

# WiMedia 초고속 근거리 무선 통신에서의 결정적 접근 프로토콜

## A Deterministic Access Protocol in WiMedia Wireless Personal Area Networks

박 현 희\*, 백 상 현\*, 김 용 선\*, 강 철 희\*\*

Hyunhee Park\*, Sangheon Pack\*, Yongsun Kim\*, Chul-Hee Kang\*\*

### Abstract

WiMedia UWB technology is a fully distributed data communication technology developed for the application demanding a high data transmission rate in the wireless PAN area. In general, devices can send data either by reserving time slots or by using prioritized CSMA/CA. If the PCA protocol of prioritized CSMA/CA is used, they are suffered congestion as the number of devices increases. In this paper, we propose a Deterministic Access Protocol(DAP) in WiMedia WPANs. A DAP is a method to transmit data in the non-reserved DRP period without competition as each device informs the beacon order information in the beacon period and the queue information. In addition, the problem that the devices with a lower beacon slot number have more transmission opportunities is addressed by introducing the reference point. Simulation results are given to demonstrate that a DAP can improve the throughput and reduce the packet loss rate.

### 요 약

WiMedia UWB 기술은 무선 PAN영역에서 무선 USB, 무선 디스플레이, 무선 KIOS 등과 같이 높은 데이터 전송 속도를 요구하는 응용을 위해 개발된 완전 분산형의 데이터 통신 기술로써 데이터 통신을 위해 DRP 구간에서 예약되지 않은 영역은 모든 장치들이 PCA(Prioritized Contention Access) 방식으로 경쟁하여 무선 매체를 점유한다. 보통 장치들은 DRP 구간을 미리 예약하여 경쟁 없이 데이터를 보낼 수 있지만, 제어 및 명령 프레임 전송이나 추가적인 데이터 프레임 전송 시에는 PCA 방식을 통해 예약되지 않은 DRP 구간에서 이러한 데이터를 전송하게 된다. 그러나 기존의 PCA 방식을 사용하게 되면 경쟁으로 인한 충돌 증가로 동일 비컨 그룹에 참여하는 장치 수가 증가할수록 전송 효율 저하를 겪게 된다. 따라서 본 논문에서는 비컨 구간에서의 비컨 전송 순서 정보와 각 장치가 DRP 예약 구간 외에 추가적으로 발생하는 큐 정보를 비컨을 통해 알려줌으로써 현재 남아 있는 비예약 DRP 구간에서 경쟁 없이 추가 발생 데이터를 전송할 수 있는 방식을 제안한다. 그리고 기준점(reference point)을 도입하여 비컨 슬롯 번호가 빠른 장치들에게 전송기회가 많이 주어지는 문제를 해결하였다.

*Key words : WiMedia MAC, UWB WPAN, distributed reservation protocol, prioritized contention access*

\* 高麗大學校 電子컴퓨터工學部  
(Department of Electronics and Computer Engineering, Korea University)

★ 교신저자(Corresponding author)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT 핵심개발사업의 일환으로 수행하였음. [2008-F-006-02, 테라헤르츠 대역 근거리 무선 통신시스템 연구]  
接受日:2009年 9月 4日, 修正完了日: 2009年 9月 25日

### I. 서론

홈 네트워크 기술 발전, 인터넷 고도화, 멀티미디어 가진 기기의 증가는 가정과 사무실에서의 기기간 초고속 무선 전송의 필요성을 증가시키고 있다. 이에 2002년 미국 FCC에서는 3.1G~10.6GHz 대역을 비허

가 대역으로 공개함으로써 초고속 근거리 무선 통신을 위한 산업 활성화를 가능하게 하였다[1]-[2]. 이러한 초고속 근거리 무선통신 기술의 표준화는 IEEE 802.15.3a에서 본격적인 논의가 진행되었지만, 인텔 중심의 MB-OFDM(Multiband Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식과 모토로라 중심의 DS-SS(Direct Sequence Code Division Multiple Access) 방식이 서로 양립하여 협상안을 도출하지 못한 채 2006년 1월 IEEE 802.15.3a의 표준화는 중단되었다. 이에 MB-OFDM 진영에서는 WiMedia Alliance를 중심으로 DS-SS 진영은 UWB Forum에서 표준화를 진행해 왔다. WiMedia Alliance에서는 2008년 12월 3번째 버전의 와다접근제어 계층(Medium Access Control: MAC) 및 <8년계층(PHY) 규@20완성하였고 표준화 기구인 ECMA International을 통해 ECMA-368 규@으로 승인 (ce동HY 2007년 3월 ISO/IEC 국제 표준 규@으로 승인 되었다[3]. WiMedia Alliance의 UWB 표준irectode 장치Y 기본 규@으로 채택되어 적용되어 있고 블루투스 규격 3.0에 채택된 상태로 향후 다수의 정보 가전 기기의 통신 프로토콜로 사용될 것으로 기대된다.

이렇게 2.4GHz 대역의 IEEE 802.15.3(High rate WPAN), 60GHz 대역의 IEEE 802.15.3c, 3.1~10.6GHz 대역을 이용하는 UWB WPAN들은 모두 무선 환경에서의 데이터 전송률을 높이기 위한 다양한 연구에서 비롯된다. 한정된 대역폭을 갖는 무선 환경에서 전송 성능을 향상시키기 위해서는 모든 장치들이 채널을 빈 슬롯으로 낭비하지 않고 최대한 사용하여 데이터를 전송해야하고, 무선 전송 영역에서 데이터를 전송하고자 하는 모든 장치들은 중앙처리장치나 각각 장치들간의 스케줄링을 통하여 효율적인 전송을 하는 것이 중요하다. 또한 높은 데이터 전송속도를 지원하더라도 매체 접근 제어 계층(MAC)의 기능이 갖고 있는 오버헤드 때문에 응용 계층까지의 고정된 데이터 전송률을 기대하기는 어려운 문제점이 있다. 이를 위해 기존에 UWB WPAN의 MAC 계층에서 throughput을 높이기 위한 연구들이 많이 진행되어 왔다. MAC 계층의 throughput을 최대화시키기 위해 최적의 payload size를 유도하는 모델을 [4]에서 제시하였고, [5]에서는 ACK 프레임의 전송횟수를 채널 상태에 따라 조절하는 기법으로 throughput과 소비전력의 효율성을 높이는 dynamic ACK Policy가 제안되었다. [6]에서는 중복되는 헤더를 제거하여 보내고자 하는 프레임의 오버헤드를 줄이는 방안을 제안하였다. [7]에서는 실시간 어플리케이션의 QoS와 throughput을 높이기 위한 기법으로 enhanced contention access period (EDAP) 스케줄링 기법을

제안하고 있다 [8]에서는 무선 채널 상태에 따라 ACK를 선택적으로 전송하는 channel adaptive ACK(CA-ACK)을 제안하고 있다. 이는 FER(Frame Error Rate)를 고려하여 throughput이 더 높은 쪽의 ACK를 선택적으로 사용하게 되어 채널 상황에 상관없이 향상된 throughput을 제공하게 된다.

WiMedia WPAN은 3.1G~10.6GHz 대역에서 최대 480Mbps의 전송속도를 제공하고 있고 MAC 프로토콜은 분산 기반 예약을 기본으로 경쟁 방식으로 PCA(Prioritized Contention Access)를 정의하고 있다. 그리고 이를 위해 동일 비컨 그룹의 모든 장치들은 비컨 구간에서 비컨을 전송해야 한다. 분산 예약 프로토콜(Distributed Reservation Protocol: DRP)은 비컨 구간에서 미리 자신이 전송할 DRP 구간을 예약하는 것으로 자신이 전송한 데이터 양을 판단하여 그만큼을 미리 예약하는 방식이다. 최근 이러한 WiMedia MAC의 성능 향상을 위한 연구가 진행되고 있다. 고정된 비컨 구간이 갖는 오버헤드를 지적하는 연구[9]와 멀티 홉 환경에서 비컨이 충돌할 경우를 고려한 연구[10], 그리고 타임 슬롯의 예약을 유동적으로 함으로써 좀 더 빈 슬롯에 대한 낭비를 막고자 하는 연구[11]가 시도 되었고, 채널 환경이 좋은 장치를 통해 높은 data rate의 장치로 릴레이하여 데이터를 보내는 연구[12]가 진행 되었다. 또한 WiMedia MAC의 성능을 수학적인 마코브 모델을 사용하여 분석한 논문들이 많이 등장하고 있다[13]-[16]. 우리는 WiMedia MAC의 성능 향상을 위하여 PCA 구간의 문제점을 지적하고 PCA 구간에 새로운 Deterministic access protocol을 적용한다.

WiMedia MAC은 장치가 자신이 전송할 구간을 예약하는 경우를 제외하고 제어 또는 명령 프레임이나 추가적으로 발생한 데이터의 경우에는 DRP 구간에서 예약되지 않은 구간을 이용하여 PCA 방식으로 전송하게 된다. 이때에는 CSMA/CA 기반의 충돌이 발생하게 되어 전송 효율이 저하된다. 만약 각 장치가 DRP 예약 구간을 여유 있게 예약하게 된다면 이러한 PCA 충돌 발생 빈도는 적게 되겠지만 DRP 구간을 효과적으로 사용하지 못해 대역폭 낭비가 심각하게 될 것이다.

따라서 본 논문에서는 비컨 구간에서의 비컨 전송 순서 정보와 각 장치가 DRP 예약 구간 외에 추가적으로 발생하는 큐 정보를 비컨을 통해 알려줌으로써 현재 남아 있는 비예약 DRP 구간에서 경쟁없이 추가 발생 데이터를 전송할 수 있는 방식을 제안한다. 그리고 기준점(reference point)을 도입하여 비컨 슬롯 번호가 낮은 장치들에게 전송기회가 많이 주어지는 문제를 해결한다. 본 논문에서 제안하고 있는 이러한

방식들은 단지 비컨에 몇 가지 정보요소 (Information Elements: IEs)만을 추가함으로써 실현할 수 있기 때문에 구현 관점에서 복잡도의 증가는 크지 않다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 WiMedia MAC에 대한 개요와 비컨 구간과 데이터 전송 구간에 대한 시스템 모델에 관하여 설명하고 3장에서는 보다 효율적인 데이터 전송을 위해 새롭게 제안하는 Deterministic Access Protocol (DAP)에 관하여 기술한다. 4장에서는 제안하는 기법의 수학적 분석을 하고 5장에서 실험을 통하여 성능 평가와 시스템의 효율성을 설명한다. 그리고 마지막 6장에서 결론을 논한다.

## II. 시스템 모델

이 장에서는 WiMedia MAC의 전반적인 내용을 설명하고, 장치간의 데이터 통신을 위한 비컨 구간과 데이터 전송 구간에 대해서 간략히 기술한다.

### 1. WiMedia MAC의 구조

WiMedia MAC 프로토콜은 고속의 무선 PAN을 이용한 응용 분야의 요구사항과 중앙제어방식으로 인한 IEEE 802.15.3 MAC 프로토콜의 문제점을 보완하여 설계되었다[3]. WiMedia MAC 상에서는 비컨 구간과 데이터 전송 구간으로 구성되어 있는 고정된 길이의 슈퍼프레임이 통신 장치들 간의 조정과 효율적인 전원 절약을 위해 정의되어 있다. 만일 한 장치가 통신하고자 한다면 장치들의 동기화, 이웃 장치 발견에 대한 공지, 이동성을 고려한 전력 관리, sleep 모드의 동작, 데이터 전송 구간의 할당과 공간 재할용, 예약 공지 등의 정보가 포함되어 있는 비컨 프레임의 최소한 한번은 들어야 한다. 그림 1은 비컨 구간과 데이터 전송 구간을 포함하는 슈퍼프레임의 구조를 보여준다. 중앙 조정 장치 없이 완전한 분산 방식으로 통신을 하는 이 장치들은 비컨 구간 동안 비컨 프레임을 브로드캐스트 하는 절차가 필수적이다. 비컨을 전송함으로써 동일한 비컨 구간내의 장치들은 서로의 정보를 교환할 수 있다.

### 2. 비컨 구간

비컨 구간에서는 통신을 위한 정보를 실은 비컨 프레임이 전송된다. 최대  $mMaxBPLength$  비컨 구간내의 각 비컨 슬롯의 길이는  $mBeaconSlotLength$ 이고, 이 비컨 구간내의 비컨 슬롯은 0부터 시작하여 차례

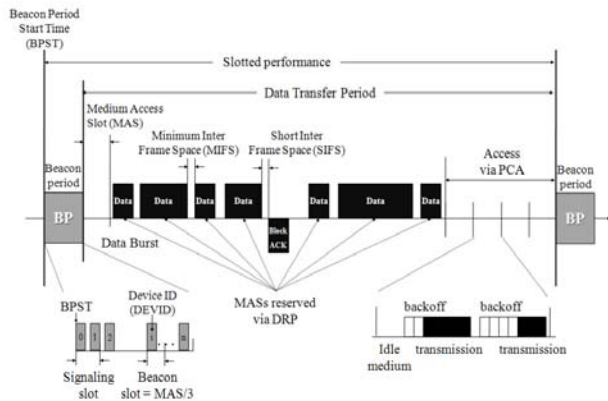


Fig. 1. Superframe structure of the WiMedia MAC  
그림 1. WiMedia MAC의 슈퍼프레임 구조

대로 번호가 매겨진다. 비컨 시작 시점(Beacon period start time: BPST)을 시작으로 비컨 전송의 안정성을 위하여 가장 낮은 데이터 전송률인 53.3Mbps로 비컨을 전송한다. 서로의 정보를 공유하기 위해서 beaoning 장치들은 매 슈퍼프레임마다 비컨 구간 내에서 비컨을 보내고 모든 비컨 슬롯에 대한 이웃 장치들의 비컨을 들어야 한다. 비컨 프레임은 비컨 헤더를 제외하고 데이터 통신을 위한 정보 요소만으로 구성된다. 예를 들면, 이전 슈퍼프레임에서의 이웃 비컨 구간 점유에 관한 정보를 제공하는 BPOIE (Beacon Period Occupancy IE), 새로운 DRP 예약을 위한 장치의 이용가능 여부를 알려주는 DRP Availability IE, 장치가 어떤 MAC을 지원하는지 나타내는 MAC Capability IE등 최대 256개의 정보 요소를 포함할 수 있다. 장치는 슈퍼프레임에서 수신된 정보 요소를 해석하여 그 슈퍼프레임에 적용되도록 비컨에 정보 요소를 포함해야 한다. 이 정보 요소들을 주고 받음으로써 완전 분산형의 데이터 통신 환경에서의 각 장치들은 데이터 통신을 위한 이웃 장치들의 정보를 제공받게 된다.

### 3. 데이터 전송 구간(Data Transfer Period: DTP)

데이터 프레임은 슈퍼프레임의 데이터 전송 구간에서 전송된다. 데이터 전송 구간 동안 장치들은 DRP와 PCA를 통해 데이터 전송을 할 수 있다. DRP의 기본적인 원리는 constant bit률의 실시간 트래픽에 적합한 시분할 다중 접속 방식(Time-division multiple access)과 유사하고 PCA는 기본적으로 우선순위를 기반으로 한 CSMA/CA 방식으로 비실시간의 데이터 전송을 지원하기 위한 서로 다른 경쟁 파라미터를 적용하는 프로토콜이다. 따라서 멀티미디어와

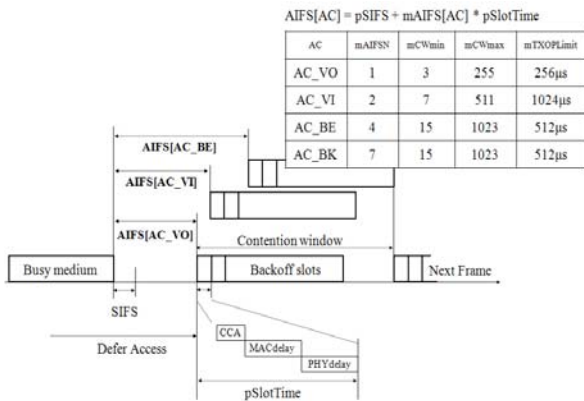


Fig. 2. IFS range of the PCA protocol  
그림 2. PCA의 IFS 범위

같은 실시간 데이터는 비컨 구간을 통해 사전에 할당 받은 DRP 구간을 통해 전송되고, 비동기 데이터는 CSMA/CA를 기반으로 차별화된 우선순위를 제공하는 PCA 구간을 통해서 전송된다.

가. DRP 프로토콜

DRP는 다른 장치들과 프레임 송수신 할 때 하나 또는 그 이상의 타임 슬롯(MASs)을 예약하여 충돌없이 이웃 장치들과 통신한다. 데이터 전송 방식으로 DRP를 사용하는 모든 장치들은 그들의 비컨 DRP IE를 포함함으로써 다른 장치들에게 자신의 예약된 MASs들을 공지하여 독점적으로 데이터 전송을 하도록 보장받아 멀티미디어 스트리밍과 같은 동기적 프레임을 전송할 수 있다.

나. PCA 프로토콜

데이터 통신을 위해 PCA를 사용한다면 장치는 상위 계층에서 제공하는 우선순위에 따라 CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)방식을 이용해서 web, email, FTP와 같은 비동기 데이터 프레임을 전송하거나 제어 프레임을 전송할 수 있다. PCA를 이용한 통신의 경우 DRP로 예약된 구간을 제외하고 남은 time slot을 모든 장치들이 경쟁 기반으로 사용하게 되는데 이 기법은 기존 IEEE 802.11e의 EDCA(Enhanced Distributed Coordination Access) 방식과 유사하지만 IEEE 802.11x에서 수신 전력 레벨을 기준으로 carrier sensing을 수행하는 것과 달리 프레임의 수신 여부로 carrier sensing을 수행한다.

PCA는 그림 2에서 보는 바와 같이 voice, video, best effort, background와 같은 4가지의 서로 다른 접근 범주(Access Categories: ACs)로 나뉘어진 우선

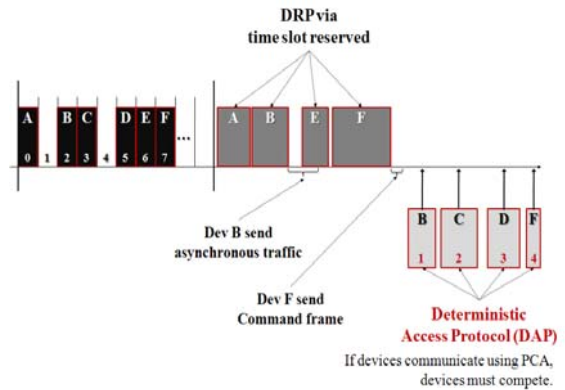


Fig. 3. Beacon number allocation scheme of the DAP  
그림 3. 제안하는 기법의 beacon 번호 할당 방법

순위를 부여하여 차별화된 전송이 이루어지도록 한다. 우선순위는 4가지 범주에 따라 AIFS(Arbitrary Inter Frame Space)를 다르게 부여하여 CSMA/CA를 위한 backoff의 시작 시간을 조절함으로써 적용된다. 또한 backoff 시간을 선택되는 CW(Contention Window)의 범위를 차별적으로 부여하여 CSMA/CA를 통한 채널 점유의 우선순위를 부여한다. 그림 2는 PCA의 IFS(Inter Frame Space)의 범위를 보여준다. 각각의 장치는 자신의 AC에 대한 backoff count를 유지하게 되고 처음에는 CW[AC]를 mCWmin[AC]값으로 설정 설정 설정 설정 을 위하여 [0, CW[AC]] 사이에서 랜덤하게 backoff count를 골라 사용하게 되고 채널이 AIFS동안 idle한 후 각 장치는 backoff count를 하나씩 줄여 그 값이 0이 되었을 때 데이터 전송을 하게 된다.

III. WiMedia MAC에서의 결정적 접근 프로토콜

본 논문에서는 앞서 설명한 PCA 구간에서의 데이터 전송을 효율적으로 하기 위한 새로운 프로토콜을 제안한다. 제안하는 기법은 기존 PCA 구간에서 CSMA/CA로 경쟁하여 채널에 접속하는 장치들이 경쟁을 하지 않고 데이터를 보낼 수 있도록 한다. 비컨 구간을 통해 자신의 슬롯 번호와 이웃 장치의 슬롯 번호를 알 수 있기 때문에 제안하는 기법에서는 이 슬롯 번호의 순서대로 남은 PCA 구간을 사용하여 경쟁으로 인한 채널 낭비를 막을 수 있다.

일반적으로 DRP 구간을 통하여 타임 슬롯을 예약하는 경우 CBR 종류의 트래픽을 전송하게 되는데 이 타임 슬롯을 예약하는 경우 peak치의 데이터 량을 고려하여 타임 슬롯을 예약하는 것이 아니라 효율성을

위해 평균치를 고려하여 타임 슬롯을 예약하게 된다. 이러한 경우 추가적으로 데이터가 발생하여 예약된 타임 슬롯 구간이 부족한 경우가 생기게 되는데, real-time 트래픽처럼 한 슈퍼프레임을 지나서 전송되어지는 것에 민감한 트래픽의 경우 PCA 구간을 이용하는 경우가 많다. 또한 VBR 특성의 비디오 트래픽이나 FTP 트래픽과 같은 경우 고정된 타임 슬롯 구간을 통한 전송이 필수적이지 않기 때문에 PCA 구간을 이용하게 된다. 결국 VBR 용도의 데이터가 발생하여 추가로 늘어나는 데이터 전송을 위해, 그리고 통신의 효율적인 변경을 위하여 즉각적으로 command 프레임이나 control 프레임을 보내야 하는 경우 PCA 구간을 사용하는 것이다. 그러나 이런 PCA 구간은 CSMA/CA를 이용하여 장치들이 데이터를 전송하기 때문에, 충돌에 의한 타임 슬롯 낭비 구간이 많이 생기게 되고 데이터 전송 및 전체적인 throughput이 낮아지게 된다. 따라서 우리는 PCA 구간을 이용하여 통신하는 경우, 이러한 비효율적 전송을 해결하고자 새로운 결정적 접근 프로토콜을 제안한다.

비컨 구간내의 비컨 슬롯은 0부터 차례대로 순서가 부여되고 장치들은 비컨을 스캔한 후 최대 비컨 구간 내에서 가장 높은 숫자의 비컨 슬롯 이후 하나의 비컨 슬롯을 선택한다. 그림 3은 제안하는 결정적 접근 프로토콜의 비컨 슬롯 번호 할당 방법으로 비컨 구간 내에서 6개의 장치들이 비컨 슬롯을 할당한 모습을 보여준다. Dev A, Dev B, Dev E, Dev F인 4개의 장치는 DRP를 이용하여 타임 슬롯을 예약하고 데이터를 전송한다. 이 중 Dev B는 DRP를 통하여 데이터 전송을 하지만 동시에 PCA 구간을 이용하여 비동기 데이터를 보내길 원한다. 또한 Dev F는 DRP를 통하여 데이터 전송을 하지만 동시에 PCA 구간을 이용하여 command 프레임을 보내기 원한다. Dev C와 Dev D는 DRP를 통한 타임 슬롯을 예약하지 않고 오직 PCA 구간만을 이용하여 비동기적인 멀티미디어 트래픽을 보내기 원한다. 기존의 PCA를 이용하여 데이터 전송을 한다면 Dev B, Dev C, Dev D, Dev F 들은 빈 타임 슬롯 구간을 IEEE 802.11e의 EDCA 방법과 유사하게 4개의 접근 범주 원칙에 따라 차등적인 backoff를 수행한 후 경쟁을 통하여 데이터를 보내게 된다. 이 경우 장치들은 충돌이 발생할 수 있고 backoff 과정을 수행해야 하므로 낭비되는 타임 슬롯이 계속적으로 발생하여 throughput이 저하되는 문제가 발생하게 된다. 그러나 우리가 제안하는 기법을 사용하는 경우 빠른 슬롯 번호를 가진 Dev B부터 time slot을 예약하지 않고 데이터 전송을 원하는

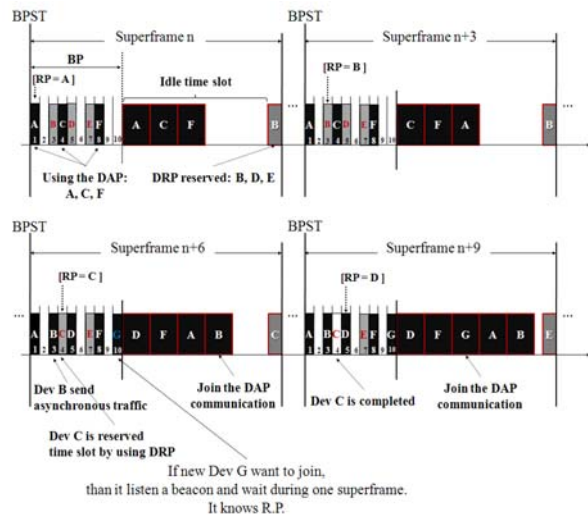


Fig. 4. Proposed mechanism: DAP  
그림 4. 제안하는 기법: Deterministic Access Protocol

디바이스들이 순차적인 전송을 하게 된다.

따라서 본 논문에서는 모든 장치가 비컨의 정보 요소를 통하여 모든 장치들의 슬롯 번호를 알고 있다는 점을 이용하여 순서적 접근 방법으로 데이터를 전송하는 기법을 제안한다. 그림 4는 제안하는 기법의 이해를 돕기 위해 예를 들어 설명한다. 검정색으로 마킹되어 있는 Dev A, C, F의 경우 기존 PCA 방식의 응용 프로그램을 전송하고자 하는 디바이스들이고 회색으로 마킹되어 있는 Dev B, D, E의 경우 예약을 통하여 응용 프로그램을 보내고자 하는 디바이스들이라 가정하자. DAP를 통해 데이터를 전송하는 경우, 만일 빈 타임 슬롯 구간이 존재한다면 그 구간을 Dev A, C, F는 경쟁없이 순차적으로 사용할 수 있다. 이 경우 결정적 기반의 스케줄링을 하기 때문에 성능 향상이 높아 질 수 있으나, 늦은 슬롯 번호를 가진 장치는 계속하여 낮은 우선 순위를 가지게 되므로 낮은 슬롯 번호를 가진 디바이스들에게 상대적인 starvation 문제가 발생한다. 따라서 우리는 이 문제를 해결하기 위하여 기준점(Reference Point: RP)의 개념을 도입한다. RP는  $n$ 개의 슈퍼프레임마다 한번씩 다음 슬롯 번호를 가진 장치에게 넘겨줘야 한다. 맨 처음에는 가장 빠른 slot 번호를 가진 장치가 슈퍼프레임  $n$ 번 동안 RP를 가지고 자신을 1번으로 기준하여 데이터 전송을 시작한다. 그 후  $n$ 번의 슈퍼프레임을 지난  $n+1$ 번째 슈퍼프레임부터는 두 번째 슬롯 번호를 가진 장치가 RP를 1번으로 가짐으로써 순서를 변경한 후 데이터를 보내게 된다. 이렇게 순차적인 전송을 하기 위해서 자신의 정확한 순서 정보를 알아야 하는데 이는 자신의 슬롯 번호와 실제로 전송

할 수 있는 순서가 다를 수 있기 때문이다. 만일 자신의 전송 순서보다 빠른 순서 번호를 가진 장치가 보낼 데이터를 가지고 있지 않다면 순서 번호는 달라져야 하기 때문에 이를 참조하기 위한 추가적인 정보 요소가 필요하게 된다. 우리는 이를 위해 DAP IE (Deterministic Access Protocol Information Element) 라는 새로운 정보 요소를 추가한다. 표 1은 DAP IE 를 보여준다. 자신이 기준점을 가지고 있는 경우 Reference point 필드에 '1'을 표시하여 이 정보 요소를 보내게 되고 이를 들은 다른 장치들은 이 기준점을 순서로 자신의 전송 순서를 참조하게 된다. 또한 Queue existence 필드는 각각의 장치들이 DAP 구간을 통하여 보낼 데이터가 있는지에 대한 정보를 표시하게 되는데 만약 이 필드가 '1'이라면 그 장치는 보낼 데이터가 있는 것으로 간주할 수 있다. 따라서 Reference point 필드와 Queue existence 필드를 통하여 자신이 실제로 데이터를 전송할 수 있는 순서 정보를 알게 된다. 그림 4에서는 3번의 슈퍼프레임마다 RP를 다음 디바이스에게 넘겨주는 시나리오로 설명하여 2번째 슬롯 번호를 가진 Dev C가 다음 RP를 갖고 순서가 바뀌는 모습을 볼 수 있다. 또한 그림과 같이 Dev C가 예약을 기반으로 하는 트래픽을 가지고 Dev D가 경쟁기반의 트래픽을 가진 것으로 시나리오가 바뀐다면 디바이스들은 최소한 한 슈퍼프레임을 통해 동기화를 비롯한 정보들을 파악하게 된다. 즉 새롭게 통신을 원하는 Dev B, G의 경우 비컨 구간을 통해 자신의 IEs들을 보내고 주변의 IEs들을 들음으로써 동기화를 맞춰 다음 슈퍼프레임부터 통신에 참여할 수 있게 된다. 전송하고자 하는 데이터를 모두 전송하여 더 이상 통신을 하고자 하는 데이터가 없는 경우 디바이스는 RP와 QE 필드의 값을 '0'으로 만들어 자신이 존재하지 않음을 표시할 수 있다.

**IV. 결정적 접근 프로토콜의 수학적 분석**

이 절에서는 제안하는 기법의 수학적 분석을 위하여 한 장치가 DAP 구간을 통하여 원하는 데이터를 전송하는 경우의 throughput을 유도한다.

제안하는 결정적 접근 프로토콜은 장치들 간의 경쟁없이 순차적인 전송을 목적으로 하기 때문에 한 장치가 데이터 전송을 하기 위해서는 앞선 장치의 데이터 전송 여부가 고려되어야 한다.

먼저  $i$ 는 한 네트워크 내의 모든 장치들에게 부여되는 index로써 슈퍼프레임 내에서 비컨이 보내지는 순서를 의미하고,  $j$ 는 DRP 구간이 아닌 빈 타임 슬롯

구간을 사용하기 위하여 DAP IE를 통하여 알게 된 실제 전송 순서를 나타내는 index를 의미한다.  $i$ 번째 순서를 가진 장치가  $j$ 번째에 데이터를 전송한다고 가정( $j \leq i$ )하고, 현재 슈퍼프레임에서  $i$ 번째 비컨을 보내는 장치에 DAP Queue의 데이터가 생성될 확률을  $\alpha_i$ 라고 가정하면 식 (1)을 유도할 수 있다.

$$P[i, j] = \alpha \binom{i-1}{i-j} \alpha^{j-1} (1-\alpha)^{i-j} \tag{1}$$

여기서 DAP Queue란 우리가 제안하는 DAP IE 필드에 포함되어 있는 Queue existence에 '1'이 마킹되어 있는 경우로써 DAP를 이용하여 보내고자 하는 데이터가 생기는 경우를 의미한다.

본 논문에서 우리는 DAP Queue에 데이터가 발생할 확률과 데이터 량은 같다고 가정하여  $\alpha = \alpha_i$ 로 표현할 수 있다. BPST로부터  $i$ 번째 비컨을 보내는 장치가 현재 슈퍼프레임에서 DAP로 데이터를 보내지 않는 장치를 제외하고 실제로  $j$ 번째로 DAP Queue에 가지고 있는 데이터를 보낸다고 했을 때,  $P[i, j]$ 는  $i$ 번째 비컨을 보내는 장치가  $j$ 번째로 DAP를 시도할 확률을 나타낸다.  $P[i, j]$ 의 계산을 유도해 보았을 때,  $P[1, 1] = 1$ 이고,  $P[n, n] = \alpha^n$ 이다. 또한 간단한 예로  $P[2, 1] = (1-\alpha)\alpha$ ,  $P[3, 1] = (1-\alpha)^2\alpha$ ,  $P[2, 2] = \alpha^2$ ,  $P[3, 2] = 2\alpha^2(1-\alpha)$ 등으로 계산될 수 있다.

$t$ 는 현재 슈퍼프레임에서 전체 가용할 DAP MAS의 개수를 나타낸다. 따라서 항상  $j \leq t$ 가 성립해야 한다. 남아 있는 구간  $t$ 는 다양하게 변화될 수 있으므로 uniform distribution으로 가정한다.  $t$ 의 범위는  $0 \leq t \leq t_{total}$ 을 가진다. 여기서  $t_{total}$ 은 한 슈퍼프레임 내에서 비컨 구간을 제외하고 최대 빈 슬롯의 MAS 개수를 나타낸다. 즉, 표준에 따라 비컨 구간의 MAS 개수를 최대 32개라고 하면,  $t_{total}$ 은 최대 224개의 MAS를 가질 수 있다.

우리는 남아 있는 구간의 수  $t$ 가  $j$ 보다 커야만 데이터 전송이 가능하기 때문에  $t$ 가  $j$ 보다 클 확률은 다음 식 (2)와 같이 정의한다.

Table 1. DAP IE.  
표 1. DAP를 위한 정보 요소

Octets:1	1	1	1	k
Element ID	Length	Reference Point	Queue Existence	Reserved

$$P[j \leq t] = \frac{t-j}{t} \quad (2)$$

또한, 우리는 분석을 위하여 1개의 장치는 DAP를 이용하여 1개의 MAS를 이용한다고 가정한다. 결국  $j$ 번째 데이터를 보낼 확률을 식 (1)과 식 (2)를 통해 정리할 수 있다.

$$P_s[i, j] = \alpha \binom{i-1}{i-j} \alpha^{j-1} (1-\alpha)^{i-j} \frac{t_{total}-j}{t_{total}} \quad (3)$$

throughput을 유도하기 위해 data rate  $\gamma$ 를 고려하였을 때, 모든 장치들의 data rate는 같다고 하고, 표준에 정의된  $\gamma_{53.3Mbps}$ 부터  $\gamma_{480Mbps}$ 까지 8가지의 data rate을 고려한다.

우리는 패킷 크기를 표준에 정의된 최대 크기인 4095 octet으로 정의하였고,  $th = data \text{량}/\text{시간}$ 이므로

$th = \sum_{j=1}^i P_s[i, j] T_{MAS} \gamma j \frac{1}{T_{MAS} j}$ 이다.  $T_{MAS} \gamma j$ 는  $j$ 개만큼 보내는 데이터 량이고  $1/T_{MAS} j$ 는 보내는 시간을 의미한다. 결국 expectation throughput은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$E(th) = \sum_{j=1}^i P_s[i, j] \gamma \quad (4)$$

그리고 drop되는 경우를 비교하기 위해 drop 확률을 다음과 같이 간단하게 유도할 수 있다.

$$P_{drop}[i, j] = P[i, j] \frac{j}{t_{total}} \quad (5)$$

즉, 구하고자 하는 expectation drop rate은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$E(drop) = \sum_{j=1}^i P_{drop}[i, j] \gamma \quad (6)$$

## V. 성능 평가

개선된 WiMedia MAC의 성능을 분석하기 위해서 Matlab 7.7.0을 이용하여 30,000번에 걸친 시뮬레이션을 하였다. 표 2는 [3]에 근거한 시뮬레이션 인자 값들을 나타낸 것이다. UWB WiMedia 시스템에서 사

용되는 modulation 기법에 따라 data rate는 53.3, 80, 106.7, 160, 200, 320, 400, 480Mbps와 같이 다양하게 주어진다. 우리는 기존 WiMedia MAC을 통하여 데이터를 전송한 경우와 제안하는 기법을 통하여 데이터를 전송한 경우의 throughput을 비교하였고, 제안하는 결정적 접근 프로토콜을 이용하는 경우에는 data rate에 따른 throughput 차이를 비교함으로써 전송률 측면에서의 효율성을 입증하였다. 또한 우선순위 기반의 CSMA/CA의 PCA 방식과 결정적 접근 프로토콜의 패킷 drop 수를 비교함으로써 패킷 손실 측면에서의 이득을 보였다. 시뮬레이션에서는 슈퍼프레임의 개수를 30번까지 반복하여 데이터 통신을 하였고 data rate는 최대 전송 속도인 480Mbps로 가정하였다. 그리고  $n$ 번의 기준점은 3번으로 하여 실험에 적용하였다. 그림 5는 기존 WiMedia MAC과 제안하는 결정적 접근 프로토콜과의 throughput 성능 비교를 나타낸다.

그림에서 볼 수 있듯이 기존 WiMedia MAC을 통한 전송은 장치의 개수가 많아질수록 throughput이 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다. 그 이유는 기존 WiMedia MAC의 경우 CSMA/CA 방식으로 경쟁을 하여 빈 슬롯을 차지하는데 장치들의 개수가 많아진다면 그만큼 경쟁을 할 경우의 수가 많아지고 또한 충돌로 인한 슬롯 낭비가 많아짐을 의미한다. 그러나 장치의 개수가 30개가 넘어가고 약 40개 이상의 장치가 통신을 할 경우에는 평균 163.1482Mbps에 표준편차가 약 1.92정도의 거의 일정한 throughput을 유지하는데, 이유는 PCA 구간에서의 경쟁으로 인해 손실이 있다하더라도 DRP 구간을 통한 일정량의 throughput

Table 2. Simulation parameter.

표 2. 시뮬레이션 인자 값

Parameter	Value
Number of Device	1 ~ 96
Packet size	4095octets
Data rate	53.3 ~ 480Mbps
Guard time	12 $\mu$ s
MAS length	256 $\mu$ s
General MAC header size	10byte
PHY header	9.4 $\mu$ s
MIFS	1.875 $\mu$ s
SIFS	10 $\mu$ s
Number of ACs	4: VO, VI, BE, BK

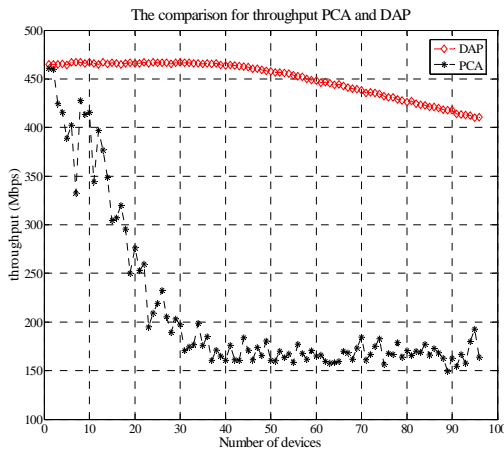


Fig. 5. The comparison for the throughput of PCA and proposed DAP

그림 5. 기존 PCA와 제안하는 DAP의 throughput 비교

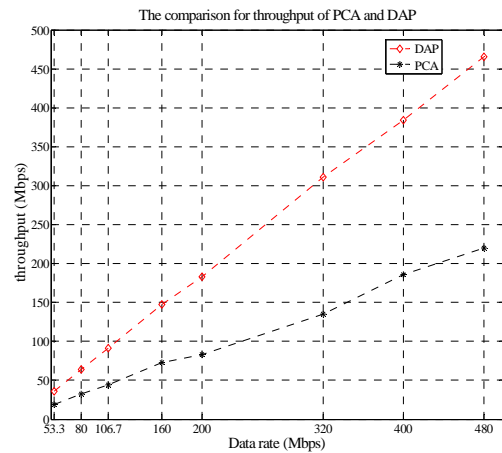


Fig. 7. The comparison for the throughput of PCA and DAP as data rates

그림 7. data rate의 변화에 따른 기존 PCA와 제안하는 DAP의 throughput 비교

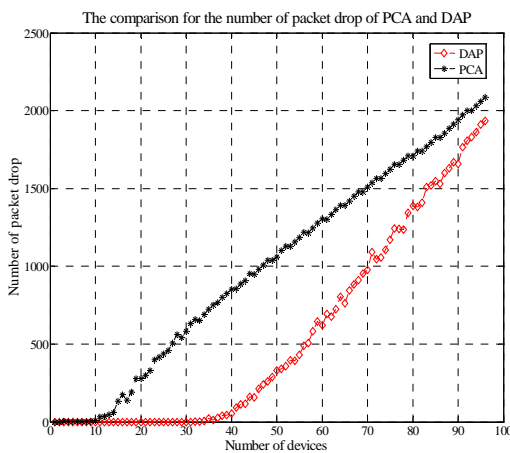


Fig. 6. The comparison for the packet drop of PCA and proposed DAP

그림 6. 기존 PCA와 제안하는 DAP의 패킷 손실 개수 비교

이 보존되기 때문이다. 이에 비해 제안하는 DAP를 이용한 경우 장치의 수가 많아짐에 따라 약간의 손실은 발생하지만 최대 96개의 장치로 데이터 통신을 한다 하더라도 평균 약 410.595Mbps 정도의 throughput을 유지함을 알 수 있다. 일반적으로 WiMedia 홈 네트워크에서는 사용하는 장치의 수를 30개로 가정하게 되는데, 30개의 장치를 사용했을 때 기존 WiMedia MAC의 경우 평균 197.2862Mbps의 throughput을 내는 반면 제안하는 DAP는 평균 466.8804Mbps의 throughput으로 거의 손실이 없음을 알 수 있다. 즉, 한 홈 네트워크 환경에서 480Mbps의 data rate로 30개의 장치를 이용한다고 가정하였을

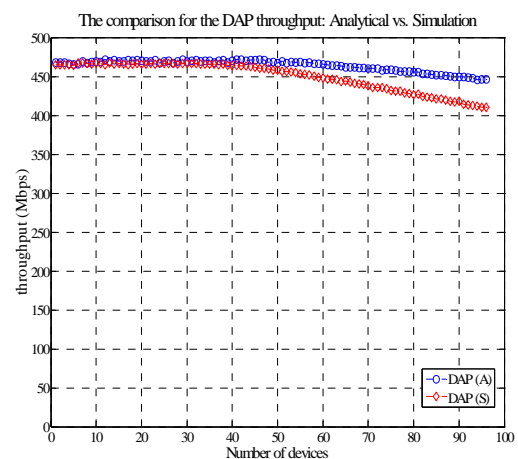


Fig. 8. The comparison for the DAP throughput - (A: analytical, S: Simulation)

그림 8. DAP를 이용한 throughput의 비교 - (A: 수학적 분석 결과, S: 시뮬레이션 결과)

때, ECMA에서 제안한 WiMedia MAC에 비하여 평균 136.65%의 성능 향상이 있음을 알 수 있다. 또한 우리는 경쟁으로 인한 패킷 손실과 결정적 접근의 결정적으로 인한 패킷 손실률을 알아 보았다.

그림 6을 보면 제안하는 DAP의 경우 장치의 수가 30개 이하의 경우 거의 패킷 손실이 발생하지 않고 순차적인 전송이 가능했고 장치들의 수가 평균 30개가 넘어서는 순간부터 패킷 손실이 발생한다. 그러나 기존 WiMedia MAC의 경우 장치의 수가 10개만 넘어가도 경쟁으로 인하여 패킷 손실이 크게 발생하고 그 손실률도 급격함을 알 수 있다. 또한 DAP의 패킷



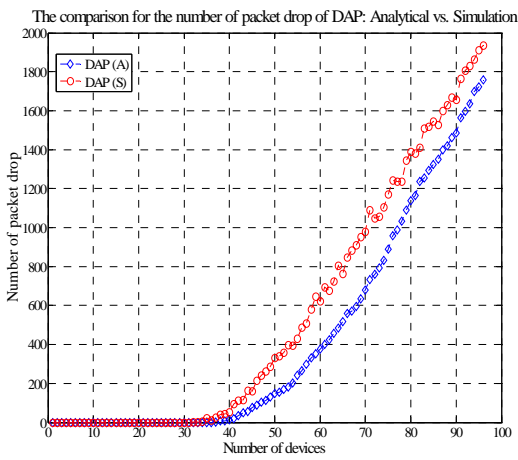


Fig. 9. The comparison for the number of packet drop of DAP - (A: analytical, S: Simulation)

그림 9. DAP를 이용한 패킷 drop의 비교 - (A: 수학적 분석 결과, S: 시뮬레이션 결과)

손실이 장치의 수가 증가함에 따라 높아지지만 400Mbps 이상의 높은 throughput을 유지하고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 DRP 구간을 제외한 DAP 구간을 원하는 데이터 량에 따라 최대한 채워 보내려는 시도를 하기 때문이고, 만일 한 슈퍼프레임에서 전송 시도를 하지 못한 경우 최대 5번까지 전송시도를 하기 때문이다. 또한 비컨 슬롯 번호가 늦어서 발생하는 문제도 기준점에 의해 해결함으로써 대부분의 장치들이 30번의 슈퍼프레임동안 데이터를 모두 보낸 것으로 분석된다.

우리는 동일한 실험 기준으로 최대 data rate 뿐만 아니라 표준에 정의된 8개의 data rate에 따른 성능 평가를 위하여 그림 7에서와 같이 8개의 data rate으로 변화시켜 성능을 분석해 보았다. 슈퍼프레임의 개수는 동일하게 30개이고 패킷 사이즈를 4095octect으로 갖는 장치의 수를 30개로 고정하여 실험하였다. 그 결과 data rate이 높아질수록 두 프로토콜의 성능 차이가 많아짐을 알 수 있었고, 최대 data rate인 480 Mbps의 경우 기존 WiMedia MAC은 197.2862Mbps의 성능을 나타내었고, 제안하는 DAP는 466.8804 Mbps의 성능으로 평균 136.65 %의 성능 향상을 보였다.

마지막으로 우리는 제안하는 DAP의 throughput과 기존 PCA 프로토콜의 시뮬레이션 결과와 수학적 분석 결과를 비교하였다. 그림 8, 9는 수학적으로 분석한 결과의 throughput과 packet drop을 고려하여 시뮬레이션 결과와 비교한 그림이다. 앞서 언급한 수학적 분석을 고려하여, data rate은 최대인 480Mbps로 적용하고, 최대 96개의 장치를 고려했을 때,

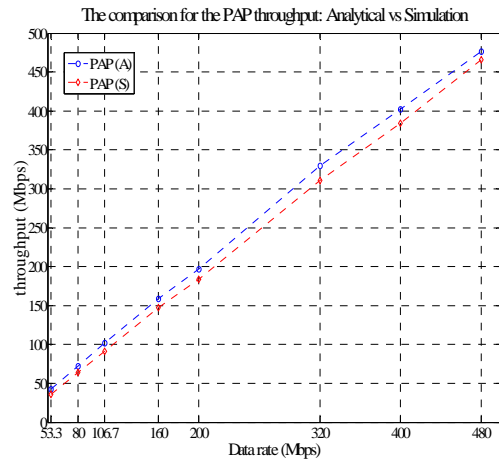


Fig. 10. The comparison for the DAP throughput as data rates - (A: analytical, S: Simulation)

그림 10. data rate의 변화에 따른 DAP를 이용한 throughput의 비교 - (A: 수학적 분석 결과, S: 시뮬레이션 결과)

throughput을 비교해보았다. 또한, 슈퍼프레임의 개수는 30개이고 패킷 사이즈를 4095octect으로 갖는 30개의 장치로 가정하여 8가지 data rate의 변화를 주며 실험하였다. 결과 최대 data rate인 480Mbps가 아닌 data rate가 변화해도 제안하는 DAP는 수학적 분석 결과와 유사한 모습을 보이고 있음을 입증한다. 결국 그림 8, 9, 10을 통하여 보이는바와 같이 수학적 분석 결과와 시뮬레이션의 결과가 유사한 추세의 비슷한 결과를 보여줌으로써 제안하는 기법의 수학적 분석 결과 및 실험 결과의 타당성을 입증한다.

이렇게 높은 throughput 향상과 적은 packet drop을 위하여 DRP 예약 구간 외에 추가적으로 발생하는 큐의 정보를 알려주기 위한 필드(Queue existence)와 낮은 순서 번호를 가진 장치들의 문제점을 해결하기 위한 필드(Reference point)를 포함하는 DAP IE만을 추가하였다. 즉, 제안하는 DAP는 기존 기법에 비하여 비컨 전송 시 하나의 정보 요소만을 추가한 것으로 많은 복잡도와 오버헤드를 가지지 않고도 높은 성능 향상이 있음을 보인 것이다.

## VI. 결론

본 논문에서는 WiMedia MAC 프로토콜이 분산 기반 예약을 기본으로 경쟁 방식의 PCA를 정의하고 있다는 점에 착안하여 새로운 프로토콜을 제안하였다. 비컨 구간에서 미리 자신이 전송할 MAS를 예약하는 DRP 방식을 사용한다 하더라도 command 또는 control 프레임이나 DRP 예약 구간 외에 추가적으로

발생하는 데이터의 경우 PCA 방식을 이용하여 통신을 할 수 있다. 또한 VBR 특성의 비디오 트래픽이나 FTP 트래픽과 같은 경우 PCA 구간을 주로 이용하게 된다. 결국 VBR 용도의 데이터가 추가적으로 발생하는 경우나 통신의 효율적인 변경을 위하여 즉각적으로 command 프레임이나 control 프레임을 보내야 하는 경우 PCA 구간을 사용하는 것이다. 그러나 이런 PCA 구간은 충돌에 의한 타임 슬롯 낭비 구간이 많이 생기게 되고 데이터 전송 및 전체적인 효율이 낮아지게 된다.

따라서 본 논문에서는 비컨에 몇 가지 정보 요소가 추가된 DAP IE만을 추가함으로써 결정적 기반의 결정적 접속 프로토콜을 제안했다. 이는 기존 WiMedia MAC에서 고려하는 CSMA/CA 방식의 경쟁형 접속의 단점을 해결하고 최대한 모든 장치들이 균등하게 전송 기회를 획득함으로써 높은 전송 효율을 이끌게 된다. 본 논문에서 제안하고 있는 방법 적용 시 기존 PCA 방법과 비교하여 장치의 개수가 30개이고 data rate를 480Mbps로 가정한 3만 번의 실험 결과, 전송율 측면에서 평균 136.65 %, 패킷 손실 측면에서 기존 손실률에 비해 평균 6.8/1000으로 줄일 수 있었다. 하지만 우리가 제안하는 이 기법은 기존 WiMedia MAC의 PCA 구간에서 고려하는 4가지 ACs의 우선순위를 반영하지 않는다. 비디오 트래픽이나 음성 트래픽 등 트래픽의 특성을 고려한 우선순위 기반의 CSMA/CA를 우리는 모든 장치에게 균등한 기회를 줌으로써 통신하도록 한다. 향후 연구 과제로써 제안하는 기법에 우선순위를 고려한 결정적 접근 프로토콜을 제안할 것이다.

## 참고문헌

- [1] J. Pavon, N. Shankar, V. Gaddam, K. Challapali, and C. Chou, "The MBOA-WiMedia specification for ultra wideband distributed networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 6 pp. 128-134, Jun. 2006.
- [2] X. Shen, W. Zhuang, H. Jiang, and J. Cai, "Medium access control in ultra-wideband wireless networks," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 54, no. 5, pp. 1663-1677, Sep. 2005.
- [3] *High Rate Ultra Wideband PHY and MAC Standard*, ECMA Int. ECMA-368, Dec. 2005. [Online]. Available: [www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-368.htm](http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-368.htm)
- [4] Y. Xiao, X. Shen, and H. Jiang, "Optimal ACK Mechanisms of the IEEE 802.15.3 MAC for Ultra-Wideband Systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 4, pp. 836-842, Apr. 2006.
- [5] B. Lee, S. Rhee, W. Choi, K. Chung, J. Cho, and W. Cho, "Dynamic Acknowledgement for the Energy Efficiency of the High-Rate Wireless PAN," in *Proc. UbiCNS 2005*, pp. 143-148, Jun. 2005.
- [6] E. Kwon, K. Lee, and J. Lim, "Enhancement of IEEE 802.15.3 MAC via MAC Header Compression," in *Proc. IEEE IPCCC 2005*, pp. 629-630, Apr. 2005.
- [7] J. Kim, Y. Jeon, S. Lee, and S. Choi, "ECAP: An Enhancement of the IEEE 802.15.3 MAC via Novel Scheduling Scheme," in *Proc. IEEE VTC 2006*, pp. 1313-1317, May 2006.
- [8] J. I. Lee, S. H. Pack, and C. H. Kang, "Channel Adaptive ACK Mechanism in IEEE 802.15.3 Wireless Personal Area Networks," in *Proc. ICOIN 2009*, Jan. 2009.
- [9] Q. Wu, Y. Xiong, H. Wu, Z. Guo, X.-G. Xia, Q. Zhang, and Z. Li, "Performance evaluation of the beacon period contraction algorithm in UWB MBOA MAC," *IEEE Communication Letter*, vol. 9, no. 10, pp. 933-935, Oct. 2005.
- [10] V. M. Vishnevsky, A. I. Lyakhov, A. A. Safonov, S. S. Mo, and A. D. Gelman, "Study of Beaconing in Multihop Wireless PAN with Control," *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 7, no. 1, pp. 113-126, Jan. 2008.
- [11] J. H. Kim, J. D. Huh, "Rate Adaptation Scheme for Slot Reservation in WiMedia MAC," in *Proc. ICCE 2007*, pp. 10-14, Jan. 2007.
- [12] H. M. Shin, Y. S. Kim, S. H. Pack, C. H. Kang, "A Distributed Relay MAC Protocol in WiMedia Wireless Personal Area," in *Proc. ISPA 2008*, pp. 784-789, Dec. 2008.
- [13] K. H. Liu, X. Shen, R. Zhang, and L. Cai, "Performance Analysis of Distributed Reservation Protocol for UWB-based WPAN," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, to appear.
- [14] K. H. Liu, X. Ling, X. S. Shen, and J. W. Mark, "Performance Analysis of Prioritized MAC in UWB WPAN With Bursty Multimedia Traffic," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 4, pp. 2462-2473, Jul. 2008.
- [15] D. T. C. Wong, F. P. S. Chin, M. R. Shajan

and Y. H. Chew, "Performance Analysis of Saturated Throughput of PCA in the Presence of Soft DRPs in WiMedia MAC," in *Proc. VTC 2007*, pp. 1275-1281, Apr. 2007.

[16] D. T. C. Wong, F. P. S. Chin, A. T. Hong and Y. C. Liang, "Saturated Throughput of PCA with Hard DRPs in Cognitive WiMedia MAC," in *Proc. IEEE VTC 2008*, pp. 1579-1583, May 2008.

저 자 소 개

**박 현 희 (학생회원)**



2002년 : 한국항공대학교 통신정보공학과 졸업 (공학사)  
 2002년 9월~현재 : 고려대학교 대학원 전자·컴퓨터공학과 석·박사 통합과정  
 <주관심분야>  
 근거리 무선 통신 기술, 무선 네트워크, 차세대 인터넷 기술, 네트워크 보안, 트래픽 모니터링 및 분석, 미래 인터넷 기술  
 hyunhee@widecomm.korea.ac.kr  
 parkhyunhee@gmail.com

**백 상 현 (비회원)**



2000년 : 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업 (공학사)  
 2005년 : 서울대학교 대학원 컴퓨터공학과 (공학박사)  
 2005년 ~ 2006년 : Univ. of Waterloo, BBCR Lab. 박사후과정  
 2007년 3월~현재 : 고려대학교 전자공학과 조교수  
 <주관심분야>  
 미래 인터넷 기술, 이동성 관리, 근거리 무선 통신 기술

**김 용 선 (비회원)**



1997년 : 고려대학교 전자공학과 졸업 (공학사)  
 1999년 : 고려대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)  
 1999년 3월~현재 : 한국전자통신연구원 초고속무선전송연구팀 선임연구원  
 2007년 3월~현재 : 고려대학교 대학원 전기전자공학과 박사과정  
 <주관심분야>  
 근거리 무선 통신 기술, 무선 네트워크, 협력 무선 통신

**강 철 희 (비회원)**



1975년 : 와세다대학교 전자통신공학과 졸업 (공학사)  
 1977년 : 와세다대학교 대학원 전자통신공학과 (공학석사)  
 1980년 : 와세다대학교 대학원 전자통신공학과 (공학박사)  
 1980년 ~ 1994년 : 한국전자통신연구소  
 1980년 ~ 1983년 : 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자과 / 기계공학과 대우교수  
 1991년 ~ 1994년 : 충남대학교 전자공학과 겸임교수  
 1994년 ~ 1995년 : Washington Univ. In.St. Louis 방문교수  
 1995년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 전자공학과 정교수  
 <주관심분야>  
 차세대 인터넷 기술, 유무선 통신 기술, 무선 네트워크, 유비쿼터스 컴퓨팅, 모바일 네트워크, 네트워크 보안