

# 60GHz 송수신 칩 개발 동향

## Development Trends of 60GHz Transceiver Chip

스마트 & 그린 융합부품소재기술 특집

박경환 (K.H. Park)	인체통신SoC연구팀 책임연구원
강태영 (T.Y. Kang)	인체통신SoC연구팀 선임연구원
강성원 (S.W. Kang)	인체통신SoC연구팀 팀장
박성수 (S.S. Park)	융합부품소재미래기술연구부 부장

### 목 차

- .....
- I . 서론
  - II . 60GHz 표준화 동향
  - III . 60GHz 주파수 정책
  - IV . 60GHz 송수신 칩 개발 동향
  - V . 결론

디지털 영상 미디어 기술의 발전과 초고속 무선 전송에 대한 요구가 증가함에 따라 수 Gbps급 무선 전송을 현실화한 연구 결과가 국내외에서 많이 발표되고 있다. 이 가운데 가장 주목을 받고 있는 기술이 바로 60GHz 대역 통신이다. 이는 60GHz 대역이 ISM 대역임에도 불구하고 최대 9GHz까지의 엄청난 대역폭을 활용할 수 있어서 Gbps급 무선 전송에 가장 적합하기 때문이다. 하지만 60GHz 전파는 대기 중 감쇄가 심하기 때문에 무선 네트워크 구성을 위해서는 고성능의 무선 송수신 단말을 필요로 한다. 따라서 단말에서 사용하게 될 안테나 및 송수신 칩은 60GHz 대역의 광대역 신호를 처리하고 고출력, 고이득이 구현되어야 할 뿐만 아니라, 크기, 소모 전력, 그리고 가격적인 측면을 고려해야 하는 고도의 설계 기술을 필요로 하고 있다. 본고에서는 60GHz 대역의 이용 현황, 표준화 동향과 함께 송수신 칩 기술동향에 대해 살펴보고자 한다.

## I. 서론

60GHz 통신은 국제적으로 주파수 사용 허가 없이 사용할 수 있는 ISM 대역 중 57~66GHz 대역에 걸쳐 최대 9GHz에 달하는 넓은 대역을 이용하여 초고속 무선 전송을 실현하는 통신을 의미한다. 이 대역은 기간 통신망의 백본용으로 point-to-point 통신에 사용되어 왔지만 최근에는 주로 근거리 무선 네트워크 안에서 Gbps급 전송에 적합한 주파수 대역으로 관심을 받고 있다. 이는 주로 영상 가전에 응용되어 HDTV와 set-top box, game console, DVD player, digital camcorder, 그리고 이동식 멀티미디어 장비 간에 무선으로 무압축 동영상을 전송할 수 있는 주변 장치들이 선보이고 있다(그림 1) 참조.

60GHz 통신을 활용하는 무선 네트워크 구성의 핵심은 60GHz 신호 송수신 모듈이다. 이는 Gbps급의 전송에 따른 적지 않은 전력소모 그리고 하이브리드 회로에 따른 사이즈에 대한 부담 때문에 주로 무선 AP에 탑재되는 형태로 개발되어 왔다. 그러나 최근에는 노트북과 휴대용 기기에서도 활용도가 높을 것으로 기대됨에 따라, 모바일 환경에서 안정적인 통신이 가능하도록 하는 다양한 기술들이 제안되고 있다. 이는 CMOS 미세공정의 발달과 결합되어 60GHz 대역 송수신 칩 개발을 자극하고 있다.



(그림 1) 60GHz 통신을 활용하는 애플리케이션

이에 본고에서는 60GHz 표준화 동향과 각국의 주파수 정책과 함께 60GHz 송수신 칩 개발 동향에 대해 살펴보고자 한다.

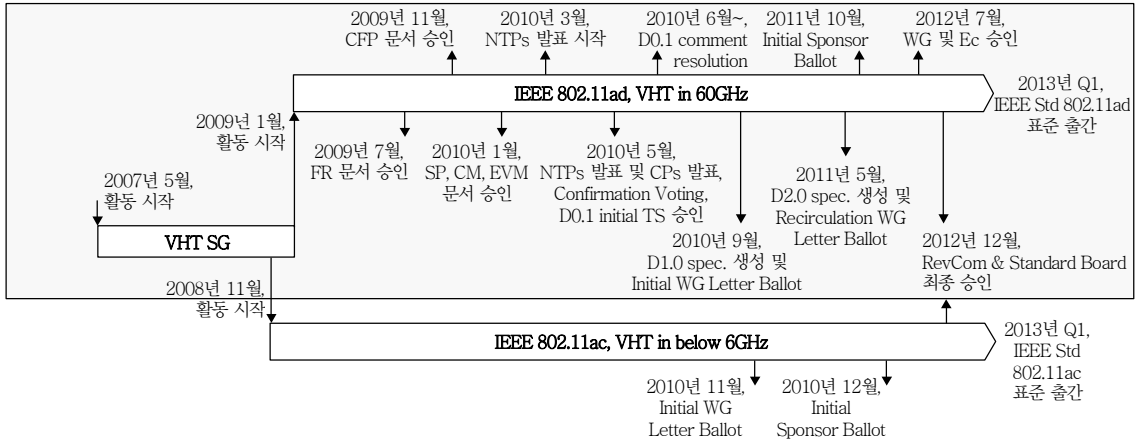
## II. 60GHz 표준화 동향

무선 전송 시스템의 통신, 방송, 가전 전반에 걸친 무한한 활용을 기대하는 세계적인 대기업들은 60GHz 표준 기술 주도권을 확보하기 위해 여러 표준화 기구에서 경쟁 및 협력을 벌이고 있다. 대표적인 표준화 기구로는 유럽의 ECMA TC48과 미국의 IEEE 802.15.3c, IEEE 802.11ad, 그리고 WiGig, WirelessHD alliance가 있으며, 현재 ECMA-387, IEEE 802.15.3c, WirelessHD 표준은 완성되었고 IEEE 802.11.ad는 draft 규격이 진행되고 있다.

ECMA TC48에서는 60GHz 대역 근거리 무선 고속 통신 표준을 만들고 있다. 이 결과 2008년 12월에 ECMA-387[1]을 발표하였다. 이는 근거리에서의 고속 60GHz PHY, MAC 규격과 더불어 HDMI PAL을 다루면서 대용량 전송과 멀티미디어 스트리밍을 지원하는 규격을 담고 있다. 이후 ECMA-387은 2009년 10월에 ISO/IEC 13156 국제 표준으로 승인되었다.

IEEE 802.15.3c는 고속 WPAN을 목적으로 표준화를 진행하고 있다. 2003년 첫 협의를 시작하여 2009년 9월 최종 IEEE 802.15.3c-2009[2]의 표준을 승인하였다. 여기에서는 60GHz PHY 표준을 사용 용도에 따라 SC/HSI/AV-PHY의 세 가지 모드로 정의하고, 다른 모드를 사용하는 기기들 간에도 정보 교환이 되도록 한 기기가 조정자로서 동기신호를 보내면 다른 기기는 이를 감지하여 통신에 참여할 수 있도록 한 내용을 담고 있다.

WiGig는 PC, HDTV, projector 등과 같은 디스



(그림 2) IEEE 802.11ad 표준화 일정

플레이 가전과 핸드헬드 장치 간의 Gbps급 데이터 전송을 목적으로 구성된 협의체이다. 이 때문에 PC 회사들인 Intel, Dell, Microsoft, NVIDIA사가 주요 회원으로 참여하고 있다. 기존 WiFi를 수용하면서 Gbps급의 전송속도를 위해 IEEE 802.11n의 MAC을 기반으로 표준화를 추진하여 2010년 12월에 WiGig 1.0[3]을 발표하였다.

WirelessHD는 고화질 디지털 영상 및 음성 신호를 무압축 무선 전송하는 것을 목표로 하고 있다. 영상 가전 업체인 Sony, NEC, Panasonic, Philips, Samsung, LG와 RF 칩 솔루션을 제공하고 있는 Si-beam이 주요 회원사로 참여하고 있다. 2008년 1월에 HDMI 신호를 무선 전송할 수 있는 WirelessHD 1.0a[4] 규격이 완성되었다. 이 규격은 이후 IEEE 802.15.3c AV OFDM 규격으로 받아들여지게 되었다. 2010년 4월에는 전송속도를 10~28Gbps까지 확장할 수 있고 압축 동영상 및 USB 3.0 데이터 프로토콜까지 지원하는 WirelessHD 1.1 규격이 발표되었다.

IEEE 802.11ad는 60GHz 주파수를 이용한 초고속 전송을 위해 만들어진 task group으로서 2012년 12월 표준안 제정을 목표로 다양한 의견을 수렴하고

있다. 앞의 표준들에 비해 늦게 시작되었지만 이미 확산되어 있는 802.11 Wireless LAN 계열[5]의 표준이기 때문에 파급 효과는 더 클 것으로 예상되고 있다. (그림 2)는 IEEE 802.11ad 그룹의 활동내역과 향후 표준 일정을 표시하고 있다.

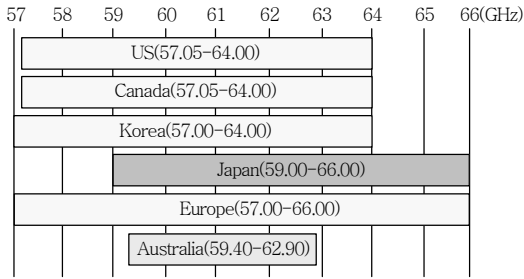
### III. 60GHz 주파수 정책

#### 1. 각국의 주파수 할당

세계 주요 각국에서는 일찌감치 60GHz 통신의 필요성을 인지하고 (그림 3)에서 파악된 주파수 대역을 할당하여 관련 기술 개발과 서비스 지원 정책을 시행해 왔다.

미국 FCC에서는 1994년 59~64GHz 주파수 대역을 허가 없이 사용할 수 있는 주파수로 할당하였으며, 2000년 12월에는 산업체의 요구를 받아들여 57~64GHz 대역으로 확장하였다.

유럽은 미국보다 앞선 1990년 ERC가 CEPT Recommendation T/R 22-03[6]에서 임시적으로 할당했다가 나중에 철회하였다. 2004년 ERC는 57~59GHz 대역의 사용을 논의하였으며[7], 2005년 CEPT



(그림 3) 국내외 60GHz 대역 주파수 할당

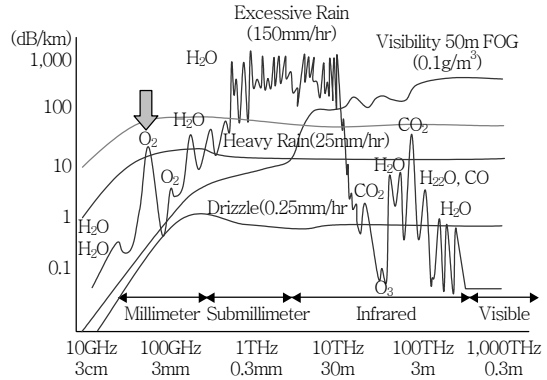
내 ECC는 ECC/REC/(05)02[8]에서 64~66GHz 사용을 권고하였다. 이후 2006년 ETSI는 WPAN 응용을 위한 60GHz 규정을 제안하였고[9] 이 제안을 근거로 2009년 ECC/REC/(09)01[10]에서 57~64 GHz를 할당함에 따라 기존 ECC/REC/(05)02에서 할당된 대역과 연결되어 최종 57~66 GHz의 9GHz 대역을 사용할 수 있게 되었다.

일본은 2000년 8월에 MPHPT가 60GHz 대역의 무선시스템에 대한 기술적 요구조건을 작성하고 54.25~59GHz는 HDTV나 고정형 무선접속장치의 전송 대역으로 할당하였고 59~66GHz는 무선 홈네트워크나 무선랜과 같이 허가가 필요하지 않은 소출력 무선기기용 주파수로 할당하였다.

우리나라도 지난 2006년 7월 정보통신부가 새로 57GHz에서 64GHz에 걸친 7GHz의 주파수 대역을 무선 통신용으로 할당하였고 2007년 4월에는 이에 대한 기술 기준을 발표하였다.

## 2. 60GHz 대역의 채널 특성

주파수 할당에서 보는 바와 같이 60GHz 대역은 수 GHz의 넓은 대역폭을 사용할 수 있는 메리트가 있는 반면 전파 특성이 굉장히 열악하여 통신 거리가 짧은 특징을 갖고 있다[11],[12]. (그림 4)는 주파수 대에 따른 전파의 감쇄계수를 나타내고 있는데, 보면 유독 화살표 지점(60GHz 대역)에서 감쇄계수가 높



(그림 4) 주파수 대역에 따른 감쇄 계수

아지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 산소분자에 의한 전파 흡수가 원인으로 작용하고 있다. 60GHz 대역에서 heavy rain에 의한 감쇄가 5dB/km 정도임에 반해 Oxygen(O<sub>2</sub>)에 의한 감쇄가 17dB/km나 되기 때문에, 비나 안개가 없는 실내 환경이라 하더라도 산소에 의한 감쇄는 존재하게 된다.

## 3. 각국의 유효방사전력 기준

한편 60GHz 신호의 이러한 감쇄 특성은 멀리 떨어진 기기로부터의 전파 간섭을 대폭 줄여 주기 때문에 주파수 재사용률을 높이고 슈퍼리어나 대역 내 불요방사에 대한 기준, 그리고 잠음 필터링에 대한 기준을 완화시켜 송수신기 구현 시 잡음 마진에 여유를 확보할 수 있다. 일정 거리 이상 떨어진 곳에서는 무선 신호를 인식하기 어려우므로 개인 정보 유출이 방지되어 보안성을 높여 주는 역할도 한다. 따라서 60GHz 주파수는 주로 근거리 무선 네트워크 용도로 이용하려는 것이다.

그러나 무선 네트워크를 설치하려는 건물 구조나 주변 환경에 따라 통신 거리가 확장되어야 하는 상황도 많기 때문에 이를 해결해 주는 방안으로 60GHz 무선기기의 유효방사전력 최대 허용치를 올린 규정을 적용하고 있다. 유럽의 경우 방사전력을 40dBm까지

허용하고 있으며, 일본은 57dBm, 중국은 47dBm, 캐나다와 미국은 43dBm까지 허용하고 있다. 우리나라는 방사전력 대신 송신기의 최대출력만을 규정하고 있는데, 송신 안테나로 지향성 안테나를 사용하는 경우엔 최대출력 27dBm, 무지향성 안테나를 사용하는 경우엔 20dBm으로 제한하고 있다.

#### IV. 60GHz 송수신 칩 개발 동향

무선 네트워크는 본질상 모바일 환경을 가정한 것이기 때문에 모바일 단말에 탑재가 가능해야 하고 이에 따른 전파 방향의 변화, 장애물의 유무, 통신 거리의 변동에 실시간으로 대응하는 기술이 적용되어야 한다. 이와 같은 환경적인 교란(perturbation)은 모두 무선 링크상의 손실을 야기하기 때문에, 60GHz 단말에서 이를 극복하기 위한 고출력, 고이득, 그리고 빔조향 기술[13]-[15]이 적용되어야 한다. 이러한 기술들은 단말에 탑재가 가능한 전용 칩으로 구현되어야 하는데, 최근 수년간 반도체 미세공정의 급속한 발달은 밀리미터파뿐만 아니라 물론 테라헤르츠 대역의 회로까지 CMOS로 구현이 가능하게 됨에 따라 Sibeam을 필두로 여러 업체와 기관에서 60GHz CMOS 칩 개발을 진행하고 있다.

모바일 환경에서 고속 전송에 적합한 변조방식은 OFDM 방식으로서 60GHz 표준에서도 많이 채용하고 있다. 이 방식에 의한 신호는 PAPR이 높기 때문에 단일 CMOS 전력증폭기를 가지고 출력을 생성하기에는 전력 효율에 큰 문제점을 안고 있다. 그리고 최대 9GHz 대역폭의 신호를 왜곡 없이 전달 및 복원하기 위해서는 광대역 필터와 초고속 ADC/DAC가 필요하다. 이러한 기술적 장애물은 단순히 회로 설계 기술만 가지고 극복하기 힘들기 때문에, 트랜시버 아키텍처 레벨에서 빔포밍이나 채널본딩 같은 기술이

제안되고 있으며 이를 단일 CMOS 칩으로 구현하려고 하고 있다.

#### 1. 60GHz 대역 칩 설계 기술

60GHz 대역 송수신기를 기능별 상용칩과 R/L/C 부품 그리고 스트립라인 등 하이브리드 형태로 구성하면 제작 과정의 오차 및 기생 성분, 하우징 공진 등의 영향으로 신뢰성 있는 회로를 만들기가 무척 어렵다. 따라서 60GHz 대역의 CMOS 칩에 대한 연구 결과가 발표되고 있지만, 통상 반도체 파운드리 업체에서 제공하는 CMOS PDK는 보통 30GHz대까지만 보장하기 때문에, PDK에만 의존하여 60GHz 회로를 설계하게 되면 신뢰성 있는 성능 예측이 어렵다. 기생 성분에 대한 가변성이 너무 높아 60GHz에서 능동소자와 수동소자의 실제 측정값에 기초하여 모델링과 PDK의 보완이 이루어져야 한다. 지금은 장비 교정 및 온웨이퍼 측정 기술이 많이 발달되어 120GHz까지 측정 데이터를 얻을 수 있다. 또한 60GHz 대역에서는 전송선로의 불연속, 결합 효과, 패키징 효과 등이 설계에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 요소들은 EM 시뮬레이터의 도움을 받아 회로 소자들 간의 결합 효과 및 기생 성분 등이 정확히 계산될 수 있다.

밀리미터파 대역의 회로 설계 기술은 일반 고주파 대역과는 다른 접근법이 필요하다. 가장 큰 차이점은 높은 밀리미터파 주파수 대역에서 안정된 국부발진기를 만드는 것이 어렵기 때문에, 상대적으로 낮은 대역의 주파수 신호를 생성하여 이를 주파수 체배하여 사용하거나 하모닉 믹서를 사용하여 고주파를 사용하는 방식 등이 적용된다. 이러한 경우 체배와 하모닉 과정에서 신호 손실이 크기 때문에 이를 보상하는 증폭회로가 반드시 필요하게 된다. 저잡음 증폭기의 경우는 낮은 주파수 대역에 비해 잡음지수가 상당히 높

다. 예를 들어 10GHz 대역에서는 잡음지수가 1dB 이하가 가능하지만 60GHz 대역에서는 거의 8dB 이상이 된다. 또한 안테나와의 패키징, 와이어/플립 칩 본딩, 전송선, 커넥터 등 손실 요소가 무척 많기 때문에 기본적으로 시스템 이득과 시스템 잡음지수의 마진을 크게 갖도록 설계되어야 한다.

## 2. 60GHz 송수신 칩 개발 동향

U. C. Berkeley에서 0.13 $\mu$ m CMOS 공정을 이용하여 트랜지스터, 수동소자, 전송선 패턴의 60GHz 대역 모델링을 기반으로 한 60GHz 대역 송수신 회로 설계에 관한 연구 결과를 발표한 이후 전 세계 많은 연구 그룹에서 60GHz 대역의 CMOS 송수신 칩 개발이 진행되고 있다. 미국의 GEDC는 65nm CMOS 송수신 칩, 일본의 NEC는 90nm CMOS 송수신 칩, Toshiba는 90nm CMOS 수신 칩, 독일의 IMEC에서는 45nm CMOS RF 칩, 대만의 NTU에서는 90nm CMOS 송수신 칩, 캐나다 Toronto 대학에서는 65nm CMOS 송수신 칩에 관한 연구 결과를 발표했으며 국내에서도 현재 ETRI와 KETI에서 송수신 칩을 개발하고 있다. 하지만 발표된 내용을 보면 안테나와 위상배열 그리고 패키징까지 적용된 상용제품 수준은 아닌 것으로 파악되고 있다. 그러는 와중에 U. C. Berkeley BWRC 멤버들로 구성된 Sibeam사에서 처음으로 상용화 수준의 칩 솔루션을 제공하였다.

2011년 2월 ISSCC 발표자료[16]를 보면, 현재 60GHz 기반의 WirelessHD 제품을 판매 중인 미국 Silicon Image(구 Sibeam)사에서는 WirelessHD와 802.11ad(WiGig) draft 표준의 최대 전송속도인 7.14Gbps와 6.76Gbps를 모두 지원하며 10m의 NLOS 통신이 가능한 두 종류의 트랜시버를 제작하였다. 전송속도가 다른 비대칭 데이터 링크에서 전송

속도가 높은 일명 소스 트랜시버는 32개의 Tx와 4개의 Rx를 사용하는 반면 수신에 중점을 둔 일명 싱크 트랜시버는 32개의 Rx와 8개의 Tx로 각각 8.95 $\times$ 8.12mm<sup>2</sup>와 8.64 $\times$ 8.93mm<sup>2</sup>로 설계되었다. 많은 위상 배열을 사용하여 칩 사이즈가 크지만 우수한 동작 특성을 나타내고 있다. U. C. Berkeley에서는 빔포밍에 필수적인 위상변위기(phase shifter)를 RF가 아닌 베이스밴드에 적용하여 위상제어의 정확도를 높이고 손실을 줄였다. 65nm CMOS 공정에서 제작되었으며 2.5 $\times$ 3.5mm<sup>2</sup>의 칩 사이즈로 Rx와 Tx에 모두 137mW를 소모한다. 일본 동경공대에서는 65nm CMOS 공정을 사용하여 60GHz direct-conversion 트랜시버 칩을 제작하고 패키지에 안테나를 포함하였다. IEEE 802.15.3c 표준의 16QAM/8PSK/QPSK/BPSK 모드를 모두 지원하는데 QPSK 모드에서 최대 8Gbps 이고 16QAM 모드에서 11Gbps의 전송속도를 보여주었다. 프랑스 CEA-LITI-Minatec 연구소와 ST-Microelectronics사는 65nm CMOS 공정을 사용하여 WirelessHD와 16QAM OFDM을 지원하는 60GHz 트랜시버 모듈을 발표하였다. 트랜시버 칩(2.8 $\times$ 3.3mm<sup>2</sup>)과 1W 전력증폭기 칩이 5층 HTCC 기판에 플립 칩 본딩이 되어있고 글라스 안테나를 사용하여 13.5 $\times$ 8.5mm<sup>2</sup> 사이즈로 제작되었다. 빔포밍 기술은 사용하지 않았으며 사무실 환경 1m 이상의 거리에서 16QAM OFDM HRP2(3.8Gbps)의 전송을 보여주었다.

2011년 6월에는 파나소닉에서 60GHz WiGig를 지원하는 모바일 기기용 칩을 개발하였다고 발표하였다. 파나소닉이 개발한 이 모바일 기기용 WiGig 칩은 1W가 안 되는 저전력 소비를 갖춘 점이 특징이다. 비슷한 시기에 퀄컴에서 스마트폰에서 HDTV로 바로 동영상 전송하는 60GHz 무선기술 지원 칩을 발표했다. 퀄컴은 Wi-Fi, 블루투스, 60GHz 기반의 동영

상 전송 기술을 지원하는 트라이밴드 칩을 발표했다. 현재 스마트폰의 HD급 동영상을 TV로 스트리밍 전송하는 데에는 Wi-Fi가 주로 활용되고 있으나, 조만간 이 칩을 스마트폰에 탑재하게 된다면 60GHz를 활용하여 10배의 고속 스트리밍을 경험하게 될 것이다. 따라서 향후 60GHz 칩 개발의 방향이 모바일에 맞춰 저전력, 소형화 이슈가 더 부각될 것으로 예상된다.

## V. 결론

지금까지 60GHz 대역의 주파수 특성과 표준 동향 그리고 집중적으로 칩 기술동향에 대해 살펴 보았다. 이전에는 상상도 못했던 60GHz CMOS 송수신 칩은 반도체 기술 발전에 힘입어 거의 상용화 단계에 이르고 있다. 머지 않아 노트북, 스마트폰, 스마트패드 등 다양한 모바일 기기와 고화질 영상 가전 제품에 60GHz 통신 칩이 탑재되어, 60GHz 기반의 제품과 응용 서비스가 Wi-Fi 만큼 활성화 될 것으로 예측된다. 이를 위해 여러 칩 벤더들이 다양한 솔루션을 내놓고 있지만 표준에 있어서는 아직 각자의 길을 가고 있는 상황이다. 하지만 표준이 하나로 통일된 적은 한 번도 없었다는 사실을 본다면 앞으로도 여러 표준이 공존할 가능성이 높다. 하지만 표준에 있어서 radio part는 어느 정도 교집합이 이루어져 있기 때문에 radio part를 구현하는 60GHz 송수신 칩에 집중할 필요가 있다. 따라서 국내에서도 ETRI를 중심으로 고속 전송 기술과 변복조 기술을 연구하고 있으며 KETI, KAIST와 함께 60GHz 여러 표준을 수용하는 멀티 표준 송수신 칩을 개발하고 있다. 휴대폰 및 스마트폰 분야에서 무선 부품을 전적으로 수입에 의존하고 있는 현시점에서 경쟁력 있는 국내의 통신 기술과 반도체 기술을 바탕으로 60GHz 칩 분야에서 선두에 서길 희망해 본다.

### ● 용어해설 ●

밀리미터파(mm-Wave): 밀리미터파는 주파수가 30~300 GHz 대역의 신호를 의미함. 초고주파인 만큼 파장이 mm 수준이기 때문에 밀리미터파란 명칭이 붙었음.

### 약어 정리

AP	Access Point
AV	Audio/Visual mode of mmWave PHY
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
CFP	Call for proposal
CM	Channel modeling
CP	Complete proposal
EC	Executive committee
ECC	Electronic Communications Committee
ECMA	European Computer Manufacturers Association
EM	Electro-Magnetic
ERC	European Radio communication Committee
EVM	Evaluation methodology
FR	Functional requirement
HDMI	High Definition Multimedia Interface
HSI	High Speed Interface mode
ISM	Industrial Scientific, Medical
ISSCC	International Solid State Circuits Conference
LOS	Line of Sight
MPHPT	Ministry of Public management, Home affairs, Posts and Telecommunications
NLOS	Non Line of Sight
NTP	New technique proposal
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAL	Protocol Adaptation Layer
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PDK	Process Design Kit
PHY	Physical Layer Specification in Communication Standards
SC	Single Carrier mode
SP	Selection procedure
WG	Working group

WiGig Wireless Gigabit alliance  
WPAN Wireless Personal Area Network

## 참고 문헌

- [1] ECMA TC48, ECMA-387, High Rate 60GHz PHY, MAC and HDMI PAL Whitepaper, 2nd ed., June 30th, 2010.
- [2] IEEE Computer Society sponsored by the LAN/MAN Standards Committee, IEEE Std 802.15.3c-2009, Part 15.3' Wireless MAC and PHY Specifications for High Rate WPANs, Amendment 2: Millimeter-wave-based Alternative Physical Layer Extension, Sept. 2009.
- [3] WiGig Alliance, July 2010. <http://wirelessgigabitalliance.org>
- [4] Wireless HD Alliance, "Overview of Wireless-HD Specification Version 1.0a," Aug. 2009.
- [5] IEEE 802, July 2010. <http://www.ieee802.org/11/>
- [6] CEPT Recommendation T/R 22-03 (1990 Athens), Provisional Recommended Use of the Frequency Range 54.25-66 GHz by Terrestrial Fixed and Mobile Systems, Jan. 1990.
- [7] CEPT/ERC/Recommendation 12-09 (the Hague 1998, Stockholm 2004), Radio Frequency Channel Arrangement for Fixed Service Systems Operating in the Band 57.0 - 59.0 GHz Which Do not Require Frequency Planning, Oct. 2004.
- [8] ECC Recommendation 05-02 (2005), Use of the 64-66 GHz Frequency Band for Fixed Services, June 2005.
- [9] ETSI DTR/ERM-RM-049 (2006), Electromagnetic Compatibility and Radio Spectrum Matters (ERM): System Reference Document: Technical Characteristics of Multiple Gigabit Wireless Systems in the 60 GHz Range, Mar. 2006.
- [10] Recommendation (09)01, Use of the 57 - 64 GHz Frequency Band for Point-to-point Fixed Wireless Systems, Jan. 2009.
- [11] B. Bosco et al., "Status Report of the Subgroup on Channel Modeling," IEEE 802.15-05-0133-3c, 2007.
- [12] S.K. Yong, "TG3c Channel Modeling Subcommittee Final Report," IEEE 802.15-07-0584-01-003c, 2007.
- [13] K. Raczkowski et al., "A Wideband Beamformer for a Phased-Array 60GHz Receiver in 40nm Digital CMOS," Session 2, *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf.*, Feb. 8th, 2010, pp. 40-41.
- [14] W.L. Chan et al., "A 60GHz-band 2x2 Phased-Array Transmitter in 65nm CMOS," Session 2, *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf.*, Feb. 8th, 2010, pp. 42-43.
- [15] M.K. Karim et al., "SiP-based 60GHz 4x4 Antenna Array with 90nm CMOS OOK Modulator in LTCC," *IMS*, May 23-28th, 2010, pp. 352-355.
- [16] K. Okada et al., "A 60GHz 16QAM/8PSK/QPSK/BPSK Direct-Conversion Transceiver for IEEE 802.15.3c," Session 9, *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf.*, Feb. 20th, 2011, pp. 160-166.