



특집

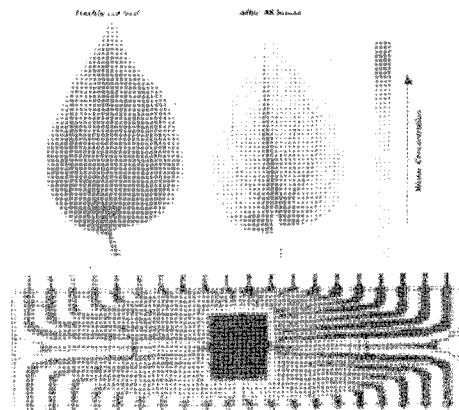
THz-TDS 분광 및 영상기술

김종욱 (한국전기연구원)

I. 기술 소개

최근 테라헤르츠파는 분광학적 응용뿐만 아니라 분광 기술을 접목한 테라헤르츠 영상(T-ray) 분야로의 확대에 많은 연구가 진행되고 있다. 테라헤르츠파는 이미 잘 알려져 있듯이 금속이나 물 같은 극성 매질에는 투과하지 않으나 반도체 같은 유전체, 종이, 플라스틱, 천 등 비극성 매질은 매우 잘 투과하는 특성을 가지고 있으며 각 매질은 테라헤르츠 주파수에서 고유한 지문을 가지고 있다. 테라헤르츠파는 매질의 투과율, 흡수율, 굴절율, 유전율, 위상 변화 등의 광학적 특성에 대한 영상 정보를 그대로 가지므로 쉽게 영상을 얻을 수 있다.

최초의 테라헤르츠 영상은 1995년 Hu와 Nuss에 의해 보고되었다. <그림 1>은 최초 테라헤르츠 영상으로서 시간에 따른 나뭇잎의 수분 변화와 플라스틱 포장 속의 IC회로의 영상을 보여준다. 이러한 결과는 의료영상 분야 및 반도체 패키지 검사, 보안, 품질 관리, 우주 등 다양한 분야로의 테라헤르츠파 응용 가능성에 대한 시발점이 되었다.

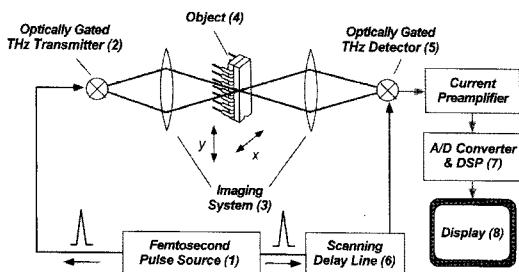


<그림 1> 시간 경과에 따른 나뭇잎의 수분 변화(상)
반도체 칩 내부 이미지(하)

[출처 : B.B.Hu & M.C.Nuss Opt. Lett. 20, 1716, 1995]

II. THz Imaging 시스템

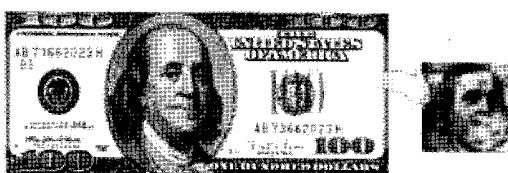
최근에 다양한 테라헤르츠파 이미징 기술이 개발되어 왔다. 테라헤르츠파의 가장 큰 특징은 전파와 광파의 중간적 성질을 가짐으로서 기존의 초음파나 마이크로파와 같이 전파적 이미징 기술이 가능할 뿐만 아니라 광학적 특성을 이용한 이미징을 동시에 사용할 수 있다는 장점이 있다.



〈그림 2〉 픽셀-픽셀 THz 이미징 시스템

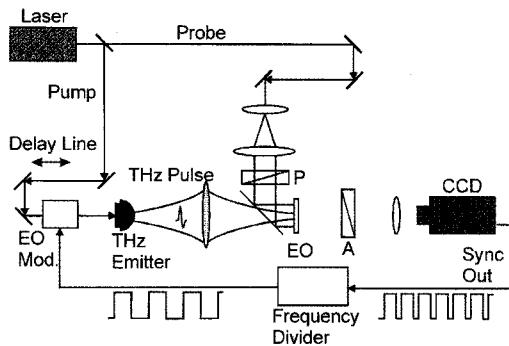
[출처 : B.B.Hu & M.C.Nuss Opt. Lett. 20, 1716, 1995]

〈그림 2〉는 가장 일반적인 테라헤르츠파 이미징 기술로서 시료의 이동을 이용한 픽셀-픽셀(pixel-by-pixel) 방법이다. 이러한 방법은 기존의 THz-TDS 측정 방법을 2차원적으로 확대한 방법으로 넓은 영역의 스펙트럼 정보와 높은 신호 대 잡음비(SNR)를 통한 이미지의 선명도가 높다. 또한, 정교한 광지연기를 이용함으로서 〈그림 3〉과 같이 박막 형태 지폐의 water mark에 대한 이미징도 가능하다. 그러나 이 방법은 전체 시료에 대한 측정 시간이 너무 오래 소요된다 는 단점이 있다. 스캐닝 시간을 줄이기 위해 스캐닝 속도를 증가시킬 경우 반대로 SNR이 급격하게 떨어지는 단점이 발생한다. 측정 시간을 줄이기 위해 galvanometer based oscillating retro-reflector, rotating prism, optical fiber stretcher, array mirrors 등 다양한 광지연기



〈그림 3〉 지폐의 워터마크(watermark) 이미지

[출처 : Q. Chen and X.-C. Zhang, Appl. Phys. Lett., Vol 74, No. 23, 3435, 1999]



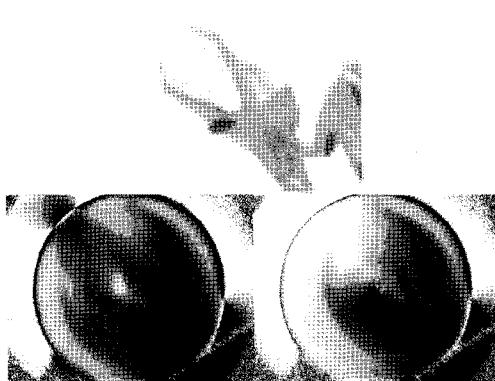
〈그림 4〉 전광 샘플링(EOS)과 CCD 카메라를 이용한 이미징 시스템

[출처 : Zhiping Jiang, X. G. Xu, and X.-C. Zhang, Applied Optics, Vol. 39, No. 17, 2982, 2000]

가 개발되어 왔으나 여전히 광지연기가 가지는 측정 속도 및 광 지연 길이의 한계성에 의하여 시료 크기에 많은 제한을 가지고 있다.

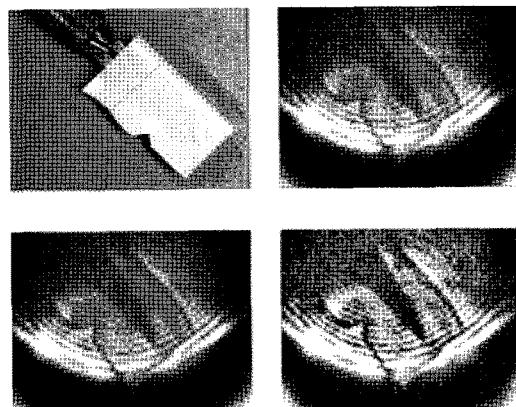
이러한 측정 속도의 한계성을 극복하기 위해 1D 또는 2D 어레이 형태의 광전도 안테나 검출기를 이용한 방법이 개발되었으나 여전히 낮은 공간 분해능과 복잡한 시스템 구조 등 많은 단점을 가지고 있다. 반면, 전광 샘플링(EOS)과 CCD 카메라를 이용한 방법이 Rensselaer Polytechnic Institute (RPI)에서 처음 시도되었다. 이 방법은 〈그림 4〉와 같이 THz-TDS의 전광 샘플링을 2차원적으로 확대한 후 광다이오드 검출기 대신 CCD 카메라를 이용함으로서 넓은 면적의 시료에 대하여 측정뿐만 아니라 실시간 영상이 가능하여 〈그림 5〉와 같이 식충 별레의 이동에 대한 THz 영상을 얻을 수 있다. 그러나 CCD 카메라의 낮은 비트와 넓은 면적의 EOS에 따른 낮은 SNR, 그리고 고가의 장비로 인하여 사용상에 많은 제약이 따르는 단점이 있다.

근래에는 고출력 테라헤르츠파 소스가 개발됨에 따라 기존에 사용이 불가능하던 다양한 검출



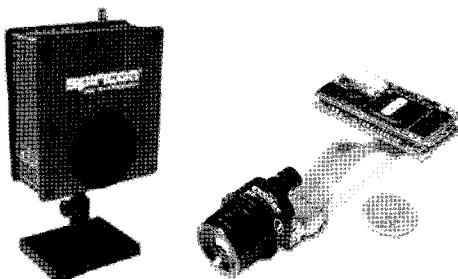
〈그림 5〉 식충 벌레를 이용한 실시간 THz 이미징

[출처 : Nikon, 2003]



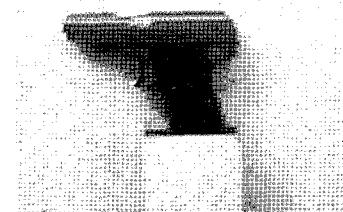
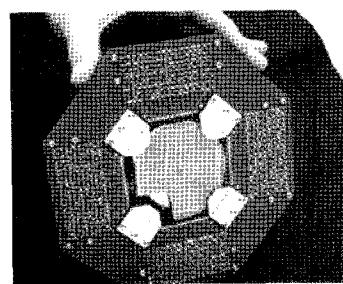
〈그림 7〉 Microbolometer 카메라를 이용한 불투명
플라스틱 테이프 내의 금속 이미징

[출처 : Barry N. Behnken, Laser & THz Imaging Research,
Courtesy of Naval Postgraduate School]



〈그림 6〉 Pyroelectric array 카메라(좌)와
Microbolometer 카메라(우)

기의 사용이 가능해졌다. 〈그림 6〉은 주로 IR 검출에서 많이 사용되던 pyroelectrics와 micro-bolometer로서 테라헤르츠 영역에서도 높은 검출 감도와 높은 공간 분해능이 가능하고 별도의 장비 없이 실시간 테라헤르츠파 이미징이 가능하여 향후 테라헤르츠파 영상 분야의 새로운 가능성으로 기대되어지고 있다. 그러나 아직까지 THz 영역에 대한 감도가 그다지 좋지 못하여 테라헤르츠 영역에 맞는 시스템 개발이 진행 중에 있다. 〈그림 7〉은 Microbolometer 카메라를 이용한 불투명 플라스틱 테이프 내의 금속 이미징으로서 초당 30 프레임 이상의 실시간 영상 구현이 가능하다.



〈그림 8〉 2D array microbolometer antennas(상)
및 이를 이용한 Gunn의 THz 이미징(하)

[출처 : NIST, Terahertz Technology]



III. 응용 분야

테라헤르츠파 이미징 기술은 기존의 검출 방식의 한계를 상당히 극복할 수 있을 것으로 기대된다. 금속탐지기의 경우 금속체에 대한 대략적인 위치만 검색이 가능하며 또한 탐지대상이 유해한 것인지 무해한 것인지에 대한 구분이 불가능하다. 반면 엑스레이의 경우 생물학적 위험물, 독성화학물질, 세라믹칼, 플라스틱 무기류, 폭발물류, 가연성 화합물 등에 대한 감도가 낮아 검출의 신뢰도를 매우 낮춘다. 초음파의 경우에는 목재, 절연 폼과 같은 다공성 재료에 대해서는 방향성이 없다. 반면, 테라헤르츠파는 에너지가 낮아 비이온화 및 무해하여 수화물, 식품류뿐만 아니라 인체 등에 사용이 가능하다. 이러한 특성을 가진 테라헤르츠파 이미징 기술은 현재 다양한 분야로의 확대에 많은 연구가 진행되고 있다. 그중에서도 특히 몇 가지 핵심 분야로 구분하여 보면 의료영상, 보안, 예술, 품질관리, 우주공학 등으로 구분되어진다.

1. 의료 영상 분야

테라헤르츠 광을 이용한 의료영상 분야는 테라헤르츠 광 필스를 생체조직에 조사하여 투과하거나 반사되어 온 테라헤르츠 광의 비행시간이나 흡수량, 반사량 등의 데이터의 처리를 통하여 내부 영상을 얻는다. 테라헤르츠광은 기존의 의료 영상 기술이 가졌던 많은 문제점을 해결 할 수 있다. MRI는 깊이 방향에 대한 영상 및 어느 정도의 화학적 정보를 제공할 수 있지만 표면이나 얇은 상피 조직을 영상화하는 데는 적합지 않다. 또한, 비용, 자석의 크기 그리고 긴 주사시간과 같은 현실적인 고려사항은 응용에 많은 제

한을 준다. 반면 초음파(ultrasound)는 긴 파장에 의한 제한된 해상도와 영상을 가질 뿐만 아니라 병의 특정패턴이 쉽게 정의되지 않는다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 가장 일반적으로 많이 사용되고 있는 것이 엑스레이이다. 그러나 엑스레이(x-ray)의 고에너지에 의한 생체조직 변화에 따른 암 발생 문제가 최근 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다. 또한 엑스레이를 이용한 암 진단의 경우 병의 특정패턴을 이용한 방법에서 많은 오차가 발생하고 있으며 조기 암의 경우 어느 정도 크기가 되어야 검출이 되는 단점을 가지고 있다. 반면, 테라헤르츠광은 엑스레이 에너지의 백만분의 일 ($1/10^6$)로 매우 작아 생체조직을 손상시키지 않고 투과하는 장점이 있어 인체에 무해할 뿐만 아니라 엑스레이 이미지가 가지지 못하는 분광학적 정보를 동시에 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한, 적외선이나 광에 비해 파장이 길어 생체조직에서의 산란이 적을 뿐만 아니라 측면 $100\mu\text{m}$, 깊이 $40\mu\text{m}$ 정도의 고해상도 이미징이 가능하다. 이러한 테라헤르츠 광은 매우 많은 장점을 가짐에도 불구하고 많은 문제점을 가지고 있다. 그중에서도 수분에 의한 높은 흡수율은 테라헤르츠 광의 의료 분야로의 접목에 있어서 시급히 개선해야 할 문제점중의 하나이다. 그러나 이러한 수분에 의한 높은 흡수율은 암과 정상세포와 같이 수분 량이 다른 조직을 쉽게 식별할 수 있어서 암의 조기 진단에 매우 유용하게 사용될 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 현재 피부암이나 구강암, 유방암 등 다양한 암 진단과 화상진단, 치과진단 등에 이용하려는 노력이 이루어지고 있으며 몇몇 실험실이나 기업체에서 이를 이용한 다양한 연구가 보고되고 있다.

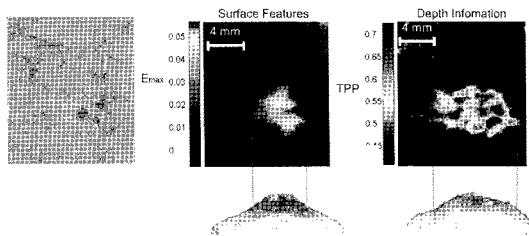
테라헤르츠파의 의료 영상 원리는 뼈, 연골, 피부, 치아, 혈관 등 조직의 수화(hydration)에



〈그림 9〉 충치 검출 : Visible image(좌)와 흡수율에 따른 THz 이미지(중) 그리고 굴절률에 따른 THz 이미지(우)

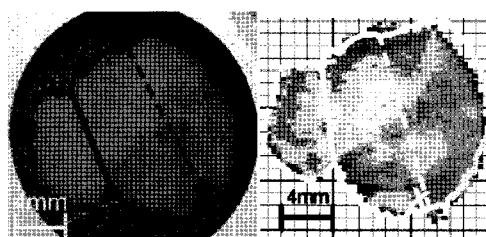
[출처 : Physics World, Physics and Institute of Physics Publishing Ltd 2001]

따른 THz파의 생체조직에서의 흡수 및 반사를 이용하거나 세포, 유전자, 단백질 체의 구조에 따른 고유한 지문에 따른 분광특성을 이용하는 방법이 사용되고 있다. 〈그림 9〉는 치아에 대한 THz 영상으로서 흡수율을 이용한 치아의 충치 검사뿐만 아니라 굴절률을 이용한 치아의 구조 영상까지 얻을 수 있다. 〈그림 10〉은 피부암에



〈그림 10〉 피부암에 대한 표피 및 깊이 방향에 대한 THz 영상

[출처 : Wallace et al. Brit. J. Dermatol. Vol. 151, Issue 2, 2004]

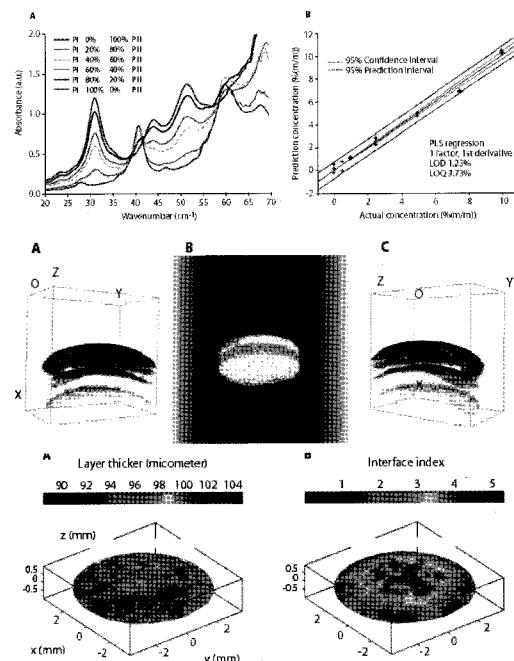


〈그림 11〉 암세포 이미지

[출처 : Teraview]

대한 THz 영상으로서 표피 및 깊이 방향에 대한 정보까지 얻을 수 있다. 〈그림 11〉은 암세포 이미지로서 정상세포와 암세포가 확연히 구별됨을 알 수 있다.

이외에도 의료와 밀접한 관련이 있는 제약 산업에서도 활발한 연구가 이루어지고 있다. 〈그림 12〉는 THz파를 이용한 알약의 특성 분석 및 영상 이미징으로서 분광학을 이용한 알약 특성 검사뿐만 아니라 알약의 코팅 레이어를 검사함으로서 알약의 품질까지 제어할 수 있다. 테라헤르츠 광을 이용한 알약 검출은 비파괴 검사로서 알약의 코팅에 대한 성질 및 코팅 두께, 그리고, 코팅의 화학적 물리적 구조 등 다양한 정보를 얻을



〈그림 12〉 알약 코팅에 대한 THz 이미지: 알약의 성분 측정(상), 알약의 코팅 레이어에 대한 이미지(중), 성분 분포 특성(하)

[출처 : Clare J. Strachan, Louise Ho, J. Axel Zeitler, Jukka Rantanen, Thomas Rades, Keith C. Gordon, Pharmaceutical Technology Europe, Vol. 18, 2006]

수 있다. 또한, 테라헤르츠 파는 펄스폭이 매우 작아 얇은 두께의 복수 레이어에 대해서도 충분히 검출이 가능할 뿐만 아니라 알약 특성에 대한 3차원 이미지를 얻을 수 있다.

2. 보안 검색

근래에 들어 폭탄 테러의 강도가 증가함에 따라 보안의 중요성이 날로 증대되고 있다. 무기류와 폭발물, 또는 마약에서 불법 동식물에 이르는 규제 품목과 같은 다양한 위협의 존재를 탐지하기 위한 보안검색에는 광범위한 기술이 사용되고 있다. 현재 일반적인 개인수화물(가방 등)의 검색 방법으로 검색대를 이용한 보편화된 엑스레이 정밀 검사 방법을 사용하고 있으며 부가적으로 수동 검사와 통로 검사 등을 적용하고 있다. 그러나 적은 양의 금속을 포함한 무기류, 세라믹 무기류, 폭발성 물질, 화학적 생물학적 위협에 대한 기존의 검출 방법에 많은 한계성을 가지고 있다. 기존의 금속 탐지기의 경우 금속이 아닌 경우는 검출이 불가능하다. 또한, 엑스레이 검사는 화학적/구조적 분석이 불가능 할 뿐만 아니라 안전성 이슈에 대한 논쟁이 끊임없이 제기되고 있다.

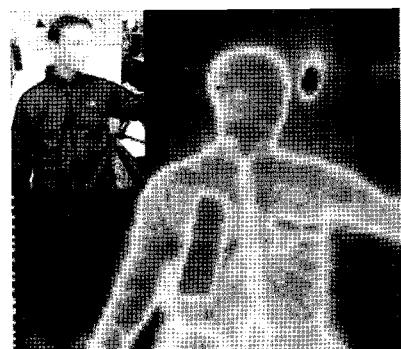
이러한 맥락에서 최근 테라헤르츠 광을 이용한 보안 검색 분야에서의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 테라헤르츠파는 가장 큰 특징으로 기존의 엑스레이에서 검출이 불가능했던 플라스틱이나 세라믹 등을 쉽게 검출할 수 있을 뿐만 아니라 매우 얕은 극초단 펄스를 사용함으로서 얕은 두께에 대한 3D 이미징이 가능하다. 또한, 각기 다른 화학물의 특징적인 신호를 탐지함으로서 화학적, 생물학적 특성을 검출할 뿐만 아니라 엑스레이에 비해 매우 낮은 에너지를 사용함으로서 안전하다.



〈그림 13〉 보안 검색, 숨겨진 무기 검출

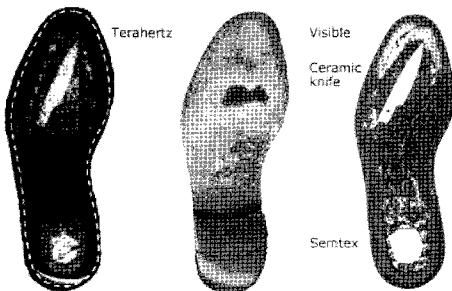
[출처 : Science, Vol.297, 2, 2002]

테라헤르츠 광을 이용한 보안 검색은 크게 인체에서의 테라헤르츠 광을 그대로 이용한 수동 소자 방법과 특정 테라헤르츠 광 소스를 이용하여 반사된 빔을 이용한 능동소자 방법으로 크게 나눌 수 있다. 수동 소자의 경우 정확한 검출은 불가능하나 이미징 속도 및 구조적으로 간단하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 〈그림 13〉은 수동소자를 이용한 영상이미지로서 숨겨진 영상에 대한 정확한 정보를 얻을 수 있다. 또한 〈그림 14〉와 같이 이전의 엑스레이에서는 검출이 불가능한 세라믹 나이프도 검출이 가능할 뿐만 아니라 〈그림 15〉와 같이 신발속의 플라스틱 폭발물



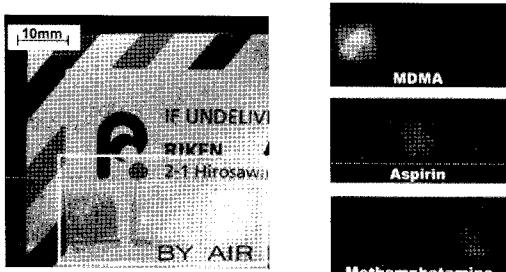
〈그림 14〉 능동 소자를 이용한 THz 이미징

[출처 : NIST & VTT, 2005]



〈그림 15〉 숨겨진 무기 및 폭발물 검출

[출처 : Teraview]



〈그림 16〉 봉투 속 마약 검출

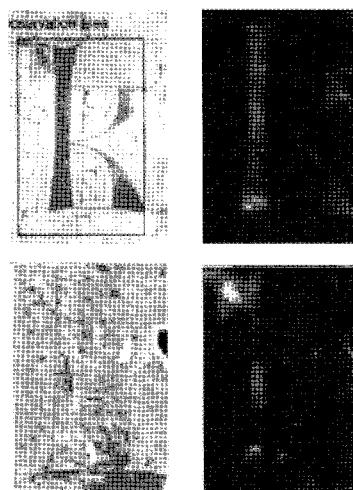
[출처 : Kodo Kawase, et al., Optics Express, Vol. 11, No. 20 2549 2003]

까지 검출이 가능하다. 이와 달리 능동 소자를 이용한 방법은 측정 속도는 느리나 정확도가 매우 높다. 이러한 방법은 테라헤르츠파 지문을 그대로 이용함으로서 <그림 16>과 같이 봉투속의 마약이나 약품 등에 대한 구별까지 가능하다. 최근 전공소자 및 반도체 소자를 이용한 고출력 테라헤르츠 광 소스가 개발됨에 따라 공간 분해능과 측정 속도에서도 상당한 진보를 이루고 있다.

3. 예술

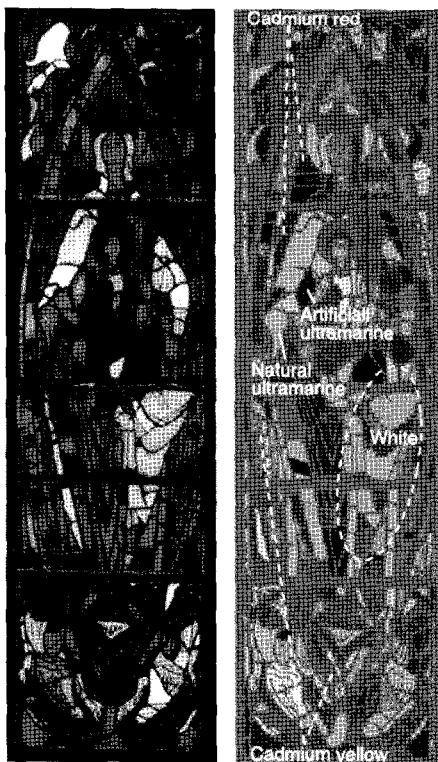
테라헤르츠파를 이용한 고미술 감정 및 복구에 사용하려는 노력이 이루어지고 있으며 몇몇 연구소를 중심으로 활발하게 연구가 진행되고

있다. 기존에는 Raman, X-ray fluorescence, near IR spectroscopy, UV fluorescence, IR & μ -wave imaging 등 다양한 방법이 사용되어 왔다. 그러나 UV, Raman, IR 분광은 벽화의 표면층 연구에 사용되어왔으나 석고 등과 같은 미술품에는 밀리미터 정도의 낮은 투과율을 가진다. 또한, X-Ray, μ -wave는 두꺼운 벽 등을 투과할 수 있기 때문에 전위(단층), 물에 의한 손상과 다른 결함을 찾는데 많이 사용되어지나 깊이 방향에 대한 분해능이 없으며, 마이크로파는 표피나 측 방향에 대한 분해능이 떨어지는 단점이 있다. 또한, 기존의 측정 방법은 비파괴, 비침습성, 높은 정밀도, 보존성 등을 요구하는 고가의 예술작품에는 그 사용에 제약이 따른다. 그러나 테라헤르츠파는 전파의 특성을 이용함으로서 비파괴검사가 가능할 뿐만 아니라 낮은 에너지로 인하여 비침습성 성질을 가지고 있어 예술성과 부가가치가 높은 고미술품 검사에 가장 이상적이다. <그림 17>은 테라헤르츠파를 이용한 고



〈그림 17〉 THz 이미징을 이용한 고미술품 검사

[출처 : Kaori Fukunaga, et al., IEICE Electronics Express, Vol. 5, No. 7. 223, 2008]



〈그림 18〉 THz false colour image : Stained glass like sample(좌)와 THz false colour image(우)

[출처 : Kaori Fukunaga, et al., IEICE Electronics Express, Vol. 4, 258, 2007]

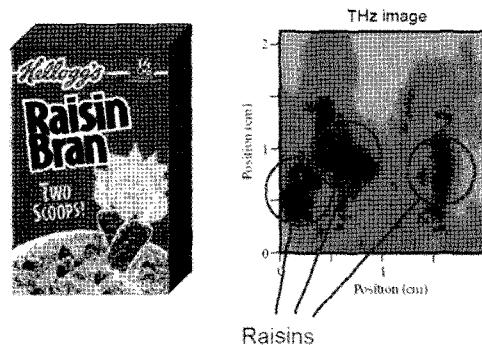
미술품 검사로서 잉크부 및 색소부 뿐만 아니라 양피지의 특성까지 검출할 수 있다. <그림 18>은 잉크로 그려진 색유리에 대한 이미지로서 각각의 염색재료에 대한 특성까지 알 수 있다. 이는 고미술품의 감정뿐만 아니라 복구에도 사용이 가능하다.

4. 품질관리

최근 식품산업 전반에 대한 품질관리의 중요성이 높아짐에 따라 다양한 품질관리시스템이 개발되어 왔다. 대표적인 품질관리 방법으로 초

음파, 엑스레이, 금속탐지기, MRI 등 다양한 방법이 사용되고 있으나 초음파의 경우 낮은 공간분해능에 의한 작은 이물질 검출이 어려우며, 엑스레이 방법은 잔류 방사능에 대한 위험과 사용상의 위험성을 배제할 수 없다. 또한, 금속 탐지기의 경우 금속 이외의 물질에 대한 검출 능력의 한계성을 가지며 MRI의 경우 수분이 있는 물질에만 사용 가능한 단점이 있다. 반면 테라헤르츠파는 높은 공간 분해능뿐만 아니라 인체에 대하여 안전하며 거의 모든 재료에 대하여 사용이 가능하다. 이러한 특성을 이용하여 최근 제품의 이물질 검사나 제품의 변형 등 품질 관리에 이용하려는 노력이 이루어지고 있다. <그림 19>은 시리얼 박스내의 건포도 이미지이다. 이러한 측정은 테라헤르츠파의 수분에 의한 흡수율로서 수분의 미미한 변화까지 검출이 가능하므로 식품산업에 충분히 응용이 가능하다. <그림 20>은 초콜릿 내의 이물질 검출로서 기존의 금속탐지기와 엑스레이 검출로 불가능 했던 유리, 돌 등 다양한 이물질 검출이 가능하다.

특히, 테라헤르츠파 이미징은 3차원 이미지를 얻을 수 있는 장점이 있다. 이는 곧 제품이나 식



〈그림 19〉 시리얼 박스 내의 건포도 이미지

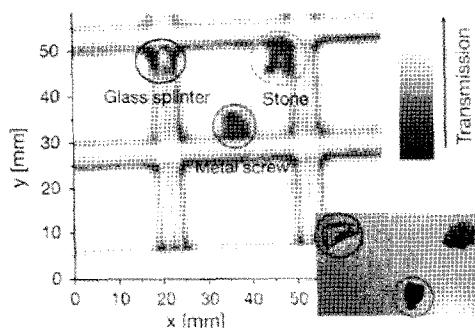
[출처 : D.M. Mittleman, Applied Physics B Lasers and Optics, 1999]

품 내의 이상이 있는 위치를 정확하게 판단함으로서 기존의 엑스레이 이미지가 해결할 수 없는 깊이 정보까지 측정이 가능하다. <그림 21>은 물병과 칠면조 뼈의 3차원 이미지로서 MRI처럼 내부 구조를 파악할 수 있다. 그밖에도 <그림

22>와 같이 우주왕복선 내의 결합 조사나 IC 칩 내부 검사 등 그 응용 분야는 무한하다.

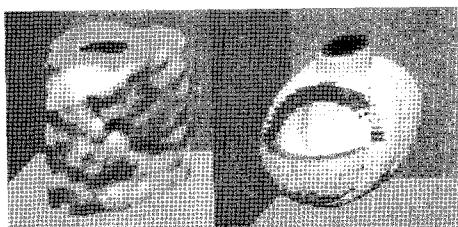
IV. 국내 현황

지금까지 테라헤르츠파 기술의 응용에 대한 예를 든 것은 극히 일부분에 지나지 않는다. 테라헤르츠파 이미징은 해결해야 할 많은 문제점을 가지고 있는 것도 사실이다. 하지만 가까운 미래에



<그림 20> 초콜릿 내의 이물질 검출

[출처 : ECNDT 2006 – Poster 67]



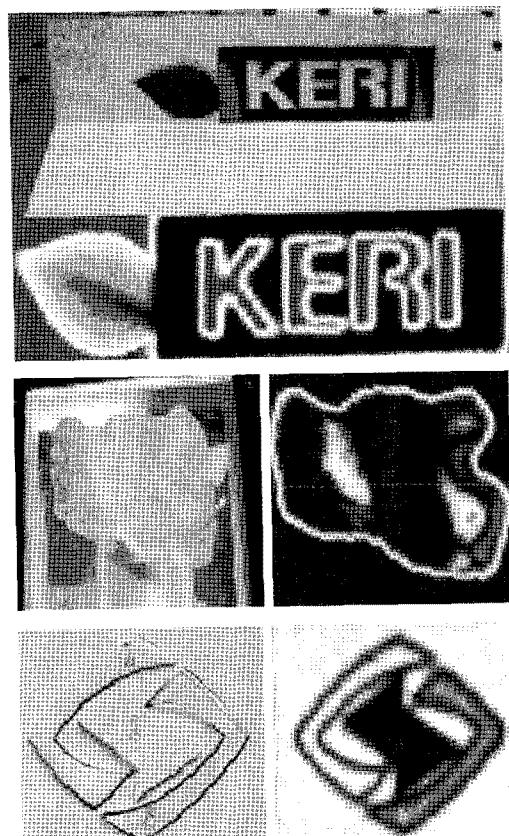
<그림 21> THz 3차원 이미지 : 물병 이미지(좌)와 칠면조 뼈 이미지(우)

[출처 : X.-C. Zhang, IEEE/LEOS News Letters, 2002]



<그림 22> 우주왕복선 단열재 내부의 결합 조사

[출처 : X.-C. Zhang, RPI]



<그림 23> THz 이미지 : 나뭇잎과 글씨 이미지(상), 돼지고기의 지방 이미지(중), 3가지 다른 종류의 폴리머에 대한 THz 이미지(하)

[출처 : 한국전기연구원, 2008]

테라헤르츠파 응용기술은 우리 일상에서 밀접하게 사용되어질 것으로 전망된다. 현재, 국내에서도 테라헤르츠 기술과 관련하여 대학교와 연구소를 중심으로 활발한 연구가 진행 중에 있다.

저자소개



김종욱

1997년 8월 Michigan State Univ.(미국) 물리학 박사
1993년 12월 Michigan State Univ.(미국) 물리학 석사
1986년 2월 한국외국어대학교 물리학과 학사
2001년 8월 ~ 2009년 현재 한국전기연구원 플라즈마
가속기 그룹(팀장 역), 전자의료기기연
구센터장(역), 영상응용연구그룹장(역),
차세대 x-선 의료기기연구그룹장(역),
첨단의용물리연구센터장(현)
2007년 9월 ~ 2008년 8월 한양대학교 학연산클러스터
겸임교수
1998년 3월 ~ 2000년 4월 The University of Texas at
Austin, Institute for Advanced
Technology(IAT), Postdoctoral Fellow
1997년 8월 ~ 1998년 3월 Michigan State University,
Center for Sensor Materials(CSM),
Postdoctoral Fellow

주관심 분야 : THz 분광/영상기술, CNT X-ray 이미징 기술 등