

# 소형 테라헤르츠 통신 및 영상시스템 기술

백문철 강광용 (한국전자통신연구원)

## I. 요약

테라헤르츠(THz) 대역은 중적외선(mid-IR)과 밀리미터파(millimeter wave) 사이의 중간 주파수 영역으로서, 다른 전자기파 대역에 비하여 개발 및 활용이 극히 미흡하지만 기존의 전자기파로는 얻어낼 수 없는 탁월한 기능, 즉 통신에 필요한 초고속 광대역, 신기능 센싱 및 새로운 영상정보 등을 제공한다. 이러한 THz 기술이 발전함에 따라 초고속 근거리 무선통신과 함께 센싱 및 영상기술은 생화학 및 의료공학적인 검사와 측정 등 여러 분야에 걸쳐 대단한 영향을 미치고 있다. 그러나 현재의 THz 시스템 기기는 규모가 큰 편이어서 실험실 등의 실내 용도로 한정된 상태이다. 이동이 가능한(mobile) 소형화된 THz 시스템은 그 활용범위를 크게 넓힐 수 있으며 새로운 시장을 창출할 수 있다.

## II. 서론

테라헤르츠(THz) 파는 원적외선(far-IR) 또는 서브 밀리미터파(submillimeter wave)로 불

리우며, 주파수 영역이 0.1~ 10THz 에 이르는 전자기파로서 1 THz는 1ps의 시간, 300 $\mu$ m의 파장, 33.3cm<sup>-1</sup>의 파수, 4.1meV의 에너지 및 46K의 절대온도에 대응하는 값을 가진다. 마이크로웨이브(microwave), 중적외선 및 가시광 대역과 같이 상대적으로 많이 발전되어 다양하게 응용되고 있는 기술과 비교해 볼 때, 기초연구와 선도적 개발연구 뿐만 아니라 실제 응용분야에서도 THz 기술개발은 아직 유아기에 불과하다. 그러나 지난 십 수년 간, 다양한 분야의 THz 기술들이 빠른 속도로 발전하여 왔으며, 초고속·대용량 근거리 무선통신을 비롯한 물리, 화학, 생명과학, 생의학, 전자 및 소재공학 등 다양한 분야의 연구에서 THz 기술을 응용하고 있다. 최근 수 년간에는 THz 기술이 환경, 에너지, 국방 및 보안 분야에서도 미래기술로서 인정받고 있다.

근거리 무선통신에서 요구하는 대역폭은 지난 25년간 매 18개월마다 2배씩 증가하여 왔다<sup>[1]</sup>. 이러한 증가속도가 갑자기 멈추는 일은 없었으므로, 향후 10년 이내에 데이터 전송속도 15Gbps 급의 무선통신 기술이 등장할 것으로 보인다. 기술이 진보하면서 이와 같은 엄청난 대



역폭에 대한 요구사항은 일부 응용분야에서 이미 예견된 바 있다.

한 예로, 공중전화 같은 형태의 멀티미디어 스테이션에서 HD 급 영화의 내용을 무선으로 수 초 이내에 다운받는 경우를 가상해 볼 수 있다. 이 영화는 범용의 개인 휴대 단말기로 다운로드 되는데 이 단말기는 집적통신 시스템에 자체적으로 접속하게 된다. 가까운 장래에 모든 연령과 직업에 관계없이 대부분의 사람들은 이와 같은 형태의 단말기를 소지하게 될 것이다. 통신과 오락의 용도 이외에도 이 단말기는 여러 가지 상황에서 매일 같이 생활의 한 부분으로 중요한 역할을 하게 될 것이다. 예를 들어, 위험한 교통상황이 발생하면 경고음을 들려주는 것과 건강문제와 관련하여 이상 신호의 감지와 함께 필요시에는 응급지원까지 받을 수 있다. 이 단말기가 병원에서 사용될 경우에는 대용량의 3D 토모그래피(tomography) 영상 데이터와 같은 의학적 정보를 무선으로 송수신하는 데에 사용될 수도 있다.

0.1~10 THz 파장대역은 소재 결정구조의 저주파수 진동수(포논 진동)에 해당하며 화약 및 관련 화합물(ERC; Explosives and Related Compounds)이나 마약 및 기타 생체분자 등을 포함하는 화학, 생물학 소재의 수소결합 신장(hydrogen bond stretches) 및 분자간(inter-molecular) 진동수 대역과 일치한다. 이 뿐만 아니라 많은 극성 기체들도 THz 주파수 영역에서 기체 고유의 분광지문(spectroscopic fingerprint)을 가지고 있다. 이와 같은 소재들에서 투과 및 반사되는 THz-파는 소재 고유의 THz 흡수 스펙트럼을 포함하고 있으며 이 정보는 마이크로웨이브나 적외선 등 다른 전자기파 스펙트럼에서는 얻을 수 없다. THz-파는 낮은

광자에너지(1 THz는 4 meV에 해당하므로 X-선 광자의 백만분의 일 정도)를 가지고 있어 생물학 소재에서 유해한 광이온화 반응을 일으키지 않는다<sup>[2,3]</sup>. 따라서 THz-파의 사용은 미래의 활용에 대하여 사용자 및 피사용자에게 모두 안전한 방법으로 인식되고 있다. THz-파는 극성을 띄지 않는 대부분의 유전체 소재 즉, 종이, 판지, 타일, 플라스틱, 나무, 가죽 및 세라믹 등을 거의 감쇠없이 통과한다. 그러므로 THz 기술을 이용하면 포장재 및 컨테이너 내부에 있는 물체를 비파괴(non-destructive) 또는 비침습(non-invasion) 방법으로 센싱 및 영상화시킬 수 있다. 이러한 장점에 따라, THz 기술은 실제로 보안 및 검색분야에서 은닉된 화약이나 무기류, 화학 및 생물학적 위협과 결합 등의 검사에서 경쟁력을 갖춘 방법으로 사용할 수 있다.

THz 분광법에 의한 센싱과 함께 2차원, 3차원 분광/영상법이 세계적으로 연구자들의 흥미를 끌고 있다. 일부 화약류에 대한 THz 정반사형(specular reflection) 분광/영상기술이 Shen 등<sup>[4]</sup>에 의해 발표되었으며 Kawase 등은 봉투 안에 들어있는 마약을 검사하는 THz 분광/영상 기술을 소개하였다<sup>[5]</sup>. 일반적으로 사용되는 X-선 영상법에 비하여 THz 영상은 분광에 대한 정보를 포함하며, THz-파의 조사(irradiation)에 의한 이온화 현상이 없고 시편의 특성에 따른 영상 콘트라스트가 높은 장점을 가지고 있다. 이러한 장점은 THz-파가 시편의 고유성질에 더욱 민감하게 반응하고 그 변화폭이 크기 때문인 것으로 알려져 있다. 예로써, 대부분의 경우 기포 또는 거품 내부에 존재하는 결합에 대해서도 X-선 영상에 비하여 매우 손쉽게 규명할 수 있다.

본 고에서는 여러 가지 THz 발생 및 검출 방법에 대해 세부적으로 살펴보고 THz-파를 이용

한 통신 및 영상기술에 대하여 논의한다. 그리고 이러한 기능을 확대하기 위한 초소형 THz 시스템 기술의 현황에 대해 소개하기로 한다.

### III. THz-파의 발생 및 검출

THz-파는 여러 가지 기법에 의해 광대역(broadband) 및 협대역(narrow band), 그리고 펄스파 및 연속파 형태로 발생/검출할 수 있으며, 각각의 방법에 따라 서로 다른 출력, 효율, 주파수 대역폭(bandwidth), 다이내믹 영역(dynamic range), 신호대 잡음비(SNR) 및 기술적 제작방법이 가능하다.

이와 같이 서로 다른 발생 및 검출기에 대해 상세히 논의함으로써, THz 신호원의 개발현황과 함께 초소형 THz 분광 및 영상 시스템의 특징과 여러 분야에 응용하는 방법을 관해 검토하고자 한다.

#### 1. 광대역 THz 시스템

광대역 THz-파 발생기 및 검출기로서, 글로우 방전이나 수은 램프와 같은 광대역 열방사체(thermal emitter) 및 액체 헬륨으로 냉각된 볼로미터 검출기는 종래에도 푸리에 변환 원적외선 분광법(FTIR: Fourier Transform far-infrared Spectroscopy) 등에서 사용되어왔다. 그러나, 이 방법은 출력이 낮고 액체 헬륨 냉각시설을 사용해야 하는 등의 문제점 때문에 실험실 내부로 제한되었다.

자유전자 레이저(FEL; Free Electron Laser)는 THz-파 방출의 가장 강력한 신호원으로서 거의 1.0에 가까운 효율로 결맞는(coherent) THz파를 연속선 또는 펄스 형태로 방출할 수 있

다<sup>[6]</sup>. 그러나 거대한 규모를 필요로 하고, 높은 경제적 비용으로 인해 실험실에서의 특수 용도 이외로는 사용이 제한되고 있다.

THz-시영역 분광(TDS; Time Domain Spectroscopy) 또는 극초단 펨토초 레이저를 사용하는 THz 펄스 분광학은 1990년대 이후 발전하였다. 이 기술은 800nm 대의 파장을 가지는 근적외선 펨토 초 레이저를 이용해서 피코 초 단위의 THz 펄스를 결맞는(coherent) 형태의 시간영역으로 발생하는 것이다. THz-TDS에서는 THz 펄스의 성분으로부터 진폭과 위상의 정보가 결정되며, 이를 이용해서 소재들에 대한 복소유전(complex dielectric) 특성을 분석할 수 있다. THz-TDS에서 발생하는 THz-파의 출력은 높지 않으며 평균적으로 nW에서  $650\mu\text{W}$ <sup>[7]</sup>에 이른다.

바이어스 전압을 가하는 형식의 광전도 안테나(photoconductive switch antenna)는 반결연 GaAs<sup>[8,9]</sup> (SI-GaAs: Semi Insulating GaAs) 또는 저온 성장 GaAs<sup>[10,11]</sup> (LT-GaAs: Low Temperature grown GaAs)를 기반으로 제작된 초기의 THz-TDS 신호원이다. 바이어스를 가하지 않는 방식으로는 반도체 및 기타 단결정체로 InAs, InSb<sup>[12]</sup>, ZnTe<sup>[13]</sup>, InP, GaP, GaAs<sup>[14]</sup>, GaSe, LiNbO<sub>3</sub><sup>[15]</sup>, LiTaO<sub>3</sub><sup>[16]</sup> 및 유기물<sup>[17]</sup> 등이 사용되며, 캐리어의 초고속 전송 또는 광정류(optical rectifying)를 기반으로 한 THz-파 발생에 널리 적용된다. 발생한 THz-파의 주파수 대역폭은 사용된 레이저의 대역폭, 그리고 사용한 발생기 및 검출기의 특징에 따라 결정된다. 특별히 제작된 발생기 및 검출기에 10fs 정도의 극초단 펄스 레이저를 사용했을 경우 60~100THz 정도까지의 대역폭이 얻어졌으며, 이 값은 SNR 값과 상반관계를 가진다<sup>[18-19]</sup>. 일반적으로 대역

폭이 적을수록 SNR은 높아진다. 예를 들어, 발생기 및 검출기로서 LT-GaAs 소재를 사용했을 때 0.3~7.5THz 영역에서 60dB 정도의 다이내믹 영역을 가지는 부드러운 스펙트럼 곡선이 얻어지며<sup>[20]</sup> THz 분광/센싱용으로는 이상적인 조건이 된다. THz-TDS에서는 걸맞는 THz-파 검출기로서, 광전도 안테나와 함께 광전(EO Electro-optic) 샘플링에 기반을 둔 비선형 광학결정을 이용한다<sup>[21-22]</sup>. 광대역 THz-파는 일반적으로 EO 샘플링법으로 검출하며<sup>[16-19]</sup> 검출된 THz-파 스펙트럼의 대역폭은 결정의 두께와 관련이 있다<sup>[22]</sup>. 특정한 대역폭, 다이내믹 영역 및 SNR은 상기 언급한 발생 및 검출장치를 조합하여 얻어낼 수 있다.

## 2. 협대역 연속선 THz 시스템

THz-파의 협대역 연속선은 높은 해상도를 필요로 하는 영상이나 분광용으로 활용된다. 전자적인 방법으로는 주파수 체배기를 이용한 Gunn 다이오드 발진기 (GDO: Gunn Diode Oscillator)와 후진파 발진기 (BWO: Backward Wave Oscillator)가 있다. GDO는 ~0.1THz 대역에서 ~200mW, 1.7THz에서는 ~ $\mu$ W 범위의 출력이 가능하다<sup>[23]</sup>. BWO의 경우에는 대역 및 출력범위가 ~100mW(@0.1THz) 부터 ~1mW(@1.25THz)에 이른다<sup>[24]</sup>. BWO와 Golay 셀 검출기를 기반으로 하는 주사형 THz 분광기가 상용화하였으며, 스펙트럼 가변영역은 35GHz~1.25THz에 이르고, 해상도는 1~10MHz, 다이내믹영역은 60dB이다. 비선형 광학 신호원은 THz 파라메트릭 발진기(TPO: THz Parametric Oscillator)와 광전류에 기반을 둔 광혼합기(photomixer)가 있다. TPO는 나노 초 수준의

펄스폭과 100mW 이상의 피크 출력을 가지는 THz-파를 발생하며, 주파수 대역은 0.7~3.8THz에 이른다<sup>[25]</sup>. 광전류 기반의 광혼합기는 초고속 캐리어 재결합 시간을 가지는 반도체에 바이어스를 가하여 동작시키며, 주파수 대역은 단위 소자에서 0.1~3THz 이고 1THz 이상일 때에는 1  $\mu$ W 이하로 출력이 감소한다<sup>[26]</sup>.

연속선 발생을 위한 THz 레이저는 일반적으로 3가지 정도가 있는데, 기체 레이저(gas laser), 양자폭포레이저(QCLs: Quantum Cascade Lasers) 및 자유전자 레이저가 그것이다. 기체 레이저는 연속 가변이 되지는 않으나, 0.9~6.86THz 영역에서 2,000개 이상의 주파수로 동작하며, 출력은 1~180mW에 달한다<sup>[27]</sup>. QCL은 소형이면서 실제 전자적인 방법으로 동작하는 THz 발생기로서 선도주자이다. 높은 출력(100mW 이상)이면서 박막의 두께 조절을 통해 발생파장의 조절이 가능하다는 특징이 있다<sup>[28-30]</sup>. (최소 ~2.1THz) 그러나, 액체 헬륨이나, 액체 질소 이하의 극저온에서만 동작한다. FEL은 넓은 범위로 가변이 가능한 펄스 및 연속선 THz-파를 발생시킬 수 있는 광원이다. 그러나 대규모 설비로 인해 응용분야가 제한적이다.

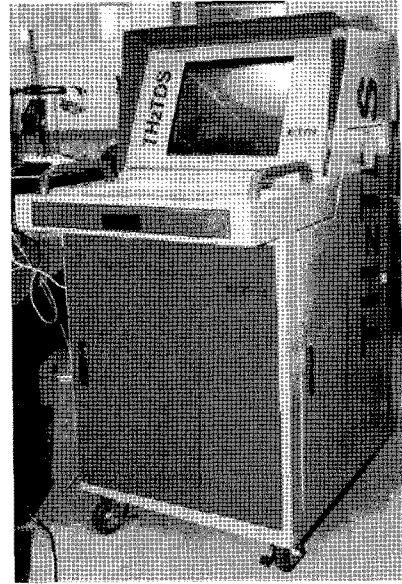
연속선 검출기는 협대역 또는 광대역이 가능하다. Schottky 다이오드는 충분히 작은 크기이나 주파수 적응력이 떨어지고, 1THz 이하에서는 지나치게 고가인 것이 단점이다<sup>[31]</sup>. 광대역 검출기는 볼로미터, Golay 셀 및 열전 검출기(pyroelectric detector) 등이 사용된다. 액체 헬륨으로 냉각시킨 볼로미터는 빠른 응답특성으로 인해 광대역에서 높은 감도의 THz-파 검출기로 사용된다. 그러나 액체 헬륨의 사용으로 인해 실제 상용화 등에 걸림돌이 되고 있다. 소형 신호원인 Golay cell은 주파수 영역 0.02~20THz 범위

에서 50dB의 높은 다이내믹 영역으로 검출할 수 있다. 그러나 응답시간이 길고(수 십 ms) 최대 출력이 수십  $\mu\text{W}$ 에 불과한 단점이 있다<sup>[32]</sup>. 열전 검출기는 0.1~20THz 영역의 스펙트럼을 커버하고, ~ms 수준의 응답시간 및 소형화가 가능하다<sup>[33]</sup>. 이 외에도, 헤테로다인(heterodyne) 검출방법을 이용하여 직접 검출 방식보다 수 오더(order) 정도 낮은 검출한계를 달성할 수 있다.

#### IV. 소형 THz-TDS 시스템

실험실 외부에서의 응용을 위해서는, 동일한 성능을 가지고, 소형이면서 휴대가 용이한 THz 시스템이 바람직하다. 실제로 재난상황이나 스포츠 중계 등에서 대량의 정보를 전송하기 위한 무선통신 시스템, 그리고 소형 이동식 의료영상 장치나 보안검색용으로 THz-파를 사용하는 소형화/휴대화한 시스템이 용이할 것이다. 특히, 환경이나 식품 등의 검사를 위해서는 현장에서 직접 시료를 비파괴 검사를 통하여 분석하는 것이 가장 중요한 업무이므로 이에 대한 수요는 증가할 것으로 보인다. 또한 일반 가정에서도 간단한 의료진단이나 음식물 검사 등에 사용될 수 있다면 조만간 엄청난 파급효과를 불러올 수 있을 것이다.

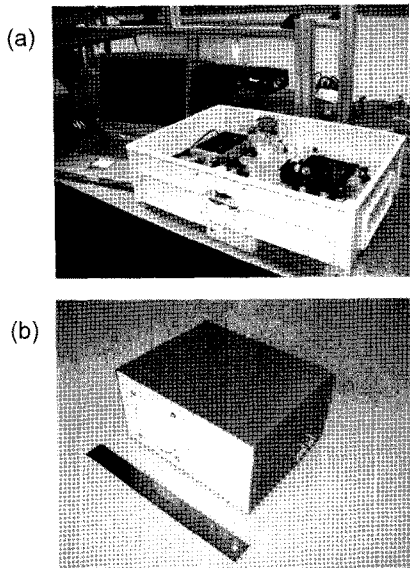
ETRI에서는 프로토타입으로 광섬유 펄스 레이저를 적용한 광전도 안테나 방식의 THz-TDS 시스템을 탁상형(table-top) 크기로 제작하였다. <그림 1>에서와 같이 캐비닛 형태로 외형을 제작하고 내부에는 랙을 사용하였으며, THz의 발생부와 수신부를 각 층에 배치하였다. 맨 위 부분에는 터치 스크린 LCD 모니터와 키보드를 설치하여 THz 분광 및 영상 정보를 표시하고 시스템을 작동할 수 있는 데이터를 입력할 수 있도록 하였다. 시스템 외형의 전체 크기는



<그림 1> ETRI에서 개발한 광섬유 펄스 레이저를 사용한 탁상형 이동식 THz-TDS 시스템

50cm×60cm×90cm 정도이며 무게는 약 50kg이다. 아래에는 바퀴를 장착하여 이동을 용이하게 하였으며, 분석용 시편을 쉽게 장착하기 위한 모듈을 자체설계하여 설치하였다. THz 발생 및 검출을 위한 LT-GaAs 소자는 교체와 정렬을 용이하게 하기 위해서 별도로 제작한 일체형 패키지 모듈(AIO-PM; All-In-One Package Module)을 적용하였다. 0.1~4.0THz 범위에서 70dB의 다이내믹 영역으로 실시간 영상을 얻는 성능을 가지고 있으며, 향후 보다 경량화하기 위한 기술개선을 거쳐 상용화제품으로 개발 가능할 것으로 보인다.

미국의 RPI(Rensselaer Polytech Institute)에서는 <그림 2>(a)에 보인 바와 같이 IMRA 광섬유 레이저를 사용하는 초소형 이동형 THz-TDS 시스템을 제작하였으며 그 크기는 55cm×40cm×20cm, 무게는 10kg에 불과하다. 이것은 실시간으로 0.1~2THz 범위에서 다이내믹



〈그림 2〉 (a) 초소형 광대역THz-TDS 시스템으로 크기는 55cm×25cm×13cm 이다. (b) 협대역 연속선 발생기로, 크기는 25cm×20cm×13cm 이며 중량은 5kg 이내이다.

영역 100dB, 4Hz의 속도로 분광측정이 가능하다. <그림 2>(b)에 보인 연속선의 좁은 선폭 발생장치는 더 작은 크기 (25cm×20cm×13cm)로서 Gunn 다이오드 (0.1~0.8THz)와 Schottky 다이오드 및 열전검출기로 구성되어있다. 0.2~0.4THz 용 시스템은 각각 중량이 4kg과 3kg에 지나지 않는다. 이들의 다이내믹 영역은 25~40dB, 선 스캔 속도는 0.6m/s에 이른다. 한편 광대역, 좁은 선폭의 휴대용 THz 파라메트릭 발생기도 발표되었다<sup>[34]</sup>.

## V. 이동식 THz 통신기기

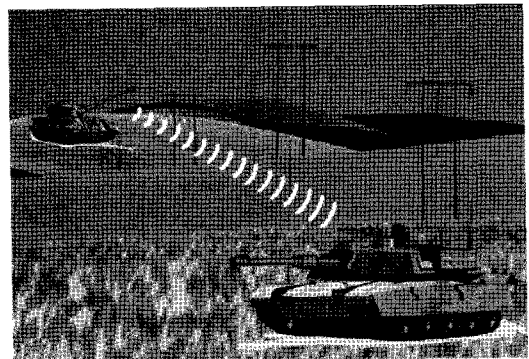
### 1. 초고속 대용량 근거리 무선통신용 THz-파 기술

THz-파의 송수신 장치가 소형화할 경우 이

동하는 물체 및 기기 간의 근거리 무선통신에 매우 유용하게 사용될 것으로 전망된다. 현재의 정보사용량 증가추세로 보면 향후 5~10년 내에 10Gbps 수준의 무선통신 전송속도가 요구될 것으로 보인다. 최소한 HDTV급 고화질에 다중 음성 및 데이터를 실시간으로 비압축 전송하는 기술이 일반화할 것으로 보이는데, 이를 위해서는 캐리어 주파수의 대역도 수백 GHz, 즉 THz 대역을 필요로 하게 될 것이다. 주요 활용분야는 이동식 스포츠 중계나 재난현장에서의 직접 중계 등이 예상될 수 있으며, 기능이 발전함에 따라 새로운 응용분야가 창출될 수도 있다.

THz 송수신 링크(link)는 군사 목적으로도 사용된다. 아래에 논의하겠지만 THz 신호는 대기 중에서 쉽게 감쇠하므로 장거리 교신에는 적합하지 않다. 게다가 THz 링크는 지향성을 가져야 한다. 이러한 장단점 때문에 THz 링크는 전장에서 <그림 3>과 같이 탱크 간 및 전투원 간의 교신 등 보안용의 통신 수단으로 매우 유용하게 사용될 수 있다.

현재 사용되고 있는 블루투스 및 WLAN(Wide Local Area Network)은 10년 이후의 대역폭을 감당할 수 없을 것으로 판단된다. 이들의 캐리어



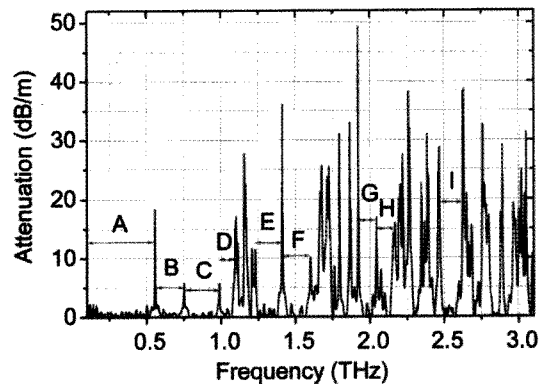
〈그림 3〉 전장에서 탱크 간의 보안용 THz 링크의 개념도

주파수는 수 GHz에 불과하며 현 시점에서 미래 기술로 기대받고 있는 초광대역 기술(UWB; Ultra Wide Band)도 마찬가지이다. 이 시스템에서의 데이터 전송속도는 1Gbps 이하로 제한된다. 실제로 60GHz 대역에서 정적인 상태로 점대 점(point to point) 간에 동작하는 시스템이 소개되었다. 앞에서 언급한 모든 시스템은 향후 10~15년 내에 소요될 대역폭을 일부 만족시킬 수는 있다. 그러나, 미래의 시스템은 전송속도 10Gbps를 만족시키기 위해서 수십 또는 수백 GHz 이상의 주파수에서 동작해야 한다. 따라서, 근거리 무선통신에서의 캐리어 주파수도 증가할 것이다. 미국의 경우 주파수 사용의 허용대역은 300GHz 이하로 엄격히 제한되어 있으며, 275~300GHz 대역은 통신용으로 별도 할당되어있다<sup>[35]</sup>. 유럽에서의 허용 주파수 대역은 275GHz까지이며, 그 이상은 자유롭게 사용할 수 있다. 따라서 이러한 주파수 영역에서 동작하는 시스템들은 THz 시스템이 된다.

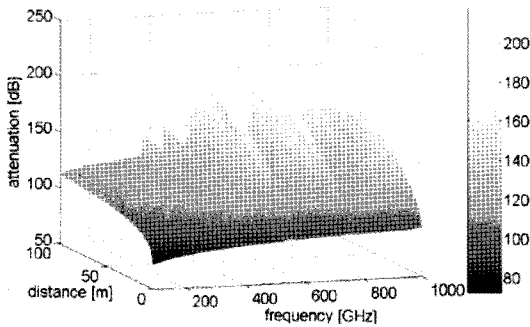
수백 GHz 대역의 주파수는 전자공학적인 방법으로 제공된다. 현재에도 고전적인 마이크로파 기술로 수백 GHz의 주파수를 발생시키는 다양한 기술이 이미 존재한다. 이들은 공명 터널링 다이오드(RTD; Resonant Tunneling Diode), 전달-전자소자(transferred-electron device) 및 전이-시간 소자(transit-time device) 등이 있다. 최근 들어 Eisele 등은 다이아몬드 방열장치 위에 장착한 InP Gunn 소자를 이용하여 2차 조화파로서 250~330GHz 대역에서 3mW 급의 RF 출력을 검증하였다. 이 출력이 충분치 않을 경우에는 증폭기를 이용하여 향상시킬 수 있다. 그러나 더 실제적인 것은 저주파수의 Gunn 다이오드를 연속 체배기로 고주파수화하는 방법이다.

## 2. 대기 및 자유공간에서의 감쇠

미래의 THz 통신용 캐리어 주파수는 300GHz가 될 것이다. 한 편으로는 규제를 받지 않는 대역이면서 오늘날 사용되고 있는 60GHz 보다 5배 정도 높은 주파수이고, 다른 한 편으로는 대기 중의 감쇠가 중간 정도이기 때문이다. 공간을 통한 THz-파의 센싱 및 영상 응용에 가장 큰 장애물은 대기 중에 포함되어있는 수분으로, 이들에 의해 THz-파가 적지 않게 흡수된다. 그러나 여러 가지 실험을 통해 공기 중에서 THz-파의 흡수 스펙트럼을 분석한 결과, 다음 <그림 4>와 같이 투과가능한 일부의 주파수 영역이 존재하며 0.1~3.0THz 사이에 9개의 주요한 투과 영역이 있음이 알려졌다. 그림에서 보듯이 대기 감쇠 스펙트럼에서 300GHz 이상일 때에 수분에 의한 흡수선이 강하게 나타나는 것을 명백하게 알 수 있다. 이 영역에서는 Gbps급의 고속 전송속도를 요구하는 무선링크를 설치 및 유지하기가 어려울 것이다.



<그림 4> 0.1~3THz 대역에서 대기에 의한 감쇠를 보인 것이다. A: 0.1~0.55 THz; B: 0.56~0.75 THz; C: 0.76~0.98 THz; D: 0.99~1.09 THz; E: 1.21~1.41 THz; F: 1.32~1.59 THz; G: 1.92~2.04 THz; H: 2.05~2.15 THz; I: 2.47~2.62 THz. 측 정온도는 23 $^{\circ}$ C, 상대습도는 26%이다



〈그림 5〉 100GHz~1THz 영역에서 자유공간 및 기체에 의한 감쇠의 누적치

대기 중에서는 분자들의 회전 전이 (rotational transition)에 의한 감쇠 이외에 자유공간에서의 감쇠효과도 존재한다. 〈그림 5〉는 자유공간 감쇠 및 기체에 의한 감쇠의 누적치를 링크 간의 거리와 주파수에 대하여 나타낸 것이다. 대기의 감쇠가 거의 없는 특징의 주파수 영역에서도, 자유공간의 감쇠효과는 심각하다. 예를 들어, 300 GHz에서는 3GHz에 비하여 자유공간에서의 감쇠가 40dB 높다. 이 수치는 수 10m 정도의 실제 통신에도 응용하기 어려운 값이다. 그러므로 미래의 초광대역 THz 무선통신 시스템은 실내의 중간거리 및 근거리 링크로 국한 될 것이다. 옥외 통신에 대한 전망은 기후조건이 허락되는 일부 지역에서만 가능할 것으로 판단된다.

## VI. THz-파 영상기술

THz 영상(imaging)은 현재로서는 항만이나 공항에서의 보안감시 또는 의료 및 생명과학 용으로서 병원이나 실험실 등에서 고정식으로 운용될 가능성이 크다. 그러나 기기의 소형화로 이동이 가능하게 될 경우 그 응용분야는 더욱 확대될 것이다. 즉, 분석이나 측정할 대상을 실험실로 옮

기기 어려운 경우로서 위급한 상황이거나 신속한 처리가 요구될 때에 효용가치가 매우 클 것으로 보인다. 이 외에도 기술개선을 통해 일반인들도 간편한 검사를 할 수 있게 되면 수요는 급증할 것이다.

THz 영상은 보통 펄스파를 이용하는 것과 연속선을 이용하는 것으로 구분할 수 있는데, 여기에서는 이에 대한 특징을 각각 살펴보고, 그 응용 사례를 보였다.

### 1. THz 펄스파 영상기술

THz-TDS의 펄스파를 이용하는 영상의 주요 장점은 광대역 특성, 비침습성 및 결맞음 검출이다. 최초의 THz 펄스 영상실험은 집속된 THz-파를 고정하고 시편을 스캔(scan)시키는 방법으로 행해졌다<sup>[36]</sup>. 이 방법으로는 굴절률의 변화가 펄스의 시간차 및 위상으로 나타나는데, 한편으로 밀도의 변화가 펄스의 피크값을 변조시킨다. THz 펄스를 주파수 영역에서 분석하면, THz 펄스 스펙트럼 내에서 물질에 대한 특성을 규명할 수 있다. 이와 같은 주사방식은 생의학 진단이나 마약, 화약 및 지뢰의 영상 및 센싱 그리고 비파괴 결합분석 분야<sup>[37]</sup>에서 광범위하게 활용되고 있다.

또 다른 중요한 THz 펄스파 영상기술은 토모그래피(tomography)이다. 이 기술은 반사 또는 투과한 THz-파를 조사하여 물체의 단면 영상을 얻어내는 방법이다. 반사형 THz 펄스파를 주사하는 방식의 영상기법도 토모그래피 기술로 고려할 수 있다. 즉, 적층구조의 시편에서 각 계면으로부터 반사한 펄스정보를 기록하여 3차원 프로파일을 얻어낼 수 있다<sup>[38]</sup>. 예를 들어 우주선(space shuttle)의 절연타일을 분석한 경우, 내



부에 존재하는 결함으로 인해 시간 및 주파수 영역에서 각각 THz 펄스가 변조된다. THz 펄스파로 계산되는 토모그래피 영상은 X-선 토모그래피를 THz 영역에서 적용하는 것이라 볼 수 있다<sup>[39]</sup>. 프레넬(Fresnel) 렌즈를 이용하는 THz 토모그래피는 주파수에 따라 초점거리가 변하므로, 서로 다른 깊이에서의 영상을 하나의 영상면에 투영할 수 있다.

THz 2차원 EO(Electro Optic) 영상기법은 종래의 주사방식으로부터 기술적으로 큰 진보를 가져온 것으로 평가된다<sup>[40]</sup>. 여기에서는 THz-파를 집속시키는 대신에 빛의 다발(flux) 형태로 확대하여 EO 센서를 변조시킨 후, 변조된 빔의 프로파일을 CCD 카메라로 촬영한다. 이 방법은 영상 획득 시간이 대폭 줄고, 실시간 영상이 가능한 장점이 있다. 이를 이용한 분광/영상 기법도 소개되었으나 현장에서 실제 사용할 경우에 SNR 값이 너무 낮은 것이 장애물이다.

이 외에도 레이더 천문학, 마이크로파 홀로그래피 및 초음파기술 등에서 사용되던 방법을 응용하는 기술이 있다.

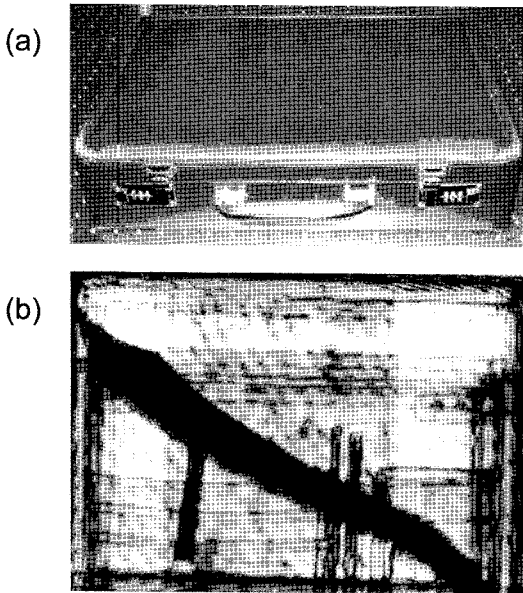
## 2. THz 연속선(CW)을 이용한 영상

최근 THz 기술분야에서 많은 관심을 끌고 있는 것은 CW THz-파의 발생과 이를 이용한 영상기술이다. CW THz 영상기술은 사실 펄스영상보다 먼저 소개되었으나<sup>[41]</sup>, 현장에서의 적용은 최근에 실시되었다. CW THz 영상은 펄스 영상에 비하여 단일 주파수에서 다이내믹 영역이 넓고 스펙트럼 대역폭이 좁아서 특정의 군사용으로 사용하기에 유리하다. 펄스파의 에너지는 넓은 스펙트럼 대역에 퍼져있어 수분에 의한 흡수손실이 많은 반면에, CW 시스템은 대기 흡수

스펙트럼의 특정 저손실 영역에 집중시킬 수 있으므로 목표물과 거리를 두고 격리된 형태인 스탠드오프(standoff)로 사용하기에 유리하다. 또한, CW 시스템에서는 시간지연 주사방식이 필요 없으므로 영상의 획득시간이 펄스 영상에 비해 빨라진다.

영상을 목적으로 사용되는 CW THz-파의 발생 방법은 여러 가지가 있는데, 주파수 체배 방식의 마이크로파<sup>[42]</sup>, 후진파 발전기<sup>[43]</sup>, 양자폭포 레이저<sup>[44]</sup>, CO<sub>2</sub> 펌핑 방식의 THz 기체 레이저, 광 혼합방식<sup>[45]</sup> 및 THz 파라메트릭 방법<sup>[5]</sup> 등이 있다. 광혼합방식과 THz 파라메트릭 방법에서는 넓은 대역에서 연속적인 주파수 가변에 의해 CW THz 영상의 스펙트럼 정보를 검색할 수 있다. 그러나 많은 응용분야에서, 투과한 THz-파의 강도에 의하여 영상의 품질이 정해지므로 강력한 단파장의 CW 파를 발생시키는 기술이 광대역 THz-파보다 유리하다.

CW THz 시스템으로 영상을 얻는 방법은 두 가지가 있다. 하나는 집속한 THz 빔을 주사시키는 것이고, 다른 하나는 집속된 검출소자의 배열(array) 형태에서 직접 영상을 얻는 것이다. 전자의 경우, Schottky 다이오드, Golay 셀, 또는 열전 검출기(pyroelectric) 등의 단일 검출장치를 이용하여 빔의 전체 파워를 검출한다. 이것은 다이내믹 영역을 높일 수는 있지만 영상의 각 화소가 주사 시스템의 점 대 점으로 이루어진다는 단점이 있다. 이것은 시간을 많이 소요하고, 움직이는 물체에 대한 정보를 얻는 것이 불가능하다. 한편, 배열방식의 고감도 THz 검출기의 개발은 최근까지도 활발히 이루어지고 있다. 열전 검출기 배열방식은 이미 상용화하였으나 THz 대역에서의 감도는 좋지 않으며 크기도 작아서 큰 시료의 고해상도 영상을 얻기는 매우 어

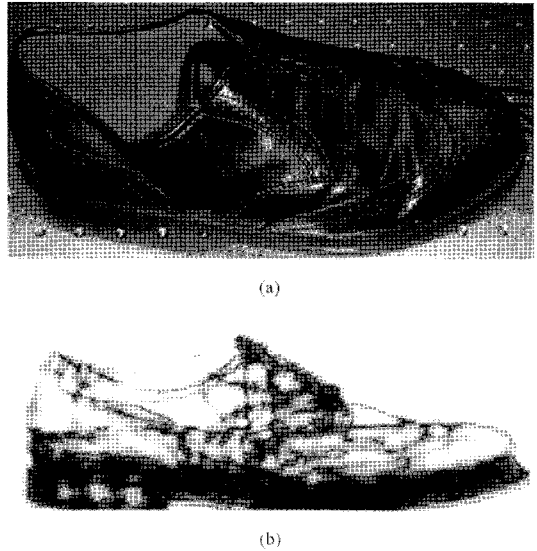


〈그림 6〉 (a) 가죽으로 만든 여행가방으로 내부에는 펜, 잡지와 큰 칼이 들어있다 (b) 0.2THz로 보인 영상

렵다. 검출기 배열방식은 또한 초점을 형성할 때에 비틀림이나 수차 등의 영향을 크게 받는다. 반면에 주사방식에서는 회절한계에 이르는 초점을 쉽게 형성하여 이용할 수 있다.

여기에서는 CW 영상에 대해 비파괴 시험과 보안 검사, 두 가지의 예를 들어 보인다. 이 결과는 주사 방식의 영상이며 주파수 체배기를 통한 Gunn 다이오드 발진기를 광원으로, Golay 셀을 검출기로 사용하였다. 〈그림 6〉은 여러 가지 물건이 들어있는 여행가방의 내부를 0.2THz 주사 방식으로 얻은 영상이다.

여행가방 내부에 있는 대부분의 절연성 물질은 THz-파를 투과시키기 때문에 그 영상이 얻어진다. 반면에 금속성 물질은 THz-파를 차단하여 그림과 같이 물체의 실루엣이 나타난다. 이러한 주사방식의 영상을 얻기 위해서는 8분 정도의 시간이 필요하며, 실생활에 적용하기에는 너



〈그림 7〉 (a) 구두의 일반 영상 (b) 0.2THz로 주사한 영상으로 전체 구조를 보인다

무 긴 시간이다. 하지만, 뛰어난 유용성으로 인해 지속적인 발전이 이루어져 영상 속도가 개선될 것임은 의심의 여지가 없다.

〈그림 7〉은 CW THz-파를 주사하여 얻어진 구두의 영상이다. 구두의 형태가 고무 밑창을 포함하여 잘 나타나는데, 이 방법은 THz-파가 물질의 이온화시키지 않는 성질을 이용하여 공항 및 항만검색 시 피검사자가 구두를 신은 채로 검사를 받게 할 수 있다.

이 결과는 CW THz 영상이 보안 검색에 유용하게 적용될 수 있음을 뜻한다. 영상의 획득 속도가 향상될 미래에는 CW THz 영상기술이 보안 검색에서 X-선 영상의 단점을 보완하고 두 방식이 상호 보상할 수 있게 될 것이다.

## VII. 결론

가장 최근의 THz 신호원 기술과 통신, 영상기

술의 새로운 개발결과로 소형화를 위한 기반 및 응용범위가 확대되었다. 이러한 THz 기술의 성공적인 적용을 위하여 필수적인 것은 (1) 성숙된 THz 기술, (2) 이동식 THz 무선통신 시스템, (3) 협대역 CW THz-파를 이용한 반사형의 스탠드오프식 THz 신호원 및 검출기, 그리고 (4) 최적화한 데이터 검색 알고리즘이다. 아직도 소형 THz 시스템을 이용한 THz 기술이 실제 적용되기 위해서는 많은 도전과제와 장애물들이 존재하고 있다. 강력한 THz 신호원과 고감도의 검출기 개발이 당면과제이며, THz 포논 모드에 대한 계산이 또한 남아있는 숙제이다. 또한, 대기 중에서의 감쇠와 산란 효과는 THz-파의 센싱감도를 크게 저하시킨다. 그러나, THz와 관련한 과학과 기술은 지금까지 엄청난 업적을 쌓아왔다. 전세계적으로 이루어지고 있는 연구활동과 함께, 지금까지의 THz 통신과 영상의 측정결과는 THz 기술이 향후 많은 분야에서 점점 더 중요한 역할을 할 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

- [1] S. Cherry, "Edholm's law of bandwidth", *IEEE Spectr.* Vol.41, pp.50 (2004).
- [2] M. R. Scarfi, M. Romano, R. Di Pietro, O. Zeni, A. Doria, G. P. Gallerano, E. Giovenale, G. Messina, A. Lai, G. Campurra, D. Coniglio, and M. D'Arienzo, "THz exposure of whole blood for the study of biological effects on human lymphocytes", *J. Biol. Phys.*, Vol.29, pp.171-177, 2003.
- [3] R. H. Clothier and N. Bourne, "Effects of THz exposure on human primary keratinocyte differentiation and viability", *J. Biol. Phys.*, Vol.29, pp.171-185, 2003.
- [4] Y. C. Shen, T. Lo, P. F. Taday, B. E. Cole, W. R. Tribe, and M. C. Kemp, "Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.86, pp. 241-116, 2005.
- [5] K. Kawase, "Terahertz imaging for drug detection and large-scale integrated circuit inspection", *Opt. Photon. News*, pp.34-39, Oct., 2004.
- [6] E. L. Saldin, E. A. Schneidmiller, and M. V. Yurkov, "The Physics of Free Electron Lasers", *Advanced Texts in Physics*. New York: Springer-Verlag, 2000, Berlin.
- [7] N. Sarukura, H. Ohtake, S. Izumida, and Z. L. Liu, "High average-power THz radiation from femtosecond laser-irradiated InAs in a magnetic field and its elliptical polarization characteristics", *J. Appl. Phys.*, Vol.84, pp.654-657, 1998.
- [8] M. Nakajima, M. Takahashi, and M. Hangyo, "Strong enhancement of THz radiation intensity from semi-insulating GaAs surfaces at high temperatures", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, pp. 1462-1464, 2002.
- [9] G. Zhao, R. N. Schouten, N. van der Valk, W. T. Wenckebach, and P. C. M. Planken, "Design and performance of a THz emission and detection setup based on a semi-insulating GaAs emitter" *Rev.*

- Sci. Instrum., Vol.73, pp.1715-1719, 2002.
- [10] H.-M. Heiliger, M. Vossebu"rger, H. G. Roskos, H. Kurz, R. Hey, and H. Kurz, "Application of liftoff low-temperature-grown GaAs on transparent substrates for THz signal generation", Appl. Phys. Lett., Vol.69, pp.2903-2905, 1996.
- [11] M. Tani, S. Matsuura, K. Sakai, and S. Nakashima, "Emission characteristics of photoconductive antennas based on low-temperature-grown GaAs and semi-insulating GaAs", Appl. Opt., Vol.36, pp.7853-7859, 1997.
- [12] P. Gu, M. Tani, S. Kono, K. Sakai, and X.-C. Zhang, "Study of terahertz radiation from InAs and InSb", J. Appl. Phys., Vol.91, pp.5533-5537, 2002.
- [13] Q. Wu, M. Litz, and X.-C. Zhang, "Broadband detection capability of ZnTe electro-optic field detectors", Appl. Phys. Lett., Vol.68, pp.2924-2926, 1996.
- [14] A. Rice, Y. Jin, X. F. Ma, X.-C. Zhang, D. Bliss, J. Larkin, and M. Alexander, "Terahertz optical rectification from (110) zinc-blende crystals", Appl. Phys. Lett., Vol.64, pp.1324-1326, 1994.
- [15] K. H. Yang, P. L. Richards, and Y. R. Shen, "Generation of far-infrared radiation by picosecond light pulses in LiNbO3", Appl. Phys. Lett., Vol.19, pp.320-323, 1971.
- [16] T. J. Carrig, G. Rodriguez, T. S. Clement, A. J. Taylor, and K. R. Stewart, "Scaling of terahertz radiation via optical rectification in electro-optic crystals", Appl. Phys. Lett., Vol.66, pp.121-123, 1995.
- [17] A. M. Sinyukov and L. M. Hayden, "Generation and detection of terahertz radiation with multilayered electro-optic polymer films", Opt. Lett., Vol.27, pp.55-57, 2002.
- [18] P. Y. Han and X. C. Zhang, "Coherent, broadband mid-infrared terahertz beam sensors", Appl. Phys. Lett., Vol.73, pp.3049-3051, 1998.
- [19] P. Y. Han, G. C. Cho, and X. C. Zhang, "Broad band mid-infrared THz pulse: Measurement technique and applications", J. Nonlinear Opt. Phys. Mater., Vol.8, pp.89-105, 1999.
- [20] Y. C. Shen, P. C. Upadhyya, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, I. S. Gregory, C. Baker, W. R. Tribe, and M. J. Evans, "Generation and detection of ultrabroadband terahertz radiation using photoconductive emitters and receivers", Appl. Phys. Lett., Vol.85, pp.164-166, 2004.
- [21] Q. Wu and X.-C. Zhang, "Free-space electro-optic sampling of terahertz beams", Appl. Phys. Lett., Vol.67, pp.3523-3525, 1995.
- [22] Q. Wu, M. Litz, and X.-C. Zhang, "Broadband detection capability of ZnTe electro-optic field detectors", Appl. Phys. Lett., Vol.68, pp.2924-2926, 1996.
- [23] VDI Virginia Diodes, Inc. [Online]. Available: <http://www.virginiadiodes.com>
- [24] Microtech Instruments, Inc. [Online].

- Available: <http://www.mtinstruments.com>
- [25] Kawase Initiative Research Unit. [Online]. Available: <http://www.riken.go.jp/lab-www/THz/>
- [26] E. R. Brown, F. W. Smith, and K. A. McIntosh, "Coherent millimetre-wave generation by heterodyne conversion in low-temperature-grown GaAs photoconductors", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.73, pp.1480-1482, 1993.
- [27] Coherent Inc. [Online]. Available: [www.coherent.com/Lasers/index.cfm?fuseaction=show.page&id=779&loc=834](http://www.coherent.com/Lasers/index.cfm?fuseaction=show.page&id=779&loc=834)
- [28] R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram, H. E. Beere, E. H. Linfield, A. G. Davies, D. A. Ritchie, R. C. Iotti, and F. Rossi, "Terahertz semiconductor-heterostructure laser", *Nature*, Vol.417, pp.156-159, 2002.
- [29] L. Mahler, A. Tredicucci, R. Köhler, F. Beltram, H. E. Beere, E. H. Linfield, and D. A. Ritchie, "High-performance operation of single-mode terahertz quantum cascade lasers with metallic gratings", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.87, pp.181-101, 2005.
- [30] S. Kumar, B. S. Williams, S. Kohen, Q. Hu, and J. L. Reno, "Continuous-wave operation of terahertz quantum-cascade lasers above liquid-nitrogen temperature", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.84, pp.2494-2497, 2004.
- [31] Virginia Diodes, Inc. [Online]. Available: <http://www.virginiadiodes.com/mixers.htm>
- [32] Microtech Instruments, Inc. [Online]. Available: <http://www.mtinstruments.com/thzdetectors/index.htm>
- [33] Pacific Millimeter Products. [Online]. Available: <http://www.pacificmillimeter.com/Detectors.html>
- [34] S. Hayashi, H. Minamide, T. Ikari, Y. Ogawa, K. Shindo, T. Shibuya, H. Sakai, H. Kan, T. Taira, H. Ito, C. Otani, and K. Kawase, "Palmtop terahertz-wave parametric generators", in *Conf. Dig. 2005 Joint 30th Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves & 13th Int. Conf. Terahertz Electronics*, pp.399-400, TC5-64.
- [36] B. B. Hu and M. C. Nuss, "Imaging with terahertz waves", *Opt. Lett.*, Vol.20, pp.1716-1718, 1995.
- [37] D. Zimdars, J. Valdmanis, J. White, and G. Stuk, "Time domain terahertz detection of flaws within space shuttle prayed on foam insulation", *Tech. Dig. Conf. Lasers and Electro-Optics*, 2004, paper CThN4.
- [38] D. M. Mittleman, S. Hunsche, L. Boivin, and M. C. Nuss, "T-ray tomography", *Opt. Lett.*, Vol.22, pp.904-906, 1997.
- [39] B. S. Ferguson, S. H. Wang, D. Gray, D. Abbot, and X.-C. Zhang, "T-ray computed tomography", *Opt. Lett.*, Vol.27, pp.1312-1314, 2002.
- [40] Q. Wu, T. D. Hewitt, and X.-C. Zhang, "Two-dimensional electro-optic imaging of terahertz beams", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.69, pp.1026-1028, 1996.
- [41] T. S. Hartwick, D. T. Hodges, D. H. Barker, and F. B. Foote, "Far infrared imagery", *Appl. Opt.*, Vol.15, pp.1919-1922, 1976.

- [42] N. Karpowicz, H. Zhong, C. Zhang, K.-I. Lin, J.-S. Hwang, J. Xu, and X.-C. Zhang, "Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications", Appl. Phys. Lett., Vol.86, pp.054-105, 2005.
- [43] A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. N. Ohshima, Y. Morita, C. Otani, and K. Kawase, "Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator", Appl. Opt., Vol.43, pp.5637-5646, 2004.
- [44] J. Darmo, V. Tamosiunas, G. Fasching, J. Kroöll, K. Unterrainer, M. Beck, M. Giovannini, J. Faist, C. Kremser, and P. Debbage, "Imaging with a Terahertz quantum cascade laser", Opt. Express, Vol.12, pp.1879-1884, 2004.
- [45] K. Siebert, H. Quast, R. Leonhardt, T. Löffler, M. Thomson, T. Bauer, and H. G. Roskos, "Continuous-wave all-optoelectronic terahertz imaging", Appl. Phys. Lett., Vol.80, pp.3003-3005, 2002.

## 저자소개



백 문 철

1979년 2월 서울대학교 자원공학과 학사  
 1982년 2월 한국과학기술원 재료공학과 석사  
 1990년 8월 한국과학기술원 재료공학과 박사  
 1996년 3월 ~ 1997년 3월 미국 Lucent Tech, Bell Labs, 교환연구원  
 2002년 3월 ~ 2004년 3월 충남대학교 신소재공학과 겸임교수  
 1982년 4월 ~ 현재 한국전자통신연구원 책임연구원  
 주관심 분야: 테라헤르츠 양자우물 소재, 정보저장 디스크 소재



강 광 용

1975년 2월 서울대학교 섬유고분자공학과 학사  
 1982년 2월 국립경상대학교 사범대 물리학과 석사  
 1988년 2월 부산대학교 자연대 물리학과 박사  
 1982년 3월 ~ 1984년 2월 국립경상대학교 실험조교  
 1985년 3월 ~ 1988년 3월 부산대학교 기초과학연구소 연구조원  
 1989년 1월 ~ 현재 한국전자통신연구원 책임연구원  
 주관심 분야: 강상관전자계 소재/소자, 테라헤르츠 소재/소자/시스템