

## 재료 내부 결함 검출을 위한 첨단 테라헤르츠 비파괴 검사법 소개

김 학 성 한양대학교 기계공학부 부교수

| e-mail : kima@hanyang.ac.kr

최근 들어 안전한 사회 구축을 위한 기계 구조물 신뢰성에 관한 관심이 커지면서 다양한 비파괴 검사법에 대한 기술 수요가 급증하고 있다. 이 글에서는 각종 재료의 불량 검출을 위한 테라헤르츠 비파괴 검사법과 그 응용 사례들을 간단히 소개한다.

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

THz는 광학적으로 금속을 제외한 거의 모든 물질(플라스틱, 나무, 종이, 직물 등)에 대하여 매우 낮은 유전 상수를 가지므로 물질 내부를 거의 손실 없이 잘 투과하며 인체의 세포구조를 파괴하지 않는 X선 에너지의 백만분의 일 수준의 에너지(4.1meV)를 가지고 있어 파장이  $\mu$ m 대역으로 충분히 작으므로 생체 친화형 고해상도 영상 구현도 가능하다. 또한, THz는 전파의 투과성과 광파의 직진성을 모두 가지고 있으므로 기존의 초음파 비파괴 검사처럼 소재와 직접 접촉할 필요가 없으며 물과 같은 중간 매개체도 필요하지 않으므로 차세대 비접촉/비파괴 검사 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 성분화

인이 가능하다. 그러므로 THz파는 재료 내부의 산화, 미세 열화, 흡습 등 미시적인 물질 변화를 비파괴적으로 검사할 수 있는 획기적인 기술로 발전할 가능성을 지니고 있는 것이다.

2000년대에 진입하면서 THz 발생/검출 소자 제작을 위한 초미세공정기술(MEMS)이 급격히 발전하였고 THz 발생에 필요한 펨토초 레이저(Femto-second laser)기술의 상용화와 저가화, 소형고출력의 THz 소스 개발이 진행되면서 THz 발생 및 측정이 비교적 용이하게 되었다. 그 이후로 THz의 발생/검출에 관한 기초 연구를 뛰어넘는 실제 응용연구가 활발하게 이루어지고 있으며 여러 혁신적인 연구 사례들이 보고되고 있는 상황이다. 이 글에서는 THz 발생 및 검출에 관한 최신 기술들과 이를 이용한 비파괴 응용 연구 사례들에 대하여 소개한다.

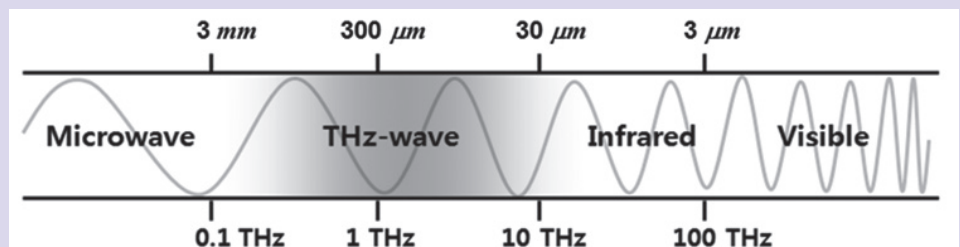


그림 1 테라헤르츠파의 범위 [1]

### 테라헤르츠 발생/검출 기술

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

현재 가장 활발히 진행 중인 펄스형 테라헤르츠파 발생 방법은 ① 광전도 안테나 방법과 ② 광정류 방법, ③ 반도체 표면전계이용 방법이 있다. 먼저, 광전도 안테나 방법에서는 저온성장한 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 인

가된 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 해당한다. 두 번째 방법인 광정류 방법은 펄스형 레이저가 GaAs나 ZnTe 등 반도체 결정에 입사될 때 일시적으로 일어난 비선형성을 이용한다. 극초단의 레이저 펄스가 광학결정에 조사되면 결정 내에 순시 분극(Transient polarization,  $P(t)$ )을 유지하고 이 순시 분극의 2차 시간 미분에 비례( $\partial^2 P(t) / \partial t^2$ )하는 THz파를 방사한다. 광정류에 의한 THz 발생법은 광전도 안테나법에 비하여 THz파의 출력은 작으나 구조적으로 간단하고 동작 주파수 범위가 매우 넓다는 장점을 가지고 있다. 마지막으로 순수한 반도체 표면에 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 방사 해석이 가장 유력하다.

연속형 THz파는 중심 주파수 주변의 좁은 스펙트럼을 가진 반면 주파수가 변성과 그 효율이 매우 좋은 장점을 갖고 있다. 대표적인 연속형 THz파의 발생방법으로는 자유 전자 레이저(Free

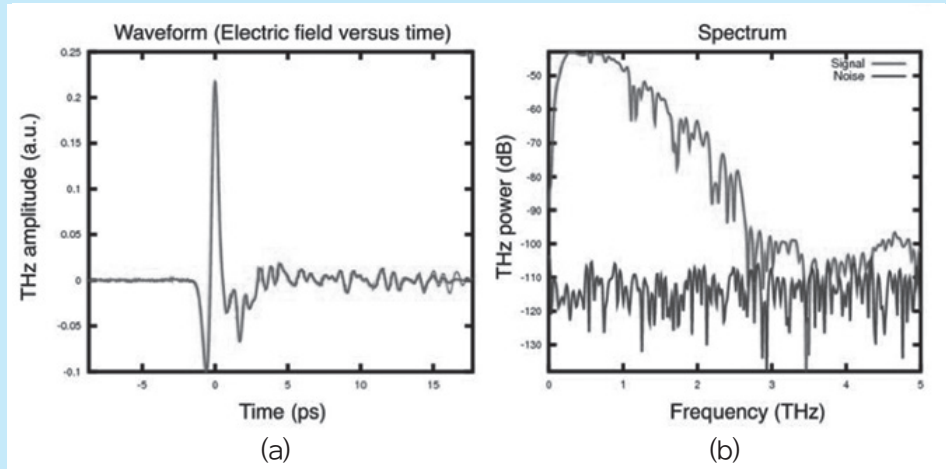


그림 2 펄스형 테라헤르츠의 파형(a), 스펙트럼(b)

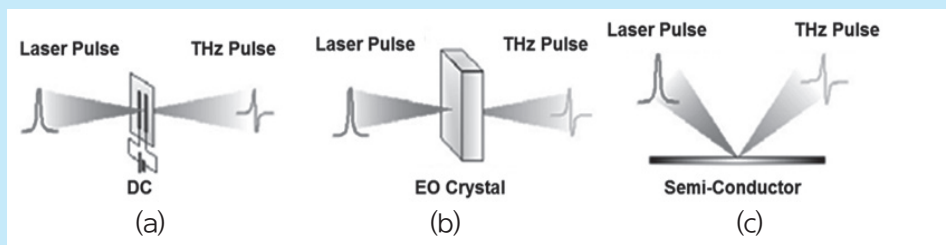


그림 3 펄스형 THz 발생 기술 : (a) 광전도 안테나법, (b) 광정류법, (c) 반도체 표면전계 이용[10]

electron laser)를 이용하는 규모가 큰 방법과 양자층계 레이저(QCL: Quantum Cascade laser)를 이용하는 방법, 두 레이저의 주파수 차이를 이용한 광혼합 방법(Photomixer) 등이 있다. 자유전자 레이저, 양자 층계 레이저는 규모가 크거나 극저온 냉각이 필요하므로 활용성이 제한되고 있다. 포토믹싱 방법은 두 개의 독립된 DFB LD(Distributed Feedback Laser Diode)를 이용하여 연속형 THz파를 발생시키는 방법으로써 두 LD 사이에서 발생하는 비탕(Beating)에 의하여 THz파를 발생시킨다. 포토믹싱 방식은 구조적으로 간단하면서 소형화가 가능한 장점이 있는 반면 그 파워가 낮으며 테라헤르츠 발생 안테나기술이 복잡하다는 단점을 가지고 있다.

THz 펄스의 측정에 일반적으로 사용되고 있는 방법은 광전도 안테나법이다. 광전도 안테나를 이용하는 경우는 THz 펄스의 발생 원리를 역으로 이용한다. 즉 펄스 레이저빔을 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 전류 값이 THz파의 크기에 비례하므로 간접적으로 THz파의 크기와 시간별 THz 추이를 측정할 수 있다. 전광 샘플링 방법은 검출용 레이저 빔과 측정하고자 하는 THz파를 동시에 비선형 결정에 조사하여 측정하는 방식이다.

연속형 THz의 측정에는 볼로미터(Bolometer), 걸레이 셀(Golay cell), 쇼트키 장벽 다이오드(Shottky

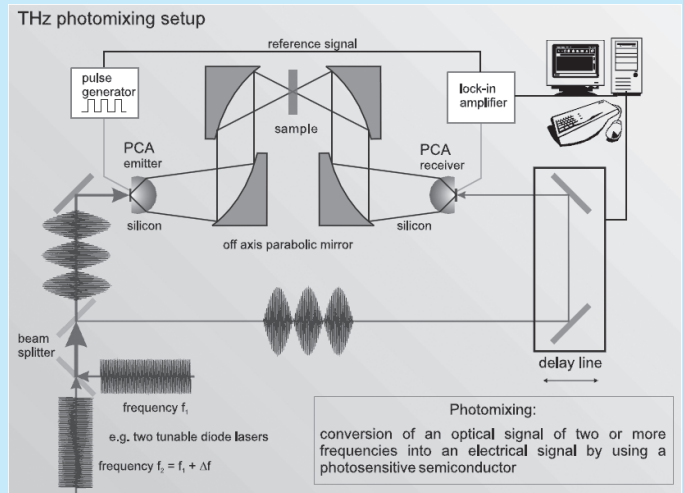


그림 4 연속 THz파 발생을 위한 포토믹싱 방법의 개요도

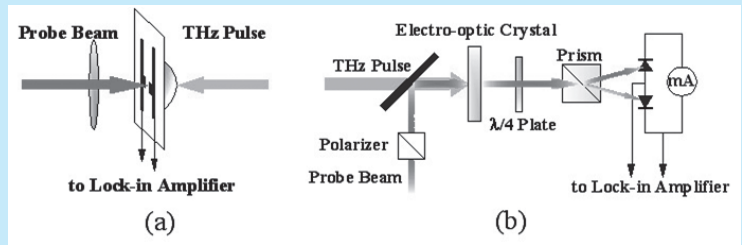


그림 5 THz 측정 기술 : (a) 광전도 안테나법, (b) 전광 샘플링법

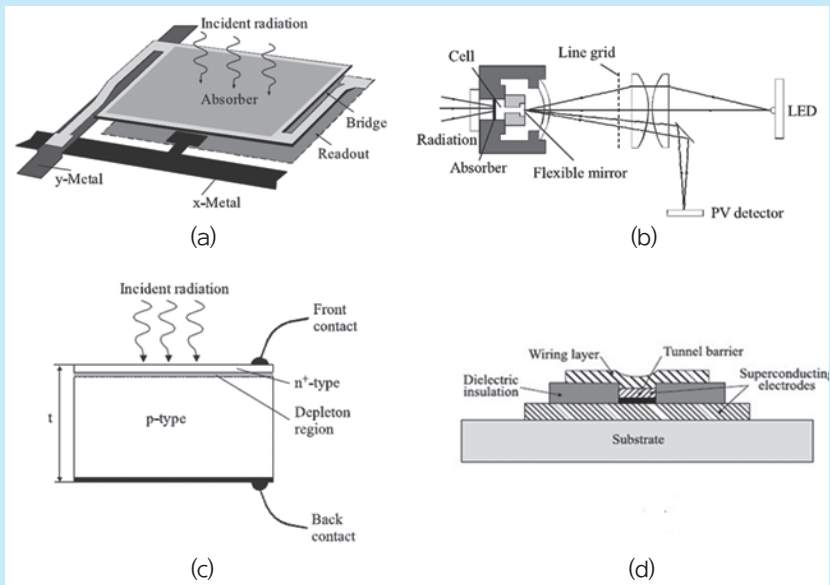


그림 6 연속형 THz 검출방법 : (a) 볼로미터(Bolometer), (b) 걸레이 셀(Golay cell), (c) 쇼트키 장벽 다이오드(Shottky barrier photodiode), (d) SIS(Super conductor-insulator-superconductor)믹서

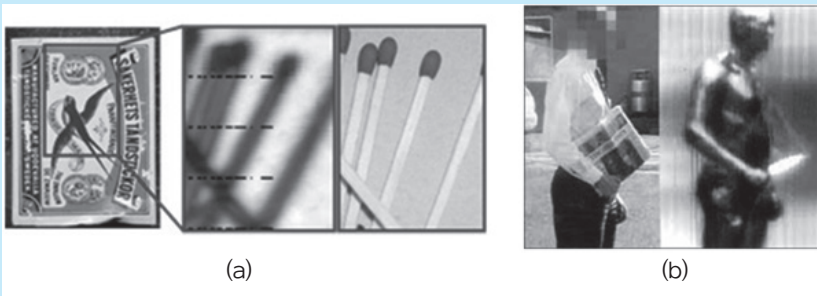


그림 7 THz의 활용 : (a) 성냥갑속의 성냥의 THz 이미지, (b) 공항 검색대로의 활용이미지

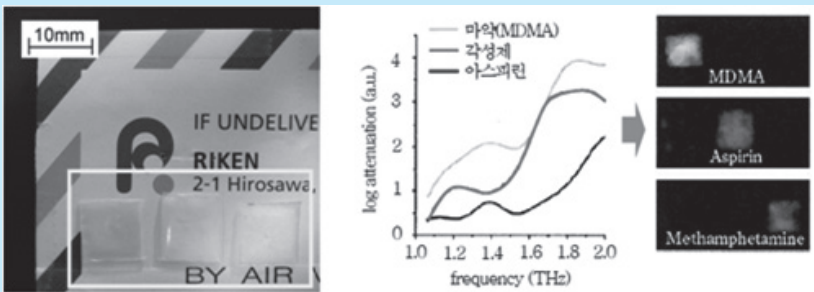


그림 8 THz를 이용한 우편 봉투 속 마약 성분 검출 사진

barrier photodiode), 그리고 SIS(Superconductor-insulator-superconductor) 믹서 THz파 검출기 등이 사용되고 있다.

먼저 볼로미터 THz 검출기는 매우 작은 열용량과 매우 큰 열팽창계수를 갖는 저항 물질에 THz가 인가 되면 그 물질의 저항 변화를 측정함으로써 THz를 검출하는 방식이다. 갈레이 셀은 저 열전도도를 갖는 제논(Xenon)가스가 충전된 밀봉 구조가 사용된다. 이 밀봉 구조에는 유연 거울 소자가 연결되어 있다. THz가 밀봉된 제논에 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 junction으로부터 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. SIS

의 원리는 1K 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.

### THz 응용 비파괴 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. 그림 7처럼 상자 속에 성냥이 들어 있는 경우가 시광선은 겉 상자만 볼 수 있으나 이 상자를 THz를 이용해 들여다보면, 종이로 만들어진 상자를 투과해 안에 들어 있는 성냥의 이미지를 얻을 수가 있는 것이다. 이는 사람의 눈이 반응하는 가시광선에서와 THz에서 느끼는 광학 상수가 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 전혀 볼 수 없는 숨겨진 물질도 THz를 이용하면 감지해낼 수 있는 것이다.

또한 특정 화학 물질의 흡수 주파수가 THz에 해당되어 봉투 안에 숨겨진 마약 등 위험물질을 검색하는 데에도 이용될 수 있다.

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. 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 투시해볼 수 있다는 결정적인 장점이 있다. 아래 그림에서 미술품을 구성하는 페인트 성분을 분석하는데 이용된 THz의 예를 볼 수 있다.

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 수분함량이

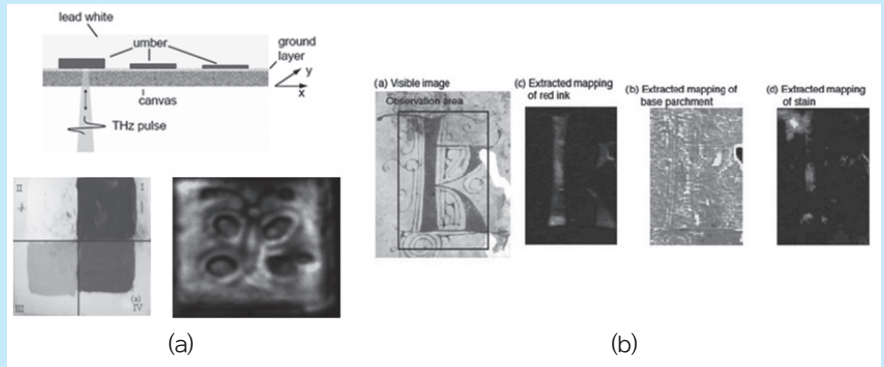


그림 9 THz를 이용한 골동 미술품 감식 예 : (a) 페인트 내부 그림의 투과 이미지, (b) 미술재료의 성분분석 이미지

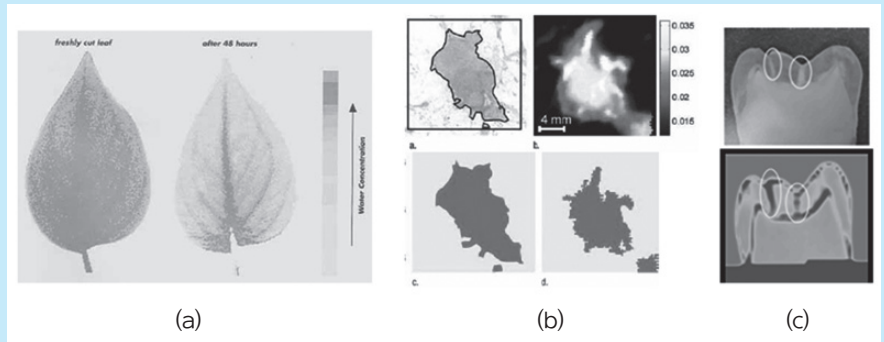


그림 10 THz를 이용한 생물학적 비파괴 검사 : (a) 나뭇잎 수명 검사 이미지, (b) 암세포 검출 이미지, (c) 치아 내부 공동 촬영 이미지

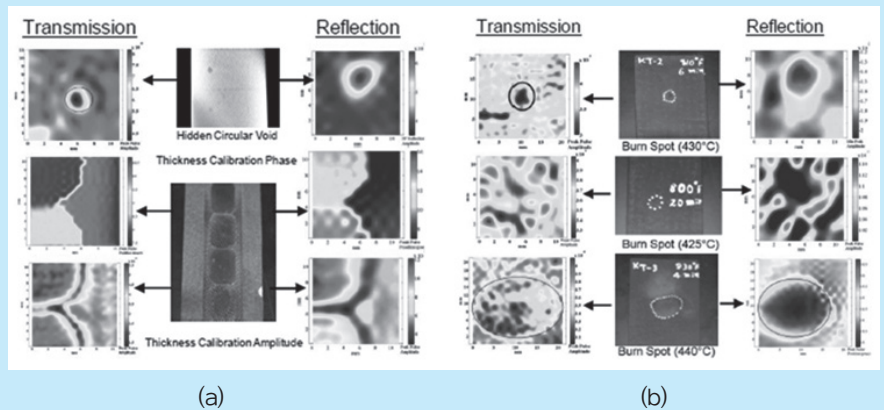


그림 11 THz를 이용한 구조용 복합재료 비파괴 검사 : (a) 내부 결함 및 두께별 이미지, (b) 열화에 따른 손상 이미지

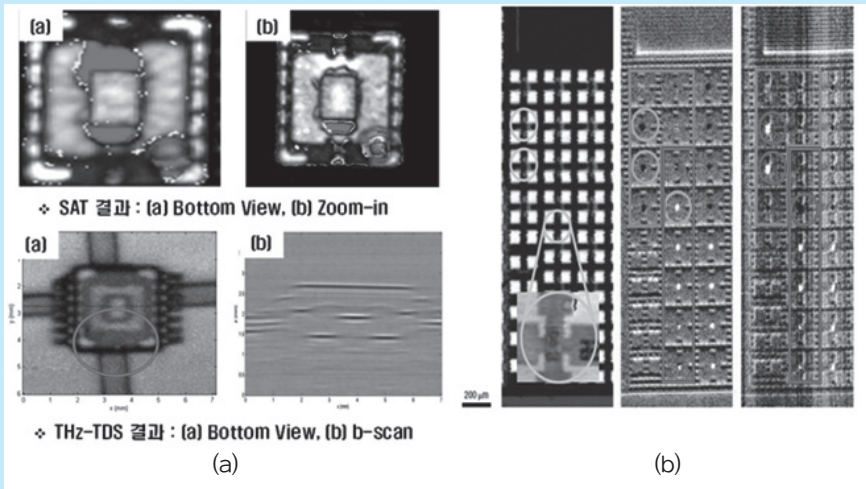


그림 12 THz를 이용한 반도체 패키징 공동 검출(a)(출처: 한양대) 및 반도체 소자 결함 검출 이미지(b)

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 관별의 척도로 쓰일 수 있게 되었다.

THz를 이용한 구조용 재료의 비파괴 평가 검사는 현재까지 많이 이루어지지 않는 실정이며 금속이 아닌 폴리머, 세라믹 등의 구조 재료의 결함 검사에 그 활용 연구가 진행되고 있다. 아래 그림은 유리섬유 복합재료에 대한 THz 이미지를 보여준다. THz TDS 방식 중 Transmission과 Reflection mode로 각각 영상화한 것으로 유리섬유 복합재료 내부의 원형 손상부위를 THz 비파괴 평가 기법으로 정확하게 진단한 결과를 보여준다. 특이한 점은 복합재료에 열을 가하여 국부적인 열화 손상을 입힌 부분이 열화 손상에

의하여 THz에 대한 유전상수가 달라지게 되어 비파괴적으로 열화의 여부와 그 위치를 검출할 수 있는 것이다. 그림 11은 이와 같은 현상을 이용하여 THz의 Transmission, Reflection mode로 열화정도와 그 위치를 영상화한 것이다.

THz는 또한 반도체 회로 및 패키징의 손상을 평가하는 데도 응용처가 있다. 그림 12(a)는 반도체 패키징 종류 중 TSOP 제품의 박리영역을 THz로 영상화한 것이다. 수중 초음

파 검사법으로 검출된 박리 영역과 같은 위치를 THz 방법으로 비교적 잘 검출할 수 있다는 것을 보여준다. 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 12(b)는 THz를 이용하여 반도체소자 내부의 결함을 평가한 결과이다. MOSFET 내부에 존재하는 공공이나 결함을 약 10um 이하의 정밀도까지 THz 비파괴 검출 기법이 적용될 수 있다는 결과를 보여준다. 특이한 점은 THz 검사법은 기존의 초음파검사법과는 달리 별도의 매질이 필요 없으며 검사체와 직접 접촉할 필요가 없으므로 비접촉식/인라인 공정적용이 가능하다는 점이다.