

# THz-파 정보통신 기술

강광용 · 백문철 ·  
류한철 · 정세영  
한국전자통신연구원  
테라전자연구팀

## I. 시작하면서: 정보통신 혁명을 기대하며

정보 전달량의 폭발적인 증대와 함께 전파 자원의 확대 및 활용이 급선무로 부각되어 왔고, 테라헤르츠(Terahertz, THz) 대역의 전파 및 전기 신호 이용 기술은 차세대 정보 통신 기술(ICT: information communication technology)을 가능케 할 것으로 전망되고 있다. 즉, [그림 1]에 나타낸 바와 같이 미이용 주파수 대역의 전파 자원인 THz-파의 고유 특징을 살려, 고속·대용량 네트워크의 구축과 끊김없는(seamless) 접속, 해양, 토양 및 대기 등의 환경오염에 대한 다양한 모니터링 및 원격 탐사 기술, 고도의 사회 보안 감시 기술 등을 실현하고, 유비쿼터스 네트워크 사회에서 고신뢰도 네트워크를 구축하여 비상재해시 ICT에 의한 안심·안전한 사회의 확보에 공헌하고 도움이 되는 기술을 확보하자는 것이다<sup>[1]~[3]</sup>.

따라서 차세대 정보 통신 기술(ICT)의 고도화를 위한 THz 연구 개발은 크게 1) 고속·광대역 정보 통신 기술(ICT) 개발, 2) THz-파 센싱 기술 개발, 3) THz 기반 기술 개발을 주된 타깃으로 하고 단기 및 중장기 연구개발 계획하에 각국들은 소재 및 소자, 부품 및 모듈, 시스템(ICT 시스템) 개발에 박차를 가하고 있다.

상기한 각각에 대해 개략적인 내용을 기술하면 다음과 같다. 먼저, 고속·광대역 ICT 개발과 관련하여서는 수십 Gbps의 초고속 무선 시스템의 실현을 위하여 광대역 주파수 자원을 이용한 Sub-THz 대역용 무선 전송 시스템의 개발을 서두르고 있다. 참고로 0.2~0.5 THz 대역에서는 대기 중의 흡수율이 비교적 적은 주파수 대역을 캐리어 주파수로 사용하고 있다. 그리고 Sub-THz 대역 무선 시스템의 실용화에는 안테나를 포함한 송수신기의 고기능화와 저손실화가 반드시 필요하다. 초고속 무선과 160 Gbps 이상의 광섬유 통신 시스템을 동시에 실현하기 위해서는 나노 스케일의 전자 소자인 HEMT(GaAs 또는 InP 기반) 등 초고주파 반도체 소자(MMIC)의 고성능화가 불가피하다. 따라서 2010년 이후 경에 개발될 수십 Gbps급 초고속 무선 기술을 사용하여, 비상시(주로 재해시) 기존 네트워크를 대체하게 될 고속·대용량 무선 네트워크의 테스트 베드 구축이 주요 목표가 되고 있다. 이 경우 전파 또는 전자적 접근 방식을 통하여 0.2~0.5 THz 대역의 개척에 주력하고, 그 이후에는 양자 폭포 레이저(QCL: Quantum Cascade Laser)의 장파장화 개발과 함께 0.5~3 THz 주파수 대역의 이용 기술을 실현함으로써, 미개척



[그림 1] 유비쿼터스 네트워크 사회에서의 THz-ICT의 모습<sup>[1]</sup>

주파수 대역을 해소하고자 진력할 것으로 생각된다. 또한, 무선 응용 이외에 네트워크의 초고속화도 중요한 개발 과제인데, 여기에 초전도 기술을 적극 활용하는 것이 고려되고 있다. 즉, 160 GHz 동작이 가능한 LSI로서 유망한 단일 자속(SFQ: Single Flux Quantum) 양자 회로 등의 고집적화 기술에 의하여, 노드(node) 처리 능력의 비약적인 향상을 기대할 수 있다. 한편, 여기에 필요한 기초 원천 기술로서는 THz 대역용 광파-전파 직접 변환 기술, 효율이 우수한 미세 회로에 THz 대역을 도입하는 기술, THz 대역용 재료(지문소재) 개발 등이 핵심이다.

이제, THz-파 센싱 기술 개발에 대하여 논의하면, THz 주파수 대역의 특징을 살리면서 고도의 이미징 인증 기술, 물질 고유의 THz 스펙트럼을 이용한 다양한 원격 센싱 및 이와 연결된 네트워크와의 접속을 실현하기 위한 기술 개발이 핵심이다. 즉, 수십 m 떨어진 거리에서 가스, 화학 물질, 생체 관련 물질 등의 존재를 검출하고, 성분 분석이 가능한 원격(stand-off 등) 센서 시스템, THz 대역 전자파를 이용하여 산란 광의 피검사가 피검사실을 인지하지 못하는 상태에서 화상을 얻을 수 있는 생체 인증 기술, 동화상을 주파수 2~10 THz 대역에서도 얻을 수 있는 카메라 시스템 등의 개발이 필수적이다. 특히, THz 센싱 시스템을 실현하는 것 뿐만 아니라, 전술한 양자 폭포 레이저 등은 THz 코헤런트(coherent) 광원으로서 매우 중요하다. 따라서 나노 기전 구조(NEMS)를 사용하여 나노 볼로미터(bolometer) 등 초고감도·실온 동작의 THz 검출기(양자 다이오드(QD), 공명 관통 다이오드(RTD) 등)의 개발에 대한 기술 확보가 중요하다.

여기서, THz 기반 기술 개발에 대한 내용을 살펴보면, 여러 종류의 THz-ICT의 응용 개발을 추진하는 것 뿐 아니라, EMC, 주파수 표준, 분광 데이터 베이스(DB) 등 기반 기술의 확립이 반드시 필요하다. 그리고 THz 대역에서의 기기 및 생체 EMC에 관하여 규격을 정하고 시험할 수 있는 환경과 기술을 확고

할 필요가 더욱 커진다고 전망된다. 뿐만 아니라 여러 종류의 THz 통신 응용과 각종 응용에 있어서 필요한 주파수 표준을 정비하고, 향후 THz 대역에서 사용 가능한 네트워크 분석기(VNA) 등 THz 대역 계측 장치의 개발도 불가피하다고 생각된다(우리나라의 경우, 기술 미성숙으로 어렵겠지만 그래도 반드시 계측기 기술을 확대해야 한다고 본다.) 그리고 각종 물질(소재)의 분광학적 데이터를 수집, 데이터 베이스(DB)로 축적하고, 공개하는 것도 매우 중요하다(일본의 RIKEN에서는 이미 시도하였음). 효율적인 DB를 구축하는 것뿐만 아니라 소형이면서(휴대 가능한), 고속 데이터 수집이 가능한 THz 분광·이미징 시스템의 개발도 반드시 필요하고, 동시에 물질 내부에서의 THz-파 거동(behavior)에 대한 해석도 매우 중요하다.

## II. 초 광대역(Broadband)이 개척할 미래 IT 사회<sup>[4]-[7],[9]</sup>

### 2-1 통신 네트워크 변천과 유비쿼터스 네트워크 사회

전보(telegram)에서 시작된 전기 통신 서비스의 발전과 함께, 우리의 삶의 양식이나 기업 활동 형태는 크게 변화하여 왔다.

19세기에 시작한 전보 서비스는 100년 이상 통신 수단의 주역을 담당해 왔으며, 고정 전화는 2차대전 후 약 60여년을 지나면서 통신 수단의 주역을 휴대 전화에게 양보했다. 그동안 전기 통신은 건물에 부착된(부착된) 단말을 연결하는 것이었지만, 휴대 전화의 보급으로 개인간 연결과 이동 중의 통신도 가능해져 통신 이용 모습이 급격히 확대·변화되었다.

특히, 1990년경부터 인터넷이 보급되자, 문자나 음성뿐만이 아니라 정지 화면이나 동영상 등의 대용량 데이터를 사용한 전송 서비스도 개시되고, 현재는 다양한 통신 기기와 소비자의 강한 욕구 때문에, 고속·

대용량 데이터 통신의 필요가 절실하게 되었다, 21세기부터는 ADSL이나 FTTH에 의한 통신의 광 랜(LAN)화, 광대역화 및 상시 접속(常時接續) 등 기술 진보와 함께 통신 요금의 저렴화도 급속히 진전되고 있다.

이러한 통신 서비스 변천을 촉진해 온 요소는, ① 정보의 디지털화, ② 정보의 네트워크화라고 할 수 있다. 한 예로서, “유비쿼터스 네트워크 사회에서의 국민 생활에 관한 조사”에서는 이러한 관점으로 1980년대 후반부터 현재까지를 “이동기기 등장기”, “멀티미디어 시대”, “인터넷 시대”, “유비쿼터스 네트워크 사회”로 분류하고 유비쿼터스 네트워크 사회의 특징을 분석 중이다. 멀티미디어 시대에 문자, 음성, 정지화상, 동영상 등의 정보 형태를 디지털화하여 다양한 정보 기기(단말)로부터 정보를 활용하고 네트워크를 중개로 한 정보의 공유화가 시작되었다. 즉, “정보의 디지털화”가 진행되고 있다고 할 수 있다. 인터넷 시대에는 전화, 컴퓨터, 워드 프로세서, 게임기, 휴대 전화, IPTV, 네비게이션, PMP 등 지금까지와는 다른 목적의 정보 단말이 인터넷과 접속하는 정보 기기로 변모하고 있다. 정보 기기가 다양화해지고 네트워크로의 접속 포인트가 급격하게 증가함과 동시에, ADSL이나 FTTH에 의한 네트워크의 대용량화도 진행되어 “정보의 네트워크화”가 크게 진전되어 왔다. 현실화되고 있는 유비쿼터스 네트워크 사회에서는 지금까지의 “정보의 디지털화”와 “정보의 네트워크화”가 질적인 변화를 통해 진화될 것으로 전망되고 있다.

“정보의 네트워크화”에 대해서는 기존의 정보 단말로 생각하지 않았던 기기까지도 네트워크에 접속되어 정보 기기로서의 기능을 발휘하게 된다. 예를 들면, 안경이나 손목시계에 삽입되는 “착용 가능(wearable) 단말”을 신체에 착용한 사람뿐만 아니라, 에어컨 등의 가전 제품에서부터 전자 태그(RFID)가 부여된 애완동물까지 그 상태나 위치 정보를 발신한다. 이외에 집을 비운 경우, 외출한 곳에서 가전 제품을

모니터하거나 제어할 수 있고, 식물이나 제품의 유통 경로 또는 보급 상황 등은 쉽게 수집할 수 있다. 건물이나 다리 등의 건축물에 부착 또는 심어둔 여러가지 센서는 노후화나 변화 상태를 네트워크로 보낼 수 있다. 이제는 사람과 사람간의 통신에서 사람과 사물, 사물과 사물간의 통신으로 발전해가고 있다. 한편, 네트워크의 액세스(접속) 장소는 기업, 가정, 교육, 행정, 스포츠에서 의료 현장, 오락 시설, 카페, 이벤트 전시장, 자동차, 선박, 기차, 비행기, 백화점과 시장 등 비약적으로 증가함과 동시에 유선 및 무선 회선은 더욱더 초 광대역화가 진행되고 있으므로, 정보 교환에서 회선(回線) 제한을 느끼지 않는 네트워크가 필요하게 되었다. 바야흐로 “언제라도 · 어디에서도 · 무엇이라도 · 누구라도 · 끊임없이” 네트워크에 액세스가 가능한 유비쿼터스 네트워크 사회의 도래가 시작되고 있다.

## 2-2 유비쿼터스 네트워크(망) 사회를 지원하는 하드웨어

정보의 네트워크화를 더욱 발전시키기(고도화) 위해서는 한 단계 더 제고된 네트워크 기술이 필수적이다. [그림 2]는 대용량 네트워크 이용 모습의 예를 나타낸 것이다. 행정, 비즈니스, 의료, 복지, 교육, 오락, (단란한) 가정 등 다양한 장소에서 대량의 정보



[그림 2] 대용량 네트워크 이용 모습의 예<sup>[2]</sup>

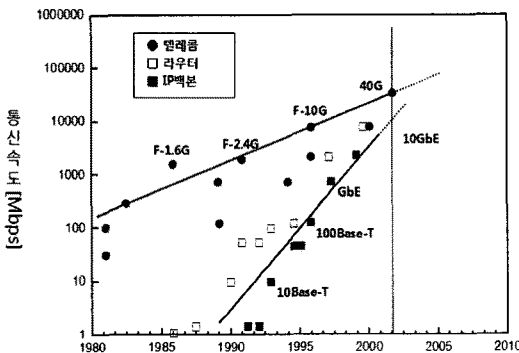
가 쌍방향으로 흐르고, 교육 및 지역 격차가 적은 서비스가 제공된다. 정보소비자(발신자·수신자), 기간망과 접속망이라는 구별은 희미해지고, 쌍방향이 가능한 초고속망이 필요해질 것이다.

한편, [그림 3]은 일본의 경우를 예로 들어, 기간망(네트워크)과 접속망(악세스 네트워크)의 전송 속도 발전 추세를 나타낸 것이다. 정보의 멀티미디어화와 인터넷의 보급으로 악세스 네트워크의 광대역화는 현저히 증가하고, 양쪽 네트워크의 격차는 적어지고 있다. FTTH의 보급과 함께 유선 광대역화는 기존 네트워크의 계층 구조(layer structure)를 분해하면서, 광(optical) 네트워크화되어 초 광대역 네트워크로 발전되어 갈 것이며, 특히 이동하면서 다양한 서비스를 실현하기 위한 무선 통신의 대용량화와 광 네트워크와의 원활한 악세스(접속)도 향후 큰 과제이다. 이와 같이 초 광대역 네트워크의 실현에는 초고속·초고주파 광부품 및 전자 부품의 연구 개발이 관건(key)이고, 그러한 부품의 제작·평가 기술 개발과 함께 장기적인 안목을 가지고 상용화시킬 연구 개발이 필요하다. 한편으로, 초고속·초고주파 광 부품 및 전자 부품의 성능에 강하게 의존하고 있는 정밀 제작 장비도 초광대역 네트워크의 구현과 함께 고성능화·저가격화·소형화할 뿐만 아니라, 새로운 센

싱 및 화상 시스템으로서 네트워크와의 융합도 기대된다. 이러한 추세는 새로운 정보기기에 의한 새로운 정보의 송수신을 실현할 가능성을 내포하고 있으므로 기존과는 다른 “정보의 디지털화”를 발전시킬 수 있다.

정보 디지털화와 관련된 적절한 예를 들어보자. 매텍형/왜곡형 센서는 비행기나 고각 등의 건축물 노후화를 항상 모니터링하여 우리들을 안심시켜 주고, 환경 부하(load)가 적은 효율적인 보수(maintenance) 정보를 제공할 수 있다. 네트워크에 접속된 밀리미터파나 서브-밀리미터파를 사용한 투시(perspective) 카메라는 이벤트 전시장, 백화점, 공항 및 항만 등에 숨겨진 위험물을 감지하여 고객의 안전에 공헌할 수 있고, 감지되지 않은 정보에 대해서도 안심할 수 있게 할 수 있다. 의료 측면을 고려해 보면, 기존에는 곤란했던 병소(病巢: 병원군이 있는 곳)를 검출하면, 즉시 전문의사들끼리 인터넷 상에서 컨퍼런스(회의)를 열고 치료 방법을 결정할 수 있다. 또는 전문지식의 필요없이, 인체에 대해 부하가 적은 혈액 모니터 등을 네트워크에 접속하면 진단의 일부는 자택에서 가능해지고, 나머지는 인터넷 상에서 진단을 받을 수도 있게 된다. 이러한 가능성은 다양한 수준에서 이미 실현을 겨냥한 연구 개발이 정력적으로 진행되고 있어, 가까운 미래에 많은 부분이 실용화될 것으로 보인다.

급속하게 발전하고 있는 현재의 ICT 사회는 사생활 보호, 정보 보안, 네트워크 인프라의 지역 격차 해소 및 디지털 소자 개발 등 해결·개선해야 할 문제도 많다. 그러나 미래의 ICT 사회가 목표로 하는 것은 정보 기술에 의한 업무 효율화에만 머무르지 않고, 현대 사회가 안고 있는 미성년자·고령자 고용, 환경·에너지, 안전·안심·보안, 교육·지역 격차라는 장기적인 과제에 대해서도 적극적으로 개선해야 한다. 따라서 정보기술의 고도화에 의하여 시간과 공간의 벽을 넘어, 인간과 사회가 서로 깊이 공감하고, 개인과 사회가 새로운 가치를 창출할 것



[그림 3] 기간망(네트워크) 및 악세스계 네트워크 전송 속도의 발전 추세<sup>18)</sup>

으로 기대된다.

### Ⅲ. 광통신의 미래<sup>9)</sup>

최근 인터넷이나 광대역 네트워크 서비스의 비약적인 발전과 함께, 기간망이나 액세스망에서 광통신은 필수품이 되었다. ICT 기업에 대한 과잉 투자로 인해 2000년말 경부터 소위 통신 버블(bubble)의 붕괴가 시작되었지만, 다른 한편에서 인터넷을 누비는 트래픽은 매년 계속 증가세를 유지하고 있다. 특히, 일본 및 한국 등은 차세대 광통신 네트워크 기술에 대한 진보의 필요성이 제안되었다(일본의 경우: 차세대 IP 인프라 연구회).

세부 기술로는 기간망에서 한줄의 광섬유(optic fiber)에 여러 파장의 광신호를 동시에 전송하는 파장분할다중(Wavelength Division Multiplexing: WDM) 기술의 발달, 광신호를 빛 그대로 증폭하는 광 앰프의 실용화 및 고기능화, 광섬유의 저손실화 또는 각종 파라미터의 제어 기술의 확립 등을 통해, 통신 시스템 전송 용량은 비약적으로 확장되었다. 현 단계에서는 1파장당 40 Gbps(40억 bit), 전송거리 1,000 km의 WDM 시스템이 시판되고 있으며, 연구실 수준에서는 WDM 기술을 이용하여 전송 거리 100 km 정도에서, 총 전송용량 10 Tbps(10조 bit)를 초과하는 전송실험이 2001년에 일본에서 보고되었다. 광섬유 자체의 전송 용량은 30 Tbps 이상이라고 생각하고서 향후 실용화를 목표로 연구 개발이 진행될 전망이다.

액세스망의 경우, 전화선으로 음성 통신에서는 사용하지 않는 주파수대를 사용하여 고속 데이터 통신을 구현하는 ADSL이 특히, 일반 가정용으로 급속하게 보급되었다. 처음의 경우, ADSL은 하향 방향으로(downwards) 1.5 또는 8 Mbps의 통신 속도를 제공했지만, 그후 개량을 거듭하여 하향 방향에서 40 Mbps의 통신 속도를 실현하였다. 또한 상향 방향(upwards)의 고속 통신도 활발히 검토/개발되고 있다. 그러나

ADSL의 경우, 전화국에서 이용자까지의 거리가 멀어질수록 통신 속도가 점차 느려진다는 문제점이 있기 때문에, 광섬유 기반의 유선 통신에 대한 기대가 더욱 높아지고 있다. 최근, 몇몇 공급자들은 GbE-PON(Gigabit Ethernet-Passive Optical Network)이라는 최대 1 Gbps의 광대역 서비스를 기대할 수 있는 FTTH 기술의 도입을 발표하고 있다. 동일한 빌딩 또는 근접한 빌딩간 극히 근거리의 경우, 컴퓨터나 프린터 등에 접속하는 LAN에서는 광섬유를 이용하여 10 Gbps 이상의 전송 속도를 가진 10 GbE를 보급하기 시작하였다. 액세스 망의 전송 속도가 고속화되면 기간망에서 트래픽의 교통 정리 역할을 담당하는 라우터나 스위치의 처리 속도도 반드시 고속화될 필요가 있기 때문에 이러한 목적의 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다. 또한 가정 내에서도 Gbps급 고속 통신을 실행하는 홈 네트워크의 발전도 상당히 기대된다.

### Ⅳ. 테라헤르츠 무선통신의 영항<sup>12)~14)</sup>

#### 4.1 테라헤르츠 무선통신의 전망

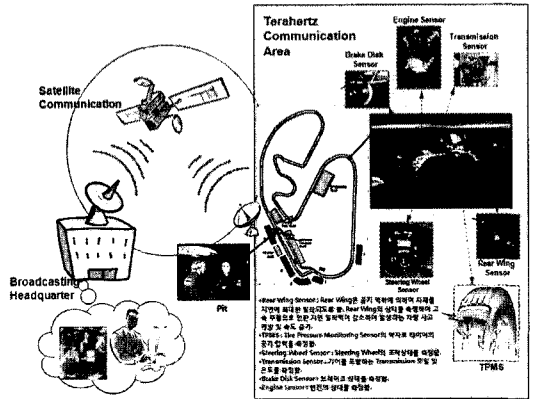
멀지 않은 장래에 우리나라에서도 F1 세계선수권(자동차 경주)이 열리고, 현대·기아·대우·삼성자동차의 합동팀이 처음으로 한국 그랑프리(grand prix)에서 우승하는 순간을 맞볼 수 있음을 세계에 보여줄 수 있다고 본다. 이 경우, 승리의 결정 요인은 경기용 자동차와 피트(pit: 경기용 자동차의 수리 따위를 행하는 공장)간의 뛰어난 통신 기술이다. 여기에 사용된 기술은 THz 무선 기술이라 일컬어지는 최고속 무선 기술인 것이다. 이것은 결코 공상만으로 끝나는 이야기는 아니다. 이제부터는 경기용 자동차 성능과 카레이서(선수)의 능력만으로 F1에서 승리할 수는 없다. F1에 출전하는 자동차에는 현재도 수백개의 센서와 데이터 처리용으로 10개 이상의 CPU와 수GB급의 메모리를 탑재하여, 스피드나 엔진의 회전수, 악셀레이터, 오일 온도, 자이로(autogyro)가 계

측한 자동차의 자세, 차체에 걸리는 가속도 등 주행 중 자동차의 상태를 상세하게 계측하고 있다. 그리고 F1 자동차가 홈 스트레이트를 300 km/h의 스피드로 질주하는 불과 수초 사이에 수 MB급의 데이터가 무선(마이크로파)으로 피트(pit)에 전송된다. [그림 4]에 나타낸 바와 같이, 이런 방식으로 수집된 데이터는 피트 내의 컴퓨터에서 해석되고, 동시에 고속 위성 통신 회선으로 본사 공장에 전송되어 시뮬레이터와의 융합이 이루어진다<sup>[10]</sup>.

현재, 자동차에서 전개되는 상황에 기반하여 최고 성능의 상태를 유지하려면 “어디를 어떻게 튜닝(조정)할 것인가”와 “동일한 정보를 어떤 방법으로 빨리 레이스(race) 중의 자동차와 드라이버에게 피드백할 수 있는냐”가 레이스의 운명을 결정하는 것이다. 실제로, 현재 무선으로 전송할 수 있는 수 MB 급의 데이터 정도로는 불충분하며, 자동차 내의 하드디스크/SSD에 축적된 데이터를 피트 인(pit-in: 경기장 라인에 들어가는 것) 중에 읽어들여, 오프라인(off-line)에서 상세하게 해석하지 않으면 안된다. 따라서 최근에 전개되는 F1의 세계는 최신 ICT에 의해 지원된 고도의 정보전쟁을 치루는 곳이라고 해도 과언이 아니고, 또한 고속·대용량화 무선 통신 분야의 연구 개발이 끊임없이 필요하게 되었다.

4-2 무선통신의 고속화 경향

이제는 멀게만 느껴지는 F1에서 일반사회로 눈을 돌려보자. 실생활이 전개되는 사회에서는 무선의 고속화는 향후 어떻게 진행될 것인가도 매우 중요하다. [그림 5]에는 여러가지 통신 방식이 보여주는 전송 속도(비트 레이트: bit rate)의 연대별 추세를 나타낸 것이다. 광섬유에 의한 기간(基幹) 전송망(백본계), 이더넷(Ethernet)에 의한 유선 LAN망 그리고 무선 전송망들은 1~10 Gbps를 초과하게 될 것이므로, 미래에는 마치 하나의 동일한 목적(수10~100 Gbps)을 향해 돌진하고(올인) 있는 듯이 보인다.



[그림 4] F1(자동차경주)과 고속·대용량 무선 통신 기술<sup>[4],[10]</sup>

4-3 무선통신의 고속화 경향

이제는 멀게만 느껴지는 F1에서 일반 사회로 눈을 돌려보자. 실생활이 전개되는 사회에서는 무선의 고속화는 향후 어떻게 진행될 것인가도 매우 중요하다. [그림 5]에는 여러가지 통신 방식이 보여주는 전송 속도(비트 레이트: bit rate)의 연대별 추세를 나타낸 것이다. 광섬유에 의한 기간(基幹) 전송망(백본계), 이더넷(Ethernet)에 의한 유선 LAN망 그리고 무선 전송망들은 1~10 Gbps를 초과하게 될 것이므로, 미래에는 마치 하나의 동일한 목적(수10~100 Gbps)을 향해 돌진하고(올인) 있는 듯이 보인다.

최근 들어, 무선 통신은 급속히 진보하고 있지만, 광섬유 기반의 유선망(광통신)와 비교하면 아직도 큰 격차의 전송율을 보이고 있다. [그림 6]에 나타낸 것과 같이, 이제는 우리에게 친숙한 LAN/PAN(Personal Area Network)을 예로서 들어보면, 광섬유 기반의 이더넷에서 10 Gbps의 표준화가 종료되고, 상용화에 돌입하고 있다.

한편, 무선 LAN의 경우는 802.11g, 802.11a에서 56 Mbps, 그리고 이어서 802.11n에서 100 Mbps, UWB(Ultra-Wide Band)나 밀리미터파 대역 무선(Wireless) 1394(60 GHz 대역)라고 불리는 신기술에 의하여

1 Gbps 정도의 전송 속도가 실현될 전망이지만, 유선 통신과 무선 통신의 전송 속도 차이는 여전히 메울 수가 없다. 미래 통신 시스템의 이상적인 형태로는 [그림 5]의 발전 추세와 같이, 유선 통신과 무선 통신이 동등한 전송 속도로서 유기적으로 결합되는 것이라 할 수 있다.

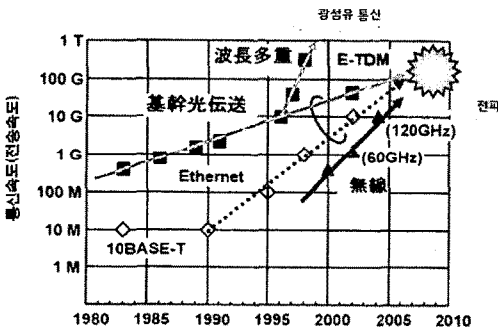
4.4 무선통신의 고속화 필요와 기대 효과

만약에, 지금보다 10배 정도(1 order) 고속인 10 Gbps 무선 통신이 실현된다면, 다음과 같은 활약이 기대된다. 가장 유망한 경우는 [그림 7]에 예시로서 보여준 고정 무선(Fixed Wireless Access: FWA)이라는 분야이다. 현재, 기업내 LAN에서는 광섬유망의 도입

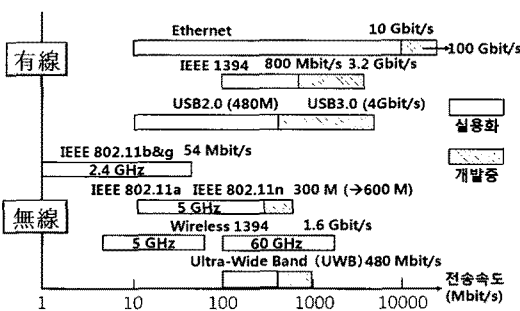
에 의한 광대역화가 진척되고 있다. 기가 비트 이더넷(1 Gbps급)은 이미 광범위하게 보급되어 있고, 향후는 10기가 비트 이더넷(10 GbE: 10 Gbps Ethernet)의 도입이 진행될 것으로 전망된다. 10 GbE로 구축된 기업내 LAN을 인접하는 빌딩으로 연장하는 경우, 새롭게 광섬유를 매설하려면 막대한 시간과 비용이 든다. 그러나 10 Gbps 무선 시스템을 사용하면, 단시간에 저비용으로 근거리의 2점 사이에 10 GbE망을 연결할 수 있다. 이벤트 전시장, 중계 방송 등 잠정적인 광대역 회선에 대한 수요에도 10 Gbps 무선은 적합하다.

특히 다중화된 디지털 하이비전(HDTV: High Definition Television) 신호나 디지털 시네마(3~7 Gbps급) 등의 고선명 동화상의 비압축 전송에서도 수 Gbps 회선 용량이 필수적으로 요구된다. 특히 라이브(생) 영상 중계시에는 화상 압축에 수반되는 지연(delay)이 걸림돌이 되기 때문에, 비압축 전송은 매우 바람직한 기술이다.

또한, 재해 복구시에는 고속 무선에 의한 잠정적인(일시적인) 네트워크 인프라 구축이 불가결하다. 한 예로서 몇 년전 뉴욕에서 발생한 911 재해(테러)시에 지금까지 거의 주목을 받지 않았던 고속 광무선(적외선을 공중에 전송시키는 통신)이 활약한 것은 기억에도 새롭다. 광섬유망은 유감스럽게도 지진



[그림 5] 여러 가지 통신에서의 전송율(Bit-Rate)의 발전 추세<sup>[11]</sup>



[그림 6] 규격(spec.) 관점에서 고려한 고속 LAN/PAN의 개발 현황<sup>[11]</sup>



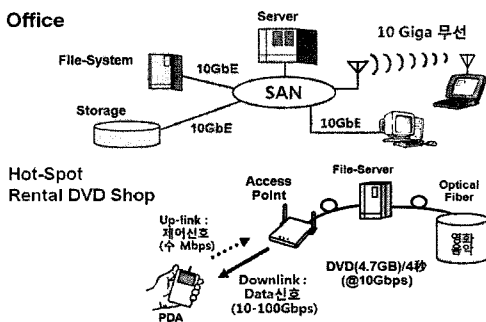
[그림 7] THz-파 고정 무선 통신이 적용된 예시들(오사카대학 나가주마 교수의 호의로)<sup>[11]</sup>

등에 의한 빌딩, 도로 등의 붕괴와 함께 단선을 면할 수 없다. 광섬유가 방방곡곡에 매설되어 있는 일본 및 한국 사회에서는 재해시에 광섬유망을 사용할 수 없는 엄청난 사태를 고려하여 인프라를 재정비하는 것이 더욱 중요할 것이다.

10 Gbps급을 초과하는 고속 무선의 또다른 주요 응용 분야는 스토리지 에어리어 네트워크(SAN: Storage Area Network)라는 분야이다. [그림 8]에 나타낸 바와 같이, 대용량 파일이나 어플리케이션(응용 파일)을 중앙 서버에 보존하여, 케이블을 연결하지 않고 각자의 단말이나 PDA(Personal Digital Assistant)로서 광섬유 접속과 동일한 속도로 데이터를 다운로드할 수 있게 되었다. 비디오 대여점에서 영화 파일의 다운로드 등으로 핫 스팟(hot spot)적인 이용도 고려할 수 있다. 예를 들면, DVD에 보존된 4.7 GB의 데이터 전송에는 빠른 이더넷(100 Mbps)으로도 7분 정도가 요구되는데 비해, 10 Gbps급 무선 전송에서는 약 4초만에 전송할 수 있다. 미래에는 전술한 FI(그랑쁘리) 경우만이 아니라, 스치듯 지나가는 한순간에서도 대량의 데이터를 교환하는 모습도 현실이 되지 않을까 생각된다.

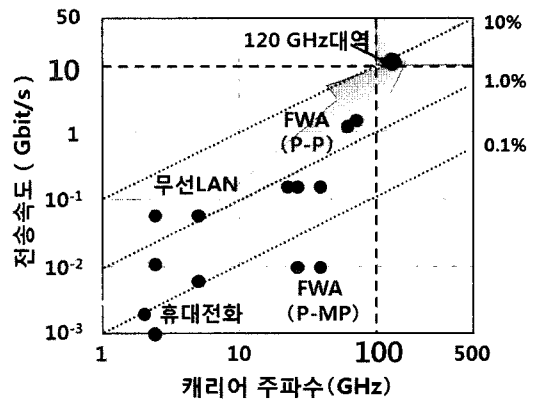
#### 4-5 테라헤르츠 대역 전파의 중요성

이상에서 서술한 것과 같은 “꿈의 고속 무선 통신”



[그림 8] 스토리지 에어리어 네트워크(SAN)의 개략도와 응용 분야<sup>[15]</sup>

을 구현하기 위해서는 전파의 캐리어 주파수를 올리는 것이 유효한 접근 방식 중의 한가지이다. 물론 다중 방식 또는 변조 방식을 고안하여 제한된 대역에서 효율적으로 비트 레이트(bit rate)를 버는 것도 중요하다. [그림 9]는 무선 캐리어 주파수와 데이터율(data rate)와의 관계를 지금까지 개발된 무선 통신에 대해 플롯(plot)한 것이다. 점선들은 캐리어 주파수에 대해 비트 레이트가 0.1%, 1.0% 및 10%가 되는 라인이지만, 일반적으로 캐리어 주파수가 부여된 경우에서 실현하기 쉬운 최대 비트 레이트(전송율)이다. 단순히 정보 이론으로 논의하자면, 더 많은 통신 용량을 전송할 수 있겠지만, 실제로 사용하는 전자 부품(믹서, 앰프, 안테나 및 필터 등)에 대한 주파수 대역 및 주파수 규정(regulation) 등이 이용 가능한 주파수 대역을 결정한다. 특히 1~5 GHz 대역에서는 법적으로 허가된 밴드폭이 좁기 때문에, 다중 변조 기술에 의한 주파수의 유효 이용이 진행되고 있다. 앞에서 기술한 사실(fact)들로부터, 광섬유 기반의 광통신급(10~100 Gbps급) 무선 통신 기술을 실현하기 위해서는 테라헤르츠 대역(100 GHz~10 THz)의 전파 이용 기술이 향후 열쇠(key)를 쥐고 있다고 할 수 있다.



[그림 9] 데이터 전송율(rate)과 캐리어 주파수와의 관계식<sup>[15]</sup>



## V. 고속 네트워크 노드(node)의 혁신

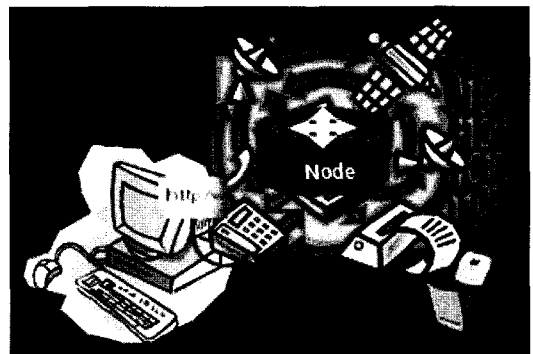
### 5-1 트래픽의 신장과 정보 사회

현재 ADSL 등의 보급으로 인터넷 이용이 발전되고 있으며, 벌써 차세대 인터넷을 구상하는 단계에 와 있다. 데이터 통신량은 이에 동반하여 급증하고 있으며, 매년 2배씩 증가하고 있다. 이것은 최근 10년동안 약 1,000배 정도 신장되었음을 의미한다. 이와 같은 통신 트래픽의 증가는 사회·경제 상황에 의해 단기적으로 보면 장애 요소가 있겠지만, 중장기적으로는 확실히 발전될 전망이다. 트래픽 증가의 원인인 네트워크에 대한 “상시 접속화”와 “광대역화”라는 라이프 스타일을 변화시키고 있다. 상시 접속화란, 현재로는 컴퓨터 단말을 네트워크에 항상 접속하여 두는 것을 의미하지만, 향후 유비쿼터스 사회가 도래하게 되면 전혀 다른 진화를 이룰 것이라고 예측한다. 즉, 주변의 디지털 기기간의 글로벌한 정보 교환을 인터넷을 통해 소통하는 사회로 간다는 것이다. 소위 정보 가전만이 아니라 백색 가전류(휴대정보 기기 포함), 그리고 자동차, 착용 가능한(wearable) 기기, 센서 네트워크(RFID 등) 등의 다양한 정보기기가 인터넷에 접속될 것이며, 필연적으로는 트래픽의 증가를 촉진시킬 것이다. 한편, 회선의 광대역화를 크게 촉진시킬 것으로 보는 이유는 동영상 등으로 대표되는 스트림(stream)망의 데이터 폭증이다. 현재는 품질이 우수한 편은 아니지만 장애에는 화질, 서비스 모두 고도화될 것이 확실하며, 더 나아가 화질 향상은 새로운 서비스를 창출할 것이 예상된다. 예를 들면, 초고선명(超高鮮明) 동영상을 이용하면 교실의 수업 풍경을 원격지에서라도 거의 완벽하게 실시간으로 재현할 수 있다. 즉, 인터넷 회선만 있으면 위성 중계기 등의 고가이고 특수한 설비 없이도 자택 내지 분교 등에서 원격 수업이 가능하다는 것이다. 따라서 학교 강의에 출석할 필요

가 없어질 지도 모르며, 현재와 10년 전을 비교하지 않더라도 10년 후에는 지금 당장 상상할 수 없었던 서비스가 등장할 것이다.

이러한 정보의 교환에는 단말만이 아니라, 표면적·직접적으로는 드러나지 않는 다양한 종류의 정보기기가 반드시 필요할 것이다. [그림 10]에 나타낸 바와 같이, 액세스망에서 집적된 정보는 백본(backbone)의 노드(node)를 통해 필요한 서버를 이용하게 되고, 통과한 뒤에 다시 돌아오게 된다. 이러한 인프라의 성능이 보기에는 사용자의 편의성이나 새로운 서비스의 성공 여부를 쥐고 있다고 해도 과언이 아니다. 액세스망에서는 100 Mbps급의 광 LAN(가입자망)이 가정마다 보급될 것이다. 이와 같은 시대가 도래할 경우, 정보 전송에는 수십 Tps급 전송 기술이 필요하게 되고, 유통(流通) 데이터를 전환하여 처리하는 코어(core) 라우터의 필요 용량은 현재의 약 100배인 100 Tbps급에 도달할 것으로 예상하고 있다. 네트워크 서버는 정보를 테라바이트급의 스토리지에 수용하고, TFLOPS급의 처리를 행하게 될 것이다.

한편, 현재의 전형적인 전송 용량은 10 Gbps이지만 기가 헤르츠(GHz)급 클럭(clock) 동작 속도의 소자 기술이 이를 지원하고 있다. 처리해야 할 정보량이 1,000배 이상이 되면 이러한 정보들을 취급하는 소자 및 하드웨어 기술은 서브-테라헤르츠(sub-THz) 또는



[그림 10] 인터넷과 노드(node) 이미지<sup>[8],[11]</sup>

테라헤르츠(THz) 영역으로 이전될 것이라는 것은 쉽게 상상할 수 있다. 즉, 향후 광섬유를 통해 유통되는 패킷의 전송 속도는 160 Gbps에 달하고, 서브-테라헤르츠 영역에 이르게 된다. 이를 WDM으로 전송하면 정보를 여러 개로 묶은 한가닥의 광섬유를 통해 흐르게 될 것이고, 이 정도의 속도와 용량을 가진 데이터를 현재의 기가헤르츠(GHz) 기술만으로 처리하려면 대단히 어려워진다는 것이다.

## 5-2 미래 네트워크 노드(node)를 지원하는 THz 통신 기술

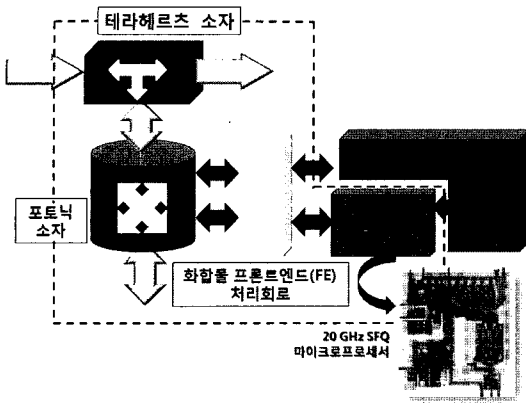
전술한 내용을 검토해 보면 미래형 네트워크의 경우, 성능 향상에서 병목(bottle neck)의 하나로 생각되는 것은 노드(node)라고 하는 데이터 중계 지점의 성능이다. 노드는 흘러 들어온 패킷의 정보를 읽어들이고 정확한 행선지로 전송하는 기능을 가진다. 현재 이 기능을 한 손에 담당하고 있는 것은 라우터(router: 망 연결 장치)라고 하는 장치이다. 대용량의 라우터 구축에는 최첨단 반도체 기술이 이용되며, 지금까지의 트래픽 증가를 지원해 왔다.

상용 제품 최대 용량의 라우터 개발 경향을 살펴보면 계속 성능이 증가하고 있다. 즉, 트래픽의 신장(12개월에 2배 정도), 무어의 법칙(18개월에 2배)에 따르는 반도체 기술의 발전, ASIC 집적수의 증가, 클럭 주파수의 신장 등이 주요 인자들이다. 예를 들면 2003년에 출시된 라우터의 최대 용량은 약 1 Tbps이지만 용량은 계속 증가 추세이고, 반도체 기술의 발전을 나타내는 지표인 ITRS(International Technology Roadmap for Semiconductors)의 로드맵을 참고하여도 잘 알 수가 있다. 그리고 라우터의 스위치 용량은 반도체 LSI 성능이 향상됨에 따라 증가되고 있다. 따라서 이러한 경향이 계속된다면 2010년경에는 현재보다 수배의 용량이 실현될 것으로 보이며, 조만간 트래픽량이 신호처리 가능한 양을 상회할 것임도 미루어 짐작할 수 있다.

한편, 라우터에서 병목은 패킷 처리에 허가된 시간이 패킷 길이에 상당하는 시간 정도 밖에 없다는 문제점에 있다. 즉, 데이터 레이트(rate)의 향상에 따라 패킷의 시간적 길이가 짧아지고, 이에 따라 처리 시간의 고속화가 필수적이다. 따라서 다음과 같은 3가지 문제점이 거론된다. (1) 병렬화에 동반하는 핀(pin)수의 증대 등 실장에 대한 부담, (2) 패킷의 버퍼링, 어드레스 디코딩, 스케줄링 등과 관련된 논리소자 및 메모리의 속도와 용량 부족, (3) 대규모화하는 시스템 사이즈에 수반되는 소비 전력의 증대이다.

이러한 문제점들을 해결하려면, (1) 본질적으로 동작 속도가 빠르고, (2) 유연하고 복잡한 논리 처리가 가능하며, (3) 고밀도 실장이 가능하고, 저소비 전력 특성을 실현하는 핵심 기술들을 이용할 필요가 있다. 예를 들면, 패킷의 속도가 160 Gbps급으로 되면, 현재 수십 ns로 실행하는 패킷 처리를 1ns 속도 이하로 실행하지 않으면 안된다. 신호처리 회로의 클럭 주기를 이와 같이 100배 정도로 짧게 하지 않으면, 논리처리를 실행할 수 없다는 것이다. 현재 디바이스가 1~10 GHz 정도의 클럭(clock)이므로, 이것은 100 GHz급 클럭이 가능한 디지털 소자로 대체할 수 있는 기술이 필요함을 강하게 시사한 것이다.

현재의 CMOS-Device의 한계를 넘어, 동작 영역이 서브-테라헤르츠에서 THz에 이르는 소자 기술의 적용이 문제 해결의 열쇠를 쥐고 있다고 할 수 있다. 현 단계에서 이러한 조건을 만족하는 소자 기술로서는 고속 화합물 반도체, 포토닉 소자, 초전도 SFQ(single Fluxquantum) 회로 기술들을 들 수 있으며, 이들 기술은 소비 전력, 논리 제어 능력, 다른 소자들에 대한 구동 능력 등에서 상보적인 특성까지도 가지고 있다<sup>[17],[18]</sup>. 상기한 소자들에게 CMOS 소자와 함께 각각의 장점을 융합하여, 미래의 트래픽 수요를 충분히 만족시킬 수 있는 백본 노드를 구축할 수 있다고 전망되고 있다. [그림 11]은 테라헤르츠 소자를 복합적으로 이용한 노드의 이미지를 개요도로서 나타내었다. 패킷



[그림 11] THz 소자, 광소자, 초전도 회로를 이용한 대용량 노드 이미지의 개략도<sup>[8],[16]</sup>

데이터는 고속 대용량이고 전송망은 광신호로 전파한다. 따라서 패킷 데이터의 전환은 도메인(domain)에서 이루어지지만 패킷 처리는 로직이 필요하기 때문에, 고속 로직이 가능한 초전도 SFQ 회로가 그 역할을 담당한다. 포토닉 디바이스(광소자)의 제어나 전자 회로와의 인터페이스에는 초고속 동작이 요구되므로 여기에는 화합물 반도체(GaAs 및 InP계)를 이용한다.

한편, CMOS 기술로는 저가의 그리고 잘 정립된 대규모 회로의 구축이 가능하고, 복잡한 신호처리를 할 수 있으므로, 백 엔드(back-end)의 처리에는 CMOS 기술을 이용한다. 이와 같이 테라헤르츠 기술은 미래의 백 본 망 등 대용량 네트워크 노드를 지원하는 기반/핵심 기술로서 크게 기대를 모으고 있다.

## VI. 결 론

테라헤르츠 대역의 미래 정보 통신 기술(THz-ICT)에 대한 기술적·사회적·문화적 측면을 고려하여 기술하였다. 현 단계에서는 THz 기술이 분광·영상 분야에서 상용 제품들이 출시되고 있지만, 장기적으로 보면 ICT 분야에 대한 기대치가 높고, 전망도 매우

밝은 편이다. 그리고 한정된 전파 자원의 효율적인 활용 못지않게 미활용 주파수 자원을 개척하는 과제도 중요하다. 미활용 전파 자원의 개발과 함께 높은 주파수에 대응할 수 있는 계측 기술과 고속·고주파·대용량 네트워크 기술 개발도 매우 중요하다(핵심 소자 및 부품 기술 포함).

THz-ICT는 이러한 관점을 고려할 때, 연구 개발의 중요성은 더욱더 부각되고 있으며, 미래 고도화 정보 사회 구축을 위한 장기적 계획(plan) 하에서 상당한 투자가 이루어질 것으로 전망된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 일본, 21세기 네트워크 기반기술연구 추진회의 테라헤르츠 ICT 워킹그룹, 테라헤르츠 ICT 분야의 단기·중기 연구개발 전략.테라헤르츠 ICT 워킹그룹 보고서 개요- 2007년.
- [2] 특집호 "테라헤르츠와 공학의 최전선", 응용물리(일본), 75(2), 2006년.
- [3] 초고속 포토닉네트워크(Photonic Network) 개발 추진협의회편, 포토닉네트워크 혁명, 2002년.
- [4] 테라헤르츠 테크놀로지 동향조사위원회편(M. Tonouchi 감수), "테라헤르츠 기술", 2006년.
- [5] T. Kamiya, F. Saito, O. Wada, and H. Yajima eds., *Femtosecond Technology-From Basic Research to Application Prospects*, Springer-Verlag, 1999.
- [6] Special Issue on Components for Ultrafast Communications, *Opt. Quantum Electron.*, vol. 33, no. 7, p. 10, 2001.
- [7] Koyomi Sakai(Ed.), *Terahertz Optoelectronics*, Springer- NICT, 2006.
- [8] 테라헤르츠 테크놀로지 동향조사위원회편(M. Tonouchi 감수) "테라헤르츠 기술", p. 100, 2006년.
- [9] 廣本宣久 등(Ed.), *Handbook of Terahertz Technology*(테라헤르츠 기술총람), 2008.

- [10] 김성일, 강광용(ETRI), *Private Communications* 2007년.
- [11] 윤두협, 박민환, 유용구, 류한철, "테라헤르츠파 기술의 현황과 전망", *전자통신동향분석*, 21(4), p. 129, 2006.
- [12] A. Hirata, T. Kosugi, H. Takahashi, R. Yamaguchi, F. Nakajima, T. Furuta, H. Ito, H. Sugahara, Y. Sato, and T. Nagatsuma, "120-GHz band millimeter-wave photonic wireless link for 10-Gb/s data transmission", *IEEE Trans. Micro. Theory Tech.*, vol. 54, no. 5, p. 1937, 2006.
- [13] R. Yamaguchi, A. Hirata, T. Kosugi, H. Takahashi, N. Kukutsu, T. Nagatsuma, Y. Kado, H. Ikegawa, H. Nishikawa, and T. Nakayama, "10-Gbit/s MMIC wireless link exceeding 800 meters", in *Proc. IEEE Radio and Wireless Symp.*, Florida, TH1C-3, 695, Jan. 2008.
- [14] R. Piesiewicz, T. Kleine-Ostmann, N. Krumbholz, D. Mittleman, M. Koch, J. Schoebel, and T. Kuerner, "Short-range ultra-broadband terahertz communications: Concept and perspectives", *IEEE Antennas Propaga. Mag.*, vol. 49, no. 6, p. 24, 2007.
- [15] T. Nagatsuma, 일본 THz 산업응용세미나(THz-파 무선통신응용) 발표자료, "테라헤르츠파통신응용을 향한 전망과 과제", *Private communications* 2009년 1월.
- [16] H. Akaïke, T. Yamada, A. Fujimaki, S. Nagasawa, K. Hinode, T. Satoh, Y. Kitagawa, and H. Hidaka, "Demonstration of a 129 GHz single-flux-quantum shift register circuit based on a 10kA/cm: Nb process", *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 19, pp. S320-324, 2006.
- [17] T. Yamada, A. Fujimaki, "A novel splitter with four fan-outs for ballistic signal distribution in single-flux-quantum circuits up to 50 Gb/s", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, pp. L262, 2006.
- [18] Y. Hashimoto, S. Yorozu, T. Satoh, and T. Miyazaki, "Demonstration of chip-to-chip transmission of single-flux-quantum pulses at throughputs beyond 100 Gbps", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 87, 022502 2005.

≡ 필자소개 ≡

강 광 용



1975년 2월: 서울대학교 섬유공학과 (공학사)  
 1982년 2월: 국립경상대학교 물리학과 (이학석사)  
 1988년 2월: 부산대학교 물리학과 (이학박사)  
 1989년 3월~현재: 한국전자통신연구원

테라전자연구팀장

[주 관심분야] 강상관전자계 소재/소자, 고온초전도 소자/시스템, 테라헤르츠 소재/소자/시스템 개발

백 문 철



1979년 2월: 서울대학교 자원공학과 (공학사)  
 1982년 2월: 한국과학기술원 재료공학과 (공학석사)  
 1990년 8월: 한국과학기술원 재료공학과 (공학박사)  
 1982년 2월~현재: 한국전자통신연구원

책임연구원

1996년 3월~1997년 3월: 미국 Lucent Tech. Bell Labs. 교환연구원

[주 관심분야] 테라헤르츠 양자우물 소재, 정보저장 디스크 소재

류 한 철



2000년 2월: 한양대학교 전자전자통신전파공학과 (공학사)  
 2002년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2002년~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원

[주 관심분야] 광믹싱 기반의 CW-THz 시스템, CW-THz Photomixer 설계 및 제작, CW-THz Antenna 설계 및 제작, THz-TDS system을 이용한 물질 분석

정 세 영



2004년: 경상대학교 세라믹공학과 (공학사)  
 2007년: 충남대학교 재료공학과 (공학석사)  
 2007년~현재: 충남대학교 나노기술학과 박사과정  
 2003년~2004년: 한국전기연구원 위촉

연구원

2006년~현재: 한국전자통신연구원 위촉연구원

[주 관심분야] THz 소자제조용 MBE 성장 및 소자 제작, III-V 족 나노와이어 및 나노닷 MBE 성장, 양극산화 알루미늄 나노템플릿 제작 및 나노닷 성장