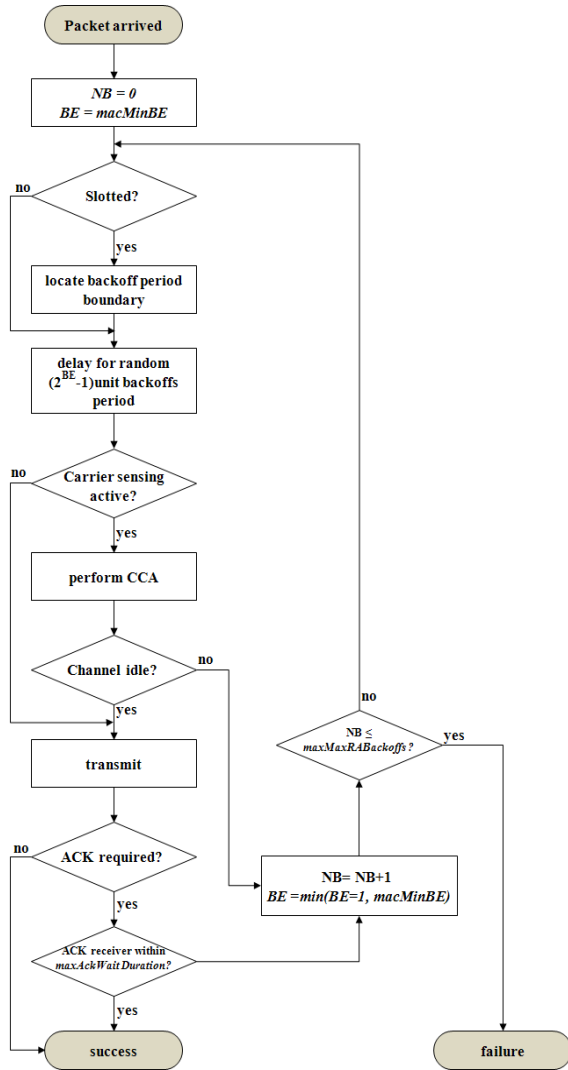


그림 3. VPAN 시스템의 무작위 접속 방법 흐름도
Fig. 3. Flowchart of Random Access for VPAN System

maxAckWaitDuration 시간 내로 수신되지 않을 경우 NB와 BE의 값을 증가시킨다. 이때 NB와 BE는 횟수에 따라 1씩 증가시키며, BE의 경우 *macMaxBE*를 초과하지는 못한다. 이후 NB의 값이 최대 백오프 횟수인 *macMaxRABackoffs* 이상이면 실패로 인식하고, 미만인 경우 다시 백오프 과정을 거쳐 데이터 전송을 시도한다.

III. IEEE 802.15.7 MAC 시뮬레이터 모델

본 논문은 스타 토폴로지 기반의 VPAN 시스템에서 Beacon 기반의 MAC 프로토콜 운용에 있어서 MAC 부계층의 파라미터 설정에 따른 네트워크 성능 평가를 목적으로 한다. 이를 위해 2장에서 슈퍼프레임을 이용한 MAC 프로토콜의 상세 운용 방법

표 2. 계층별 모의실험 변수
Table 2. Simulation Parameter of Each Layer

| Layer spec. | Parameter | Value |
|---------------|---------------------------------|---|
| PHY | Physical Mode | PHY II |
| | CCA | Mode 3 |
| | Modulation | OOK |
| | Optical Clock Rate | 15MHz |
| | Data Rate | 9.6Mbps |
| MAC | Time of single optical clock | 0.06usec |
| | BO | 0 ~ 14 |
| | SO | 0 ~ 14 |
| | <i>aBaseSlotDuration</i> | 60 |
| | <i>aNumSuperframe Slots</i> | 16 |
| | <i>aBaseSuperframe Duration</i> | <i>aBaseSlotDuration</i> * <i>aNumSuperframeSlots</i> |
| | <i>aMinCAPLength</i> | 450 (7.5 slots) |
| | <i>CFLength</i> | 480 (8 slots) |
| | <i>aUnitBackoffPeriod</i> | 20 optical clocks |
| | <i>maxMaxBE</i> | 3 ~ 15 |
| | <i>macMinBE</i> | 0 ~ <i>maxMaxBE</i> |
| | <i>macMaxCSMA Backoffs</i> | 0 ~ 5 |
| | Superframe length | 57.6usec ~ 0.94sec |
| Beacon length | 30 (0.5 slot) | |
| Communication | Communication Scenario | Only Transmission Success |
| | Traffic Load | 10% ~ 200% |
| | Packet Size | 64bytes ~ 1,514bytes |
| | Packet Distribution | Exponential |
| | Number of Nodes | 4 ~ 15 |
| | Connection Maintain Time | 6sec |
| | Simulation Time | 60sec |

및 프레임 구조 등에 대해 면밀히 분석하였다. 이를 기반으로 본 논문에서는 다음과 같이 표준 규격을 토대로 주요 기능을 포괄적으로 구현한 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 이를 보다 상세히 살펴보면 다음과 같다.

3.1. 시뮬레이터 구현 환경

Beacon 기반의 MAC 프로토콜 분석을 위해 VPAN 시스템의 물리 계층(PHY)과 MAC 계층 그리고 통신 환경을 표 2와 같이 설정하였다. 먼저 물리 계층에 대한 파라미터는 표준에 제시된 세 가지 통신 모드 중 PHY II 모드를 사용하며, CAP 구간에 사용여부를 판단하기 위한 CCA 모드 3을 이용하였다. 이때 CCA 모드 3 기법은 채널 내 에너지가 검출되면 채널이 사용되는 것으로 간주한다.

이와 더불어 변조 기법은 OOK(On-Off Keying) 기법을 고려하여 하나의 광 클럭 당 1 비트(Bit)의 데이터를 전송할 수 있으며, 이때 PHY II의 클럭 속도를 15MHz로 고려할 때 한 클럭 시간은 0.06μsec으로 정의된다. 또한 VPAN 시스템의 시스템 전송 속도는 PHY II에서 OOK 변조 기법을 통해 지원 가능한 9.6Mbps를 가정하였다.

이와 더불어 MAC 부계층의 변수는 슈퍼프레임의 구조 및 길이를 정의하기 위해 사용되는데 먼저, BO와 SO의 경우 활성화 구간(Active Period)과 비활성화 구간(Inactive Period)의 길이를 정의할 수 있다. 이때, SO와 BO가 동일한 값을 가질 경우 비활성화 구간의 길이는 0으로 설정되고, SD와 BI가 동일하게 된다. 이와 더불어 슬롯의 개수(aNum SuperframeSlots)와 슬롯당 길이(aBaseSlotDuration) 정의에 따라 한 개의 슈퍼 프레임의 길이(aBase SuperframeDuration)가 결정되고, 최소 CAP 구간(aMinCAPLength)과 CFP (CFPLength) 구간을 사용자 정의에 따라 설정할 수 있다. 또한 단말간 충돌이 발생할 경우 최소 백오프 시간은 20 광 클럭으로 설정하였고, 충돌 횟수에 따라 최대 백오프 허용값(macMaxCSMABackoffs)을 정의하였다. 이러한 MAC 부계층의 변수 설정에 따라 SO와 BO가 0과 14일 경우 슈퍼프레임의 길이는 다음과 같다.

- aBasesuperframeDuration
 $= aBaseSlotDuration \times aNumSuperframeSlots$
 $= 60 \times 16 = 960$
- SD and BI (BO 와 SO를 0으로 설정)
 $= aBasesuperframeDuration \times 2^{SO(orBO)}$ optical clocks
 $= 960 \times 0.06\mu sec \times 2^0 = 57.6\mu sec$
- SD and BI (BO 와 SO를 14로 설정)
 $= 960 \times 0.06\mu sec \times 2^{14} = 0.94sec$

이와 같은 슈퍼프레임 환경에서 최대 9.6Mbps의 전송 속도를 만족시키기 위해서는 각 슬롯에 전송할 수 있는 데이터의 양을 결정하는데, 슈퍼 프레임의 길이에 따라 각 슬롯에 전송할 수 있는 최대 패킷 크기는 표 3과 같다.

이와 같은 프레임 길이에 따른 슬롯 당 전송 가능한 데이터 크기 분석 결과를 토대로 사용자 단말의 패킷이 표준 이더넷(Ethernet) 패킷의 최소 크기인 64bytes(0.512kbits)와 최대 크기인 1,514bytes

표 3. 슈퍼 프레임 길이에 따른 슬롯 당 전송 가능 비트 수
 Table 3. Transmitting Packet Size of Each Slot with Superframe Length

| Parameter Value (SO = BO) | Superframe Length (msec) | transmitting packet size of each slot (kbits) |
|---------------------------|--------------------------|---|
| 0 | 0.0576 | 0.03456 |
| 1 | 0.1152 | 0.06912 |
| 2 | 0.2304 | 0.13824 |
| 3 | 0.4608 | 0.27648 |
| 4 | 0.9216 | 0.55296 |
| 5 | 1.8432 | 1.10592 |
| 6 | 3.6864 | 2.21184 |
| 7 | 7.3728 | 4.42368 |
| 8 | 14.7456 | 8.84736 |
| 9 | 30.0096 | 18.00576 |
| 10 | 58.9824 | 35.38944 |
| 11 | 117.9648 | 70.77888 |
| 12 | 235.9296 | 141.5578 |
| 13 | 471.8592 | 283.1155 |
| 14 | 943.7184 | 566.231 |

(12.1kbits)를 고려하여 SO와 BO가 9와 12사이의 슈퍼프레임 운용 환경에서 통신 성능을 분석하였다. 이때 응용 서비스 계층에서 사용자 단말의 트래픽 발생 분포는 지수 분포를 따르며, 트래픽 부하는 10%에서 150%까지 변화된다. 이때 단말기의 수는 4 ~ 12개를 고려하였으며, 하나의 단말이 발생시키는 데이터의 양은 트래픽 부하 환경에 따라 가변적으로 변화된다. 일 예로 4개의 단말이 존재할 경우 트래픽 부하가 10%이면, 각 단말은 0.24Mbps, 150%이면 3.6Mbps의 데이터를 발생시킨다. 이와 더불어 MAC 프레임에 대한 사용 권한은 코디네이터와 단말기 모두 고려하여야 하나, 본 논문에서는 단말기가 코디네이터로 데이터를 전송하는 상황링크 전송만을 고려하였다.

이러한 통신 환경은 CAP와 CFP가 고정된 환경에서 충돌로 인한 영향을 분석하기 위함이며, 각 단말은 매 슈퍼 프레임마다 CAP 구간에서는 충돌이 발생하지 않을 경우 구간 내 매 슬롯 마다 접속 요청을 할 수 있고, 충돌이 발생하면 백오프 시간 이후에 접속 가능하다. 단, CAP 구간에서 발생한 백오프 시간은 CFP 구간에는 감소되지 않는다. 반면 CFP 구간의 경우 CAP 구간의 슬롯을 성공적으로 접속한 단말에게 할당되는데, 이때 한 번 CFP 슬롯을 할당 받으면 총 모의실험 시간의 1/10동안 (6초) 해당 CFP 구간을 점유한다.

3.2. 성능 평가 지표

이와 같은 IEEE 802.15.7 스타 토폴로지 VPAN 시스템 통신 환경을 기반으로 C++ 기반의 이벤트 운용 기반 시뮬레이터(Event-driven simulator)를 구성하고 다음과 같은 성능 지표를 고려하여 통신 성능을 분석하였다.

- 네트워크 전송률 (Network Throughput) : 단말이 전송하고, LED AP가 수신한 패킷의 총량
- 평균 지연 (Average Delay) : 단말기의 슈퍼프레임 내 CAP 구간에서 경쟁을 통해 슬롯을 할당받기까지 소요되는 시간
- 링크 접속 성공 확률 (Success Probability) : 단말이 CAP 슬롯에 접속 시도를 하여 성공할 확률 (충돌 횟수가 *macMaxRABackoffs* 값을 초과하는 경우 실패로 간주함)

IV. 성능 평가 및 분석

본 논문에서는 앞서 설명한 IEEE 802.15.7 표준 MAC 시뮬레이터에 대한 구현 내용을 토대로 MAC 계층의 주요 성능을 좌우할 수 있는 파라미터 변화와 단말 수 변화에 따른 성능을 분석하였다. 이때 그림 4 ~ 7은 접속을 요청하는 단말기의 수와 SO 및 BO의 영향을 네트워크 전송률과 전송 지연 측면에서 분석한 결과이며, 그림 8과 9의 경우 *macMinBE* 값의 변화에 따른 네트워크 전송률과 접속 성공률을 분석한 결과이다.

먼저, 그림 4는 SO와 BO를 10으로 고정하고, 단말 수의 변화에 따른 네트워크 전송률을 분석한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 단말기의 수가 적을 경우 시스템 전송률 9.6Mbps에 근접한 네트워크 전송률을 제공할 수 있으나 단말기의 수가 증가함에 따라 네트워크 전송률의 급격히 저하되는 것을 볼 수 있다. 특히 트래픽 부하 100%를 기준으로 분석할 경우, 단말기의 수가 4에서 8로 증가한다면, 두 경우의 감소폭이 다른 경우의 감소폭보다 큰 것을 볼 수 있다. 이는 모의실험 상에서 설정한 7.5슬롯의 초과하는 시점에서 충돌로 인해 손실되는 슬롯의 수가 급격히 증가하는 것으로 분석된다. 더욱이 단말기의 수가 12, 15로 증가함에 따라 네트워크 전송률의 감소를 계속 발생하여 단말기의 수가 15에 이를 경우 단말기의 수가 4일 경우에 비해 40%이상 감소된 네트워크 전송률을 나타내고 있다. 그림 5는 앞서 그림 4와 동일한 환경에서 단말기

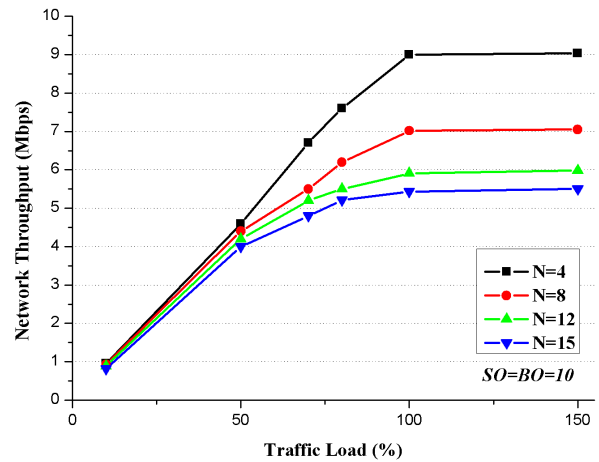


그림 4. 단말 수 변화에 따른 네트워크 전송률
Fig. 4. Network Throughput with Changing Number of Nodes

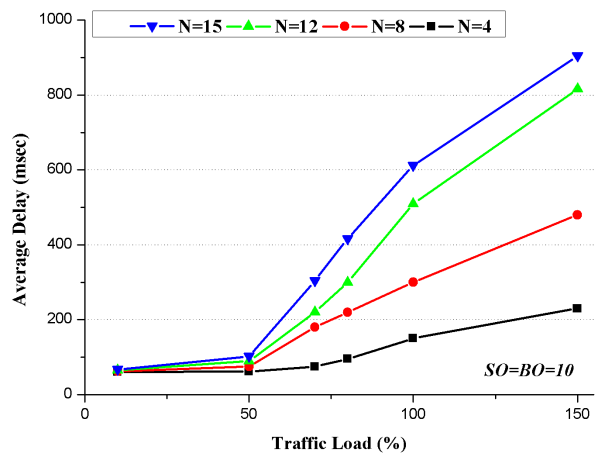


그림 5. 단말 수 변화에 따른 평균 지연
Fig. 5. Average delay with changing number of nodes

수 변화에 따른 전송 지연을 나타내고 있는데, 그림에서 보는 바와 같이 접속 요청 단말기의 수가 증가할수록 평균 전송 지연이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 접속 요청 단말기의 수가 증가할수록 충돌 발생이 빈번해지고, 이에 따라 네트워크 전송률은 물론 전송 지연 성능에도 큰 영향을 끼치게 됨을 확인할 수 있다.

그림 6은 단말기의 수를 8로 고정하고, SO와 BO값을 9 ~ 12까지 변화시켰을 때 네트워크 전송률을 분석한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 SO 및 BO가 증가할수록 전송률이 감소되는 것을 볼 수 있다. 이는 SO 및 BO 값이 커질수록 한 슬롯당 전송할 수 있는 데이터의 양 커지기 때문에 충돌이 발생할 경우 해당 슬롯에 데이터를 전송하지 못하기 때문이다. 따라서 동일한 충돌 횟수를 가지더라도

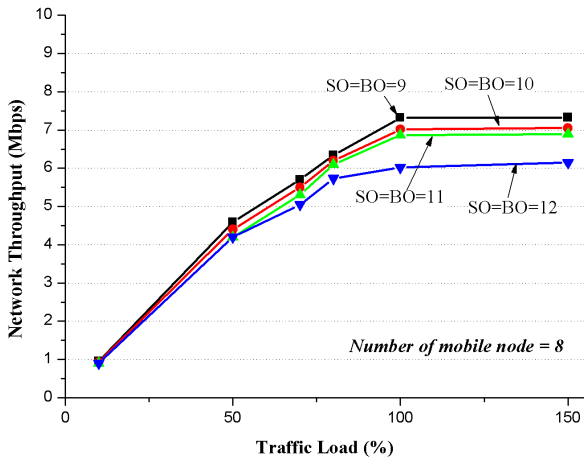


그림 6. SO 및 BO 변화에 따른 네트워크 전송률
Fig. 6. Network Throughput with Changing SO and BO

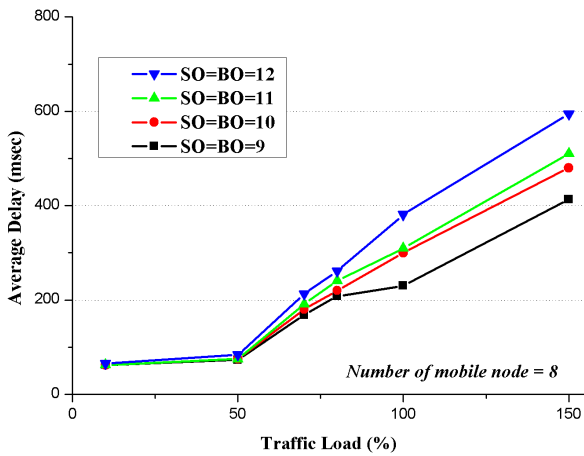


그림 7. SO 및 BO 변화에 따른 평균 패킷 전송 지연
Fig. 7. Average Packet Delay with Changing SO and BO

도 슬롯 당 전송할 수 있는 데이터양 많기 때문에 전송률이 감소되는 것으로 분석된다.

그림 7은 앞서 그림 6과 동일한 환경에서 SO 및 BO값 변화에 따른 평균 전송 지연 결과를 도시하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 SO 및 BO 값의 커질수록 전송 지연의 증가가 발생하지만, 앞서 살펴본 단말기 수의 변화에 따른 평균 패킷 전송 지연의 보다는 영향이 적은 것으로 나타났다.

그림 8과 9는 각각 *macMinBE* 값 변화에 따른 접속 성공률과 네트워크 전송률을 비교 분석한 것이다. 먼저, 그림 8의 경우 *macMinBE* 값이 클수록 접속 성공률이 높은 것을 볼 수 있는데, 이는 *macMinBE* 값이 클수록 충돌이 발생한 단말은 긴 시간 동안 재접속을 요청하지 못하는 반면 다른 단말의 경우 접속 요청에 대한 수용이 원활해지기 때문이다. 하지만 그림 9의 네트워크 전송률을 보면,

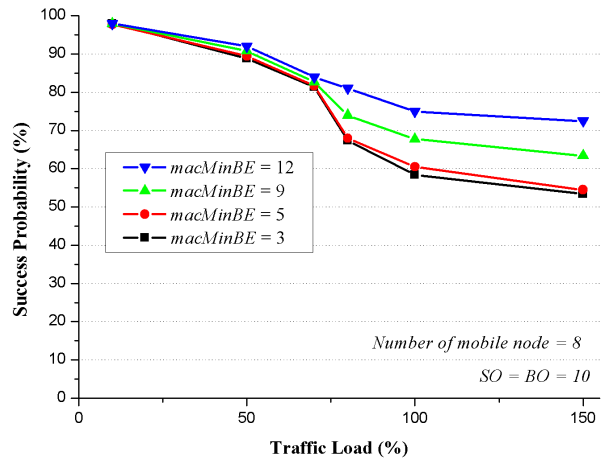


그림 8. *macMinBE* 값 변화에 따른 접속 성공률
Fig. 8. Success Probability with Changing *macMinBE*

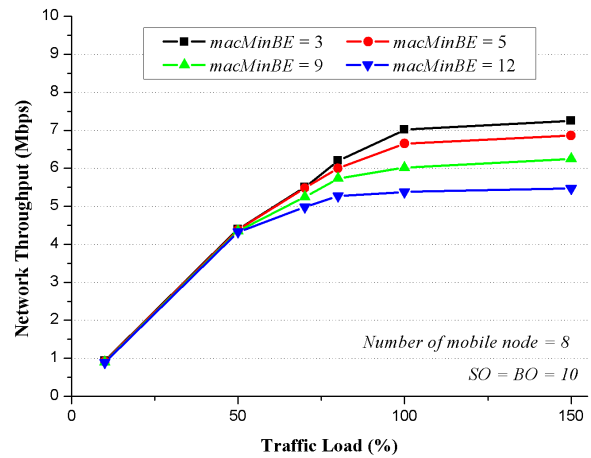


그림 9. *macMinBE* 값 변화에 따른 네트워크 전송률
Fig. 9. Network Throughput with Changing *macMinBE*

macMinBE 값이 클수록 네트워크 전송률이 감소되는데, 대기 시간이 길어진 만큼 데이터 전송의 효율성이 감소되는 것을 볼 수 있다.

V. 결 론

가시광 무선 통신 시스템은 차세대 조명인 LED를 이용하여 조명뿐 아니라 통신 장비로서 매우 다양한 응용 서비스에 적용될 수 있다. 하지만 고려되는 응용 서비스들이 PtP 환경에 국한되어 있어 VLAN 서비스 등과 같은 다중 사용자를 동시에 수용해야 되는 통신 환경에 대한 연구가 요구된다. 이에 본 논문에서는 IEEE 802.15.7에서 제시한 표준 Beacon 기반의 MAC 프로토콜을 사용할 경우 중요 파라미터와 다중 사용자의 수 여부에 따른 네트워크 관점에서의 성능을 분석하였다. 이를 위해 표준

에서 제시하는 물리 계층과 MAC 계층에 대한 상세 파라미터를 고려한 시뮬레이터를 구현하여 네트워크 전송률 및 평균 전송 지연, 그리고 접속 성공률 등의 다양한 성능을 비교 분석하였다. 그 결과 경쟁 노드 수가 CAP 슬롯의 개수를 초과하는 구간에서 급격한 네트워크 전송률 감소와 평균 전송 지연의 증가가 발생함을 확인할 수 있었고, CAP 슬롯 개수의 경쟁 노드 수가 비슷할 경우 슈퍼 프레임의 크기가 커질수록 전송률 감소와 전송 지연이 증가하는 결과를 확인할 수 있었다. 이와 더불어 충돌 발생 후 단말의 재접속 시도 시간과 연관된 *macMinBE* 값의 경우 그 값이 적을수록 충돌로 인해 접속 성공률은 낮았지만, 높은 접속 시도 횟수를 제공할 수 있기 때문에 네트워크 전송률이 증가하는 것을 볼 수 있었다.

본 논문은 스타 토폴로지 기반의 VPAN 응용 서비스 개발 시 고려해야되는 주요 파라미터를 산출하고, 이들 주요 파라미터가 네트워크 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 연구 결과는 향후 스타 토폴로지 기반의 VPAN 시스템을 운용하는 응용 서비스의 단말기 수용 범위와 수용 능력에 따른 슈퍼프레임 운용 결정하는데 있어서 핵심 참고 자료로 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Indoor visible light data transmission system utilizing white LED lights," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E86-B, no. 8, pp. 2440-2454, Aug. 2003.
- [2] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights," *IEEE Trans. Consumer Electron.*, vol. 50, no. 1, pp. 100-107, Feb. 2004.
- [3] T. G. Kang, S. H. Park, I. S. Jang, I. S. Kim, and D. W. Han, "The Convergence technology analysis of green growth LED illumination," *ETRI Electron. Telecommun. Trends*, vol. 24, no. 5, pp. 30-37, Oct. 2009.
- [4] D. H. Kim, S. K. Lim, and T.G. Kang, "Application service model of the visible light communication," *KICS Inform. Commun. Mag.*, vol. 25, no. 5, pp. 3-9, Apr. 2009.
- [5] J. H. Hwang, L. Dixi, and M. S. Yoo, "A development trends on application model based on visible light communication," *KICS Inform. Commun. Mag.*, vol. 30, no. 1, pp. 77-83, Jan. 2013.
- [6] IEEE Standard Association, "IEEE standard for local and metropolitan area networks-Part 15.7: short-range wireless optical communication using visible light," *IEEE Std 802.15.7-2011*, Sep. 2011.
- [7] D.-R. Kim, S.-H. Yang, H.-S. Kim, Y.-H. Son, and S.-K. Han, "Outdoor visible light communication for inter-vehicle communication using controller area network," in *Proc. 4th Int. Conf. Commun. Electron. (ICCE 2012)*, pp. 31-34, Hue, Vietnam, Aug. 2012.
- [8] M. Nakajima and S. Haruyama, "Indoor navigation system for visually impaired people using visible light communication and compensated geomagnetic sensing," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. China (ICCC 2012)*, pp. 524-529, Beijing, China, Aug. 2012.
- [9] S.-M. Kim, "A MAC Protocol for LED visible light communications with beamforming," *J. KICS*, vol. 6, no. 3, pp. 92-99, Jun. 2011.
- [10] H. S. Shin, J. S. Choi, K. W. Lee, S. B. Park, D. K. Jung, Y. M. Lee, and J. W. Park, "Research on MAC protocol for wireless visible light communication," *KICS Inform. Commun. Mag.*, vol. 26, no. 5, pp. 30-35, Apr. 2009.
- [11] J. H. Hwang and M. S. Yoo, "An enhanced MAC protocol based on FDD for reducing the delay in visible LAN systems," *J. IEEEK*, vol. 49, no. 10, pp. 3-10, Oct. 2012.
- [12] V. Van Huynh, L. N.-T. Le, and Y. M. Jang, "Priority MAC based on multi-parameters for IEEE 802.15.7 VLC in non-saturation environments," *J. KICS*, vol. 37, no. 3, pp. 224-232, Mar. 2012.
- [13] T. Nguyen, M. Z. Chowdhury, and Y. M. Jang, "Flexible resource allocation scheme for link switching support in visible light communication networks," in *Proc. 3rd Int. Conf. ICT Convergence (ICTC 2012)*, pp. 145

- 148, Jeju Island, Korea, Oct. 2012.

황 준 호 (Junho Hwang)



2004년 2월 숭실대학교
정보통신전자공학부 학사
2006년 2월 숭실대학교
정보통신전자공학부 석사
2006년 9월~현재 숭실대학교
정보통신전자공학부 박사과정

<관심분야> Optical Access Network, Wireless MAC Protocol, RFID/USN, Visible Light Communication

유 명 식 (Myungsik Yoo)



1989년 2월 고려대학교 전자
공학과 학사
1991년 2월 고려대학교 전자
공학과 석사
2000년 6월 SUNY at
Buffalo Dept. of EE 박사
2000년 9월~현재 숭실대학교
정보통신전자공학부 부교수

<관심분야> Optical Network, OBS, EPON, QoS, Wireless MAC Protocol, MANET, RFID/ USN, CR, Visible Light Communication