테라헤르츠 이미징 기술 및 그 응용 분야

Terahertz Imaging Technology and Applications

김무건 (M.G. Kim, mugeonkim@etri.re.kr) 테라헤르츠연구실 연구원
이의수 (E.S. Lee, euisu@etri.re.kr) 테라헤르츠연구실 선임연구원/기술총괄
박동우 (D.W. Park, dwpark@etri.re.kr) 테라헤르츠연구실 선임연구원
최다혜 (D.H. Choi, choi.dh@etri.re.kr) 테라헤르츠연구실 선임연구원
이일민 (I.M. Lee, ilminlee@etri.re.kr) 테라헤르츠연구실 책임연구원/실장
신준환 (J.H. Shin, jh.shin@etri.re.kr) 테라헤르츠연구실 선임연구원
김영호 (Y.H. Kim, youngho@etri.re.kr) 테라헤르츠연구실 책임연구원
김정수 (J.S. Kim, jungsookim@etri.re.kr) 테라헤르츠연구실 선임연구원
조진철 (J.C. Cho, hide28@etri.re.kr) 테라헤르츠연구실 박사후연구원
김영훈 (Y.H. Kim, yhk1125@etri.re.kr) 테라헤르츠연구실 위촉연구원
곽동용 (D.Y. Kwak, dykwak@etri.re.kr) 테라헤르츠연구실 책임연구원
박경현 (K.H. Park, khp@etri.re.kr) 미래원천연구본부 책임연구원/본부장

ABSTRACT

The terahertz wave (THz wave) is a band between infrared and microwaves and is defined as an electromagnetic wave having a frequency of 0.1 to 10 THz band. THz waves have the property of transmitting nonpolar materials, which the visible light cannot be transmitted, such as ceramics, plastics, and paper; and the photon energy is low, such as several meV. For this reason, non-destructive testing equipment based on THz imaging technology can be applied to the industrial field. Recently, THz imaging technology was applied in wide industrial fields, such as automobiles, batteries, food, medical, and security, and being actively studied.

In this paper, we describe the research trends of terahertz imaging technology and experimental results. Furthermore, we summarize the recent commercialized terahertz camera. Finally, we present the research results in the field of the human security scanner system.

KEYWORDS 테라헤르츠, 이미징 기술, 비파괴 검사, 보안

* DOI: https://doi.org/10.22648/ETRI.2021.J.360310
* 이 연구는 산업통상자원부와 중소벤처기업부의 WC300사업(S2524372), ETRI의 연구운영비 지원사업(21ZB1140, 21ZH1120)의 일환으로 수행되었음.

본 저작물은 공공누리 제4유형
출처표시+상업적이용금지+변경금지 조건에 따라 이용할 수 있습니다.
©2021 한국전자통신연구원

Ⅰ. 서론

테라헤르츠파(THz wave)는 적외선과 마이크로파(Microwaves) 사이의 대역으로 대략 0.1~10THz 대역의 주파수를 가지는 전자기파로 정의된다[1]. 테라헤르츠 대역의 전자기파는 가시광 대역이 투과하지 못하는 세라믹, 플라스틱, 종이 등과 같은 비분극성 물질을 투과하는 특성을 가지고 있으며, 광자 에너지는 수 meV로 매우 낮아 비파괴 특성을 가진다. 이러한 특성을 이용하여 비파괴 투과/반사형 이미징 기술을 기반으로 하는 비파괴 검사 장비를 산업현장에 적용할 수 있으며[2], 최근 자동차, 배터리, 식품, 의료, 보안 등 산업 전반에 걸쳐 테라헤르츠파를 이용한 이미징 및 비파괴 검사 기술이 활발히 연구되고 있다[3,4].

본 고에서는 테라헤르츠 이미징 기술의 연구 동향을 설명하고, 이와 관련된 본 연구실의 연구결과를 소개한다. 이와 더불어 최근 활발히 연구되고 있는 테라헤르츠 카메라에 대해서 간략히 정리하고, 관련된 최신 연구결과를 기술한다. 마지막으로 테라헤르츠 및 밀리미터파 이미징의 산업, 보안 분야의 연구 동향을 중심적으로 소개하고자 한다.

Ⅱ. 테라헤르츠 이미징 기술 동향

1. 테라헤르츠 이미징 기술

테라헤르츠 이미징은 테라헤르츠 대역의 전자기파를 이용하여 물체의 형태/정보를 기록하는 것으로, 외부 조명환경(가시광)에 영향을 받지 않기 때문에 기존의 비전(Vision) 검사 장비가 갖는 문제점을 보완하고, 제품의 내부를 검사할 수 있는 기술로 많은 관심을 받아 왔다.

테라헤르츠 이미징은 테라헤르츠 광원의 유무에 따라 능동 이미징(Active Imaging)과 수동 이미징(Passive Imaging)으로 나뉜다. 능동 이미징은 측정하고자 하는 물체에 테라헤르츠파를 직접 조사하여 물체로부터 반사 또는 산란되는 테라헤르츠파를 검출 소자를 이용하여 검출/기록하여 이미지를 구성하는 방식이며, 수동 이미징은 별도의 테라헤르츠파 광원을 사용하지 않으며, 물체에서 자연적으로 발생된 테라헤르츠파를 검출하여 이미지를 구성하는 방식이다. 수동 이미징 방식의 경우 물체에서 발생되는 테라헤르츠파의 에너지가 매우 작기 때문에 민감도가 매우 높은 테라헤르츠 카메라를 필요로 한다. 테라헤르츠 카메라는 현재 활발히 연구되고 있으나, 아직은 상용화 초기 단계로 현재까지 대부분의 테라헤르츠 이미징은 능동 이미징 방식으로 연구되어 왔다.

테라헤르츠 이미징의 검출기의 형태에 따라 단일 검출기를 이용하는 방식과 검출기 배열을 이용하는 방식으로 나뉠 수 있으며, 이 절에서는 두 가지 방식에 따라 테라헤르츠 이미징 기술을 소개하고자 한다.

가. 단일 검출기 방식

단일 검출기를 이용한 이미징 방식은 측정하고자 하는 물체의 정보를 한 점씩 검출하고, 검출된 정보를 이차원으로 배열하여 이미지를 구성한다. 가장 기본적인 방법으로 래스터 스캐닝(Raster Scanning)을 사용하며, 광원이 고정된 상태에서 물체의 위치를 한 점씩 기계적으로 이동시키거나, 테라헤르츠 광원을 조사하는 위치를 한 점씩 이동하여 물체 전체적인 정보를 검출하는 방식이다. 하지만 이 방식은 한 장의 이미지를 구성하기 위하여 물체나 광원의 기계적인 움직임에 소요되는 시간이 매우 길며, 측정하고 하는 면적에 비례하여 시간이 증가된다. 이로 인하여 산업현장에 적용하기에는 무리가 있으며, 본 연구실에서는 측정시간을

단축하기 위한 노력을 진행해왔다[3,4].

고속의 산업용 비파괴 검사(NDT) 이미징 시스템을 구현하기 위해서 기계적 스캔을 사용하지 않고 광학적 스캐너를 이용하였다. 초기의 광학 스캐너는 갈바노 스캐너(Galvano Scanner) 쌍을 이용하여 2차원 스캔이 가능하도록 구성하였다. 테라헤르츠파의 특성상 물체에서 대부분의 에너지가 산란이 아닌 거울 반사되므로 측정하고자 하는 면적 전체에서 물체에 수직으로 입사되는 광축을 가질 수 있도록 Telecentric f–θ 렌즈를 설계/제작하여 사용하였다. 구성된 이미징 시스템[3]은 70×80mm의 측정 면적을 500×500개의 데이터로 구성하며, 측정시간은 10초 내외로 앞서 언급한 래스터 스캐닝 방식보다 빠른 속도를 가진다. 산업현장에 적용하기 위해서는 보다 빠른 측정 속도와 높은 해상도가 요구되어, 기존의 갈바노 스캐너를 이용한 시스템을 개선하기 위한 후속 연구가 진행되었다[5].

갈바노 스캐너를 대신하여 고속 회전 모터(BLDC)와 저속 모터(Stepping Motor)를 결합한 4면체 폴리곤 미러를 이용해 2차원 이미징 시스템을 구현하였다(그림 1). 포토믹서(UTC–PD)에서 발생한 테라헤르츠파를 렌즈를 이용하여 시준빔(Collimated Beam) 형태로 만들어 폴리곤 미러에 입사되면, 고속모터의 수평 회전과 저속모터의 수직 회전으로 2차원 스캐닝이 구현된다. 2차원 스캐닝된 테라헤르츠파는 Telecentric f–θ 렌즈를 거쳐 물체에 수직으로 입사되며, 물체의 표면으로부터 반사되어 입사 광경로와 동일한 광경로로 쇼트키 배리어 다이오드(SBD)에 의해 검출된다. 이미징 시스템은 80×80mm의 면적을 측정할 수 있다. 시스템에 사용된 폴리곤 미러는 3,000rpm의 속도로 회전하며 초당 50바퀴를 회전하는데, 폴리곤 미러는 4면이므로 1바퀴당 4줄의 스캔이 가능해져 1초당 200줄의 데이터를 획득할 수 있다. 이러한 결과로 이미지 측정시간을 기존 10초 내외에서 2초 내외로 대폭 개선한 결과를 확보할 수 있었다. 사용된 테라헤르츠의 주파수는 500GHz이며, 1951 USAF 타겟 이미징을 통해 1.26mm의 분해능을 확인하였다.

본 연구실에서는 소개된 테라헤르츠 이미징 시스템들을 산업현장에 적용하기 위한 노력을 해왔다. 수작업에 의존하는 자동차, 선박, 항공기와 같은 복잡한 기구들의 전기 커넥터 체결 검사, 물류

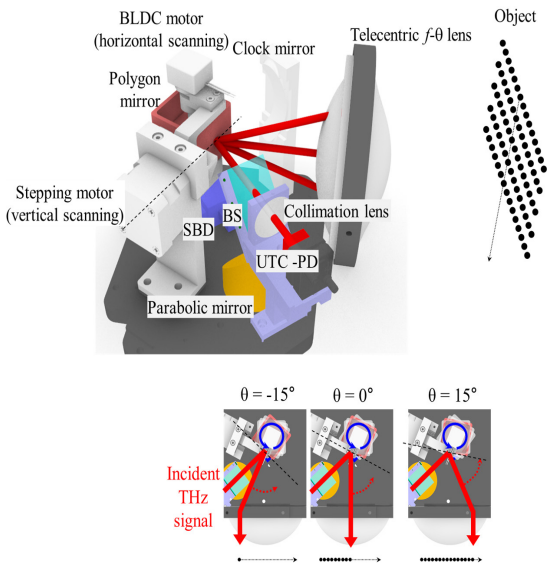


그림 1 고속 폴리곤 미러 기반 THz 이미징 시스템

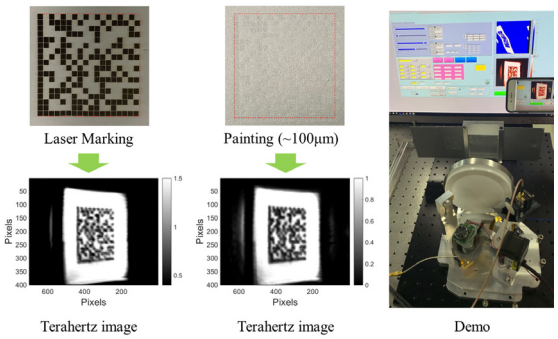
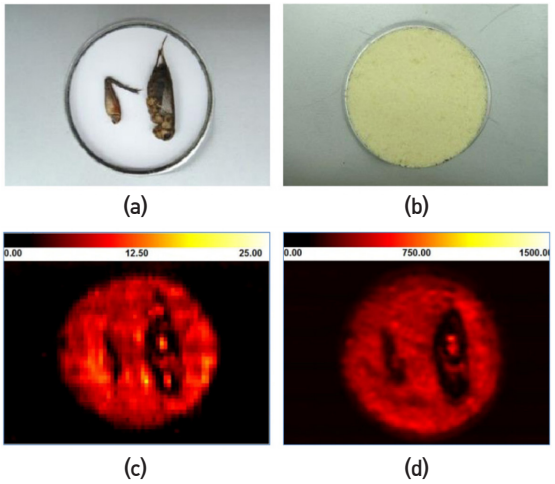


그림 2 테라헤르츠 데이터매트릭스



출처 G. Ok et al., "Highperformance Sub-Terahertz Transmission Imaging System for Food Inspection," Biomed. Opt. Express, vol. 6, no. 5, 2015, pp. 1929-1941, © 2019 Optical Society of America.

그림 3 테라헤르츠 식품 검사 시스템의 검사 결과.
(a) 생체 이물질(귀뚜라미) (b) 식품에 묻힌 생체 이물질
(c) 고속 스캔 이미지 (d) 저속 스캔 이미지

관리의 핵심 기술로 기대되는 테라헤르츠 태그(그림 2) 등 많은 현장 테스트를 진행해왔다. 산업현장의 요구에 맞춰 테라헤르츠 이미징 시스템의 해상도 개선과 대면적 이미징이 가능한 시스템을 개발하기 위해 지속적으로 노력 중이며 개선된 결과를 얻을 수 있을 것으로 전망된다.

이밖에도 산업현장 적용을 위한 연구의 예로 식품품질관리가 있었다[6]. X-선 영상 검사 시스템은 제품 내부에 포함된 금속 이물질은 쉽게 판별할 수 있지만, 비금속 이물질은 판별할 수 없는 단점이 있다. 반면에 초음파 검사 시스템은 검사 장비와 제품이 물리적인 접촉이 요구되어 양산 과정에 적용되기에는 어려운 단점이 있다. 이러한 단점들을 극복하기 위한 대안 기술로 테라헤르츠 식품 검사 시스템이 기대를 받았다. 그림 3은 테라헤르츠파 발생기와 검출기로 구성된 식품 검사 시스템으로 측정한 이미지로, 식품(밀가루)에 묻혀 있는 생체 이물질(귀뚜라미)을 검출하여 테라헤르츠 검사 시스템이 식품 검사에 적용될 가능성을 보여 주었다.

나. 배열 검출기 방식

단일 검출기 방식의 이미징 시스템과 달리 배열 검출기 방식의 이미징 시스템은 복수의 검출기를 배열하여 사용한다. 검출기 배열에 따라 여러 형태로 나뉘며, 대표적으로 1차원 배열로 구성된 라인 검출기와 2차원 배열로 구성된 카메라가 있다. 연구 초기에는 상대적으로 2차원 배열보다 검출기 숫자가 비교적 적은 라인 검출기로 연구가 활발히 진행되었다.

미국의 TeraSense사는 테라헤르츠 라인 카메라를 상용화하였으며 비파괴 검사와 품질 관리를 목적으로 하는 산업 응용 장비를 활발히 연구 중이다. 테라헤르츠 라인 카메라는 256개의 단일 검출기를 1열로 배열하여 구성하였으며, 1.5×3mm의 픽셀 크기, 최대 5,000fps의 이미지 획득 속도를 가진다[7]. 100GHz의 IMPATT diode를 테라헤르츠 소스로 사용하며, 발생된 테라헤르츠파를 오목거울(Concave Mirror)을 이용하여 라인 빔 형태로 만들어 대상 물체에 조사한다. 컨베이어 벨트 위에서 이동하는 대상 물체를 투과한 테라헤르츠파를 테라헤르츠 라인 카메라가 검출하여 이미지를 구성한다. 실험 결과를 통해서 테라헤르츠 라인 검사 시스템의 물류 시스템 보안 검색 등에 적용될 가능성을 제시하였다.

본 연구실에서도 테라헤르츠 검출기 연구를 활발히 진행 중이며, 배열형 검출기에 관한 연구도 포함된다. InGaAs 쇼트키 배리어 다이오드 40개를 한 유닛으로 하여 6개의 유닛으로 총 240개로 구성된 테라헤르츠 라인 검출기를 개발했으며, 총 스캔 길이는 120mm이다[8]. 개발된 테라헤르츠 라인

그림 4 **상용 테라헤르츠 카메라.** (a) Terasense[9] (b) INO[10] (c) Swiss Terahertz[11]

검출기와 200GHz gyrotron 소스를 이용하여 시스템을 구성하여 테라헤르츠 이미징 결과를 발표하였다. 발표한 이미징 결과는 비스킷 아래에 숨겨진 금속 물질을 판별하는 것으로 식품 검사 장비에 적용될 가능성을 제시하였다.

최근에는 테라헤르츠 이미지의 품질을 개선하고 획득 시간 단축 및 높은 신호 민감성을 확보하기 위한 테라헤르츠 카메라 개발이 이루어지고 있다(그림 4)[9–14]. 각국의 테라헤르츠 연구 그룹들은 테라헤르츠 카메라 상용화를 경쟁적으로 하고 있으며 다양한 제품들이 소개되었다. 현재까지 상용화된 대부분의 테라헤르츠 카메라들은 마이크로 볼로미터 어레이[15] 형태의 검출기를 사용한다. 대표적으로, Swiss Terahertz 사의 RIGI camera를 예로 들 수 있다. 제품군 중 가장 높은 해상도를 가지는 제품은 1,920×1,080FHD 해상도를 가지며, 최대 영상 획득 속도는 60fps로 매우 높은 수준이다. 하지만 픽셀의 개수는 세계 최고 수준임에도 마이크로 볼로미터 어레이가 갖는 특성상 단일 검출기의 크기의 한계 때문에 높은 분해능을 얻기에는 어려움이 따를 것으로 생각된다. 마이크로 볼로미터 어레이 외에도 CCD(Charge Coupled Device)[16], 수동 이미징 카메라[17] 등 많은 연구가 진행되고 있지만, 여전히 가시광 대역의 이미지 품질에 버금가는 성능을 요구하는 산업현장의 기대에는 못 미치고 있으며 더 많은 연구가 필요하다.

2. 테라헤르츠 이미징 기술의 응용

앞 절을 통해서 테라헤르츠 이미징 기술에 대해 살펴보면서 각 연구 그룹의 연구결과로 다양한 산업 응용 분야를 함께 살펴보았다. 앞서 본 연구결과들은 대부분 비파괴 검사, 테라헤르츠 태깅, 물류 관리, 식품 검사 등 대물에 대한 응용 기술이었다. 이 절에서는 테라헤르츠 대인 보안 검색 기술과 더불어 밀리미터파(mmW) 대인 보안 검색 기술에 대한 산업현장의 관심과 응용 가능성을 중심으로 소개한다.

테라헤르츠 이미징 기술이 대인 보안 분야에 상용화된 실례로 ThruVision 사의 TS4–SC를 들 수 있다[18,19]. ThruVision의 테라헤르츠 카메라는 미국의 LA 지하철에서 탑승객을 대상으로 시연/활용되었다. 수동 이미징 방식을 이용하여 별도의 테라헤르츠 소스 없이 승객의 신체에서 자연적으로 발생하는 테라헤르츠파를 검출하는 방식으로, 지하철역으로 들어오는 승객들의 이동 흐름을 방해하지

않고 3~8m 원거리에서 시간당 2,000여 명의 승객을 실시간으로 검색하는 시연을 성공적으로 보여주었다. 하지만 비교적 낮은 해상도로 인해 명확히 숨겨진 물체의 유해물/위해물 여부를 구분하기에는 한계가 있고, 낮은 프레임 수로 인한 잔상은 보완해야 할 점으로 생각된다.

또한 밀리미터파 기반 대인 보안 검색 시스템 등이 각국의 공항에서 사용되고 있으며, 도입이 점차 확대되고 있다. 원통 형태의 검색 장비에 승객이 멈추어 보안 검색을 하는 방식의 시스템들은 미국뿐만 아니라 세계 각국에 설치되어 운영되고 있으며, 패널 형태, 원거리형(Standoff)의 검색 장비 또한 독일과 미국 등지에서 상용화를 위한 연구 개발이 진행되고 있다.

원통형 검색 장비의 대표적인 예로 L3 SDS(Security & Detection Systems) 사의 ProVision을 들 수 있다[20]. ProVision은 밀리미터 웨이브를 이용하여 탑승객의 몸에 숨겨진 금속과 비금속 물질 모두를 신속하게 검사할 수 있으며, TSA와 EU ECAC 인증을 받았다. 보안 검색 방법은 탐승객이 원통 형태의 Provision 내부로 들어가 두 팔을 들고 정지 상태로 서 있으면 1열로 배치된 발생기와 검출기가 회전하여 1.5초 안에 검사를 마친다. 또한, 검색 결과를 표현함에 있어 의심 영역을 마네킹 형태에 인체 윤곽에 매핑하여 표현함으로써 최근 떠오르는 보안 검색 장비의 프라버시 문제를 해결했다. 최근에는 미국 전역에 1,000대 이상의 ProVision이 배포되어 사용되고 있다[21].

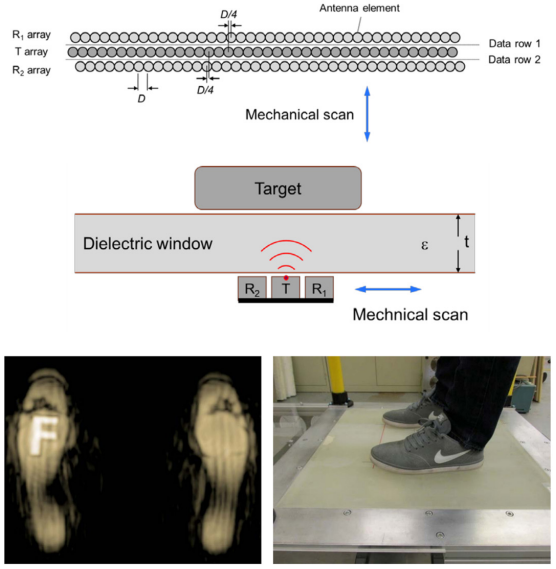
이밖에도, 영국의 카디프 공항은 테라헤르츠 카메라를 이용한 대인 검색 시스템을 시연했다[22]. 시연에 사용된 테라헤르츠 보안 검색 시스템은 카디프 대학(영국)과 QMC Instruments의 산학 연구로 개발되었으며, 앞서 발표된 LEKID(Lumped Element Kinetic Inductance Detector)검출기를 토대로 발전시켜 왔다. LEKID 검출기는 수동 검출기로 인체에서 발생하는 열을 바탕으로 테라헤르츠파를 검출한다. 위 시스템을 통해 시연자의 옷 속에 숨겨진 물체(유해물, 무기류, 지갑, 금속 동전 등)를 검출했다[23]. 이미지 획득 속도는 빠르지 않은 것으로 보여 실시간 이미징을 하기에는 한계가 있을 것으로 생각된다. 또한, 이러한 시스템은 위험 물질에 대한 판별을 기계학습을 통해 반복적으로 학습함으로써 그 정확도를 높일 수 있었다.

패널형 투시 이미징 시스템의 대표적인 예로는 독일의 Rhode & Schwarz 사의 QPS System이 있다[24]. 독일의 일부 공항에 적용하여 테스트를 진행중이다. QPS System은 70~80GHz 대역의 주파수를 사용하며, 패널 벽면에 배열된 다수의 발생기와 검출기를 통한 멀티스태틱(Multistatic) 이미징 기법으로 고해상도 3차원 이미지를 획득할 수 있다. QPS System의 해상도는 2mm 이하로 알려져 있으며, 이미지 획득에 소요되는 시간은 약 32ms로 매우 빠른 편이다.

신발 검색 기술은 대인 검색 기술보다 앞서 연구되어왔다. 신발 내부에 숨겨진 유해물을 탐지하기 위한 노력을 계속해왔으나 금속탐지기 수준의 제품들이었다. 금속 탐지 장치는 문형 금속탐지기의 원리를 차용하여 개발된 장비로 폭발물 탐지 능력이 없어 TSA의 적합성 테스트에 탈락했다. 따라서 폭발물과 위험물, 비금속 등을 동시에 검출하는 장비들이 최근 발표되었다. 네덜란드 Stage Gate 11 사의 Delta-R 신발 검색 장비[25]는 적외선 대역의 차분 분광법에 기반하여 폭발물 검출을 목적으로 개발되었으며, 암스테르담 스키폴 공항에서 시범 운영 중이다. 하지만 검색이 가능한 부분이 신발 표면으로 제한되어 신발 내부에 숨겨진 금속이나 위험물 탐지에는 어려운 점이 있을 것으로 보인다. 반면, 이탈리아 CEIA사의 SAMDEX 신발 검색 장

비[26]는 자사의 신발 금속 탐지 장치인 SAMD에 폭발물 탐지 기능을 넣은 시스템으로 폭발물 탐지 원리는 공개되지 않았다. 현재 프랑스의 일부 공항에서 시험 적용 중이나 검색을 위한 별도의 동선이 필요하며, 검색 과정에서 한 발씩 검사해야 하고 한 발을 검사하는 데 소요되는 시간이 길어 혼잡도가 높을 경우 어려움이 있을 것으로 생각된다.

최근에는 금속 탐지에서 그치지 않고 신발 내부를 이미징하여 정확한 보안 검색을 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 미국 PNNL(Pacific Northwest National Lab.) 연구소에서 발표한 밀리미터파 신발 검색기(그림 5)[27]는 라인 형태로 배열된 테라헤르츠 발생기 1열과 검출기 2열을 이용하여 시스템을 구성하였다. 배열된 검출기와 발생기를 기계적으로 움직임으로써 이미지를 구성하며, 이미지 재구성 알고리즘을 사용하여 신발 내부의 3차원 깊



출처 D.M. Sheen et al., "Efficient image reconstruction method for a millimeter-wave shoe scanner," Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XXIII. vol. 11411, Int. Soc. Opt. Photo., 2020, Reprinted with permission from SPIE.

그림 5 PNNL사의 밀리미터파 신발 검색기[27]

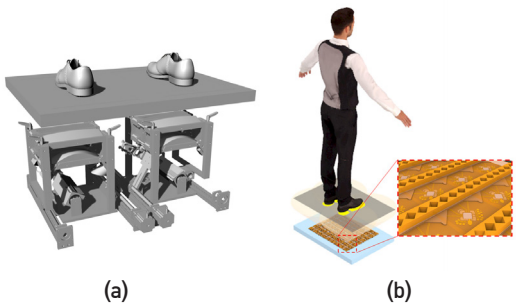


그림 6 신발 검색 시스템 구상도.
(a) 포토닉스 기반 신발 검색기 (b) 전자 소자 기반 신발 검색기

이 정보를 획득한다.

본 연구실에서도 테라헤르츠 대인 보안 검색 시스템을 개발하기 위한 노력을 계속해서 해오고 있다. 최근 시작 단계에 착수한 신발 검색기 개발 사업을 통해 포토닉스 기반의 신발 검색기 프로토타입 개발과 전자 소자 기반의 신발 검색기 개발을 계획 중이다(그림 6). 개발하고자 하는 시스템의 주파수 대역은 100GHz 이상의 테라헤르츠파를 이용하며, 신발의 표면뿐만 아니라 신발의 윗면과 옆면, 내부 전체를 3차원으로 이미징하여 유해물을 검사할 수 있는 시스템 개발을 목표로 하고 있다. 현재 포토닉스 기반의 신발 검색 시스템은 시스템 제작이 완료되어 실험단계에 있으며 연구결과를 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

신발 검색 시스템뿐만 아니라 대인 보안 검색 시스템 개발 또한 준비과정에 있다. 대인 보안 검색 시스템은 전자 소자 기반의 테라헤르츠 발생기와 검출기를 사용하여 구성할 계획이며, 궁극적으로는 워크-쓰루(Walk-through) 형태의 시스템을 구현하는 것이 최종 목표이다(그림 7). 최종적으로 보안 검색 시장에서 요구하는 이동 흐름에 방해가 없고 추가적인 동선 배치가 요구되지 않으며 정밀하고 고해상도의 이미지를 통해 보안 검색이 가능한 장비를 개발하고자 노력을 기울이고 있다. 본

그림 7 워크-쓰루 보안 검색 시스템 구상도

연구실은 이러한 목표를 설정하고 체계적으로 준비해온 만큼 산업현장에 적용할 수 있는 시스템을 개발하여 좋은 결과를 얻을 것으로 기대된다.

III. 결론

테라헤르츠 이미징 기술은 오랜 기간을 거쳐 크게 발전해왔으며, 그에 따라 산업현장에 적용할 수 있을 것이라는 기대를 받아 왔다. 최근 많은 연구진의 제품 상용화와 시연을 통해 그 관심은 더욱더 커지고 있으며 기술력이 계속해서 높아지고 있다. 본 고에서는 세계 각국의 테라헤르츠 연구진들의 연구결과를 중심으로 살펴보았다. 또한, 그 기술들의 산업현장에 적용할 수 있는 가능성들을 보여주는 연구결과들을 소개하였다. 특히 경쟁적으로 연구 중인 보안 검색 분야의 연구결과들과 전망에 대해 중점을 두고 살펴보았다.

현재까지 많은 테라헤르츠 이미징 시스템과 보안 검색 시스템이 발표되었으나, 가시광 대역의 이미지 품질을 기대하는 산업현장의 요구에는 미치지 못한다. 높은 이미지 해상도와 빠른 이미지 획득시간, 정밀한 검사 능력 등 많은 부분의 연구가 필요하다. 앞으로는 소자 측면의 개선뿐만 아니라 영상 처리 알고리즘과 인공지능 기술 등 소프트웨어 기술과 복합적으로 발전해나갈 것으로 기대된다.

용어해설

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

비파괴 검사 피검사체의 손상 없이 필요한 정보를 확인하는 검사 방법으로, 넓은 의미에서 비접촉식 검사도 포함됨

워크-쓰루 보안 검색 피검사자의 이동을 방해하지 않고 자연스러운 통행 상태에서 보안 검색을 진행하는 방식

약어 정리

BLDC	Brushless DC motor
CCD	Charge-Coupled Device
EUAC	European Civil Aviation Conference
fps	frame per second
LEKID	Lumped Element Kinetic Inductance Detector
NDT	Non-Destructive Testing
SBD	Schottky Barrier Diode
TSA	Transportation Security Administration
UTC-PD	Unitraveling-Carrier Photodiode

참고문헌

[1] M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology," Nat. Photon., vol. 1, 2007, pp. 97-105.

[2] J.P. Gullet et al., "Review of terahertz tomography techniques," J. Infrared Millim. Terahertz Waves, vol. 35, no. 4, Feb. 2014, pp. 382-411.

[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 telecentric f-lens," in Proc. Conf. Lasers Electro-Optics (CLEO), May 5, 2019, pp. 1-2.

[5] E.S. Lee et al. “High-speed and cost-effective reflective terahertz imaging system using a novel 2D beam scanner,” J. Lightw. Technol., vol. 36, no. 16, 2020, pp. 4237-4243.

[6] G. Ok et al. “Highperformance sub-terahertz transmission imaging system for food inspection,” Biomed. Opt. Express, vol. 6, no. 5, 2015, pp. 1929-1941.

[7] A.V. Shchepetilniko et al. “New ultra-fast Sub-terahertz linear scanner for postal security screening,” J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves, vol. 41, 2020, pp. 655-664.

[8] S.-P. Han et al. “Real-time continuous-wave terahertz line scanner based on a compact 1 × 240 InGaAs Schottky barrier diode array detector,” Opt. Express, vol. 22, no. 23, 2014, pp. 28977-28983.

[9] https://terasense.com/products/sub-thz-imaging-cameras/

[10] https://www.ino.ca/en/solutions/thz/microxcam-384i-thz/

[11] https://www.swissterahertz.com/rigicamera

[12] https://www.alphanov.com/en/products-services/imagery-sensors

[13] https://www.i2s.fr/en/imaging-solutions/specific-cameras-for-the-visible-and-invisible/tzcam

[14] https://www.nec.com/en/global/prod/terahertz/

[15] F. Simoens et al., “Uncooled Terahertz real-time imaging 2D arrays developed at LETI: Present status and perspectives,” Int. Soc. Opt. Photon. May 18, 2017, p. 101942N.

[16] M. Shalaby et al., “High-performing nonlinear visualization of terahertz radiation on a silicon charge-coupled device,” Nature Comm., vol. 6, 2015, p. 8439.

[17] S. Rowe, “A passive terahertz video camera based on lumped element kinetic inductance detectors,” Rev. Sci. Instrum., vol. 87, 2016, p. 033105.

[18] https://thruvision.com/products/surface-transport-security-cameras/

[19] C. Mann, “Real time passive imaging at 250GHz for security: Technology and phenomenology,” in Proc. Int. Conf. Electromagn. Adv. Appl., Turin, Italy, Sept. 2009. pp. 1013-1015.

[20] http://www.hotronic.ee/files/Pdf/ProVision%202%20fact%20sheet.pdf

[21] https://www.l3commercialaviation.com/media/transportation-security-administration-purchases-100-l3harris-technologies-passenger-screening-systems/

[22] https://www.cardiff.ac.uk/news/view/1389672-new-passenger-scanner-uses-space-technology-to-speed-up-airport-security

[23] S. Rowe, “A passive terahertz video camera based on lumped element kinetic inductance detectors,” Rev. Sci. Instrum., vol. 87, 2016, p. 033105.

[24] https://www.rohde-schwarz.com/kr/product/qps-productstartpage_63493-332676.html

[25] https://sg11.nl/products/delta-r-shoe-scanner/

[26] https://www.ceia.net/security/product.aspx?a=SAMDEX

[27] D.M. Sheen et al, “Efficient image reconstruction method for a millimeter-wave shoe scanner,” Passive and Active Millimeter-Wave Imaging XXIII. vol. 11411, Int. Soc. Opt. Photo., 2020.