

# VR HMD를 위한 무선 전송 기술 비교

오 민 석\*

## Comparison of Wireless Transmission Technologies for VR HMD

Minseok Oh\*

요 약

최근에 가상현실(Virtual Reality, VR)에 대한 관심이 크게 늘어 사용자 수 또한 점점 늘고 있는 추세이다. 하지만 아직도 VR 헤드셋(Head Mounted Display, HMD)과 PC 콘솔의 연결이 유선으로 되어 있어 VR 체험에 몰입하는데 제약을 주고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 유선을 무선으로 대체하려는 노력이 진행되고 있다. 본 논문에서는 VR 헤드셋이 콘텐츠 서버와 연결될 때에 필요로 하는 기술 요구 조건을 조사하고 이를 최근의 무선 전송 기술의 성능과 비교 분석하여 어느 부분이 만족스럽고 어느 부분이 더욱 성능 향상이 필요로 하는지 알아보고자 한다. 이는 VR을 체험하고자 하는 사용자의 몰입감을 더욱 향상시켜 VR의 확산에 크게 도움이 될 것이라 확신한다.

**Key Words** : Virtual Reality, Head Mounted Display, IEEE 802.11ax, IEEE 802.11ay, Wireless, 5G

### ABSTRACT

The number of VR (Virtual Reality) users has been increasing as it becomes popular. However, since the connection between VR HMD(Head Mounted Display) and PC console is wired, it reduces the immersive experience for VR users. To solve this problem an effort to replace it with wireless connection is being made. In this paper we investigate the conditions that VR HMD requires to be connected with a content servers and study the wireless transmission technology candidates available. Hence we figure out which conditions are supported without degradation and which capabilities of the transmission technology are still in need of enhancement. This will help immersive VR experience so that the VR industry expands.

### I. 서 론

VR(Virtual Reality)은 초기에 일부 게이머들에서부터 시작하여 사용자 수가 점차 늘어 가족들과의 대화, 업무용 회의 목적으로 사용될 것으로 기대된다. 또한 드론, 로봇, 그리고 무인자동차가 지금까지 사람이 쉽게 도달할 수 없었던 곳들에 접근하여 이미지를 제공함으로써 우리는 세계 도처의 놀라운 광경을 접하기도 한다. 더불어 앞으로 VR은 더욱 사적이고 몰입적인 경험을 제공할 것이다. 하지만 오늘날 오클러

스 리프트나 HTC 바이브와 같은 최신의 기기들은 VR 헤드셋(Head Mounted Display, HMD)에 전력과 고화질의 이미지를 전송하기 위해 케이블에 의존하고 있다. 이 케이블은 번거로울 뿐만 아니라 때때로 몰입감을 경감시키기도 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 HMD 개발자들은 PC 콘솔과 VR HMD를 무선으로 연결하기 위해 노력하고 있다. 하지만 VR 기기의 성능이 높아질수록 고해상도의 비디오를 높은 프레임 속도로 전송해야하기 때문에 불가피하게 유선 선로를 이용해야하는 어려움이 있기도 하다. 무선 전송기술이

\* 이 논문은 2017학년도 경기대학교 연구년 수혜로 연구되었음

•° First and Corresponding Author : Kyonggi University Department of Electronic Engineering, msoh@kgu.ac.kr, 종신회원  
논문번호 : 201902-466-0-SE, Received February 8, 2019; Revised February 25, 2019; Accepted March 4, 2019

진보함에 따라 성능에 있어 큰 뒤집 없이 유선 선로를 대체할 수 있을 것으로 보이지만 VR HMD의 몇몇 분야에 있어서는 아직까지도 개선될 여지가 있다.

본 논문에서는 HMD가 어떠한 네트워크 환경에서 사용되는지 알아보기 위해 유즈 케이스(use case)를 소개하고 그에 따른 네트워크 토폴로지를 제시한다. 그리고 VR HMD를 위해 무선 전송기술로서 사용될 수 있는 후보 기술들을 소개하고 그 기술들의 성능과 무선 VR HMD의 요건을 비교하여 어느 부분이 이미 만족하고 있으며 어느 부분에서 개선이 필요한지 논의한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 VR 시스템의 유즈 케이스를 소개하고 3장에서는 만족스러운 VR 체험을 위해 기술 요구사항을 제시한다. 4장에서는 무선 VR HMD에 적용할 수 있는 무선기술의 성능을 알아보고 5장에서는 기술 요구사항과 무선기술의 성능을 비교하고 6장에서는 결론을 맺는다.

## II. VR 환경의 네트워크 토폴로지

VR HMD는 다양한 용도에 맞는 여러 네트워크 토폴로지의 형태를 나타낸다. 이 장에서는 현재 또는 향후에 사용될 수 있는 4 개의 유즈 케이스를 소개한다<sup>[1]</sup>.

### 2.1 케이스 1 - LAN으로 연결된 하나의 VR HMD

하나의 VR HMD가 로컬 콘텐츠 서버(예를 들어, PC나 게임 콘솔)와 LAN(Local Area Network)을 통해서 교신하는 경우이다. HMD의 움직임이 LAN을 통해서 콘텐츠 서버로 전달되면 콘텐츠가 로컬 콘텐츠 서버에서 생성되어 LAN을 통해서 HMD로 전송된다. 이 유즈 케이스의 예로서 사용자가 게임 콘솔에 연결된 VR HMD를 쓰고 혼자서 VR 게임을 하는 경우를 들 수 있다. 이 경우 사용자는 작은 제한된 영역에서 게임을 하게 되며 다른 영역으로의 이동이 없다.

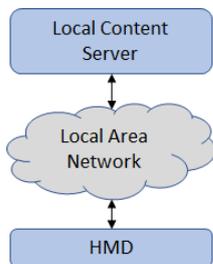


그림 1. 케이스 1 - LAN으로 연결된 하나의 VR HMD  
Fig. 1. Case 1 - A single VR HMD connected via a LAN.

### 2.2 케이스 2 - WAN으로 연결된 하나의 VR HMD

하나의 VR HMD가 리모트 콘텐츠 서버(예를 들어, 서버가 지역적으로 멀리 떨어져 있는 경우)와 WAN(Wide Area Network)을 통해서 교신하는 경우이다. HMD의 움직임이 WAN을 통해서 콘텐츠 서버로 전달되면 VR 콘텐츠가 리모트 콘텐츠 서버에서 생성되어 WAN을 통해서 다시 HMD로 전송된다. 리모트 콘텐츠 서버는 HMD와 WAN으로 연결되어 있으며 WAN은 유선망과 무선망의 조합으로 구성되어 있다. 이 유즈 케이스의 예는 사용자가 스마트폰 기반 VR HMD를 쓰고 VR 환경에서 야구 경기를 보는 경우가 된다. WAN에 직접 HMD가 접속되는 경우 사용자는 한 영역에서 다른 영역으로 이동할 수 있기 때문에 이동성이 매우 중요하게 된다.

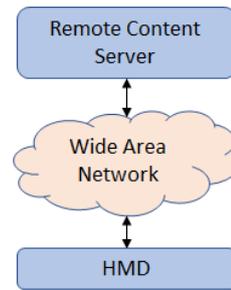


그림 2. 케이스 2 - WAN으로 연결된 하나의 VR HMD  
Fig. 2. Case 2 - A single VR HMD connected via a WAN.

### 2.3 케이스 3 - LAN으로 연결된 다수의 VR HMD

한 개 이상의 VR HMD가 리모트 콘텐츠 서버에 연결되어 있는 경우이다. HMD의 움직임이 LAN을 통해서 로컬 콘텐츠 서버로 전달되고 그 중에서 다른 사용자의 움직임과 관련된 데이터는 WAN을 통해서 리모트 콘텐츠 서버로 전달된다. 리모트 콘텐츠 서버는 로컬 콘텐츠 서버가 보낸 데이터를 계산하고 처리하여 다시 로컬 콘텐츠 서버로 보내는 역할을 한다. VR HMD는 로컬 콘텐츠 서버에서 생성된 VR 콘텐츠를 수신한다. 이 유즈 케이스의 하나의 예는 다른 로컬 서버에 연결되어 있는 VR HMD를 이용하는 다른 원거리 사용자와 VR 게임을 하는 경우가 된다. 유즈 케이스 1의 경우처럼 HMD가 LAN에 접속되어 있는 경우 사용자는 작은 제한된 공간에서만 이동을 하며 다른 공간으로 이동은 하지 않는다.

### 2.4 케이스 4 - WAN으로 연결된 다수의 VR HMD

하나 이상의 VR HMD가 리모트 콘텐츠 서버와 교

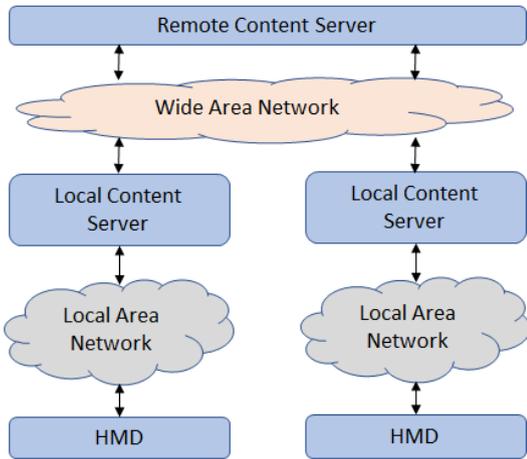


그림 3. 케이스 3 - LAN으로 연결된 다수의 VR HMD  
Fig. 3. Case 3 - Multiple VR HMDs connected via a LAN.

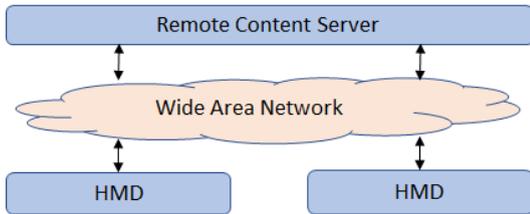


그림 4. 케이스 2 - WAN으로 연결된 다수의 VR HMD  
Fig. 4. Case 2 - Multiple VR HMD connected via a WAN.

신하며 리모트 콘텐츠 서버에서 생성된 VR 콘텐츠를 받는 경우이다. 이의 예는 두 명 이상의 사용자가 스마트폰 기반 VR HMD를 이용하여 각자의 장소에서 실시간으로 전해지는 비디오 게임 경기를 관람하는 경우가 된다. 유즈 케이스 2에서처럼 이 경우 사용자는 한 영역에서 다른 영역으로 이동할 수 있기 때문에 이동성이 매우 중요하게 된다.

### III. 무선 VR HMD의 기술 요구 사항

IEEE 802<sup>[2]</sup>, MPEG (Moving Picture Experts Group)<sup>[3]</sup>, 3GPP (Third Generation Project Partnership)<sup>[4]</sup>와 같은 표준화 기구에서 VR HMD를 위한 네트워크 관련 이슈 및 기술 요구 사항들을 언급하고 있다. 이에 VR 관련 단체에서도 콘텐츠 서버와 HMD 장치 사이의 연결 관련하여 좀 더 구체적인 네트워크 요구 사항을 도출할 필요가 있다. 그 요구 사항들로서 높은 프레임 속도, 낮은 motion-to-photon

지연시간, 높은 데이터 전송 속도, 낮은 지터, 긴 전송 거리, 높은 이동성, 고해상도, 낮은 패킷 에러율 등이 있다. 주요 기술 요구 사항에 대해 좀 더 세부적으로 기술하면 다음과 같다.

첫 번째는 최고 전송 속도이다. 전송 속도는 시간당 전송할 수 있는 콘텐츠의 양과 직접적 관련이 있는 중요한 기술 요구 사항이다. 8 bits/color의 bit depth를 사용하는 경우 최고 전송 속도는 표 1과 같다.

위의 예에서는 프레임 속도를 60 frames/s로 하였으나 실제 VR HMD의 경우 좀 더 높은 90 frames/s 이상을 사용하므로 이 경우에는 요구되는 전송 속도가 위에 언급된 속도보다 더 높아질 수 있다.

두 번째는 Motion-to-Photon/Audio Latency이다. 지연시간이 길어질 때 어지러움 및 멀미가 심해지므로 HMD 구현에서 중요한 기술 요구 사항이다. motion-to-photon 지연시간은 20 ms 보다 작거나 같아야 한다<sup>[4]</sup>. 또한 무선 구간만의 지연시간은 5 ms 보다 작아야 한다<sup>[5]</sup>.

세 번째는 지터(Jitter)이다. 지터가 큰 경우 영상과 음성을 복원하는데 왜곡을 일으킬 수 있다. 지터는 5 ms 이하이어야 한다<sup>[2]</sup>.

네 번째는 전송 거리이다. 데이터를 전달할 수 있는 거리를 의미하며 VR HMD의 송수신 장치는 전송 거리 이내에 있어야 한다. 실내에서는 5 m x 5 m를 초과해서는 안 된다<sup>[2]</sup>. 실외에서는 수백 미터에 이를 수 있다.

다섯 번째는 이동성이다. HMD를 사용 중에 실내에서는 한정된 구간 내에서 이동이 있을 수 있으며, 실외에서는 지역을 이동하는 경우가 있을 수 있을 것이다. 이 두 경우 모두 데이터 전송이 가능해야 한다. 실내에서는 4 km/h 보다 작다<sup>[2]</sup>. 실외에서는 최고 300 km/h까지 될 수 있다.

여섯 번째는 패킷 에러율 (Packet Error Rate, PER)

표 1. 8 bits/color의 bit depth 경우에 대한 최고 전송 속도<sup>[5]</sup>  
Table 1. Peak data rate for bit depth of 8 bits/color<sup>[5]</sup>

Compression	Resolution	FPS(frames/s)	Color depth (bits/pixel)	Chroma subsampling	Peak data rate [Gbps]
Compressed	4K UHD (3840x2160)	60	24	n/a	1.5
Compressed	8K UHD (7680x4320)	60	24	n/a	8
Uncompressed	4K UHD (3840x2160)	60	n/a	(4:4:4)	18
Uncompressed	8K UHD (7680x4320)	60	n/a	(4:2:0)	28

이다. 수신되는 데이터에 오류가 많으면 HMD의 화질에 부정적 영향을 주기 때문에 중요한 기술 요구 사항이 된다. 에러 보정 기술이 적용되기 이전의 PER이 10E-2 보다 작아야 한다.

일곱 번째는 해상도이다. 40 pixels/degree 또는 12K (11520x6480)가 필요하다<sup>3)</sup>. pixels/degree란 구의 원점에서 바라보았을 때에 1도의 각도 안에 놓인 픽셀의 수를 일컫는다. 4K UHD (3840x2160)이 현재의 디스플레이 기술을 고려할 때에 적절할 수 있지만 매끄러운 VR 체험을 위한 HMD의 기술 요구 조건은 그렇지 않다. 왜냐하면 HMD는 눈에 매우 가까이 위치하고 있어 화면이 확대되므로 더 높은 해상도를 필요로 하기 때문이다. 해상도는 VR HMD의 기술 요구 조건이지 무선 전송 기술의 요구 조건은 아니다.

여덟 번째는 프레임 속도이다. 추천하는 프레임 속도는 90 frame/s(fps) 또는 그 이상이어야 한다. 프레임 속도는 motion-to-photon 지연 시간과 매우 밀접한 관계가 있다. 이는 프레임 속도가 낮은 경우 사용자의 움직임 또한 천천히 화면에 반영되기 때문이다. 프레임 속도가 낮을수록 감각 기관을 교란시켜 피로감과 멀미를 유발하게 된다. 프레임 속도는 VR HMD의 기술 요구 조건이지 무선 전송 기술의 요구 조건은 아니다.

표 2는 2장에서 소개한 유즈 케이스와 위에서 설명한 기술 요구 사항과 관계를 보여준다. 해상도와 프레임 속도는 무선 전송 기술과 직접적으로 관련이 없기 때문에 제외하였다.

표 2 유즈 케이스와 네트워크 기술 요구 사항과의 관계  
Table 2. Relation between use cases and network requirements.

Use Case	Network Requirements					
	Data rate	Latency	Jitter	TX range	Mobility	PER
1. Single VR System via LAN	●	●	●	●	○	●
2. Single VR System via WAN	●	●	●	●	●	●
3. Multiple VR Systems via LAN	●	●	●	●	○	●
4. Multiple VR Systems via WAN	●	●	●	●	●	●

#### IV. VR HMD를 위한 무선 전송 기술 표준

VR HMD를 위한 몇몇 무선 전송 기술이 현재 개

발 중에 있다. 일부는 이미 표준화가 완료되어 상용화가 시작되었으며 일부는 현재 표준이 한창 진행 중에 있다. 이 장에서는 VR HMD 측면에서 그들의 성능을 살펴보고자 한다.

##### 4.1 IEEE 802.11ax

802.11ax Task Group은 2018년 7월 현재 Draft 3.0을 만들었으며 2019년 말에 표준을 완성할 예정이다. 802.11ax는 2.4 GHz 와 5 GHz 대역에서 동작한다. 802.11ax의 주목표는 802.11ac 대비 4배의 전송 속도에 도달하는 것과 밀집 환경에서도 전송속도의 강하가 덜 되도록 하는 방안을 제공하는 것이다<sup>6)</sup>.

전송속도 향상을 위해 표준에서 채택한 주요 기술들을 물리계층의 것부터 나열하면 다음과 같다. 802.11ax는 주파수 효율을 향상시키기 위해 uplink(UL) Multi-User Multiple-Input and Multiple-Output(MU-MIMO)와 Orthogonal Frequency Division Multiple Access(OFDMA)를 채택, downlink(DL) MU-MIMO가 지원하는 단말기의 수는 8개로 증가, Quadrature Amplitude Modulation(QAM)의 order는 1024로 증가하여 이론적으로 9.607 Gbps의 전송속도를 낼 수 있도록 하였다.

MAC 계층에서는 UL MU-MIMO의 스케줄링을 위해 Access Point(AP)가 단말기로 보내는 트리거 프레임들을 새로이 정의하였으며, 전송 효율을 높이기 위해 다중 단말 블록 ACK(Block ACK, BA) 시퀀스 포맷, MU cascading 시퀀스 포맷을 정의하였다. 또한 UL OFDMA 기반 랜덤 액세스 기법을 추가하여 단말기로 하여금 임의의 Resource Unit(RU)에서 UL 데이터를 전송할 수 있도록 하였다. spatial reuse 기법을 더욱 활용하기 위해 BSS 컬러 시그널링을 채택하여 이웃 BSS로부터 감지된 신호의 크기가 클지라도 전송 시도를 할 수 있게 하였다.

이러한 802.11ax의 노력으로 이상적인 환경에서 10 Gbps에 가까운 전송 속도를 얻었지만, 지연 시간, 지터, 전송 거리, 이동성, PER의 성능 분야에 대해서는 아직 측정 또는 계산된 바가 없어 구체적인 비교 분석에 어려움이 있다<sup>6)</sup>.

##### 4.2 IEEE 802.11ay

802.11ad의 후속 기술을 개발하기 위해 IEEE 802.11ay Task Group이 2015년 5월에 결성되었으며 60 GHz 대역에서 100 Gbps 또는 그 이상의 전송 속도를 얻는 것을 목표로 하고 있다. 2018년 10월에 Draft 2.1을 만들었으며 2019년 12월에 표준을 완성

할 예정이다.

802.11ay는 물리계층에서 채널 본딩 및 채널 aggregation 기술을 사용하여 전송 속도를 증가시켰으며, 단말기당 spatial stream의 수는 최대 8개까지 지원하며 DL MU-MIMO은 최대 8개의 단말기까지 지원하도록 하여 주파수를 효율적으로 사용하도록 하였다<sup>7)</sup>.

802.11ay에서는 이상적인 환경에서 최고 100 Gbps의 전송 속도까지 나오며, 지연 시간은 10 ms, 실내에서 전송 거리 10 m, 실외에서 전송 거리 100 m, 이동성 3 km/h의 성능을 나타낸다<sup>5)</sup>.

### 4.3 3GPP

Wi-Fi의 제한된 송수신 범위를 벗어나 더 큰 이동성을 제공한다면 VR가 사용되는 영역을 확장할 수 있다. 이러한 확장성을 제공할 수 있는 유일한 전송 기술은 4G 기술의 하나인 Long Term Evolution(LTE)일 것이다. 하지만 옥외에서 HMD를 제대로 사용하기에는 전송 속도가 충분히 높지 않다(하향 최대 100 Mbps). 2018년 말부터 일부 지역에서 서비스를 제공하기 시작한 5G는 아마도 옥외에서의 HMD를 지원할 수 있을 것으로 예상된다<sup>8)</sup>. 5G 기술을 개발해왔던 3rd Generation Project Partnership (3GPP)는 다른 전송 기술에 비해 보다 VR에 적극적으로 대응하여 3GPP의 기술을 활용한 VR 서비스에 대한 보고서도 작성하였다<sup>9)</sup>. 이 보고서에서 비디오 및 오디오 신호 처리를 위한 블록을 정의하였으며 여러 유즈 케이스와 성능 측정 방법을 제안하였다.

5G 전송 기술은 최고 20 Gbps의 전송 속도를 제공한다. 하지만 밀집된 실제 상황에서 사용자의 얻을 수 있는 속도는 대략 100 Mbps 정도로 파악된다. 지연 시간은 1 ms, 이동성은 500 km/h 정도로 예상된다<sup>4)</sup>.

## V. 무선 전송 기술과 VR HMD 기술 요구 사항의 비교

이 장에서는 VR HMD에 적용할 수 있는 무선 전송 기술들의 성능과 VR HMD 시스템의 기술 요구 조건을 비교한다. 이러한 비교는 어느 부분이 이미 요구 조건을 만족하고 어느 부분이 성능 향상을 필요로 하는지 이해하는데 도움을 줄 것이다. 표 3는 이러한 비교를 보여 준다<sup>10)</sup>.

해상도가 7,680x4,320 이상이고, 프레임 속도 60 fps, 콘텐츠가 압축되지 않은 경우 VR HMD는 최고 전송 속도 28 Gbps를 필요로 한다. 이 경우 IEEE

표 3. VR 기술 요구 조건과 무선 전송 기술  
Table 3. VR requirements and capabilities of wireless transmission technology candidates.

		VR HMD Requirements	Capabilities		
			802.11ax <sup>[6]</sup>	802.11ay <sup>[5]</sup>	IMT-2020 <sup>[4]</sup>
Data transmission rate		~ 20 Gbps <sup>[2]</sup>	~10 Gbps (at least 4 times improvement over 802.11ac)	~100 Gbps	20 Gbps peak, 100 Mbps user-experience data rate
Latency		~ 5 ms (at wireless medium) <sup>[2]</sup> , 20 ms (motion-to-photop/audi o) <sup>[3]</sup>	“A desirable level to meet QoS requirements in high dense deployment scenario”	10 ms	1 ms
Jitter		< 5 ms <sup>[2]</sup>	Not specified	Not specified	Not specified
Transmission range	Indoor	5 m <sup>[2]</sup>	Not specified	10 m indoor	Not specified
	Outdoor	Several hundred meters		100 m outdoor	
Mobility	Indoor	Pedestrian speed $\leq$ 4 km/h <sup>[2]</sup>	Not specified	3 km/h	500 km/h
	Outdoor	300 km/h			
PER		10E-2 <sup>[2]</sup>	Not specified		Not specified

802.11ax의 전송 속도는 VR HMD의 요구 조건을 충족시키지 못할 수 있다. 프레임 속도가 60 fps 이상일 경우에는 더욱 충족하기 어려워질 것이다. 지터, 전송 거리, 이동성, PER이 구체적으로 명시되지 않았지만 VR HMD가 전송 거리가 짧은 실내에서 사용된다면 대부분의 요구 조건을 만족할 것으로 예상된다.

IEEE 802.11ay의 경우 지연 시간(요구 조건 5 ms와 성능 10 ms)을 제외하고 VR HMD의 요구 조건을 대부분 만족할 것으로 보인다. 802.11ay의 100 Gbps 전송 속도는 4K 이상의 해상도 콘텐츠를 전송하는데 충분할 것이다. 하지만 60 GHz 대역 전자기파의 직진성으로 인해HMD의 이동이 잦을 경우 사용자의 몰입감이 줄어들어 이동성에 문제가 있을 수 있을 것으로 예상된다. 이는 빔포밍 알고리즘의 성능 향상과 연관되어 있으며 이를 향상시킬 방안을 간구할 필요가 있을 것이다.

5G 또는 IMT-2020은 압축을 사용한다면 8K의 해상도까지도 지원 가능하다. (VR 요구 조건 20 Gbps와 IMT-2020 성능 20 Gbps) 그러나 옥외 환경에서 특히 단말기가 밀집된 장소에서는 IMT-2020의 전송 속도가 100 Mbps로 내려가 무선 VR HMD의 화질이

떨어질 수 있다. 하지만 IMT-2020은 이동성에서 우수하여 고속철과 같은 곳에서 VR HMD를 사용할 수 있을 것으로 보인다.

## VI. 결 론

무선 VR HMD의 수요는 점차 커질 것으로 예상되며, 몇몇 VR HMD의 요구 조건은 앞으로 나올 무선 전송 기술에 의해 만족될 것으로 보인다. 하지만 몇몇 요구 조건은 아직도 성능이 도달하지 못한다. 가장 성능 향상이 필요로 되는 분야는 전송 속도이며 이는 VR HMD의 해상도가 높아질수록 더욱 큰 문제가 될 것이다. IEEE 802.11ay나 5G는 현재의 VR HMD의 기술 요구 조건을 대부분을 만족하지만 IEEE 802.11ay의 경우 지연시간 및 이동성, 5G의 경우에는 전송 속도에 약간의 문제가 있을 것으로 파악된다. IEEE 802.11ax의 후속 기술로 예상되는 IEEE 802.11 EHT(Extremely High Throughput) 기술에서는 VR HMD를 지원하기 위한 여러 기술 요구 조건을 만족하기 위한 기술들이 포함되기를 기대한다.

## References

[1] *A White Paper on Use Cases and requirements for supporting HMD-based VR Applications*(2018), Retrieved Jan. 30, 2019, from <https://mentor.ieee.org/802.21/dcn/18/21-18-0061-02-0000-a-white-paper-on-use-cases-and-requirements-for-supporting-hmd-based-vr-applications.docx>.

[2] R. Sun, et al., *IEEE 802.11 TGay Use Cases*(2017), Retrieved Jan. 30, 2019, from <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-0625-07-00ay-ieee-802-11-tgay-usage-scenarios.pptx>.

[3] M. Champel, et al., *Quality Requirements for VR*, ISO/IEC JTC1/ SC29/WG11 MPEG 116 Std. m39532, Oct. 2016.

[4] IMT-Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, Recommendation ITU-R M.2083-0, Sep. 2015.

[5] R. Sun, et al., *TGay Functional Requirements* (2015), Retrieved Jan. 30, 2019, from <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1074-00-0>

ay-11ayfunctional-requirements.docx.

[6] IEEE P802.11ax/D3.0 Draft Standard: *Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications - Amendment 6: Enhancements for High Efficiency WLAN*, Jun. 2018.

[7] IEEE P802.11ay/D2.1 Draft Standard: *Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications - Amendment 7: Enhanced throughput for operation in license-exempt bands above 45 GHz*, Oct. 2018.

[8] M. Do, *Timeline of 5G Standardization in ITU-R and 3GPP*(2017) Retrieved Jan., 30, 2019, from <https://www.netmanias.com/en/post/oneshot/11147/5g/timeline-of-5g-standardization-in-itu-r-and-3gpp/>.

[9] Technical Specification Group Services and System Aspects, *Virtual (VR) media services over 3GPP*, 3GPP Std. TR 26.918, Sep. 2017.

[10] M. Oh, "Gap Analysis on Wireless Transmission Technologies for VR HMDs," *J. KIIT*, vol. 16, no. 6, pp. 55-62, Jun. 2018.

오민석 (Minseok Oh)



1987년 2월 : 서울대학교 전기공학과 졸업  
 1993년 5월 : Columbia 대학 전기공학과 석사  
 1998년 5월 : Washington 대학 전기공학과 박사  
 2000년~2004년 : LG U+ 책임연구원

2004년~현재 : 경기대학교 전자공학과 교수  
 <관심분야> 이동통신, 무선랜  
 [ORCID:0000-0002-0790-178X]