

# 차세대 광 가입자를 위한 OFDMA-PON MAC 기술

방학전, 박창수  
광주과학기술원

## 요약

본고에서는 차세대 광 가입자를 위한 OFDMA-PON (Orthogonal Frequency Division Multiple Access Passive Optical Network)을 소개하고, 그 MAC(Medium Access Control) 기술에 대한 전반적 내용과 기 연구된 상향 자원 할당 방법들에 대해 알아본다. 또한, OFDMA-PON 연구 동향을 바탕으로, 향후 MAC 기술을 전망한다.

## I. 서론

수동형 광통신 네트워크 (PON: Passive Optical Network)는 광 채널을 이용한 고용량의 대역폭을 수동형(Passive) 광 소자를 사용하여 경제적으로 다수의 광 가입자에게 고속으로 제공한다[1]. 그러나, 최근 폭발적으로 증가된 인터넷 트래픽을 수용하고 신규 고품질 어플리케이션을 지원하기 위해, PON은 그 전송 용량과 속도를 증가시킬 필요성이 대두되었다[2]. 이에 따라, 차세대 광 가입자 네트워크(NG-PON: Next-Generation PON)에 대한 요구사항이 논의되었다[2]. 기 전개된 TDMA-PON의 경우, IEEE 802.3 그룹에서는 EPON에 이어 10GE-PON 표준화를 2008년에 완료하였고, FSAN 그룹에서는 GPON에 이어 NG-PON Stage-1(NG-PON1)으로써 XG-PON에 대한 표준화를 2010년에 완료하였다[2-4]. 그럼에도 불구하고, 고품질 실감 미디어 서비스의 지원을 위한 가입자 접속 속도는 최소 1Gb/s에서 10Gb/s까지 요구되고 있으며, 그 서비스의 점진적 수요 증가에 따라 가입자 네트워크의 고용량화 및 고속화는 보다 가속화될 전망이다[3]. FSAN에서는 보다 증가된 전송용량 제공을 위한 NG-PON2 기술로써, 기 전개된 PON들과의 기술적 공존(Coexistence) 및 단기 실현 가능성 등에 대한 기술적 검토를 통해, 2012년 4월에 TWDM-PON(Time- and Wavelength-Division Multiplexed PON)을 채택하였고, 이에 대한 표준화는 2013년 6월까지 완료될 것

으로 예정되었다[3,5]. NG-PON3를 위한 기술로 2012년 당시 기술적으로 성숙하지 못했던 OFDMA-PON이 유망하며, 최근 이에 대한 연구에 관심이 집중되고 있다[3,6,7].

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multi-plexing)은 사용 가능 스펙트럼(Spectrum)을 좁은 스펙트럼 대역(Band)을 갖는 다수의 서브캐리어 (Subcarrier)들로 나누어 데이터(Data)를 병렬로 (Parallel) 저속 송수신하여 최종적으로 누적된 고용량 전송을 가능하게 하는 기술이다[6]. OFDM은 이미 유선의 DSL, 및 무선의 WiMAX, LTE 등에서 기 연구되었다. OFDM은 서브캐리어 간 직교성(Orthogonality)을 갖기 때문에 높은 주파수 효율을 통해 스펙트럼 당 전송용량이 높다. 또한, OFDM 방식은 광 미디엄(Optical Medium) 내의 광섬유 분산(Fiber Dispersion)에 강하여 장거리 전송에 유리하다[6-7]. 이러한 이유에서 40G 급 이상의 장거리 전송을 요구하는 NG-PON을 위해, OFDM 기반의 PON은 많은 관심을 받고 있지만, 대부분의 연구는 물리(PHY: Physical) 계층에 집중되어 있는 실정이다[8]. 그러나 OFDMA-PON의 실현을 위해서는 MAC(Medium Access Control) 기술에 대한 연구가 필수적이다.

II 장에서는 OFDMA-PON의 구조 및 시스템 동작에 대해 설명하고, III 장에서는 그 MAC 기술에 대한 전반적 내용과 기 연구된 상향 자원 할당 방법들에 대해 알아본다. IV 장에서는 OFDMA-PON의 연구 동향을 바탕으로, 향후 MAC 기술에 대해 전망한다. 그리고, V 장에서의 결론을 끝으로 본고를 마친다.

## II. OFDMA-PON 시스템 개요

### 1. 광 OFDMA

차세대 광 가입자 네트워크는, 기 전개된 네트워크들과의 공존(Coexistence)을 고려하면서, 40G 이상의 전송용량을 실시간으로 유연하게 128 이상의 광 가입자에게 경제적 비용으로 제공하는 것이 요구된다[2,6]. TDMA 방식은 저가형 40G 급 버스트 모드 수신기(Burst Mode Receiver)와 고속 광 소자들

의 부족으로 시스템을 구성하기 어렵다[6-9]. WDM 방식은 점대점(P2P: Point-to-Point)으로 각 단말 노드에 하나의 파장을 할당하며, 유연성(Flexibility)을 위해 별도의 장비로 네트워크를 재구성하여야 하므로 비용 효율적이지 않다. TDMA 및 WDM 방식에서의 단점 보완을 위해 하이브리드(Hybrid) WDM/TDMA-PON이 제안되기도 하였다[10].

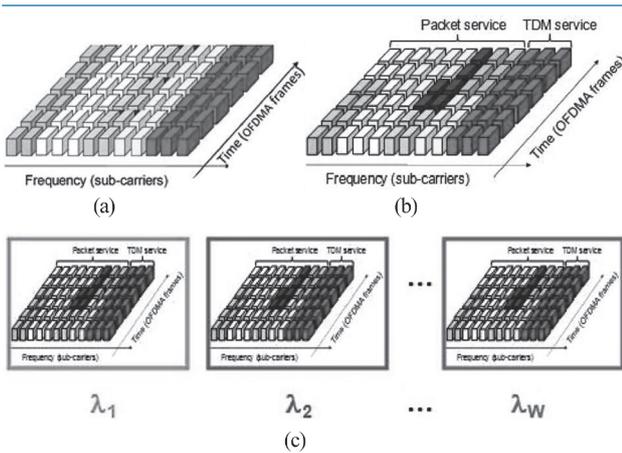


그림 1. Optical OFDMA variants: (a) OFDMA, (b) OFDMA+TDMA, (c) WDM+OFDMA+TDMA [7].

OFDMA-PON은 높은 주파수 효율로 40G 이상의 전송용량을 제공하며, 서브캐리어 단위의 유연한 대역폭 할당이 가능하다[6,8,11]. 그 고용량의 대역폭을 다수의 광 가입자에게 경제적이고 효율적으로 제공하기 위해, 다중 접속(Multiple Access)을 위한 MAC 기술이 필요하다. OFDMA-PON에서 광 OFDMA는 <그림 1>의 경우가 고려될 수 있다. 기본적으로, <그림 1(a)>에서처럼, OFDM 대역 (Band) 내에서 임의의 서브캐리어들을 단말 노드 별로 할당할 수 있다. 유연한 대역폭 할당을 위해, 실시간으로 트래픽 요구에 따라 단말 노드 별로 또는 서비스 별로 서브캐리어 수를 동적으로 변경할 수 있다. 여기서 보다 동적이고 세분화된 대역폭 할당을 위해, <그림 1(b)>에서처럼 같은 서브캐리어 내에서 다른 시간 슬롯(Time Slot)의 사용을 통하여 다수의 단말 노드에 2차원의 동적 대역폭 할당(예를 들면, OFDMA+TDMA)이 있을 수 있다. 이 1차원 및 2차원의 동적 대역폭 할당 방법은 MAC 계층의 프로토콜에 기반한 자원 할당 알고리즘과 이에 따라 수행되는 DSP에 의해 구현된다[6,7]. 그러나, 이 때의 MAC은 효율성 대비 구현 가능한 복잡도를 갖는 것이 요구된다. 2차원의 OFDMA 대역폭 할당에서 W개의 WDM 파장, 즉  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_W$ 를 이용해, <그림 1(c)>에서처럼 3차원의 동적 대역폭 할당 (예를 들면, WDM+OFDMA+TDMA)을 고려할 수 있다. 여기서 WDM은 점대점의 고정(Static) 파장 할당, 또는 파장 튜닝(Wavelength-Tuning)이 가능한 ONU 시스템을 사용

하여 OLT에서 동적(Dynamic) 파장 할당이 있을 수 있다. 이러한 광 OFDMA에서는 대역폭 할당을 이용한 데이터 송수신에 있어서 ONU의 colorless한 시스템 구성이 요구된다.

## 2. OFDMA-PON 구조

가장 일반적인 OFDMA-PON 구조는 점대다(P2MP: Point-to-Multi-Point) 방식의 트리형(Tree-type) 토폴로지(Topology)를 따른다. 2008년 NEC Lab, America는 10G 급 이기종(Heterogenous) 서비스 수용이 가능한 OFDMA-PON 구조를 OFC/NFOEC에서 최초로 발표하고[12,13], 유무선 융합 및 무선 백홀(Backhaul) 지원의 OFDMA-PON 기술을 꾸준히 발전시켜 나가고 있다[12,14].

유럽 FP7의 ACCORDANCE(A Converged Copper-Optical-Radio ofDma-based Access Network with high Capacity and fEXibility) 그룹도 트리형 토폴로지의 OFDMA-PON 구조를 제시하고, 2008년부터 2010년까지 이기종 서비스 지원을 위해 유연한 대역폭 할당이 가능한 저비용, 저복잡도의 OFDMA-PON 기술을 연구하였다[15-17]. <그림 2>에서의 토폴로지는 전화국(CO: Central Office)에 위치한 OLT(Optical Line Terminal)와 사용자 거주지에 위치한 ONU(Optical Network Unit) 또는 무선 기지국(BS: Base Station)들로 구성된다. 각 OLT와 ONU들은 광섬유를 통해 광분배기(Optical Splitter)를 거쳐 연결되어 있으며, 일부 광섬유는 무선 안테나 또는 DSL 인터페이스 스위치에 직접적으로 연결된다. OLT는 이기종 네트워크들의 수용을 위해 통합 관리 시스템으로써의 기능을 갖고 다수의 서브캐리어들을 관리하는 것이 필요하다. <그림 2>의 구조에서, OLT는 세그먼트(Segment) 단위로 다수의 네트워크 그룹들을 관리한다. 하나의 서브채널 (Subchannel)이 다수의 서브캐리어들로 구

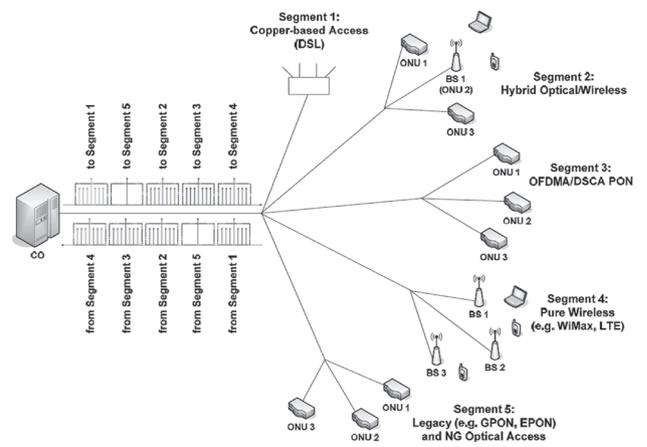


그림 2. Concept of OFDMA-PON architecture [15].

성된다고 할 때, 각 서브채널은 FDM(Frequency-Division Multiplex) 채널처럼 사용되어 각 세그먼트에 할당될 수 있다. 세그먼트에는 기 전개된 EPON 및 GPON 등의 TDMA-PON을 위치시킬 수 있으며, 무선 네트워크의 경우 FDM 윈도우의 일부 서브캐리어 셋(Set)이 RoF(Radio-over-Fiber)나 DoF(Digital-over-Fiber) 기술을 통하여 무선 OFDM 신호가 광 인프라를 통하여 전달되도록 직접적으로 무선 기지국에 할당할 수 있다. 그리고, 유선 및 무선 기술이 혼합된 하이브리드 광-무선 네트워크는 하나의 FDM 윈도우 내에서 서브캐리어들을 공유할 수 있다. 기존의 구리선 기반의 DSL의 경우, FDM 윈도우의 고정 할당을 통해 투명하게(Transparent) 동작될 수 있다. <그림 2>에서의 OFDM 기반 PON은 차세대를 고려한 기술 또는 기존의 TDMA-PON 기술의 프로토콜에 기반하여 동작될 수 있다. ACCORDANCE 이외에 ALPHA, DORADO, FIVER, PATRON, OTONES 등의 OFDM 기반의 광 네트워크 연구 프로젝트들이 존재하며, 이들의 연구 내용은 NEC 및 ACCORDANCE의 광 가입자를 위한 OFDMA-PON 기술 연구에 활용될 수 있을 것으로 보인다.

### 3. 시스템 구조 및 동작

<그림 2>의 OFDMA-PON 구조에서, OLT는 하향 데이터 전송을 위해 높은 대역폭(10~25GHz)을 갖는 단일 레이저 모듈을 사용한다[16]. 레이저를 통하여 송신된 광 OFDM 신호는 모든 ONU들에 전달(Broadcast)될 수 있다. 수 GHz로 분할된 대역폭의 선택적 수신을 함에도 불구하고, 하향 방향에서 ONU에서는 송신 레이저와 같은 대역폭(이 경우에는, 10~25GHz)에서의 수신이 가능해야 한다. 광 OFDM 신호를 수신하는 데 있어서, 수신기는 스펙트럼의 복조 방법(광 필드 변조(Optical Field Modulation) 또는 광 세기 변조(Optical Intensity Modulation))에 따라 설계된다. 수신기를 지난 광 OFDM 신호는 전자 영역(Electric Domain)으로 주파수가 다운컨버트(Down-Convert)되고, 이것은 ADC를 거쳐 DSP로 입력되어 처리된다.

상향에서는 각 세그먼트 별 할당된 서브채널의 전송속도를 사용하기 때문에, 각 ONU에서는 수 GHz 정도의 대역폭을 사용한다. OLT에서는 각 세그먼트로부터의 광 OFDM 신호 수신을 위해 파장 역다중화(Wavelength Demultiplexer) 이후에 APD 또는 PIN 수신기를 사용한다. 상향에서는 특히 광 OFDM 신호 간 OBI(Optical Beat Interference) 문제를 고려해야 한다. OBI는 다수 ONU들에 의해 다양한 레이저로 송신되는 광 OFDM 신호들을 실은 서브캐리어들이 OLT의 수신기의 주파

수 영역에서 중첩(Overlap)되어 발생한다. 이 OBI 문제를 완화하기 위해, 각 ONU 별로 WDM 방식처럼 서브채널 간 충분한 파장 간격을 두고 광 OFDM 신호를 전송하거나, 동기화된 OFDMA, TDMA 방식의 시간 슬롯(Time Slot) 기반의 상향 대역폭 할당 방법을 사용할 수 있다. 또한, 시스템 비용 및 복잡도는 증가되지만, 코히런트(Coherent)한 검출 방법을 사용할 수 있다[6,7,16].

## III. OFDMA-PON MAC 기술

OFDMA-PON의 고용량의 대역폭을 경제적이고 효율적으로 다수의 광 가입자들에게 할당하기 위해, 다중 접속(Multiple Access)을 제어하기 위한 MAC 기술이 필수적이다. MAC 계층에서는 효과적인 채널 관리를 위해 상하향 전송 채널을 분리하고, 다중 접속 제어를 위한 프로토콜을 설계하며, 효율적인 채널 이용을 위해 동적 대역폭 할당 기능을 구현해야 한다[8,17].

### 1. 상하향 채널 분리

기존의 TDMA-PON 시스템에서는 채널 관리 및 전송 효율 증가의 목적으로 상하향 전송 채널을 분리되어 있다[1]. 현재 OFDMA-PON은 표준화되지 않아, 상하향 파장이 정의되어 있지 않다. 그러나, 상향 전송시 코히런트(Coherent) 방식 및 저가형 ONU 시스템을 위한 직접-검출(Direct-Detection) 방식 모두를 수용하고, 직접-검출 방식의 사용에 따른 OBI 완화를 위한 방법 사용을 위해, OFDMA-PON에서도 상하향 채널 분리는 필요할 것으로 예상된다.

### 2. 다중 접속 (multiple access)

#### 2.1. Control Message Exchanges

다수 ONU들의 주파수 및 시간의 상향 자원에 대한 다중 접속을 제어하기 위해, OLT와 ONU들 간의 Control Message의 교환이 보장되어야 한다[1]. OFDMA-PON 역시 기 전개된 TDMA 방식의 EPON, GPON처럼 데이터 채널에서 OAM(Operations, Administration, and Management) Message를 교환할 수 있도록 설계될 수 있다. 또는, OFDMA-PON은 전체 스펙트럼을 다수의 좁은 대역으로 나누어 서브캐리어 단위로 이용이 가능하기 때문에, 독립된 Control Channel의 사용이 가능하다[13]. Control Channel의 사용은 OLT-ONU 간 빠른 제어가 가능하게 하지만, 예를 들어, 대역

폭 Request/Grant 및 시스템 동기화 등, 전체 서브캐리어의 수가 적어 하나의 서브캐리어 당 전송속도가 큰 경우 독립적인 Control Channel의 사용은 큰 대역폭 낭비를 초래할 수 있다.

## 2.2. ONU Discovery/Registration

OFDMA-PON에서 ONU의 활성화(Activation)는 Discovery/Registration Process를 통해 이루어 진다[1]. Registration 절차에서, ONU는 광 전송 및 수신기의 튜닝(Tuning) 시간, 지원되는 파장 범위, 최대 이용 가능한 서브캐리어 수, 가능한 변조 포맷 등에 대한 시스템 정보를 OLT에 알려주어야 한다[16,17]. OLT 역시 ONU의 활성화를 위해 사용할 변조 포맷, 전송 파장, 수신 파장 등에 대한 정보를 ONU에 전달해야 한다.

## 2.3. 적응형 변조

OFDMA-PON 시스템은 고차 변조 포맷을 사용하여 전송 용량을 증가시킬 수 있다[8,17]. 광 링크 상의 적응형 변조의 광 OFDM(AMOOFDMA: Adaptively Modulated Optical OFDM) 기술은 서브캐리어 별 파워 할당(Power Allocation)의 사용 없이 거리 당 전송 용량 최대화를 위해 광 OFDM 심볼 내에서 서브캐리어 별 변조 포맷을 조정한다[16,18]. 그러나, AMOOFDMA의 사용은 동적 대역폭 할당 (DBA: Dynamic Bandwidth Allocation) 프로세스 동안에 ONU 별 할당된 서브캐리어들에서 다른 전송 속도를 갖는 것을 의미하므로, 그 AMOOFDMA 방법은 MAC 계층의 DBA 프로세스와 연계(Cross-Layer)되어 동작되어야 한다. 그러나, AMOOFDMA 기능을 사용함에 있어서, 정상 동작 중인 ONU의 변조 포맷을 임의로 바꾸려고 하는 것은, Registration Process를 거쳐 다시 ONU가 활성화 되거나, 보다 복잡한 PHY-MAC 연계 알고리즘이 필요하므로 시스템 상에서 큰 이득이 없을 수 있다[15]. 또한, 일반적으로 광 링크상에서 QAM Depth에 변화를 줄 정도로 큰 변화가 없을 뿐 더러, 변조 포맷을 변경하기 위해 상당한 양의 Control Message들을 교환하여야 하기 때문에 잦은 변조 포맷 변경은 DBA 프로세스를 방해할 정도의 상당한 대역폭 낭비를 초래할 수 있다[17]. 추가적으로, AMOOFDMA 기술로 서브캐리어 별 다른 변조 포맷을 허용한다 하더라도, 각 ONU에 할당된 모든 서브캐리어들은 동일한 변조 포맷을 사용할 필요가 있다. 첫째로, AMOOFDMA 기능의 사용에 따라 DBPSK/DQPSK/m-QAM의 변조 포맷을 위한 변/복조기가 필요하게 되어, ONU 시스템 복잡도가 이미 증가하여 더 이상의 시스템 복잡도 증가를 막기 위함이며, 둘째로, 하나의 ONU에 할당된 서브캐리어들 간에, 특히 제한적인 수의 서브캐리어를 사용하

는 경우에, 서브캐리어 별 다른 변조 포맷을 사용하는 경우는 일반적이지 않기 때문이다[17]. Control Channel이 사용된 경우, 해당 채널에서는 시스템 안정성을 위해 고차 변조 포맷을 사용하지 않는 것이 바람직하다.

## 3. 동적 자원 할당

### 3.1. MAC 프로토콜

효율적인 네트워크 자원 할당 방법은 네트워크 성능 및 서비스 품질(QoS: Quality of Service)을 향상시킨다. 본 장에서는 <그림 1>에서의 2차원 자원 할당을 위한 MAC 프로토콜을 살펴본다. ACCORDANCE에서는 10GE-PON 기반의 OFDMA/TDMA 동작을 위한 MAC 프로토콜을 제안하였다[8,17]. 10GE-PON과는 다르게, OFDMA-PON에서 하향 데이터 송신을 위해 OLT는 각 ONU에 사용할 파장과 서브캐리어들을 알려주어야 한다. 이 때, ONU들은 시스템 복잡도와 비용을 낮추기 위해, 제한된 수의 하향 서브캐리어만 수신하도록 할 수 있다. 서브캐리어에 대한 정보를 알려주기 위해, <그림 3(a)>에서와 같이 OFDMA-PON을 위한 GATE 메시지에는 Low\_SC와 High\_SC의 두 개의 필드가 추가되어 ONU의 상향 전송을 위한 서브캐리어 및 시간 윈도우에 대한 정보를 제공한다. SCA (Subcarrier Allocation Identifier) 필드는 특정 ONU를 위한 대역폭 할당 모드를 설정할 때 사용된다. <그림 3(b)>의 Control Message는 수신기의 서브캐리어 범위 셋팅을 위해 사용된다.

OFDMA-PON GATE 메시지를 전달받게 되면, ONU는 상향으로 Start\_Time과 Stop\_Time으로 정의되는 시작과 끝 시

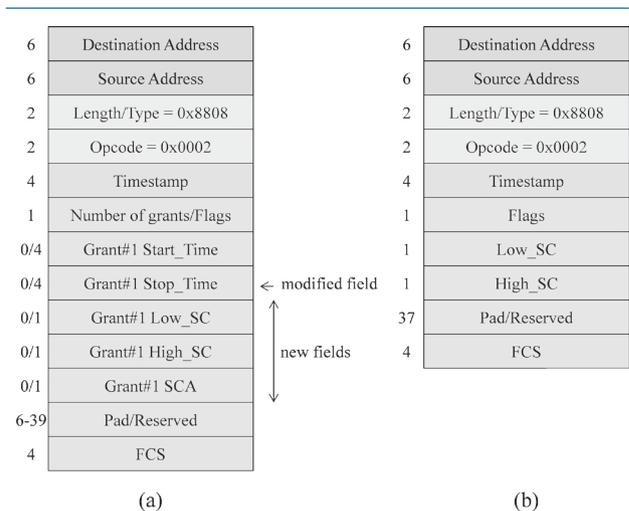


그림 3. (a) OFDMA-PON GATE MPCPDU for OFDMA/TDMA operation, and (b) newly inserted RX\_CONFIG MPCPDU for receiver subcarrier setting [17].

간을 갖는 시간 윈도우와 Low\_SC와 High\_SC로 정의되는 서브캐리어들로 구성되는 2차원 구조로 데이터를 전송할 수 있다 [17]. 각 2차원의 할당 영역은 가드 시간(Guard Time)을 두고 인접하여 전송할 수 있다. [8]에서는 5us, [13]에서는 10us의 가드 시간이 가정되었다. OFDMA/TDMA 방식으로 사각형 형태의 2차원 할당을 하는 이유는, 인접된 서브캐리어의 사용이 수신기에서의 처리가 쉽고, 다수 ONU들의 전송에 의한 서브캐리어 간 간섭을 최소화할 수 있기 때문이다. 또한, 이러한 구조는 최고 서브캐리어 인덱스(High\_SC)와 최저 서브캐리어 인덱스(Low\_SC)를 나타내는 두 필드를 추가함으로써 동작되기 때문에, MAC 프로토콜의 구조를 단순화한다.

NEC에서는 2008년 고정 버스트 전송(FBT: Fixed Burst Transmission)과 동적 서킷 전송(DCT: Dynamic Circuit Transmission)의 동작을 수행하기 위한 MAC 프로토콜을 제안하였다 [13]. FBT는 1-10ms의 고정 OFDMA 프레임 구조에 다수의 패킷을 넣어 전송하며, request/grant 신호를 이용한 상향 자원 예약을 통해 데이터를 전송하는 구조이다. 하나의 OFDMA 프레임은 고정 프레임(예를 들면, 125us)을 갖는 다수 슬롯을 가질 수 있다. DCT는 Three-way 시그널링을 이용한 서비스 연결(Service Connection) 기반의 CAC(Call Admission Control)을 이용하여 데이터를 전송하는 구조이다.

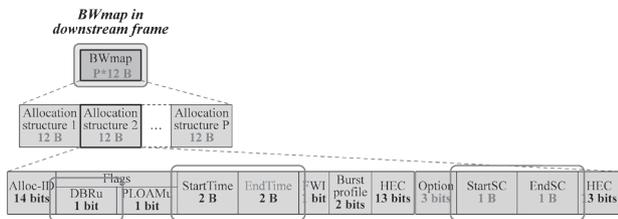


그림 4. BWmap of OFDMA-PON downstream frame (ETRI & GIST)

국내의 경우, OFDMA-PON MAC 관련 연구는 ETRI와 GIST가 주도하고 있다. ETRI와 GIST는 ACCORDANCE 및 NEC와의 차별성을 위해, 2012년에 XG-PON 기반의 OFDMA/TDMA 동작 수행을 위한 MAC 프로토콜을 제안하였다. 제시된 MAC 프로토콜은 하향 프레임에서 상향의 서브캐리어 자원을 할당하기 위해 Start\_SC와 End\_SC의 두 필드가 추가된 2차원 BWmap을 정의한다. 사각형 형태의 자원 할당의 이유는 앞서 설명한 그것과 같다. BWmap에서 HEC 필드는 Error Correction을 위해 추가되었고, Option 필드는 Future Use를 위해 남겨졌다. 그리고, XG-PON에서의 GrantSize 필드는 EndTime 필드로 변경되었다. ONU는 할당된 서브캐리어들과 시간 윈도우를 이용하여 상향으로 데이터 전송이 가능한데, 125us 프레임 내에서의 다양한 사각형은 내부 프로그래멘테이션(Fragmentation)을 발생시키므로 125us의 고정 시간 윈도우를 갖고 서브캐리어 수를 할당하는 것이 선호된다.

이전 (Fragmentation)을 발생시키므로 125us의 고정 시간 윈도우를 갖고 서브캐리어 수를 할당하는 것이 선호된다.

### 3.2. 동적 자원 할당

ACCORDANCE는 10GE-PON 기반의 OFDMA-PON MAC 프로토콜에 기반하여, 다소 휴리스틱한 방법의 상향 대역폭 할당 방법을 제안하였다[8]. 제안한 방법은 <그림 5>에서와 같이 ONU로부터의 요구량에 근거하여 지연 시간(Delay)를 최소화하는 2차원 사각형 영역을 찾아 해당 ONU에 할당한다. 이 경우, 서브캐리어 수의 제공에 해당하는 검색 복잡도를 갖는다. 이러한 문제를 완화하기 위해, 가능한 한 많은 수의 서브캐리어를 사용하는 경우(지연 시간이 적을 가능성이 높은 경우)부터 검색하여 최적의 사각형을 찾도록 하였다. 이와 더불어, 채널 이용률을 높이기 위해, 빈공간을 찾아 활용하는 방법도 제시되었다. [8]은ONU에서 사용 가능한 서브캐리어 개수에 따라 지연 시간 성능이 영향을 받으며, 최적의 서브캐리어 개수가 있음을 보였다. 그러나, [8]의 연구는 휴리스틱한 방법의 알고리즘이 제안되어 이를 구현하기에는 다소 복잡하며, 서비스 품질 보장을 위한 방법은 제시되지 않았다.

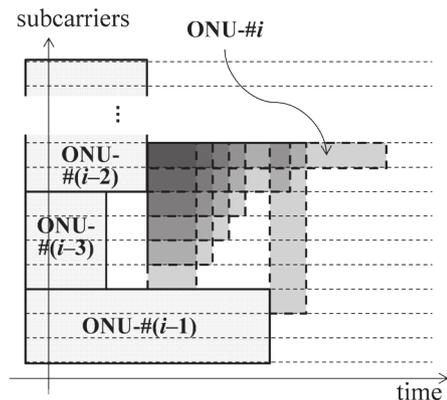


그림 5. Rectangle allocation (ACCORDANCE) [8].

ETRI와 GIST는 ACCORDANCE의 10GE-PON 기반의 OFDMA-PON MAC 프로토콜에 기반하여 다중 채널 (Multi-channel)에서의 IPACT 방법에 기반한 동적 대역폭 할당 방법을 제안하였다. 광 OFDM 대역의 서브채널을 동적 할당하는 것이 실험적 기능함에 근거하여 제시된 OFDMA-PON 구조에서, 전송 속도, ONU 수, 전체 서브캐리어 수, 변조 포맷 등에 대한 정보를 바탕으로 지연 시간을 수학적으로 분석하고 이를 시뮬레이션으로 검증하였다. <그림 7>에서 보는 것과 같이, S가 서브채널의 수라고 가정할 때, 하나의 ONU에 들어오는 트래픽에 따른 사이클 시간 분석이 시뮬레이션과 거의 일치됨을 볼 수 있다. IPACT 기반의 알고리즘에서 지연 시간은 2배의 사이클 시

간과 단방향 전송 지연의 합보다 작다. 도출된 분석 방법이 이용하여, 지연 시간을 보장하는 최대 대역폭 할당량, ONU 수, 및 최적의 서브캐리어 개수 등에 대한 파라메타 도출이 가능하며, 서비스 차등화 지원을 위한 대역폭 할당 방법으로서의 확장이 가능하다.

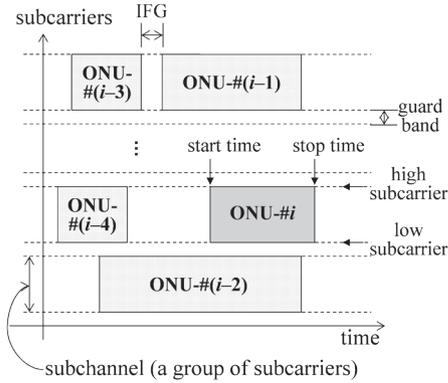


그림 6. Resource allocation (ETRI & GIST).

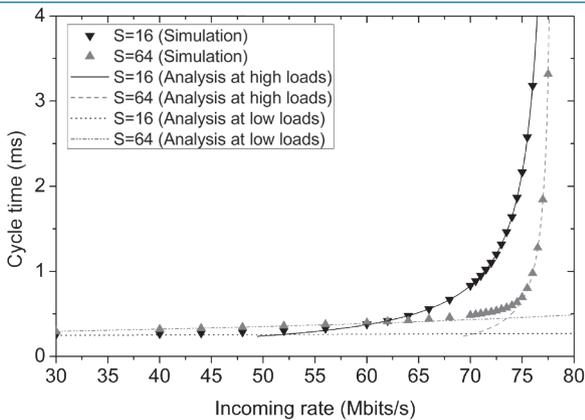


그림 7. Comparison between delay analyses and simulations in IPACT-based 2-D bandwidth allocation (ETRI & GIST).

ETRI와 GIST는 XG-PON 기반의 OFDMA-PON MAC 프로토콜을 바탕으로 시간 슬롯(Time Slot) 기반의 상향 자원 할당 방법도 연구하였다. 시간 슬롯 기반의 할당은 고정 프레임 시간(예를 들면, 125us) 안에서 다수의 ONU들을 위한 자원 할당이 가능해야 하기 때문에, 복잡도가 높은 알고리즘은 CPU 레벨의 ms 단위의 수행 시간(하드웨어 레벨은 us 단위의 수행 시간)을 필요로 하여 구현상에 어려움이 존재한다. 이러한 문제 때문에 Greedy 방식에 기반한 알고리즘을 제안하였다. 그러나, 서브캐리어 개수가 적을 때, 적은 데이터 양에도 불구하고 하나의 시간 슬롯을 할당하는 경우, 채널 이용률이 떨어져 전체 성능을 저하시킨다. 이에 대한 보안을 위해, 서비스 인터벌을 이용하여 및 오프셋(Offset) 방법을 이용하여 시간 슬롯 이용률을 높여 전체 성능을 향상시켰다.

현재의 OFDMA-PON MAC 기술은 기초적인 연구 수준이다. PHY에서의 특성을 고려한 MAC 제어에 어려움이 있어, 주로 프로토콜 설계 및 자원 할당 관련 연구에 집중되고 있다. 자원 할당 관련 연구에 있어서도, 처리율 보장, 지연 시간 보장 등을 통한 서비스 품질 향상을 위한 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

### 3.3. 다중 접속을 위한 자원 할당 가능성

OFDMA-PON의 동적 자원 할당을 위한 실험은 영국의 Bangor 대학을 중심으로 이루어지고 있다. Bangor 대학은 2009년부터 OFDMA-PON 기술의 핵심 요소 기술인 실시간 동작 가능한 FPGA 기반 DSP 관련 구현 기술에 대해 집중적인 연구를 진행해 오고 있다[3]. 2012년에는 스펙트럼의 서브밴드(Subband) 기반의 동적 할당의 가능성을 실험적으로 보였다 [18].

## IV. OFDMA-PON MAC 기술 전망

### 1. 모바일 백홀 기능 지원의 OFDMA-PON

LTE와 LTE-A의 4G 표준에서는 셀(Cell) 당 각 100 Mb/s와 1Gb/s의 데이터 속도를 목표로 한다[19]. 셀의 밀집도가 증가된 상황에서 이용 가능한 스펙트럼의 공간적 재사용(Spatial Reuse) 방법은 주파수 간섭(Interference)에 의한 송수신 파워 감소에 의해 전송 속도를 제한할 수 있다. 이러한 상황에서 낮은 지연 시간과 높은 서비스 품질을 보장하기 위해, 고용량의 고속 전송이 가능한 모바일 백홀(Backhaul) 네트워크가 필요하다. 이를 위하여, 광섬유 기반의 PON이 고려될 수 있다. 그러나, 기존의 PON은 모바일 백홀로써 기능하기 위해, 구조적이고 기능적으로 많은 변경이 필요했고, 단일 플랫폼으로 이기종 서비스를 제공하기 위한 추가적인 시스템 업그레이드 비용이 요구되었다 [14]. 2013년 NEC는 모바일 백홀 기능을 지원하는 광 네트워크의 기술적 과제에 대해 논의하였고, 모바일 백홀의 셀 당 100Mb/s 이상의 전송 속도를 제공하는 OFDMA-PON 구조를 제안하고 실험적으로 그 성능을 평가하였다. 그 OFDMA-PON 구조는 DSP를 이용한 디지털 RoF(dRoF: Digital Radio-over-Fiber)와 TDMA 방식을 사용하여 광섬유 링크 당 최대 200개의 셀 사이트를 수용할 수 있는 LTE-Adv 기반의 이동 통신 시스템용 모바일 백홀 트래픽 처리가 가능한 총용량 10Gb/s급 OFDMA/TDMA 하이브리드 PON 망에서 1ms 이하의 전송 지연 규격을 만족하는 버스트 모드 전송이 가능하다[3,14].

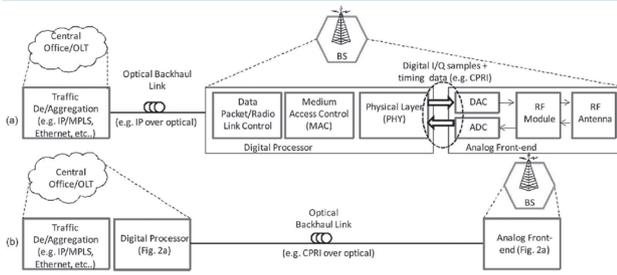


그림 8. OFDM-based mobile backhaul, (a) distributed architecture, and (b) centralized architecture [14].

## 2. 소프트웨어 정의된 OFDMA-PON

EU FP-7에서는 유연한 광 네트워크를 위한 3가지 핵심 요소 기술로서 Flexible Optical Transponder, Flexible Optical Switching Node, 및 Flexible Network Planning/Control Plane 이슈 등을 제안하고 이에 대한 활발한 연구를 진행하였다[3,4]. 상이한 PHY 기술을 갖는 광 네트워크의 전개 및 유지 비용을 줄이고, 네트워크 공존(Coexistence) 관점에서 하나의 플랫폼으로 다양한 서비스를 지원하기 위해, 2013년 AIT는 NEC와 함께, 소프트웨어-정의된(Software-Defined) 광 네트워크를 위한 OFDM 기반의 Meta-MAC에 대한 연구를 발표하였다[20]. Meta-MAC은 이기종 네트워크의 MAC의 상위에서 가상의 OFDMA 서브캐리어를 사용하여 대역폭을 효율적으로 관리하고 제어한다.

## V. 결론

본고에서는 차세대 광 가입자를 위한 OFDMA-PON MAC 기술에 대한 전반적 내용과 기 연구된 상향 자원 할당 방법들에 대해 알아보았다. OFDMA-PON MAC 프로토콜은 기존의 10GE-PON 및 XG-PON에 기반하여 OFDMA/TDMA 동작을 수행하도록 확장되어 정의될 수 있다. 이렇게 정의된 MAC 프로토콜을 바탕으로 몇몇의 상향 자원 활용을 위한 방법들이 제시되었다. 그러나, 제안된 방법들은 처리율 보장, 시간 지연 보장 등의 서비스 품질 보장에 대한 기능은 고려되지 않아, 향후 이에 대한 연구가 있을 것으로 예상된다. 또한, PHY와 MAC의 결합을 통한 OFDMA-PON 기술이 아직은 성숙단계에 있지 않아, MAC 계층에서의 연구는 모바일 백홀 및 소프트웨어 정의된 광 네트워크로 확장되고 있다. OFDMA-PON에 대한 연구는 NEC와 ACCORDANCE 연구 그룹들의 일부가 주도하고 있으나, 차세대 광 가입자 기술인 만큼 국내 연구 기관 및 학계의 기술 선점이 필요하다. 본고를 통해, 국내 연구자들이

OFDMA-PON MAC 기술에 대해 관심을 갖고, 국내 연구 기술의 향상을 있을 수 있기를 기대한다.

## 참고 문헌

- [1] J. Zheng and H.T. Mouftah, "Media access control for Ethernet passive optical networks: an overview," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 2, pp. 145-150, Feb. 2005.
- [2] J.-i. Kani, F. Bourgart, A. Cui, A. Rafel, M. Campbell, R. Davey, and S. Rodrigues, "Next-generation PON-part I: Technology roadmap and general requirements," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 11, pp. 43-49, Nov. 2009.
- [3] 임용재, 김동철, 이상수, 조승현, "차세대 광 가입자 기술: Next Generation Optical Access Technology," 한국방 송통신전파진흥원, PM Issue Report 2013-제2권 이슈1, pp. 1-26, 2013. (<http://www.kompass.or.kr>).
- [4] 이한협, 조승현, 이지현, 명승일, 이상수, "차세대 광가입자망 기술 및 표준화 동향," *전자통신동향분석 제27권 제2호*, pp. 89-98, 2012년 4월.
- [5] Y. Luo, X. Zhou, F. Effenberger, X. Yan, G. Peng, Y. Qian, and Y. Ma, "Time- and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation PON stage 2 (NG-PON2)," *J. Lightwave Technol.*, vol. 31, no. 4, pp. 587-593, Feb. 15, 2013.
- [6] N. Cvijetic, D. Qian, and J. Hu, "100 Gb/s optical access based on orthogonal frequency division multiplexing," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 7, pp. 70-77, Jul. 2010.
- [7] N. Cvijetic, "OFDM for next-generation optical access networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 30, no. 4, pp. 384-398, Feb. 15, 2012.
- [8] K. Kanonakis, E. Giacomidis, and I. Tomkos, "Physical-layer-aware MAC schemes for dynamic subcarrier assignment in OFDMA-PON networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 30, no. 12, pp. 1915-1923, June 15, 2012.
- [9] X.Z. Qiu, C. Mélangé, T. De Ridder, B. Baekelandt, J. Bauwelinck, X. Yin, and J. Vandewege, "Evolution

- of burst mode receivers," presented at the Eur. Conf. Opt. Commun. Conf., Vienna, Austria, Sep. 2009, Paper 7.5.1.
- [10] M.P. McGarry, M. Reisslein, C.J. Colbourn, M. Maier, F. Aurzada, and M. Scheutzow, "Just-in-time scheduling for multichannel EPONs," J. Lightwave Technol., vol. 26, no. 10, pp. 1204-1216, May 15, 2008.
- [11] N. Cvijetic, M. Cvijetic, M.F. Huang, E. Ip, Y.-K. Huang, and T. Wang, "Terabit optical access networks based on WDM-OFDMA-PON," J. Lightwave Technol., vol. 30, no. 4, pp. 493-503, Feb. 15, 2012.
- [12] NEC Laboratories America, Inc. (<http://www.nec-labs.com/index.php>)
- [13] W. Wei, T. Wang, D. Qian, and J. Hu, "MAC protocols for optical orthogonal frequency division multiple access (OFDMA)-based passive optical networks," presented at the IEEE/OSA Opt. Fiber Commun. Conf., San Diego, CA, Mar. 2008, Paper JWA82.
- [14] N. Cvijetic, A. Tanaka, M. Cvijetic, Y.-K. Huang, E. Ip, Y. Shao, and T. Wang, "Novel optical access and digital processing architectures for future mobile backhaul," J. Lightwave Technol., vol. 31, no. 4, pp. 621-627, Feb. 15, 2013.
- [15] ACCORDANCE (<http://www.ict-accordance.eu/Eng>)
- [16] K. Kanonakis, I. Tomkos, T. Pfeiffer, J. Prat, and P. Kourtessis, "ACCORDANCE: a novel OFDMA-PON paradigm for ultra-high capacity converged wireline-wireless access networks," ICTON, Munich, June 27-July 1, 2010, pp. 1-4.
- [17] K. Kanonakis and I. Tomkos, "An overview of MAC issues in OFDMA-PON networks," ICTON, Stockholm, June 26-30, 2011, pp. 1-4.
- [18] C. H. Yeh, C. W. Chow, H. Y. Chen, and B. W. Chen, "Using adaptive four-band OFDM modulation with 40 Gb/s downstream and 10 Gb/s upstream signals for next generation long-reach PON," Opt. Express, vol. 19, no. 27, pp. 26150-26160, Dec. 2011.
- [19] Long Term Evolution (LTE) and LTE-Advanced Specifications, (<http://www.3gpp.org/LTE>)
- [20] K. Kanonakis, N. Cvijetic, I. Tomkos, and T. Wang, "Dynamic software-defined resource optimization in next-generation optical access enabled by OFDMA-based Meta-MAC provisioning," J. Lightwave Technol., vol. 31, no. 14, pp. 2296-2306, July 15, 2013.

## 약 력



박 창 준

2006년 한양대학교 컴퓨터공학 학사  
 2009년 광주과학기술원 정보통신공학 석사  
 2013년 광주과학기술원 정보통신공학 박사(예정)  
 관심분야: 유무선 통신 시스템 및 네트워크



박 창 수

1979년 한양대학교 전자공학 학사  
 1981년 서울대학교 전자공학 석사  
 1990년 Texas A&M University 전자공학 박사  
 1982년~1987년 한국전자통신연구원 선임연구원  
 1987년~1990년 Research Assistance, Engineering Research Center, Texas A&M University  
 1991년~2000년 한국전자통신연구원 실장  
 2000년~현재 광주과학기술원 정보통신공학과 교수  
 2012년~현재 문화컨텐츠기술연구소 기획단장  
 관심분야: 유무선 통신 시스템 및 네트워크, 광 신호 처리, 바이오 옵틱, 3D 이미징, UWB, 가시광통신(VLC)