

테라헤르츠 이미징 기술 개발 동향

Trends in Terahertz Imaging Technology

최다혜 (D.H. Choi, choi.dh@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 박사후연구원
신준환 (J.H. Shin, jh.shin@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 선임연구원
이의수 (E.S. Lee, euisu@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 선임연구원
문기원 (K.W. Moon, kwmoon@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 책임연구원
이일민 (I.M. Lee, ilminlee@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 선임연구원
박동우 (D.W. Park, dwpark@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 선임연구원
김현수 (H.S. Kim, kimhyunsoo@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 책임연구원
김무건 (M.G. Kim, mugeonkim@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 연구원
최경선 (K.S. Choi, miso5383@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 기술실무원
박경현 (K.H. Park, khp@etri.re.kr)	테라헤르츠연구실 책임연구원/실장

ABSTRACT

Modern imaging technologies utilizing electromagnetic waves are indispensable in our daily lives. Applications, such as television and smartphone screens, radar imaging for weather forecast, and medical imaging, can be attributed to technology developments in various electromagnetic regions. Terahertz (THz) waves, electromagnetic (EM) waves located between far infrared and microwave regions, had left unexplored EM waves. Recent advances in technology have led to various two-dimensional and three-dimensional THz imaging techniques. In this article, we explain THz imaging techniques as well as the experimental results from our laboratory. Additionally, we introduce commercial THz cameras developed worldwide. Finally, we present the applications of THz imaging techniques.

KEYWORDS 테라헤르츠, 이미징 기술, 카메라, 이미징 기술 응용

1. 서론

라디오파부터 감마선에 이르기까지, 다양한 영역의 전자기파는 레이더 영상, 텔레비전 방송 영상, 엑스선 영상, 자기공명영상 등 다양한 형태로

우리의 일상생활에서 활용되고 있다.

테라헤르츠파(THz wave)는 전자기파 스펙트럼 상에서 적외선 영역과 마이크로파 영역 사이에 위치하는 전자기파로, 가장 최근까지 미개척 영역으로 남아 있던 전자기파 영역이다(그림 1 참조).

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2019.J.340503>

* 이 연구는 산업통상자원부와 중소벤처기업부의 WC300사업(S2524372), ETRI의 연구운영비지원사업(19ZR1200, 19ZH1700)의 일환으로 수행되었음.



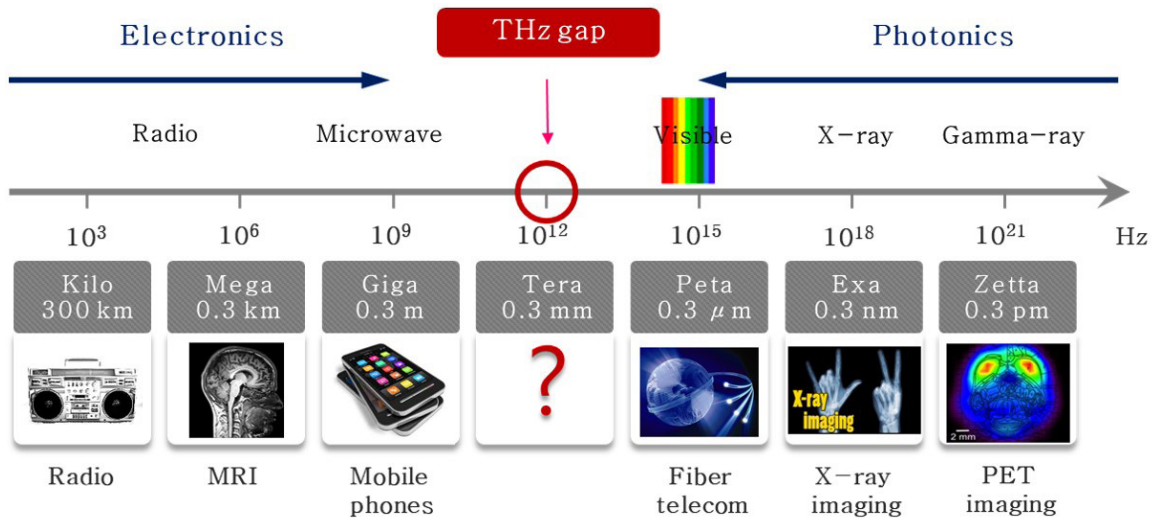


그림 1 전자기파 스펙트럼

조). 테라헤르츠파는 종이, 플라스틱, 옷, 나무 등 가시광 영역에서 불투명한 물질을 잘 투과하는 반면, 금속성 물질이나 물 등의 분극성 물질은 잘 투과하지 못하는 특성이 있다. 그리고 테라헤르츠파의 광자 에너지는 수 meV로 DNA나 다른 생체 분자를 이온화시키는 데 필요한 에너지보다 훨씬 작다. 이와 같은 성질을 이용하여, 지난 20여 년 동안, 의료, 의약, 천문, 보안, 통신, 산업 등 다양한 분야에서 테라헤르츠파를 활용한 이미징 및 센싱 기술이 연구되어 왔다 [1,2].

본 고에서는 테라헤르츠 2차원과 3차원 이미징 기술에 관하여 설명하고, 관련한 본 연구실의 연구결과를 소개한다. 그리고 상용화된 테라헤르츠 카메라 기술에 대해서 정리하고, 관련한 최신 연구결과를 설명한다. 마지막으로 테라헤르츠 이미징의 산업, 보안 분야에서의 응용 예를 본 연구실의 연구결과를 중심으로 설명하고 글을 맺고자 한다.

II. 테라헤르츠 이미징 기술 개발 동향

1. 테라헤르츠 이미징 기술

대부분의 테라헤르츠 이미징 기술은 테라헤르츠 광원을 관측하고자 하는 물체에 입사시킨 후에 물체를 투과하거나, 물체에서 반사된 테라헤르츠파를 검출하여 물체의 이미지를 구현하는 능동 이미징 방식을 사용한다. 본 절에서는 2차원과 3차원 테라헤르츠 능동 이미징 기술에 대해서 다루겠다. 수동 이미징 기술에 대해서는 2절 테라헤르츠 카메라 기술 부분에서 소개하도록 하겠다.

가. 2차원 이미징 기술

2차원 이미징 기술은 크게 단일 픽셀 검출기를 활용한 방식과 어레이 검출기를 활용한 이미징 방식으로 나눌 수 있다. 2차원 이미징 기술에서 평면 방향의 분해능은 주로 광원의 주파수에 의해 결정된다. 래스터 스캔 방식은 가장 기본적인 이미징 방식인데 관측하고자 하는 물체 혹은 광원을 기계

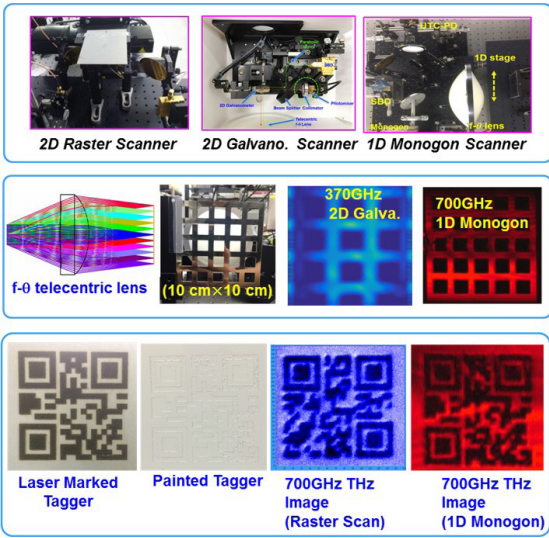


그림 2 2차원 THz 이미징 시스템과 샘플 이미지

적으로 움직이면서 물체의 부분 정보를 순차적으로 얻어서 물체 전체를 이미징하는 방식이다. 래스터 스캔 방식은 속도가 느리므로 본 연구실에서는 스캔 속도를 높이기 위한 여러 가지 노력을 해왔다 [3,4]. 모터에 거울을 부착하여 빔 경로를 빠른 속도로 제어함으로써 이미지 획득 속도를 증가시키는 방식을 사용했는데, 500x500 픽셀의 이미지를 10초 안에 획득하였다[3]. 그림 2는 본 연구실에서 개발한 래스터 스캔과 회전 거울을 이용한 다양한 테라헤르츠 2차원 이미징 시스템, 그리고 이 시스템에서 얻은 금속 격자와 차세대 물류관리의 핵심으로 부상 가능한 신기술인 THz-QR 코드 등 샘플의 이미지를 보여주고 있다. 스캔 속도를 더 높이기 위해서 기존의 미러 대신에 고속으로 회전하는 폴리곤 미러(Polygon Mirror)를 사용하여 기존 10초 수준에서 2초 이내로 영상 획득 시간이 비약적으로 향상된 이미징 시스템을 개발하였고, 필드 테스트 준비가 한창이다. 개발된 시스템은 무엇보다도 저가격 현장용 고속 모터들이 갖는 지터를 새롭게 개발한 클락 추출기를 활용하여 해결하였고, 이

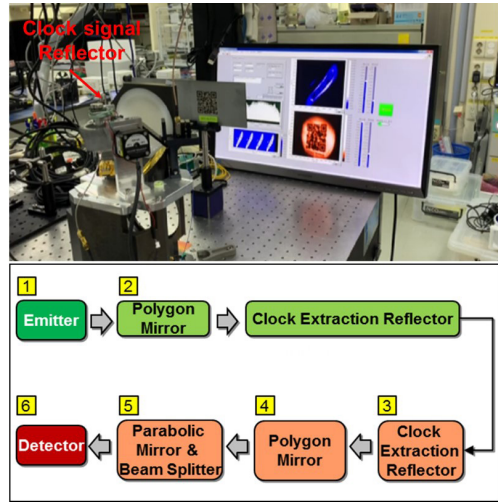


그림 3 폴리곤 미러와 클락 추출을 활용한 테라헤르츠 고속 이미지 시스템과 클락 추출과정

를 통해 고속의 고품질 영상 획득이 가능하게 함으로써 타 경쟁 연구그룹과의 차별성을 확보하였다.

앞서 기술한 단일 픽셀 검출기를 활용한 이미징 시스템 이외에도 본 연구실에서는 쇼트키 배리어 다이오드 어레이 검출기를 이용한 이미징 시스템도 개발하였다[5]. 개발된 이미징 시스템으로 움직이는 애벌레를 실시간으로 이미징할 수 있었다. 어레이형 검출기를 구성하는 단위 검출기의 성능은 계속 향상되고 있으며, 이에 따라 보다 다양한 고성능의 2차원 영상 시스템이 개발될 것으로 전망된다.

나. 3차원 이미징 기술

펄스 기반의 테라헤르츠 시스템에서는 TOF(Time-of-Flight) 방식을 사용하여 3차원 영상을 구현한다 [6]. 이 방식은 층상구조를 지닌 3차원 물체를 투과한 펄스 혹은 물체에서 반사된 테라헤르츠 펄스가 각각의 층상구조의 경계면에서 반사됨에 따라 시간상으로 분리되는 현상을 이미징에 이용한다. 펄스의 시간적 분리량은 굴절률과 두께 등 물체의 특성과 구조에 의해 결정되므로, 테라헤르츠 펄스

의 시간적 분리 형태로부터 물체의 3차원 정보를 얻을 수 있다(그림 4 참조). 통상 이 방식으로 수십 μm 이하의 축 방향 분해능을 얻을 수 있다. 그러나 이 방식은 비싸고 부피가 큰 펄스 레이저를 사용하므로 실생활에 응용하기에는 한계가 있다.

이러한 한계점을 극복하기 위해서 여러 가지 연속파 기반의 테라헤르츠 시스템이 개발되어 왔다. 먼저 테라헤르츠 CT(Computed Tomography)는 물체를 회전하면서 각각의 회전 각도에서 2차원 이미지를 얻고 소프트웨어적 후처리를 통해서 물체의 3차원 영상을 구현하는 방법이다[7]. CT는 물체를 회전시키며 각각의 회전 각도에서 2차원 이미지를 얻으므로 이미지 획득시간이 길고, 3차원 영상을 얻기 위한 신호 처리 방법이 복잡하다는 단점이 있다. 또한, 물체를 회전시킬 수 없는 경우에는 적용이 제한된다. 그러나 X-ray CT와 다르게 테라헤르츠 CT는 피검자나 검사자의 건강에 대한 위험이 적다는 장점을 갖고 있다. 이미 테라헤르츠 CT를 통해 사람 뼈 등의 영상을 얻은 결과가 보고되어 있다[8]. 이미지의 분해능은 광원의 파장에 의

해 결정되므로, X-ray 이미지와 비교하여 테라헤르츠 이미지의 분해능이 낮다. 그럼에도 불구하고 관상봉합(두개골 사이의 결합) 부분을 분명하게 확인할 수가 있었다[8]. 이미지 획득시간의 개선[9], 분해능 향상 등 여러 가지 관련 기술이 성숙한다면 추후 의료 분야 등에서 활용될 가능성이 있다.

테라헤르츠 OCT(Optical Coherence Tomography)는 광대역 테라헤르츠 광원과 마이켈슨 간섭계를 이용한 3차원 영상 획득 시스템이다. TD(Time-domain) OCT와 SS(Sweep Source) OCT 방식이 있다. TD OCT의 경우, 결맞음이 좋지 않은 테라헤르츠 광원을 이용하고 간섭계의 한쪽 빔 경로의 길이를 변화시키며 얻은 간섭 신호를 이용하여 3차원 영

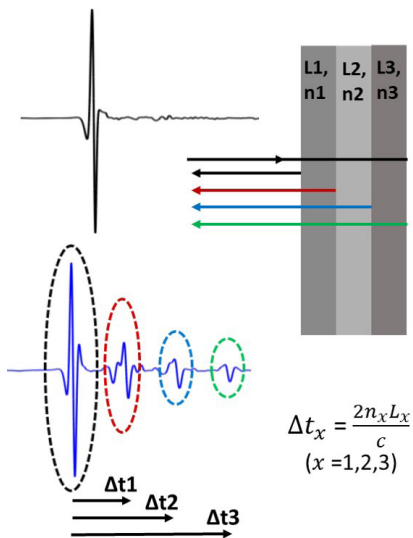
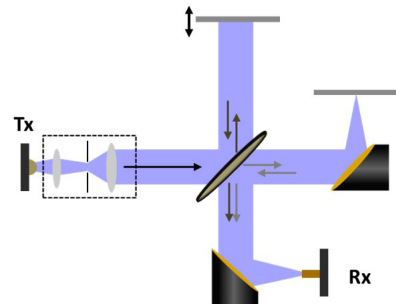
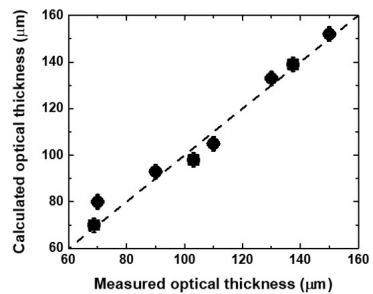


그림 4 TOF 방식의 원리



(a) Gouy 위상 변화를 이용한 간섭계



(b) 파장 이하 두께의 샘플 측정

출처 D.-H. Choi et al., "Terahertz continuous wave system using phase shift interferometry for measuring the thickness of sub-100- μm -thick samples without frequency sweep," Opt. Express, vol. 27, 2019, pp. 14695-14704.

그림 5 (a) Gouy 위상 변화를 이용한 축 방향 분해능 증가 이미징 시스템과 (b) 100 μm 이하의 축 방향 분해능 획득 결과

상을 얻는다[10]. 이 방식은 시스템의 구성이 간단하고, 작고 값싼 광원을 사용할 수 있는 장점을 갖고 있다. 그러나 축 방향의 분해능이 1mm 수준이기 때문에 분해능을 높이기 위해서 광대역의 주파수 스캔을 이용하는 SS OCT 방식 또한 연구되었다[11]. 이 방식에서는 넓은 주파수 영역에서 얻은 간섭 신호를 FFT(Fast Fourier Transform)하여 시간 영역에서 펄스 형태의 신호를 얻게 된다. 이 신호를 바탕으로 앞서 설명한 TOF 방식을 적용하면 물체의 3차원 영상을 얻게 된다. 그런데, 축 방향의 분해능을 높이기 위해서 주파수 스캔 범위를 증가시키면 이미지 획득시간이 증가하게 되고 테라헤르츠 3차원 영상의 실생활 응용에 한계점으로 작용한다.

본 연구실에서는 Gouy 위상 변화를 이용한 간섭계를 통하여 주파수 스캔 없이 축 방향 분해능을 높임으로써 이미지 획득 속도를 높이는 3차원 이미징 방법을 개발하였다[12]. 그림 5와 같이 기본

적인 실험 구성은 SS OCT 방식과 같지만, 본 연구에서는 간섭계의 두 갈래 빔 경로의 길이를 정확하게 맞추어서 샘플에 의한 발생한 두 갈래 빔 경로의 작은 차이를 민감하게 검출할 수 있는 시스템을 고안 및 구성하였고, 그 결과로 주파수 스캔 없이 100 μ m 이하의 축 방향 분해능을 획득했다. 그림 5(b)를 보면, 실제 기계적으로 측정된 샘플의 광학적 두께와 간섭계를 통한 측정의 결과를 바탕으로 얻은 계산적 광학적 두께가 잘 맞는 것을 확인할 수 있다.

앞서 기술한 방법 이외에도 프레넬 렌즈를 이용한 3차원 이미징, 홀로그램을 이용한 3차원 이미징 등 여러 가지 테라헤르츠 3차원 이미징 기법이 연구되어왔다. 각각의 방식에 대한 자세한 내용은 참고문헌을 참조하기 바란다[13].

본 절에서는 여러 가지 테라헤르츠 이미징 기술을 살펴보았다. 각각의 이미징 기술은 서로 다른

표 1 상용 테라헤르츠 카메라 사양[14-20]

	TeraSense	INO	NEC	Alphanov	i2S	Swiss Terahertz	Digital Barriers
제품명	TeraFAST-256	MICROXCAM-384i-THz	IR/V-T0831	TERACAM	TZcam	RIGI Camera	ThruVision TS5 (수동이미징)
주파수	50~700GHz	94~4,250GHz	1~7THz	0.1~30THz	0.3~5THz	4.6THz	250±20 GHz
픽셀수	16×16	384×288	320×240	40×40	320×240	1,920×1,080	n/a
픽셀크기 (혹은 피치 크기)	1.5×3mm ²	35 μ m	23.5 μ m	1mm	50 μ m	15 μ m	n/a
검출기 종류	GaAs	μ bolometer FPA	μ bolometer FPA	n/a	μ bolometer FPA	μ bolometer FPA	n/a
작동온도	상온	상온	상온	상온	상온	상온	상온
등가 잡음전력	1nW/Hz ^{1/2}	n/a	<100pW (@ 4THz)	<10 μ W/Hz ^{1/2} (@ 0.1THz)	20pW (@ 2.5THz)	<1.5pW/Hz ^{1/2} (@ 4.6THz)	n/a
분해능	3mm	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
프레임수	5kHz	50Hz	30Hz	n/a	25Hz	10, 30, 60Hz	6Hz
응답도	50kV/W	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

장단점을 지니고 있으므로 사용자의 목적에 맞는 이미징 방식을 취사선택하는 것이 필요할 것이다.

2. 테라헤르츠 카메라 기술

높은 민감성, 빠른 반응시간을 가진 검출기를 바탕으로 고분해능의 실시간 이미지를 얻는 것은 테라헤르츠 이미징의 실생활 응용을 위해서 매우 중요하다. 현재 미국, 유럽, 일본 등 세계 각국에서 개발된 테라헤르츠 카메라가 상용화되어 있다(표 1 참조). 일부 상용화되어 있으나 실생활에 직접적으로 활용할 수 있는 단계로 발전하지 못한 이유는 개발된 제품이 여전히 크기, 성능, 가격 문제 등을 갖고 있기 때문이다. 이를 해소하기 위해서 다양한 방법을 통해 경쟁적으로 개발 중이다.

테라헤르츠 카메라의 검출기로는 마이크로 볼로미터 어레이가 가장 널리 사용되고 있다. 각각의 마이크로 볼로미터 픽셀은 바나듐 옥사이드(VO_x), 비정질 실리콘(Amorphous silicon) 등의 볼로미터 박막층, 절연층, 금속층 등으로 구성되어 있으며 상온에서 동작한다[21]. 최근에 스위스의 Swiss Terahertz 사에서는 마이크로 볼로미터 어레이를 사용한 픽셀 수 1,920×1,080, 픽셀 크기 15 μ m로 초당 60프레임의 영상을 얻는 테라헤르츠 카메라를 출시하였다. 이 카메라의 성능지표는 4.6THz QCL(Quantum Cascade Laser)를 광원을 사용하여 얻었는데, 앞으로 이보다 파워가 적고, 주파수 낮을 때에도 효율적으로 고분해능의 이미지를 얻는 연구가 필요할 것으로 예상된다.

궁극적으로 테라헤르츠 카메라의 목표는 광학 카메라 수준의 성능을 갖는 것일 것이다. 그런데, 마이크로 볼로미터를 활용한 테라헤르츠 이미징 기술은 픽셀 크기의 한계로 고해상도 이미징에 어려움이 있다. 또한, 검출기의 반응속도가 느리고

주변의 열에너지에 의한 노이즈 영향이 크다는 단점이 있다. 이런 한계점을 극복하는 방법의 하나로써 최근에 상용 CCD(Charge-Coupled Device)를 사용한 테라헤르츠 이미징에 대한 연구 결과가 발표되었다[22]. 일반적으로 실리콘의 밴드갭 에너지는 1.12eV로 수 meV의 에너지를 갖는 테라헤르츠 파 검출에 사용될 수 없다. 그러나 고강도 테라헤르츠파와 실리콘 사이의 비선형 현상을 이용하여 5~13THz 영역의 테라헤르츠파를 픽셀 수 1,360×1,240개, 픽셀 크기 4.65 μ m인 CCD 상에 이미징하였다. CCD를 사용했을 때, 상용화된 마이크로 볼로미터 카메라와 비교하여, 테라헤르츠파의 발산, 크기, 초점 평면 등이 좀 더 명확하게 구분되는 것이 확인되었다[22].

그 외에도 프레임 수는 상대적으로 적지만 수동 이미징이라는 특성을 지닌 카메라도 보고되었다[18,23]. 수동 이미징 기술이란 앞서 설명한 능동 이미징과 대비되는 기술로써, 테라헤르츠 광원 대신에 관측하고자 하는 샘플에서 직접 방출된 전자기파 혹은 대기 중의 흑체복사 광원의 샘플에서의 산란으로 발생한 전자기파를 이용한 이미징 기술을 의미하는데, 인위적인 전자기파 노출이 없으므로 특히 대인 보안 검색 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대되고 있는 기술이다.

표 1의 ThruVision 카메라는 LA 지하철에서 이미 활용되고 있으며, 이 부분에 대해서는 다음 절의 보안 부분에서 좀 더 다루도록 하겠다. 또 다른 수동 이미징 카메라는 LEKID(Lumped Element Kinetic Inductance Detector) 검출기를 사용한다. 이 검출기는 실리콘 웨이퍼에 알루미늄 필름을 증착한 간단한 구조를 갖고 있으며, 전자기파가 흡수되었을 때 LC 공진회로의 공진주파수가 변화되는 정도를 측정함으로써 입사된 전자기파의 세기를 검출한다. 이 검출기의 등가잡음전력은 350GHz에서 0.6

pW/Hz1/2로, 그 성능이 다른 카메라에 비해서 뛰어나다. 다만, 초당 2프레임 정도의 영상을 얻는다는 점과 필름의 초전도 임계온도 이하인 0.25K에서 작동된다는 한계점이 존재한다. 이 기술의 실제 활용에 대해서는 역시 다음 절의 보안 부분에서 좀 더 다루도록 하겠다.

3. 테라헤르츠 이미징 기술의 응용

앞 2절을 통해서 테라헤르츠 이미징 기술 현황과 테라헤르츠 카메라 기술에 대해서 살펴보았다. 본 절에서는 테라헤르츠 이미징 기술의 응용에 대해서 소개한다. 테라헤르츠 이미징 기술의 응용은 의료, 의약, 천문, 보안, 통신, 예술, 산업 등 다방면에서 활용되고 있으나 본 연구실에서 중점을 두고 있는 산업, 보안 분야를 중심으로 소개한다.

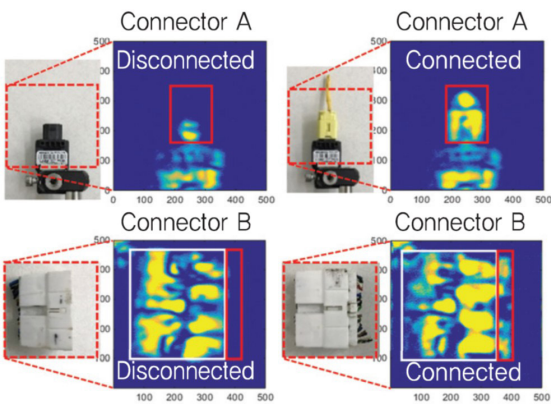
가. 산업

본 연구실에서는 국내의 다양한 산업 분야의 실수요를 바탕으로 테라헤르츠 이미징 테스트를 수

행하고 있다. 구체적인 내용은 해당 기업의 비밀에 해당할 수 있으므로, 여기서는 개략적인 내용과 실험 결과에 대해서 다룬다.

1) 전기 커넥터 체결 검사

자동차, 항공기 등의 복잡한 제품에는 수백 개에서 많게는 수천 개의 전기적 커넥터가 존재한다. 이런 커넥터의 체결은 대부분은 수작업으로 이루어지는데, 다양한 작업 오류로 인해서 불량 발생하게 된다. 현재 사용되는 불량 검사인 사진 촬영의 경우, 외부 조명 상황에 의한 사진 검사의 오류나 다른 부품에 의해 가려진 커넥터의 검사 불가 등의 문제점이 있다. 테라헤르츠파는 외부 조명에 영향을 받지 않고 플라스틱 등을 잘 투과하므로 사진 촬영 검사의 대안이 될 가능성이 있다. 본 연구실에서는 실제 차량에서 사용되고 있는 두 종류 커넥터의 체결 상태를 테라헤르츠 이미징을 통해 확인하였다(그림 6 참조). 각 커넥터의 체결 여부를 점선으로 표시된 영역의 이미지 차이를 통해 확연하게 구분됨을 확인하였다.



출처 E. S. Lee et al., "Semiconductor-Based Terahertz Photonics for Industrial Application," J. Lightw. Technol., vol. 36, no. 2, De. 2017, pp. 274-283.

그림 6 THz 이미징 시스템으로 측정된 커넥터의 이미지

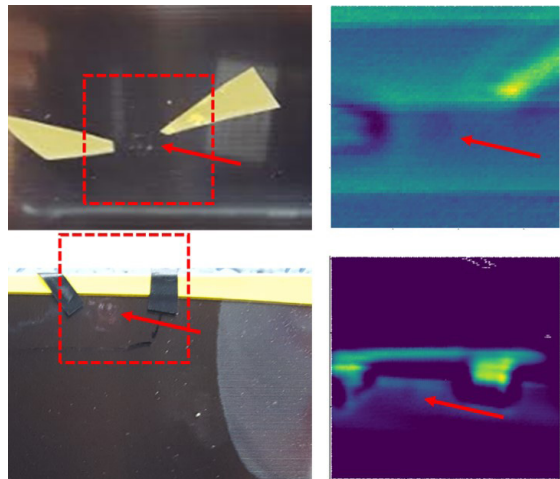


그림 7 THz 이미징 시스템으로 측정된 디스플레이 패널의 결함 이미지

2) 디스플레이 패널의 결함 검사

디스플레이 공정상에서 발생하는 기포 및 들뜸 등의 불량은 디스플레이 제품 수명을 단축하는 주요 원인이 되고 있으나 적합한 검사 기술을 찾지 못해서 관련 산업체의 수요 기술로 인식되고 있다. 기존에 X-ray와 초음파를 통한 검사가 있지만, X-ray의 경우 방사선 등의 요인으로 작업자의 거부감이 크고 원장 크기의 검사에서 기포 검출이 불가하다. 초음파 검사는 패널을 물에 담가야 하므로 전수 조사 방법으로는 적합하지 않다. 따라서 앞의 문제점을 해결할 새로운 검사 기술이 요구되는 상황이다. 본 연구실에서는 테라헤르츠 이미징을 통해 디스플레이 패널에 생성된 결함을 관찰하였다(그림 7 참조). 빨간색 화살표 부분에 형성된 디스플레이 패널의 결함이 테라헤르츠 이미지에서 확인되었다. 다만, 분해능은 개선될 필요가 있다.

분해능 개선을 위해서 가장 기본적인 방법은 광원의 주파수를 높이는 방법이다. 그러나 디스플레이 패널 내부 이미징에서는 주파수를 높이는 것에 한계가 있다. 왜냐하면 주파수가 높아질수록 테라헤르츠의 커버그래스 투과율이 감소하기 때문이다. 따라서 출력이 높은 고주파 광원을 활용하거나 저주파에서 분해능을 높일 수 있는 방법 등 분해능 향상 방안을 모색하고 있다.

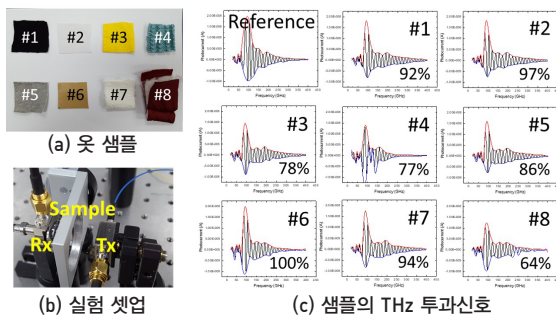


그림 8 다양한 의복의 THz 투과 실험

나. 보안

대중교통이나 공공장소 등 많은 사람이 오가는 장소에서 은닉된 무기, 폭발물 등을 검출하는 것은 안전상 중요한 요소이다. 특히 공항처럼 보안 검색 시간에 대한 부담이 큰 경우, 휴대품을 들고 걸어가는 승객에 대해서 보안 검색을 하는 walk through 형 보안 검색에 대한 수요가 높게 나타나고 있다.

테라헤르츠는 옷을 잘 투과하므로 은닉된 무기나 폭발물 등을 검출하는 데 사용될 수 있으며(그림 8 참조), 인체에 해를 끼치지 않는 성질이 있어[24], 외국의 경우 차세대 보안 검색 기술로서 테라헤르츠 기술의 도입을 위한 움직임이 나타나고 있다.

미국 LA의 지하철역에는 2018년 9월 현재, 테라헤르츠 기술을 활용한 지하철 승객 검색용 카메라가 운용되고 있다. ThruVision 카메라를 사용하여, 한 시간에 2,000여 명의 승객을 검색하는 수준이다[25]. 앞서 설명한 바와 같이 이 카메라는 광원 없이 물체로부터 자연적으로 발생한 전자기파를 검출하므로 승객의 거부감을 최소화할 수 있다는 장점이 있다.

2018년 12월에는 영국의 Cardiff 공항에서 테라헤르츠 카메라를 이용한 대인 검색 시스템의 시연을 수행되었다[26]. 이 시스템은 영국의 Cardiff 대학과 QMC Instruments사의 공동 연구를 통해 개발된 기술로써 여기서 사용된 테라헤르츠 카메라는 LEKID를 검출기로 사용하였다. 연구팀은 기존에 이미 LEKID를 이용한 카메라를 사용하여 옷 안에 감춰진 지갑, 권총, 동전 등의 이미지를 초당 2프레임 정도로 얻은 바 있다[23]. 공항에서 시연된 보안 시스템은 컴퓨터 학습을 통하여 위험물체 여부를 배우게 되며, 이를 통해 허위 경보를 줄일 수 있도록 하였다. 앞으로 이미지의 분해능을 높이고 초당 획득하는 이미지 수를 늘리는 등 관련 기술의 발전이 이루어진다면, 인체에 해가 없는 테라

헤르츠파를 이용하여 walk through형 보안 검색 시스템이 실제로 공항이나 지하철역 등에서 활용될 수 있을 것이다.

III. 결론

테라헤르츠 이미징 기술은 지난 20여 년 동안 크게 발전해왔으며, 실생활에서의 응용을 위해서 계속 발전하고 있다. 본 고에서는 기존에 이루어진 2차원과 3차원 테라헤르츠 이미징 분야의 연구결과들을 본 연구실의 연구결과를 중심으로 다루었다. 또한, 최근에 상용화된 테라헤르츠 카메라에 대해서도 살펴보았다. 그리고 산업과 보안 분야를 중심으로 테라헤르츠 이미징의 응용에 대해서 살펴보았다.

실시간 테라헤르츠 2차원 카메라는 이미 상용제품이 나와 있는 상태이고, 분해능을 더 높이고 이미지 획득 및 처리 시간을 줄이는 방향으로 계속해서 발전해 나갈 것이다. 또한, 다양한 기술을 활용하여 3차원 영상 획득을 위한 연구도 계속 이루어질 것으로 전망된다. 앞으로 검출기, 이미징 처리 등 기술 개발에 따라 테라헤르츠파의 실제적인 활용이 더욱 활발해질 것으로 기대되는데, 본 고의 내용이 관련 분야의 연구자들에게 좋은 참고 자료로 활용되기를 기대한다.

용어해설

테라헤르츠 파(THz Wave) 0.1~10THz(1THz = 10^{12} Hz)의 주파수를 갖는 전자기파. 적외선과 마이크로파 사이에 위치하며, 비금속 및 비분극성 유전체를 잘 투과함

Gouy 위상 변화 집중된 전자기파가 평면파 대비 추가적인 위상 변화를 겪게 되는 현상

테라헤르츠 수동 이미징 외부의 테라헤르츠 광원 없이 관측하고자 하는 샘플에서 직접적으로 방출되거나 대기 중의 흑체 복사 광원에 의한 샘플에서의 산란으로 발생한 테라헤르츠파를 이용한 이미징 기술

약어 정리

CCD	Charge Coupled Device
CT	Computed Tomography
FFT	Fast Fourier Transform
LEKID	Lumped Element Kinetic Inductance Detector
OCT	Optical Coherence Tomography
QCL	Quantum Cascade Laser
SS	Sweep Source
TD	Time Domain
THz	Terahertz
TOF	Time-of-Flight

참고문헌

- [1] D. M. Mittleman, "Twenty years of terahertz imaging," *Opt. Express*, vol. 26, 2018, pp. 9417-9431.
- [2] S. S. Dhillon et al., "The 2017 terahertz science and technology roadmap," *J. Phys. D Appl. Phys.*, vol. 50, 2017, p. 043001.
- [3] E. S. Lee et al., "Semiconductor-based terahertz photonics for industrial applications," *J. Lightw. Technol.*, vol. 36, 2017, pp. 274-283.
- [4] K. Moon et al., "Photonics-based multi-spectral THz imaging using a dual-mode laser and a telecentric f-lens," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, May 5, 2019, pp. 1-2.
- [5] S.-P. Han et al., "Real-time imaging of moving living objects using a compact terahertz scanner," *Appl. Phys. Express*, vol. 9, 2016, p. 022501.
- [6] J. Takayanagi et al., "High-resolution time-of-flight terahertz tomography using a femtosecond fiber laser," *Opt. Express*, vol. 17, 2009, pp. 7533-7539.
- [7] B. Ferguson et al., "T-ray computed tomography," *Opt. Lett.*, vol. 27, 2002, pp. 1312-1314.
- [8] M. Bessou et al., "Tree-dimensional terahertz computed tomography of human bones," *Appl. Opt.*, vol. 51, 2012, pp. 6738-6744.
- [9] G. C. Trichopoulos, and K. Sertel, "Broadband terahertz computed tomography using a 5k-pixel real-time THz camera," *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, vol. 36, 2015, pp. 675-686.
- [10] T. Isogawa et al., "Tomographic imaging using photonically generated low-coherence terahertz noise sources," *IEEE trans. THz Sci. Tech.*, vol. 2, 2012, pp. 485-492.
- [11] T. Nagatsuma et al., "Terahertz imaging based on optical

- coherence tomography,” *Photon. Res.*, vol. 2, 2014, pp. B64-B69.
- [12] D.-H. Choi et al., “Terahertz continuous wave system using phase shift interferometry for measuring the thickness of sub-100- μm -thick samples without frequency sweep,” *Opt. Express*, vol. 27, 2019, pp. 14695-14704.
- [13] J. P. Guillet et al., “Review of terahertz tomography techniques,” *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, vol. 35, 2014, pp. 382-411.
- [14] <http://terasense.com/products/thz-scanner/>
- [15] <https://www.ino.ca/en/solutions/microxcam-384i-thz/>
- [16] <https://www.nec.com/en/global/prod/terahertz/>
- [17] http://www.alphanov.com/client/document/pn-04---teracam_az040411_6.pdf?PHPSESSID=2d98c365308b-9446001fc44b95606a26
- [18] <https://www.i2s.fr/en/product/tzcam>
- [19] <https://www.swissterahertz.com/rigi>
- [20] https://www.cornestech.co.jp/tech/wp-content/uploads/sites/2/2017/02/ts5_r_eng.pdf
- [21] F. Simoons et al., “Uncooled Terahertz real-time imaging 2D arrays developed at LETI: present status and perspectives,” *International Society for Optics and Photonics*, May 18, 2017, p. 101942N.
- [22] M. Shalaby et al., “High-performing nonlinear visualization of terahertz radiation on a silicon charge-coupled device,” *Nature Comm.*, vol. 6, 2015, p. 8439.
- [23] S. Rowe, “A passive terahertz video camera based on lumped element kinetic inductance detectors,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 87, 2016, p. 033105.
- [24] G. C. Walker et al., “Terahertz imaging and international safety guidelines,” vol. 4682, 2002, pp. 683-690.
- [25] https://m.esa.int/Our_Activities/Telecommunications_Integrated_Applications/TTP2/ESA_technology_making_LA_Metro_a_safer_ride
- [26] <https://www.cardiff.ac.uk/news/view/1389672-new-passenger-scanner-uses-space-technology-to-speed-up-airport-security>