
빔포밍 기능을 가진 LED 무선 가시광 LAN 통신을 위한 MAC 프로토콜

김성만*

A MAC Protocol for LED visible light communications with beamforming

Sung-Man Kim*

요약

LED 무선 가시광 통신기술의 성능을 1Gb/s 이상으로 높이기 위해서는 실내환경에서 다중 반사로 인한 멀티패스 효과를 없애주어야 한다. 본 논문에서는 이러한 멀티패스 효과를 없애주기 위하여 빔포밍 기술을 접목한 LED 무선 가시광 LAN 통신을 위한 MAC 프로토콜을 제안하고자 한다. 본 MAC 프로토콜은 각 방향으로 빔포밍 된 빛을 각 방향에 대한 방향코드와 함께 송신하는 절차가 삽입되어 있는 것이 특징이다. 또한, 기존의 무선 LAN 과는 달리 충돌감지가 어려운 무선 가시광 통신의 특징을 감안하여 중앙 집중형 polling 기법을 사용하였다. 또한 본 논문에서 제안한 MAC 프로토콜의 성능을 평가하여 그래프로 나타내었다.

ABSTRACT

To increase the bit rate over than 1 Gb/s in LED visible light communications, we need to reduce the multipath effect of the light in indoor environment. In this paper, we propose a MAC protocol for LED visible light wireless LAN with beamforming technique. We assumed that spatial light modulator is used for beamforming function. We use polling method since detecting another uplink channel is difficult in visible light communication. We also estimated the performance of the proposed MAC protocol.

키워드

LED, visible light communication, beamforming, MAC protocol

1. 서론

LED (light emitting diode) 무선 가시광 통신 기술은 친환경 고효율 조명인 LED 조명을 이용하여 무선 통신을 구현하는 기술로, LED 조명의 보급에 따라 함께 발전하고 있는 기술이다. 최근에 LED 조명이 각광을 받게 된 이유는 저전력, 무수은, 긴수명 등과 같이 친환경적인 특징을 갖추고 있으며, 전기 에너지를 빛으

로 변환하는 효율도 기존의 백열등이나 형광등에 비해 더 높기 때문이다 [1].

LED 무선 가시광 통신은 실내에서 기존의 무선 LAN 통신을 대체하는 용도로 많이 연구되고 있다. LED 무선 가시광 통신 기술은 특히 실내환경에서 기존의 RF 주파수를 이용하는 무선통신 기술에 비해 다음과 같은 몇 가지 장점을 가지고 있다. 첫째, 전자파를 이용하지 않아 인체에 무해하여 병원이나 의료시설에

* 경성대학교 공학기술연구소 겸임연구원 / 경성대학교 전자공학과 (sungman@ks.ac.kr).

접수일자 : 2011. 04. 04

심사(수정)일자 : 2011. 04. 22

게재확정일자 : 2011. 06. 15

서 사용이 가능하며, 항공기와 같이 전자파가 기기의 오작동을 일으킬 수 있는 환경에서도 사용할 수 있다. 둘째, RF 무선 주파수와는 달리 정부의 규제나 허가가 필요없어 빠른 기술의 진보가 가능하며, 무료로 사용이 가능하다. 셋째, 기존의 RF 무선 주파수와는 비교할 수 없는 넓은 잠재 대역폭을 가지고 있어 추후 발전가능성이 매우 높다 (가시광을 주파수로 환산하면 380~780 THz 로 그 대역폭은 약 400 THz 에 달한다). 넷째, 벽을 투과하여 옆방과 간섭을 일으키는 RF 주파수와는 달리 얇은 벽으로도 완벽하게 가시광이 차단이 되므로 각 방마다 보안성을 유지할 수 있으며 불필요한 간섭효과가 적다. 다섯째, 눈에 보이는 가시광을 이용하므로 통신 가능영역 및 음영영역을 쉽게 확인할 수 있다.

하지만, 이러한 LED 무선 가시광 통신을 이용하여 차세대 1 Gb/s 급 통신을 하기 위해서는 송신단과 수신단 사이에 빛의 경로가 실내에서 여러 개의 다중경로가 존재하는 멀티패스(multipath) 채널환경 특성을 극복해야 하는 문제점을 가지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 LED 조명을 이용한 무선 가시광 통신 시스템에서 멀티패스를 제거해 주는 방법으로 특정 사용자의 단말기로 LED 빛을 빔포밍(BF, beamforming) 해주는 기술을 제시하고, 이에 대한 MAC 프로토콜을 제시하고자 한다. 우리는 이미 RF 주파수를 이용한 무선 LAN 통신기술과는 다른 가시광의 물리적인 특징을 고려하여 무선 가시광 LAN 통신을 위한 MAC 프로토콜을 발표한 바가 있다 [2]. 본 논문에서는 이를 빔포밍 기술이 적용된 무선 가시광 LAN 통신 기술에 맞게 수정된 프로토콜을 제시하고자 한다.

II. LED 무선 가시광 통신을 위한 빔포밍 방법

빔포밍 기술은 이동통신에서 개발된 기술로서, 여러 개의 안테나 Array 에서 각 안테나 패스마다 특정 위상 계수를 곱해줌으로써 특정 단말의 방향으로 안테나 빔을 형성시키는 기술이다 [3, 4]. 이러한 빔포밍 기술을 이용하면 신호의 SNR (signal to noise ratio) 을 높일 수 있어 더 빠른 고속의 통신이 가능하고 통신의 전송거리도 증가되는 기술이다 [5]. 하지만, 이러한 빔포

밍 기술을 빛을 이용한 LED 무선 가시광 통신에 그대로 적용하기는 힘들다. 따라서, 본 논문에서는 공간 광변조기 (spatial light modulator) [6] 를 사용하는 방법을 제시하고자 한다. 공간 광변조기란 각 픽셀별로 빛의 위상이나 진폭을 변화시킬 수 있어 이를 LED 조명 앞에 부착하면 우리가 원하는 자유로운 형태의 렌즈나 격자가 가능하므로 우리가 원하는 방향으로 빔을 형성시킬 수 있다. 따라서, 이러한 원리를 이용하면 LED 조명 빛을 빔포밍 하는 기술이 가능하다.

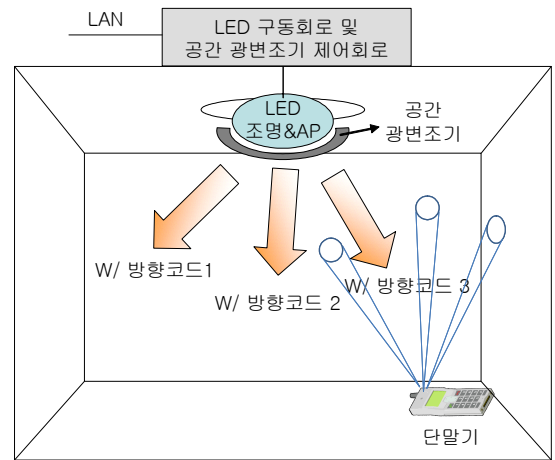


그림 1. 빔포밍 기술이 적용된 LED 무선 가시광 통신 기술의 구성도

Fig. 1 LED visible light communication using beamforming technology

그림 1은 이렇게 제안된 LED 무선 빔포밍 기술의 구성을 보여주고 있다 [7]. 본 구성에서 빔포밍을 구현하기 위해서는 단말기의 위치를 알아내는 과정이 필요한데, 이를 위해서 빔포밍 기술이 적용된 LED 무선 가시광 통신의 MAC 프로토콜은 다음과 같은 동작을 하게 된다.

- 1) 전체 MAC (media access control) 프로토콜 동작 시간중에 방향코드 송신시간을 할당한다.
- 2) LED AP (access point)는 조명 전면부에 부착된 공간변조기를 이용하여 방향코드 송신시간 동안 각 방향으로 빔포밍된 신호를 각 방향에 해당하는 방향코드를 붙여 빔포밍 신호를 송신한다. 비록 그림 1에는 방향코드를 3 개만 그려놓았지만, 실제로는 수십개의 방향코드를 사용하여 각 방향으로 송신하게 된다.
- 3) 각 단말기는 자신이

가장 잘 수신할 수 있는 방향코드를 판별하여 이를 LED AP 로 응답한다. 4) LED AP 는 이 정보를 받아 각 단말에게 적합한 방향으로 LED 조명 빛을 빔포밍하여 통신신호를 송수신하게 된다.

III. 전체 MAC 프로토콜 동작

그림 2는 본 논문에서 제안하는 MAC 프로토콜의 전체 동작 시간할당을 보여주고 있다.

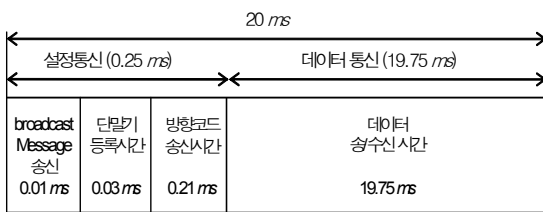


그림 2. MAC 프로토콜의 전체 동작 시간할당
Fig. 2 Time schedule of the proposed MAC protocol

제안하는 MAC 프로토콜은 통신의 설정을 위한 설정통신과 데이터를 송/수신하는 데이터 통신시간으로 나뉜다. 설정통신에서는 단말기의 송/수신기의 방향을 LED AP 와 자동으로 최적으로 맞추도록 broadcast 메시지를 송신해주며, 빔포밍 기능을 위해 방향코드를 송신하는 구간이다. 이러한 전체 프로토콜 동작시간은 20 ms 를 주기로 계속 반복된다.

무선 가시광 LAN 통신에서는 가시광의 직진성 때문에 단말기의 송수신 방향이 AP 로 향하도록 설정되어야만 통신이 가능하다. 이를 위하여 20 ms 의 주기마다 AP 는 Broadcast 메시지를 송신해 준다. 그러면 단말기는 이 Broadcast 메시지를 가장 잘 수신할 수 있는 방향으로 단말기의 광송수신기의 방향을 조절하게 된다.

그 이후에 단말기 등록시간에는 방향을 최적방향으로 조절한 단말기가 자신의 정보를 AP 로 전송하도록 할당된 시간이다. 본 논문의 MAC 프로토콜에서는 가시광의 특성상 Full-duplex 로 동작하기가 종종 어려운 점을 감안하여 Half-duplex 로 동작하는 것을 가정하였기 때문에 단말기가 자신의 정보를 등록할 수 있는 시간을 별도로 할당해 두었다.

방향코드 송신시간은 빔포밍 기능을 위하여 AP 가 각 방향으로 빔포밍을 하면서 방향코드를 송신하는 시간이다. 단말기는 이 시간에 자신에게 가장 적합한 방향코드를 수신하여 추후에 데이터 송/수신시에 자신에게 적합한 방향코드 정보를 AP 에게 알리게 된다.

데이터 송/수신 시간에는 기존의 무선 LAN 통신에서 사용되는 CSMA/CA (carrier sense multiple access with collision avoidance) 방식과는 달리 AP 가 단말기들의 데이터 송수신을 제어하는 중앙 집중형 방식인 polling 방식을 사용하였다. 이는 가시광의 직진성 때문에 한 단말의 UL (uplink) 전송을 다른 단말들이 감지하기가 어려워 Carrier Sensing 이 힘들기 때문이다.

IV. 설정통신 세부절차

설정통신의 흐름도 및 순서도를 그림 3 및 그림 4에 나타내었다. AP는 20 ms 의 주기를 가지고 Broadcast 메시지를 전송하고, 이 Broadcast 메시지를 이용하여 단말기들은 0.5 초 이내에 AP 와의 송수신기 방향을 Broadcast 를 가장 잘 수신할 수 있는 방향으로 최적으로 조절한다.

단말기가 부팅을 완료하고, 통신 기능을 정상적으로 동작시키기 위하여 단말기의 광 송수신기가 AP와의 송수신 방향을 최적화하는데 소요되는 시간이 0.5초 이내이면 사용자가 불편을 느끼지 않는다고 가정하였다. 단말기에 부착된 광 송수신기가 360도로 회전할 수 있다고 보았을 때, 한 번에 15도씩 움직일 경우 총 24 번이면 1바퀴 (360도)를 완전히 회전할 수 있다. 방송주기를 계산할 시에는 계산의 편리함을 위해 24 번 대신 25 번으로 계산하여 0.5초 / 25번 = 20 ms 로 broadcast 메시지의 주기를 결정하였다. 한 번에 15도씩 움직인다고 가정한 이유는 LED 송수신기의 실험결과 15도 오차 각도 내에서는 통신이 정상적으로 수행함을 확인하였기 때문이다 [2].

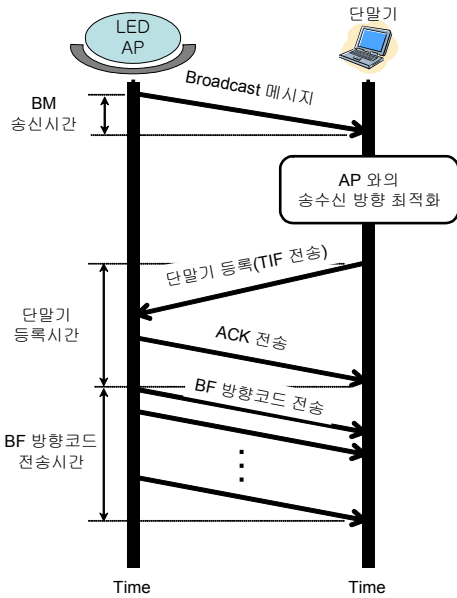


그림 3. 설정통신의 흐름도
Fig. 3 Procedure of setting communication

이렇게 0.5 초 동안 25 번의 Broadcast 메시지를 수신하여 가장 최적의 방향으로 광 송수신기의 방향을 설정한 후에 단말기는 단말기 등록시간에 자신의 정보를 AP 로 전송한다. 그 후에 ACK 를 수신하면 단말기 등록절차가 완료된다. 단말기 등록시간에 여러 대의 단말기가 동시에 등록을 시도할 가능성이 있기 때문에, ACK 수신에 실패하면 [랜덤숫자(R) * 주기(T_p)] 후의 단말기 등록시간에 단말기 등록을 재시도하고, 총 횟수가 10 회를 넘으면 단말기 등록은 실패한 것으로 판단하며, 일정 시간이 지난 뒤 다시 처음부터 설정통신을 수행한다.

빔포밍(BF) 방향코드 전송시간에는 AP 가 각 방향으로 빔포밍된 빛을 방향코드와 함께 전송하며 이를 수신한 단말기는 자신에게 가장 최적인 방향코드를 찾아내어 기억하고 있다가 데이터 송/수신시에 이 정보를 AP 로 전달하게 된다. 본 논문에서는 전체 방향을 40 개로 나누어 총 40 번의 방향코드를 보내는 것을 가정하였다.

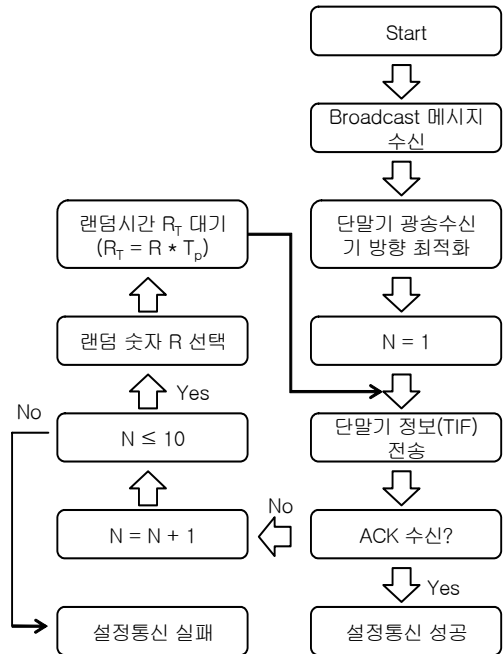


그림 4. 설정통신의 순서도
Fig. 4 Flow chart of setting communication

V. 데이터통신 세부절차

데이터 통신의 흐름도 및 순서도를 그림 5 및 그림 6에 나타내었다. 데이터 통신의 전체적인 흐름은 일반적인 polling 기법을 따르지만 [2, 8], 빔포밍 기술을 적용하기 위하여 몇 가지 수정된 부분이 포함되어 있다. 이를 설명하면, 하향링크의 방향으로 데이터를 전송할 것이 있을 때에는 AP 에서 SEL 메시지를 보내고, 단말로부터 BF-ACK (빔포밍 방향코드 정보가 포함된 ACK) 를 수신한 후에, BF-ACK 메시지에 포함된 방향으로 빔포밍 기술이 적용된 데이터 메시지를 전송하게 된다. 마지막으로 이에 대한 ACK 를 수신하면 데이터 전송은 완료된다.

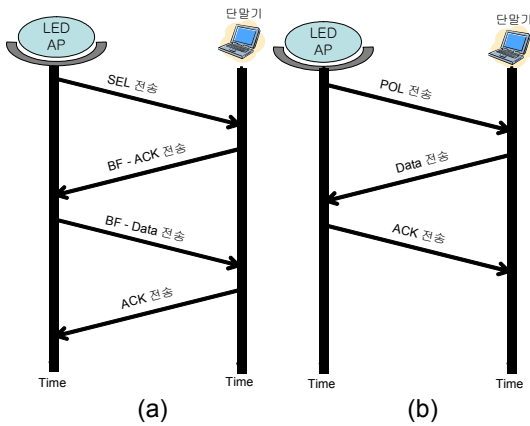


그림 5. 데이터 통신의 흐름도
 (a) downlink 데이터 전송 (b) uplink 데이터 전송
 Fig. 5 Procedure of data communication
 (a) downlink transmission (b) uplink transmission

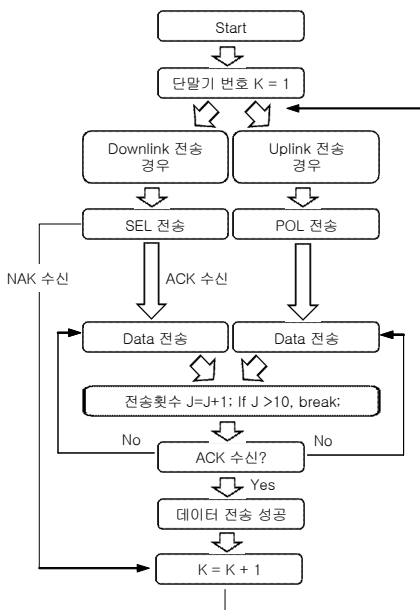


그림 6. 데이터 통신의 순서도
 Fig. 6 Flow chart of data communication

반면에 상향링크의 방향으로 데이터를 전송할 때에는 AP가 POL을 전송하여 uplink로 보낼 데이터 유/무를 질의하였을 때 전송할 데이터가 없으면 NAK로 응답하고, 보낼 데이터가 있으면 데이터를 전송하고 이에 대한 ACK를 수신한다. 상향링크의 동작방식은

일반적인 polling 기법과 동일하다.

데이터 전송하고 난 이후에 이에 대한 ACK를 응답받으면 데이터 전송이 성공하지만, 만약 Time-off 시간이 지나도 ACK 응답이 없으면 데이터 유실 또는 충돌이 발생으로 판단하고 10 회까지 재전송을 하는 것으로 설정하였다. 만약, 재전송 횟수가 10 회를 넘어가도 실패할 경우에는 다음 번호의 단말기 순서로 넘어가서 데이터 통신을 수행하게 된다.

VI. 프레임 구조 및 상세 동작시간 설명

본 단원에서는 본 논문에서 제안하는 프로토콜의 프레임 구조 및 여러 시간값 계산에 대한 상세한 설명을 하고자 한다.

표 1. 메시지별 전송속도
 Table 1. Data rate of each message

	최소전송속도	최대전송속도
Broadcast Message 송신	10 Mbps	100 Mbps
단말기 등록	10 Mbps	100 Mbps
BF 방향코드 전송	20 Mbps	200 Mbps
데이터 전송 (BF 적용)	20 Mbps	200 Mbps
데이터 전송 (BF 적용안됨)	10 Mbps	100 Mbps

6.1 각 메시지별 전송속도

표 1은 본 논문에서 가정한 각 통신 메시지별 최소 전송속도와 최대 전송속도를 나타낸 것이다.

표 1의 데이터 전송속도는 현재 표준화가 진행중인 가시광 PAN (personal area network) 통신의 표준인 IEEE 802.15.7에서 정의한 PHY 영역의 데이터 전송속도[9]를 참고하여 가정한 것이다. 여기에 빔포밍 기술이 적용되는 데이터 전송이나 BF 방향코드 전송은 빔포밍 기술에 의해 신호의 SNR이 증가되므로 전송속도가 다른 메시지들의 전송속도보다 더 높은 속도로 전송할 수 있음을 가정하였다. 참고로, 본 논문에서는 전체 방향을 40개로 나누어 방향코드를 전송하므로 빔포밍 기술이 적용될 경우 약 16 dB의 SNR 개선효과가

발생한다. 따라서, 빔포밍 기술을 이용할 때에는 더 높은 레벨의 QAM (quadrature amplitude modulation) 변조를 통하여 전송속도를 증가시킬 수 있다.

6.2 MAC 프레임 구조

MAC 프레임 형식으로는 기존의 IEEE 802.11 기반의 무선 LAN 통신용 MAC 프레임을 수정하여 무선 가시광 LAN 통신에 적합한 MAC 프레임을 제안하였으며, 이를 그림 7 및 그림 8에 나타내었다. 제안된 MAC 프레임은 기존의 IEEE 802.11 기반의 MAC 프레임에서 Length 필드가 추가가 되었는데, 이는 프레임의 길이 정보를 제공함으로써 추가적인 오류를 막기 위함이다. 또한, 빔포밍 방향코드의 전송을 위해서 빔포밍 방향코드 메시지가 추가로 정의되었으며, 단말기가 자신에게 알맞은 빔포밍 방향코드 정보를 AP 로 전달할 수 있도록 BF-ACK 메시지가 정의되었다. 기타 항목에 대한 정의들은 기존의 IEEE 802.11 기반의 무선 LAN 프로토콜[10]과 동일하므로 설명을 생략하도록 하겠다. 표 2는 프레임 필드에 대한 설명이다.

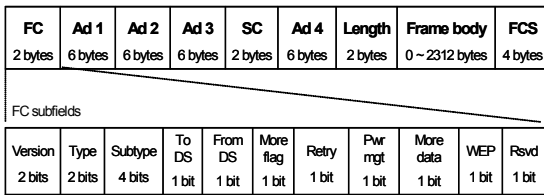


그림 7. 프레임 형식
Fig. 7 Frame format

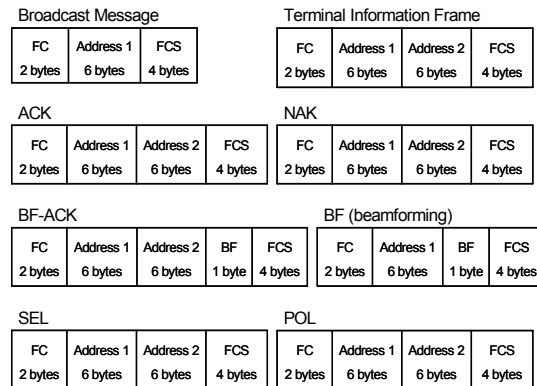


그림 8. 메시지별 프레임 형식
Fig. 8 Frame format of each message

표 2. 프레임 필드
Table 2. Frame fields

Field	Explanation	
FC	Version	현재 버전은 0이다.
	Type	프레임 종류 : 초기프레임(00), 응답프레임(01), 데이터프레임(11)
	Sub Type	초기프레임 : BM(0000), TIF(1111) 응답프레임 : ACK(0000), BF-ACK(0001), NAK(0101), SEL(1010), POL(1111)
	To DS	IEEE 802.11 과 동일
	From DS	
	Retry	1로 설정되었을 때, 프레임 재전송을 의미한다.
	Pwr mgt	1로 설정되었을 때, 지국은 전력관리모드임을 의미한다.
	More data	1로 설정되었을 때, 지국이 더 보낼 데이터를 가지고 있다는 것을 의미한다.
	Rsvd	예약을 의미한다.
Length	프레임의 길이를 제어한다.	
FCS	CRC-32 오류검출 시퀀스 포함한다.	
SC	프레임의 순서번호를 정의 한다.	
BF	방향코드 번호이다.	
Frame body	0에서 2312 바이트의 길이를 가지고 있으며, Type 필드와 Sub Type 필드에서 정의한 정보를 포함하고 있다.	

6.3 상세 동작시간 계산

Broadcast 메시지 송신에 필요한 시간을 표 3에 정리하였고, 단말기 등록 메시지 송신에 필요한 시간을 표 4에 정리하였다. 또한, 빔포밍 방향코드 송신에 필요한 시간을 표 5에 정리하였다. 본 논문에서는 가시광 무선 LAN의 최대 동작거리를 100 m 로 가정하였으며, 필요 동작시간계산에는 가장 시간이 오래 걸리는 경우인 각 메시지별 최소전송속도로 계산하였다. 이렇게 계산된 0.01ms 의 broadcast 메시지 송신시간, 0.03ms 의 단말기 등록시간, 0.21ms 의 빔포밍 방향코드 송신시간

을 바탕으로 III 장의 그림 2와 같은 전체 프로토콜 동작시간을 결정하였던 것이다.

표 3. Broadcast 메시지에 필요한 동작시간
Table 3. Time for broadcast message

	Broadcast Message (12 bytes = 96 bits)
Propagation Delay for 100 m (A)	$100 / (3 \times 10^8)$ = 0.00033 ms
Processing Delay with 10 Mbps (B)	$96 / (10 \times 10^6)$ = 0.0096 ms
Total required time	A+B \approx 0.01 ms

표 4. 단말기 등록에 필요한 동작시간
Table 4. Time for Terminal Registration

	TIF Message (18 bytes = 144 bits)
Propagation Delay for 100 m (A)	$100 / (3 \times 10^8)$ = 0.00033 ms
TIF processing Delay with 10 Mbps (B)	$144 / (10 \times 10^6)$ = 0.0144 ms
ACK processing Delay with 10 Mbps (C)	$144 / (10 \times 10^6)$ = 0.0144 ms
Total required time	2A+B+C \approx 0.03 ms

표 5. 빔포밍 방향코드 송신에 필요한 동작시간
Table 5. Time for beamforming code transmission

	BF Message (13 bytes = 104 bits)
Propagation Delay for 100 m (A)	$100 / (3 \times 10^8)$ = 0.00033 ms
BF processing Delay with 20 Mbps (B)	$104 / (20 \times 10^6)$ = 0.0052 ms
Total required time	A+40B \approx 0.21 ms

VII. 성능평가 연구

본 논문에서 제안한 MAC 프로토콜의 성능을 계산하였다. 데이터 송수신 구간의 데이터 전송속도는 최소 전송속도와 최대 전송속도인 두 가지 경우를 가정하여 성능을 평가하였다. 또한, 본 성능평가 연구에서는 단말기와 AP의 광 송수신기 방향이 일치하면 전송에러는 발생하지 않음을 가정하였다.

그림 9는 표 1의 최소 전송속도로 동작하는 경우에 대해 본 MAC 프로토콜로 얻을 수 있는 순수 데이터 throughput 을 나타낸 그래프이다. 트래픽이 증가함에 따라 Data Throughput 도 일정하게 증가하다가 18.496 Mb/s 의 값에 도달하면 더 이상 증가하지 않는 결과를 보여주고 있다. 이는 polling 기법을 사용하였으므로, 특별히 데이터 전송구간에서는 단말간에 충돌이 일어나지 않으며, 데이터 전송구간에서 하향링크에서 빔포밍 기법을 통해 전송할 수 있는 최대의 전송량에서 한계값을 보이고, 그 한계값 이상의 트래픽이 유입될 때에는 더 이상 throughput 이 증가하지 않기 때문이다.

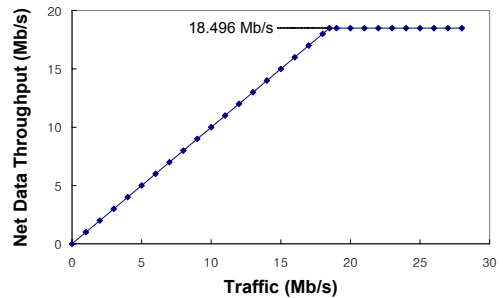


그림 9. 최소 전송속도로 동작시 Data Throughput
Fig. 9 Data throughput with minimum transmission rate

그림 10은 표 1의 최대 전송속도로 동작하는 경우에 대해 본 MAC 프로토콜로 얻을 수 있는 순수 데이터 throughput 을 나타낸 그래프이다. 그림 9의 경우와 마찬가지로 트래픽이 증가함에 따라 Data Throughput 도 일정하게 증가하다가 183.1 Mb/s 의 값에 도달하면 더 이상 증가하지 않는 유사한 결과를 보여주고 있다.

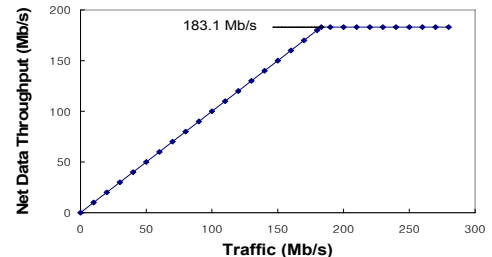


그림 10. 최대 전송속도로 동작시 Data Throughput
Fig. 10 Data throughput with maximum transmission rate

Ⅷ. 결 론

본 논문에서는 빔포밍 기술이 적용된 LED 무선 가시광 LAN 통신 시스템을 위한 MAC 프로토콜을 제시하였다. 기존의 IEEE 802.11 기반의 무선랜 MAC 프로토콜의 프레임 형식을 수정하여 새로운 프레임 형식을 제안하였으며, carrier 센싱 및 충돌감지가 어려운 가시광 통신의 특징을 고려하여 CSMA/CA 방식 대신에 중앙 집중형 polling 기법을 사용하였다. 본 논문에서 제시하는 MAC 프로토콜은 자동으로 단말기가 AP의 방향을 찾을 수 있는 장점이 있으며, 또한, 빔포밍 기능을 지원할 수 있는 장점을 가지고 있다.

또한, 본 논문에서 제시한 MAC 프로토콜의 성능을 평가하였으며, PHY 단에서 가정한 최대 전송속도로 전송할 시에 여러 오버헤드를 제외하고 최대로 183.1 Mb/s의 순수 데이터 전송량을 보여주었다.

본 연구를 통해 현재 PHY 계층만 완성이 되었던 LED 무선 가시광 LAN 통신 시스템에서의 빔포밍 기술을 MAC 계층까지 완성시킴으로서 공간 광변조기를 사용한 LED 무선 가시광 통신의 빔포밍 기술을 확립할 수 있게 되었다. 이를 통해 LED 무선 가시광 통신의 성능을 한층 더 향상시킬 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2010학년도 경성대학교 공학기술연구소 연구지원사업으로 이루어졌음.

참고 문헌

[1] 김태근, "백색 LED 설계 및 제작기술", Photonics Conference 2010, Tutorial I, 2010.

[2] 전종배, 최정호, 김성만, "LED 조명 기반의 무선 가시광 LAN 통신을 위한 MAC 프로토콜 설계", 한국통신학회논문지, 36권, 4호, pp. 391-398, 2011.

[3] Christian B. Peel, Bertrand M. Hochwald, and A. Lee Swindlehurst, "A vector-perturbation technique for near-capacity multiantenna multiuser communication-Part I: channel inversion and regularization", IEEE Trans. Commun., vol. 53, No. 1, pp. 195-202. Jan. 2005.

[4] 김성만, "중계기가 연결된 빔포밍 기지국을 위한 새로운 RF-패스 보정절차 방법", 한국전자통신학회논문지, 6권, 2호, pp. 274-279, 2011.

[5] Jeffrey G. Andrew, Arunabha Ghosh, and Rias Muhamed, *Fundamentals of WiMAX*, Prentice Hall, section 5.4, pp. 169-174, 2007.

[6] Liang Xinan, Xu Xuewu, Sanjeev Solanki, Pan Yuechao, Ridwan Bin Adrian Tanjung, Tan Chiwei, Xu Baoxi, Chong Tow Chong, "3D holographic display with optically addressed spatial light modulator", 3DTV Conference 2009: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video, Germany, May, 2009.

[7] 김성만, 이석진, 임종수, "LED 무선 가시광 통신을 위한 빔포밍 방법", 제18회 광전자 및 광통신 학술회의, paper TP-18, pp. 196-197, 2011.

[8] Behrouz A. Forouzan, *Data Communications and Networking*, McGraw-Hill, Ch.12, pp.380-381, 2007.

[9] IEEE Std 802.15.7, draft version, pp. 21-22, Nov. 2009.

[10] Behrouz A. Forouzan, *Data Communications and Networking*, McGraw-Hill, Ch.14, pp.421-434, 2007.

저자 소개

김성만(Sung-Man Kim)



1999년 KAIST 전기및전자공학과 졸업 (공학사)

2001년 KAIST 전자전산학과 졸업 (공학석사)

2006년 KAIST 전자전산학과 졸업 (공학박사)

2006년~2009년 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원

2009년~현재 경성대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : LED 무선 광통신, 광통신, WiMAX