

# 테라헤르츠파 기술과 이를 이용한 비파괴검사 평가

## Introduction to Terahertz Wave Technology and Its Usage for Nondestructive Testing Evaluation

김학성(한양대학교 기계공학부)

Hak-Sung Kim (E-mail: kima@hanyang.ac.kr)

### 요약

최근 들어 급격히 발전한 테라헤르츠파 발생/검출 기술에 힘입어 생명, 화학, 기계, 통신 등의 다양한 분야에서 THz 관련 응용 연구가 진행되고 있다. 본 강좌에서는 최신 THz 발생/검출 기술을 분야별로 살펴보고 바이오, 재료, 기계 분야의 비접촉식 비파괴검사 분야에 적용 개발되고 있는 THz 기술에 대하여 기술하고자 한다. 특히, 구조물의 THz 비파괴검사 평가 분야 세부 기술에 대하여 자세하게 소개한다.

### 1. 서론

테라헤르츠파(terahertz wave, THz wave)는 적외선과 마이크로파의 중간 영역에 해당하는 전자기파로 약 0.1~10 THz의 주파수(파장 1 mm~30 μm)를 갖는 전자기파를 말한다(그림 1).

THz는 광학적으로 금속을 제외한 거의 모든 물질(플라스틱, 나무, 종이, 직물 등)에 대하여 매우 낮은 유전상수를 가지므로 물질 내부를 거의 손실 없이 잘 투과한다[1-5]. 이와 더불어 THz파는 기존의 X선 에너지의 백만분의 일 수준의 에너지(4.1 meV)를 가지므로 인체의 세포구조를 파

괴하지 않으면서 파장이 μm대역으로 충분히 작으므로 생체친화형 고해상도 영상 구현도 가능하다[5]. 생명 친화적이며 다양한 물질을 잘 투과한다는 THz의 성질은 비파괴검사분야의 응용 기술로서 특별한 관심을 받고 있는 중요한 이유가 되고 있다. 또한, THz는 전파의 투과성과 광파의 직진성을 모두 가지고 있으므로 기존의 초음파 비파괴검사처럼 소재와 직접 접촉할 필요가 없으며 물과 같은 중간 매개체도 필요하지 않으므로 차세대 비접촉/비파괴검사 영상 기술로의 무한한 잠재력을 갖고 있다. 또한, THz파의 에너지는 분자들의 비틀림, 회전-진동 에너지와 공명을 잘 일으켜 물질별로 고유의 독특한 흡수 스펙트럼을 띄므로 이를 이용하여 재료의 물질 성분 확인이 가능하다[6]. 그러므로 THz파는 재료 내부의 산화, 미세 열화, 흡습 등 미시적인 물질 변화를 비파괴적으로 검사할 수 있는 획기적인 기술로 발전할 가능성을 지니고 있는 것이다.

THz를 인위적으로 발생시키는 방법은 1970년대부터 본격적으로 개발되어 왔으나 1990년대 이전에는 THz 발생 및 측정이 까다롭고 어려워 상업적으로 거의 주목을 받지 못하였고 천문학, 물리학 등의 영역에서 THz 스펙트럼 발생과 측정 원리 자체에 관한 연구에 국한되어 연구가 진행되었다[7]. 그러나 2000년대에 진입하면서 THz 발생/검출 소자 제작을 위한 초미세 공정 기술(MEMS)이 급격히 발전하였고 THz 발생에 필요한 펨토초 레이저(femtosecond laser) 기술의 상용화와 저가화, 소형 고출력의 THz 소스가 개발이 진행되면서 THz 발생 및 측정이 비교적 용이

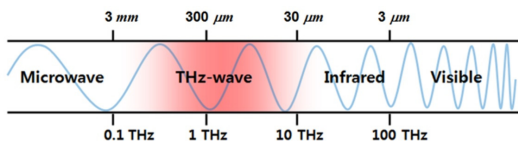


그림 1. 테라헤르츠파의 범위[1]

하게 되었다. 그 이후로 THz의 발생/검출에 관한 기초 연구를 뛰어넘는 실제 응용연구가 활발하게 이루어지고 있으며 여러 혁신적인 연구 사례들이 보고되고 있는 상황이다. 본 기술 강좌에서는 THz 발생 및 검출에 관한 최신 기술들을 간단히 살펴보고 이를 이용한 응용 연구 사례들에 대하여 소개한다. 특히, THz를 이용한 비파괴검사 평가에 관하여 살펴보고 향후 THz의 연구 방향과 그 가능성에 대하여 논한다.

## 2. 테라헤르츠 발생/검출 기술 소개

### 2.1. 펄스형 테라헤르츠 발생 기술

테라헤르츠파의 발생 방법은 크게 펄스형 발생법과 연속형 발생법으로 나눌 수 있다. 펄스형 테라헤르츠파는 피코초 이하(subpico second,  $< 10^{-12}$  sec)의 펄스폭을 가지며 이를 주파수로 변환시키면 매우 넓은 스펙트럼을 보인다[8].

펄스형 테라헤르츠파를 발생시키기 위해서는 고출력 펄스 레이저를 사용하게 되므로 그 특성상 넓은 공간과 다소 복잡한 설비를 요구하기 때문에 물리적, 화학적, 생물학적 물질의 특성을 연구하는 용도로 적합하다고 알려져 있다[9].

현재 가장 활발히 진행중인 펄스형 테라헤르츠파 발생 방법은 (1) 광전도 안테나 방법과 (2) 광정류 방법, (3) 반도체 표면전계 이용 방법이 있다. 먼저, 광전도 안테나 방법에서는 저온 성장한 갈륨 아세나이드(LT-GaAs)결정 등의 반도체 물질 위에 금속으로 안테나 구조를 만들어 전압을 인가한다.

전압이 가해진 전극 사이로 펄스 레이저로부터 광펄스가 인가되게 되면 순간적으로 여기된 전자가 인가된 전압에 의하여 가속된다. 이때 발생한 전자(electron)와 정공(hole) 사이에서 전기 쌍극자(electron dipole)가 형성되고 이 쌍극자의 시간에 따른 변화가 곧 THz 영역에 해당하는 것이다. 이

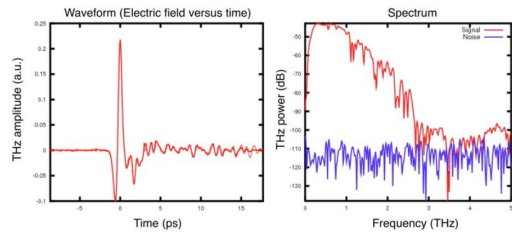


그림 2 펄스형 테라헤르츠의 (a) 파형, (b) 스펙트럼[9]

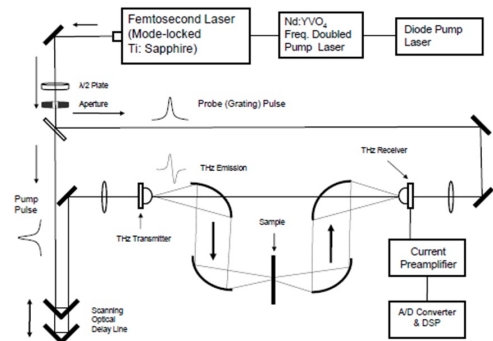


그림 3 펄스형 THz 발생 및 검출을 위한 시스템 개요도 (transmission 모드)[9]

방법은 펄스형 THz 발생법 중 상대적으로 큰 출력을 보이며 레이저 출력과 인가된 전압을 조절함으로써 THz 출력을 조절할 수 있는 장점이 있다. 그러나 파장 대역이 사용되는 반도체 결정의 종류와 안테나의 구조적인 특성에 의해 제한되는 특성을 가지고 있다. 두번째 방법인 광정류 방법은 펄스형 레이저가 GaAs나 ZnTe 등 반도체 결정에 입사될 때 일시적으로 일어난 비선형성을 이용한다. 극초단의 레이저 펄스가 광학결정에 조사되면 결정 내에 순시분극(transient polarization, P(t))을 유지하고 이 순시분극의 2차 시간 미분에 비례( $\partial^2 P(t)/\partial t^2$ )하는 THz파를 방사한다. 광정류에 의한 THz 발생법은 광전도 안테나법에 비하여 THz 파의 출력은 작으나 구조적으로 간단하고 동작 주파수 범위가 매우 넓다는 장점을 가지고 있다. 마지막으로 순수한 반도체 표면에

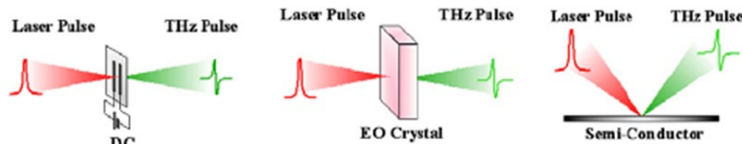


그림 4 펄스형 THz 발생 기술: (a) 광전도 안테나법, (b) 광정류법, (c) 반도체 표면전계 이용[10]

레이저를 조사하면 THz가 발생하게 되는데 이를 반도체 표면전계를 이용한 THz 발생법이라고 한다. 이러한 현상은 여러 효과로 설명되고 있는데 반도체에 고유하게 존재하는 표면전계(intrinsic surface depletion field)와 전자, 정공의 확산속도의 차이(photo-dember 효과)에 의해 생성되는 쌍극자에 의한 THz 방사해석이 가장 유력하다[7]. 전압을 인가하지 않은 순수한 반도체 표면으로부터의 THz 방사는 그 구조가 매우 간단하며 광정류법에 비해 큰 THz파 출력을 얻을 수 있으며 광전도 안테나법보다는 넓은 스펙트럼을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다[11].

## 2.2. 연속형 테라헤르츠 발생 기술

연속형 THz파는 중심 주파수 주변의 좁은 스펙트럼을 가진 반면 주파수 가변성과 그 효율이 매우 좋은 장점을 갖고 있다. 대표적인 연속형 THz파의 발생 방법으로는 자유전자 레이저(free electron laser)를 이용하는 규모가 큰 방법과 양자층계 레이저(quantum cascade laser, QCL)를 이용하는 방법, 두 레이저의 주파수 차이를 이용한 광혼합 방법(photomixer) 등이 있다[7,10,11]. 먼저, 자유전자 레이저는 구조가 거대하고 복잡한 장비의 조합으로 이루어져 소형화가 어려운 단점이 있다. 양자층계 레이저는 레이저 기기를 초저온으로 냉각시켜야 하고 고난도의 반도체 공정을 통하여 소자를 제작하여야 하는 단점이 있다. 포토믹싱 방법은 두 개의 독립된 DFB LD (distributed feedback laser diode)를 이용하여 연속형 THz파를 발생시키는 방법으로써 동일한 편광(polarization)을 가지고 주파수가 각각  $f_1$ ,  $f_2$ 인 두 개의 빛을 공간상에 겹치게 한 후 여기에서 발생하는 비팅(beatting)에 의하여 THz파를 발생시킨다. 이때 두 파장의 차이가 수 nm정도의 값을 가져야 원하는 THz 주파수를 얻을 수 있다. 여기에서 DFB LD의 동작 온도를 조절하여 각 레이저의 동작 파장을 조절하여 비팅 주파수가 달라지게 되면 연속 THz의 주파수를 1 MHz 정도의 정확도로 가변할 수 있다. 포토믹싱 방식은 구조적으로 간단하면서 소형화가 가능한 장점이 있는 반면 그 파워가 낮으며 테라헤르츠 발생 안테나 기술이 복잡하다는 단점을 가지고 있다. 하지만, 이러한 단점들을 극복한다면 비파괴검사용 소형

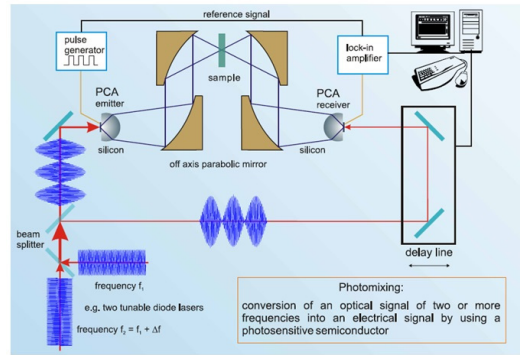


그림 5 연속 THz파 발생을 위한 포토믹싱 방법의 개요도[13]

장비의 구현 방식으로 그 응용 가능성이 높다.

## 2.3. 펄스형 THz 검출 기술

펄스형 THz파는 그 에너지의 크기가 meV단위로 매우 작기 때문에 측정이 용이하지 않다. 따라서 직접적으로 펄스를 시간축 상에서 측정하지 못한다. 이를 극복하기 위하여 샘플링 방법을 통한 간접 측정 방법을 사용한다. 현재 THz 펄스의 측정에 일반적으로 사용되고 있는 방법은 광전도 안테나법이다[7]. 광전도 안테나를 이용하는 경우는 THz 펄스의 발생 원리를 역으로 이용한다. 즉 펄스 레이저 빔을 안테나의 양끝에 조사하여 운반자가 만들어지고 이때 THz파가 도달하면 전계에 의하여 운반자가 가속되어 미세 전류 펄스가 발생하며 이를 안테나 양단 전극에 설치된 전류 검출 소자로 측정하게 된다. 이 전류값이 THz파의 크기에 비례하므로 간접적으로 THz파의 크기와 시간별 THz 추이를 측정할 수 있다. 전광 샘플링 방법은 검출용 레이저 빔과 측정하고자 하는 THz 파를 동시에 비선형 결정에 조사하여 측정하는 방식이다. THz파 펄스의 전기장은 결정 내에서 전기 광학 효과(electro-optic effect or Pockles effect)에 의해서 복굴절(birefringence)을 유도한다. 이 때, 선형 편광된 검출용 레이저 빔이 결정에 조사되면 전파방향에 수직인 두 편광 성분이 서로 다른 굴절률을 겪게 됨으로써 두 성분 사이에 위상 지연이 발생하게 된다. 위상 지연이 발생한 레이저 빔은  $\lambda/4$  파장판을 지나 타원 편광이 되고 프리즘에 의하여 강도가 다른 두개의 편광성분으로 나누어져 평행 광 다이오드

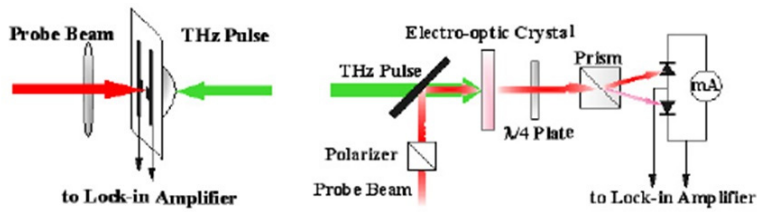


그림 6 THz 측정 기술 (a) 광전도 안테나법, (b) 전광 샘플링법[7]

에 입사하므로 검출회로에 전류가 흐른다. 이 전류값이 THz파의 크기에 비례하게 된다[7].

### 2.4. 연속형 THz 검출 기술

연속형 THz의 측정에는 볼로미터(bolometer), 갈레이 셀(Golay cell), 쇼트키 장벽 다이오드(Shottky barrier photodiode), 그리고 SIS(super conductor-insulator-superconductor) 믹서 THz파 검출기 등이 사용되고 있다[11].

먼저 볼로미터 THz 검출기는 매우 작은 열용량과 매우 큰 열팽창계수를 갖는 저장 물질에 THz가 인가되면 그 물질의 저항 변화를 측정함으로써 THz를 검출하는 방식이다. 여기에 산화 망간, 산화코발트, 산화니켈을 기반으로 한 써미스터(thermistor) 소자가 사용되는데 THz 영역의 검출을 위해서는 극민감 저온 반도체 혹은 초전도체 볼로미터가 사용된다. 갈레이 셀(Golay cell)은 저열전도도를 갖는 제논(Xenon)가스가 충전된 밀봉

구조가 사용된다. 이 밀봉 구조에는 유연 거울 소자가 연결되어 있다. THz가 밀봉된 Xenon에 조사되면 가스가 팽창하게 되고 여기에 달린 유연 거울 소자를 움직이게 되며 이러한 움직임을 감지하여 THz를 측정하게 되는 원리이다. 쇼트키 장벽 다이오드는 THz파가 조사되면 p-n junction 으로부터 발생하는 전류를 감지하여 THz를 검출하는 원리로 제작이 간편하고 소형화가 가능하다는 장점이 있어 널리 사용되고 있는 방식이다. SIS 방식에서는 Nb, NbTiN 등이 초전도체로 사용되며 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN 등이 절연체(insulator)로 사용된다. SIS의 원리는 1 K 정도의 극저온에서 SIS에 두 초전도체에 전압을 인가하고 중간의 절연체 THz파가 조사되었을 때 터널링 효과에 의하여 양단의 초전도체 사이에 전류가 발생하게 되며 이를 측정함으로써 THz파의 크기와 파형을 측정할 수 있다. 이 방법은 아직까지 대면적화하기에 힘들뿐만 아니라 극저온으로 사용해야 하므로 소형화가 어렵다는 단점이 있다.

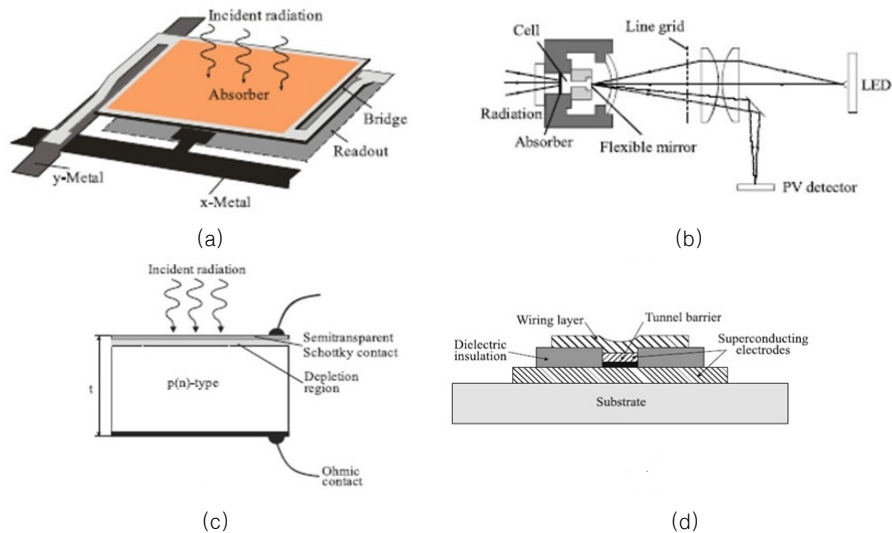
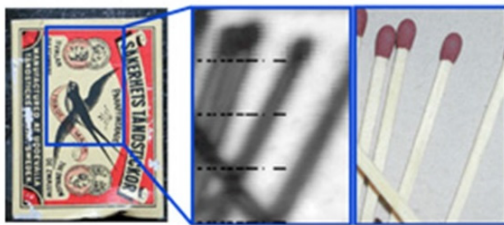


그림 7 연속형 THz 검출 방법: (a) 볼로미터(bolometer); (b) 갈레이 셀(Golay cell); (c) 쇼트키 장벽 다이오드(Shottky barrier photodiode); (d) SIS(super conductor-insulator-superconductor) 믹서[11]

### 3. THz 응용 연구 사례

THz는 금속을 제외한 대부분의 물질을 투과하는 성질을 가지고 있다. 이러한 특성 때문에 가시광선으로 볼 수 없는 숨어있는 물질을 감별해 낼 수 있으며 공항 등에서 검색을 위해 이용이 가능하다. 아래의 그림처럼 상자 속에 성냥이 들어 있는 경우 가시광선은 겉 상자만 볼 수 있으나 이 상자를 THz를 이용해 들여다보면, 종이로 만들어진 상자를 투과해 안에 들어있는 성냥의 이미지를 얻을 수가 있는 것이다. 이는 사람의 눈이 반응하는 가시광선에서와 THz에서 느끼는 광학상수가 다르기 때문이다. 종이는 THz를 모두 투과하고 성냥을 이루는 나무 부분과 성냥 머리는 THz를 일부 흡수 또는 반사하고 그 정도가 물질에 따라 다르기 때문에 영상화를 할 때 명암차를 줄 수 있는 것이다. 따라서 가시광선에서



(a)



(b)

그림 8 THz의 활용: (a) 성냥갑 속의 성냥의 THz 이미지, (b) 공항 검색대로의 활용 이미지[6]

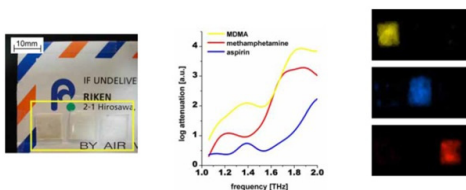


그림 9 THz를 이용한 우편봉투 속 마약 성분 검출 사진 [12]

전혀 볼 수 없는 숨겨진 물질도 THz를 이용하면 감지해 낼 수 있는 것이다.

공항에서 오랫동안 검색의 목적으로 사용했던 엑스선이 장기간 누적 노출시 인체에 일부 유해한 점을 극복하는 대체 수단으로 THz에 대한 관심이 더욱 증폭되고 있다. 엑스레이와 달리 THz는 이온화하지 않는 과장대이기 때문인데 THz는 가까운 과장인 적외선보다 투과성이 높으며 과장이 길어 물질 내부의 미세 구조에 의한 산란이 적다. 이미 전 세계 몇몇 공항에서는 THz를 이용한 전신 스캔이 시도되고 있으나 사람의 전신을 투시한다는 점에서는 논란의 여지가 있다. 눈에 보이지 않는 빛이 전신을 스캔한다는 막연한 두려움 때문에 많은 사람들이 했던 걱정과 달리 매우 낮은 에너지 영역의 THz는 인체에 전혀 무해하다. 또한 특정 화학물질의 흡수 주파수가 THz에 해당되어 봉투 안에 숨겨진 마약 등 위험물질을 검색하는 데에도 이용될 수 있다[6].

공항 검색과 비슷한 원리로 THz는 오래된 골동품이나 미술품의 성분을 분석하는 데에도 쓰일 수 있다. 오래된 미술품의 페인트 성분을 분석하는 일은 투과성이 좋은 엑스선을 이용해왔으나 고밀도 백 페인트(lead paint) 등을 사용했던 그림의 경우 침투 깊이가 짧은 엑스선의 특성상 그 분석이 어려웠다. 또한 원격외선을 이용하는 경우에는 공간상의 분해능이 매우 낮아 그 효율이 높지 않았다. 또한, 이 방법들은 흑연 등 특정 물질에 대해서는 그 반응이 약해 정확한 성분 분석이 더욱 어려웠다. 이에 최근 THz를 이용해 이러한 기존의 방법들이 가진 단점을 극복하려는 노력이 있어 왔다. 미술품 분석에 THz를 이용한다면 그 장점으로 크게 비이온화 특성으로 인해 무해하다는 점과 시간 의존형 데이터 추출법을 이용해 시간차로부터 물질의 깊이 정보를 알아낼 수 있다는 점을 들 수 있다. 또 근본적으로 빛을 조사하는 방식이라 미술품의 표면을 전혀 손상시키지 않고 내부를 투시해 볼 수 있다는 결정적인 장점이 있다. 그림 10에서 미술품을 구성하는 페인트 성분을 분석하는데 이용된 THz의 예를 볼 수 있다[6,7].

또한 THz는 같은 원리로 3차원 형상의 알약의 코팅 두께나 알약 내부의 성분을 검사하는 데에도 활용될 수 있다.



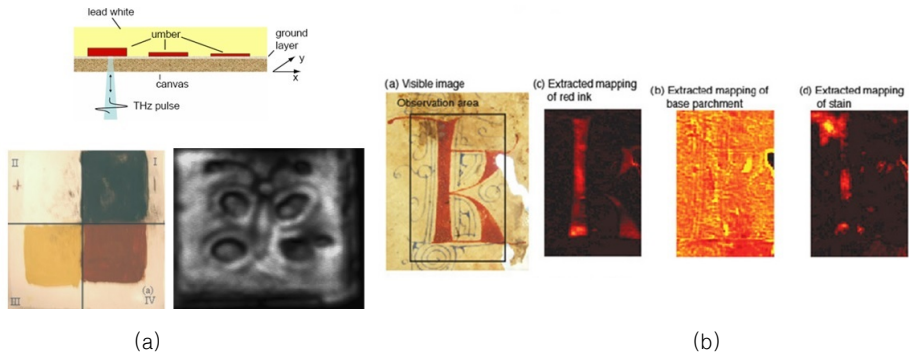


그림 10 THz를 이용한 공동 미술품 감식 예: (a) 페인트 내부 그림의 투과 이미지, (b) 미술 도료의 성분 분석 이미지[7]

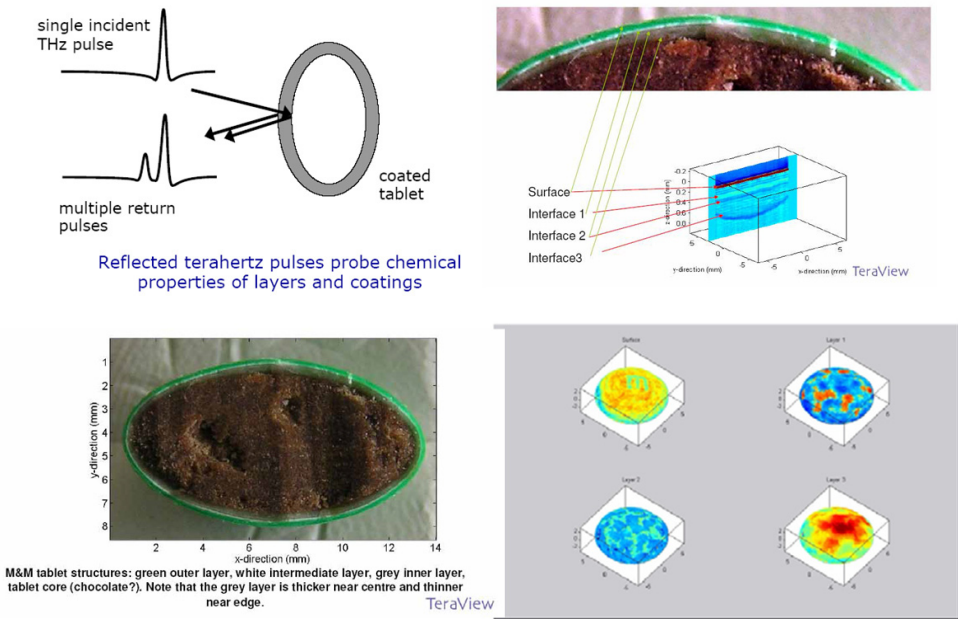


그림 11 THz 를 이용한 알약 코팅 비파괴검사[13]

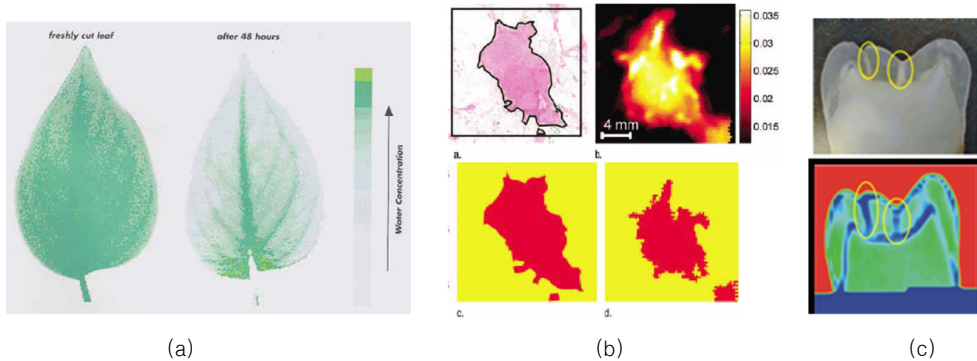


그림 12 THz를 이용한 생물학적 비파괴검사 (a) 나뭇잎 수명 검사 이미지; (b) 암세포 검출 이미지; (c) 치아 내부 공동 촬영 이미지[14,15]

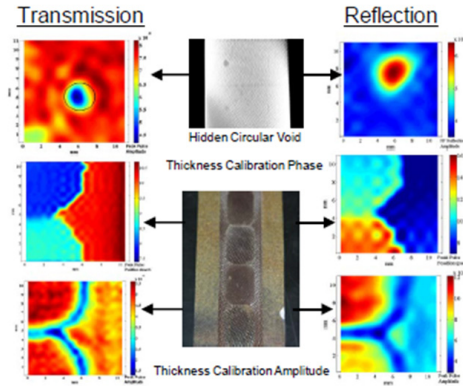
THz는 또한 나뭇잎 등 생명체의 생물학적인 노화에 따른 수분의 변화 등을 민감하게 감지할 수 있으므로 생물학에도 널리 사용될 수 있는 기술이다. 또한, THz는 비이온화, 비파괴 과장으로 기존에 의학용으로 사용되던 엑스선과는 달리 인체 내부의 조직이나 DNA에 손상을 주지 않는다. 또 인체의 많은 부분을 차지하고 있는 물과 반응하는 빛의 주파수가 THz 영역에 존재하므로 물의 함유량 차이를 이용해 THz 영상화를 하면 인체에 손상이나 접촉 없이 암세포 등 의학 분야에서 주요한 부분을 직접 감지해낼 수 있다. 특히 암세포는 일반 세포에 비해 수분 함량이 많은 것으로 알려져 THz 영상화를 실시할 경우 다른 세기의 투과 혹은 흡수율을 보여준다. 또한 THz 영상의 공간 해상도가 수 마이크로까지 정밀해졌기 때문에 더욱 정확한 질병 판별의 척도로 쓰일 수 있게 되었다.

4. THz를 이용한 구조/반도체 재료의 비파괴 평가 검사 연구 사례

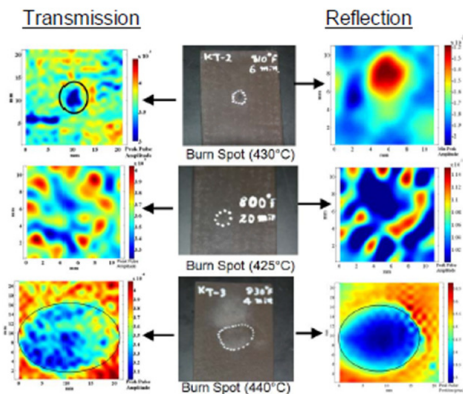
THz를 이용한 구조용 재료의 비파괴평가 검사는 현재까지 많이 이루어지지는 않은 실정이다. 앞서 기술한 바와 같이 THz의 유전상수가 금속을 제외한 거의 모든 물질에는 매우 낮으나 금속은 유전상수가 매우 높아 THz가 투과할 수 없으므로 금속 재료의 비파괴검사에는 사용될 수 없다. 따라서 금속이 아닌 폴리머, 세라믹 등의 구조 재료의 결함 검사에 그 활용 연구가 진행되고 있다[16-18]. 그림 13은 유리섬유 복합재료에 대한 THz 이미지를 보여준다. THz TDS 방식 중 transmission과 reflection mode로 각각 영상화한 것으로 유리섬유 복합재료 내부의 원형 손상 부위를 THz 비파괴평가 기법으로 정확하게 진단한 결과를 보여준다. 특이할 점은 복합재료에 열을 가하여 국부적인 열화손상을 입힌 부분이 열화 손상에 의하여 THz에 대한 유전상수가 달라지게 되어 비파괴적으로 열화의 여부와 그 위치를 검출할 수 있는 것이다. 그림 13은 이와 같은 현상을 이용하여 THz의 transmission, reflection mode로 열화 정도와 그 위치를 영상화한 것이다[9].

THz는 복합재료뿐만 아니라 차폐 소재인 foam이나 wool 등의 재료의 비파괴검사에도 널리 활

용될 수 있다. 아래 그림과 같이 단열재 내부의 결함이나 접촉면, 수분, 부식 부위들을 검출할 수 있다[19].



(a)



(b)

그림 13 THz 를 이용한 구조용 복합재료 비파괴검사 (a) 내부 결함 및 두께별 이미지; (b) 열화에 따른 손상 이미지[9]

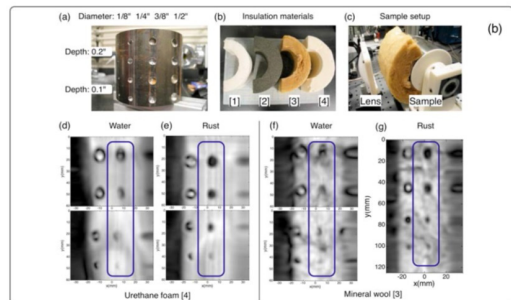


그림 14 THz 를 이용한 금속 파이프에 외장된 차폐 소재 결함 검출 예[19]

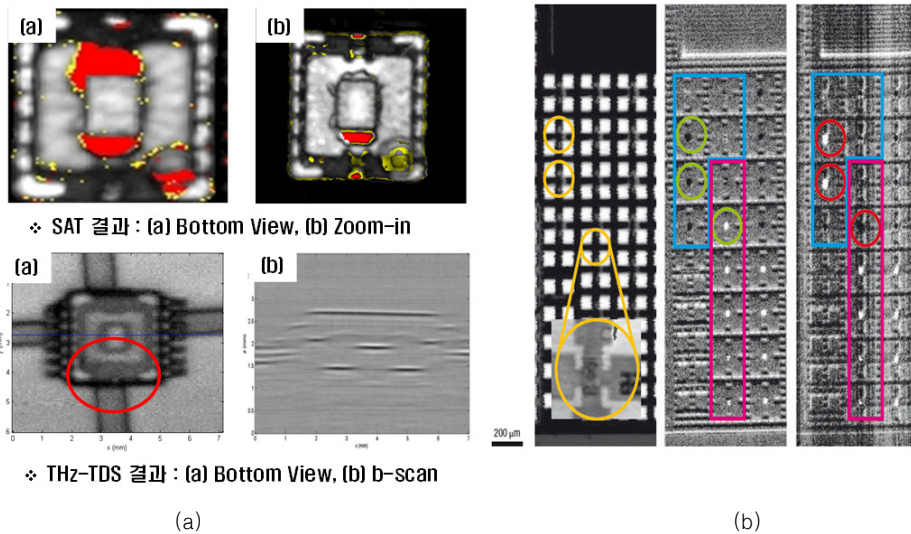


그림 15 THz 를 이용한 (a) 반도체 패키징 공동 검출 (출처: 한양대) 및 (b) 반도체 소자 결함 검출 이미지 [20]

THz는 또한 반도체 회로 및 패키징의 손상을 평가하는데 응용처가 있다. 그림 15(a)는 반도체 패키징 종류 중 TSOP 제품의 박리영역을 THz로 영상화한 것이다. 수중초음파검사법으로 검출된 박리 영역과 같은 위치를 THz 방법으로 비교적 잘 검출할 수 있다는 것을 보여준다. 그 위치나 정확도 면에서 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. THz는 전파의 특성상 금속 패턴이 형성되어 있는 반도체 칩을 투과하지 못하는 단점은 있으나 폴리머 재료로 구성된 패키징 구조의 내부는 잘 투과하여 검사할 수 있으므로 그 가능성 면에서 긍정적으로 평가된다. 그림 15(b)는 THz를 이용하여 반도체 소자 내부의 결함을 평가한 결과이다. MOSFET 내부에 존재하는 공공이나 결함을 약 10  $\mu\text{m}$  이하의 정밀도까지 THz 비파괴 검출 기법이 적용될 수 있다는 결과를 보여준다. 특이할 점은 THz 검사법은 기존의 초음파 검사법과는 달리 별도의 매질이 필요 없으며 검사체와 직접 접촉할 필요가 없으므로 비접촉식/인라인 공정 적용이 가능하다는 점이다.

## 5. 결론

본 기술 강좌에서는 THz의 발생, 검출에 관한 기술 동향과 이에 대한 비파괴 분야의 다양한 응용처에 대하여 살펴보았다. THz의 생명친화성, 깊은 투과성, 재료별 공명성 등은 이 기술의 무

한한 잠재력의 원인이 되고 있다. 향후 THz 장비에 대한 상용화 및 저가화 등이 이루어진다면 향후 차세대 검사 기술로 새로운 시장을 발생시킬 것으로 판단된다.

## 후 기

이 원고는 2013년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2013M2A2A9043280).

## 참고문헌

- [1] B. Ferguson and X. -C. Zhang, "Materials for terahertz science and technology," *Nature Material*, Vol. 1, pp. 26-33 (2002)
- [2] P. H. Siegel, "Terahertz technology," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 50, No. 3, pp. 910-928 (2002)
- [3] C. A. Schmuttenmaer, "Exploring dynamics in the far-infrared with terahertz spectroscopy," *Chemical Review*, Vol. 104, pp. 1759-1779 (2004)
- [4] P. H. Siegel, "Terahertz technology in biology and medicine," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 52, No. 10, pp. 2438-2446 (2004)



- [5] D. Mittleman, "Sensing with terahertz radiation," *Springer Series in Optical Sciences*, Vol. 85, (2003)
- [6] 안세정, 서민아, "테라파를 이용한 물성 분석 및 응용", 미래유망기술 분석보고서 (2011)
- [7] 김근주, 김정일, 전석기, "펄스형 및 연속형 테라헤르츠파 소재/소자 기술", *한국전자파 학회지*, Vol. 21, No. 4, pp. 4-17 (2010)
- [8] R. Kohler, 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)
- [9] C. D. Stoik, M. J. Bohn and J. L. Blackshire, "Nondestructive evaluation of aircraft composites using terahertz time domain spectroscopy," *Infrared Millimeter and Terahertz Waves 33rd International Conference*, (2008)
- [10] 진윤식, 전석기, 김정일, 김근주, 손채화, "테라헤르츠파 발생 및 응용연구", *물리학과 첨단기술*, Vol. 8, pp. 2-6 (2007)
- [11] M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology," *Nature Photonics*, Vol. 1, pp. 97-105 (2007)
- [12] <http://www.rikenresearch.riken.jp/eng/frontline/6131>
- [13] <http://www.ceb.cam.ac.uk/research/groups/rg-terahertz-applications/research/thz-pharma>
- [14] B. B. Hu and M. C. Nuss, "Imaging with terahertz waves," *Optics Letters*, Vol. 20, No. 16, pp. 1716-1718 (1995)
- [15] R. M. Woodward, V. P. Wallace, R. J. Pye, B. E. Cole, D. D. Arnone, E. H. Linfield and M. Pepper, "Terahertz pulse imaging of ex vivo basal cell carcinoma," *J. of Investigative Dermatology*, Vol. 120, No. 1, pp. 72-78 (2003)
- [16] N. Karpowicz, D. Dawes, M. J. Perry and X.-C. Zhang, "Fire damage on carbon fiber materials characterized by THz waves," *International J. of High Speed Electronics and Systems*, Vol. 17, No. 2, pp. 213-224 (2007)
- [17] I. Amenabar, F. Lopez and A. Mendikute, "In introductory review to THz non-destructive testing of composite mater.," *J. of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, Vol. 34, pp. 152-169 (2013)
- [18] Y. Oyama, L. Zhen, T. Tanabe and M. Kagaya, "Sub-terahertz imaging of defects in building blocks," *NDT&E International*, Vol. 42, pp. 28-33 (2009)
- [19] J. Xu, H. Zhong, T. Yuan, X. Xie, S. Wang, X. -C. Zhang, R. Reightler and E. Madaras, "T-rays identify defects in insulating materials," *Vol. Conference on Lasers and Electro-Optics, Terahertz Pulse Propagation and Imaging*, (2004)
- [20] M. Yamashita, K. Kawase, C. Otani, T. Kiwa and M. Tonouchi, "Imaging of large-scale integrated circuits using laser terahertz emission microscopy," *Optics Express*, Vol. 13, No. 1, pp. 115-120 (2005)