식품안전 모니터링을 위한 테라헤르츠파 기반 비파괴 검사 기술

Terahertz wave-based non-destructive testing technology for food safety monitoring

김태용, 임민철, 김현정, 옥경식*

Tai-Yong Kim, Min-Cheol Lim, Hyun Jung Kim, Gyeongsik Ok*

한국식품연구원 안전유통연구단

Research Group of Food Safety and Distribution, Korea Food Research Institute

옥 경 식

Correspondence to

Correspondence to : Gyeongsik Ok, Food Safety and Distribution Research Group, Korea Food Research Institute, 245, Nongsaengmyeong-ro, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55365, Republic of Korea.
Tel: +82-10-9058-5149,
Fax: +82-63-219-9876,
E-mail: gsok@kfri.re.kr

Ⅰ. 서론

국민의 안전한 식품 소비를 위해 식품의약품안전처는 매년 식품안전 관리지침을 마련하며 식품접객업소 영업자를 대상으로는 식품 이물 혼입 방지를 위한 예방 교육을 지원하고 있다 [1,2]. 하지만 코로나19 팬데믹 이후 비대면 거래를 선호하는 심리의 확산으로 식품의 소비 형태가 다변화 됨에 따라 최근 식품안전사고 사례도 꾸준하게 증가하고 있는 추세이다. 우발적이든 의도적이든 식품에 오염된 물질을 식별하는 것은 식품안전을 보장하는데 중요한 문제이다 [3]. 특히 대규모 식품 제조 기업의 경우 식품안전 관리를 위한 일부 설비를 갖추고 있지만 배달 음식을 포함한 소규모 식품접객업소에서는 식품안전사고를 모니터링하는 것이 어려운 실정이다. 또한 식품 유형별로 원자재, 생산시설 및 설비, 가공 공정, 생산속도, 유통, 보관 방법 등의 차이가 있기 때문에 각 식품 유형에 맞는 검사 기술의 개발 및 차별화가 요구된다. 식품안전을 위한 분석은 박테리아나 곰팡이 독소, 잔류성 유기 오염물질, 식품 가공 및 저장 중 발생하는 오염 물질뿐만 아니라 승인되지 않은 첨가물, 불순물 등의 광범위한 화합물을 포괄한다 [4,5]. 그중 식품 이물은 식품의 제조 및 유통 과정에서 유입된 정상적인 원료 및 재료가 아닌 것으로 섭취 시 위생상 위해가 발생할 수 있거나 섭취하기에 부적합한 물질을 말하며, 동물성, 식물성, 광물성 및 기타 (비닐, 고무, 플라스틱 등)로 분류된다 [6,7]. 실제 최근 2017~2021년 국내 가공식품에서 발견된 이물 현황은 벌레 24.8%, 곰팡이 14.7%, 금속 9.1%, 플라스틱 8.6%, 유리 1.5%인 것으로 나타났으며, 연질성 이물 (벌레, 머리카락, 플라스틱, 비닐 등)의 비

중이 상대적으로 많았다 [8]. 본 논단에서는 식품안전 모니터링을 위한 비파괴 검사(Non-Destructive Testing) 기술 동향 및 테라헤르츠(THz)파 기반 검사 시스템에 대해 논하고자 한다.

II. 본론

1. 식품 비파괴 검사 기술 동향

일부 식품 산업 현장에서는 식품안전 및 품질 관리를 위해 여전히 추출, 분리, 정제로 구성된 전처리 과정과 정량분석을 위한 HPLC, HPLC/MS, GC, GC/MS, ICP/MS 등의 분석을 필요로 한다 [9]. 하지만 이런 방법들은 훈련된 작업자가 필요하고 시간 소모적이며 많은 비용과 복잡한 분석 절차를 동반한다. 따라서 자동화된 비파괴 검사는 시간과 비용 등의 낭비를 줄이고 생산성을 높이며 안전 및 품질 평가 기술을 개선하기 위한 방법으로 주목받고 있다 [10]. 식품 비파괴 검사 기술은 식품을 파괴하지 않고 원형을 유지한 채 품질을 평가하는 기술이며 [11], 1963년 근적외선 분광 분석법을 이용해 곡물과 종자의 수분을 측정한 연구로부터 시작되었다 [12]. 비파괴 검사는 방사선 투과검사, 초음파탐상검사, 자분탐상검사, 침투탐상검사, 와전류탐상검사, 누설검사, 육안검사, 음향방출검사, 적외선탐상검사 등 다양한 방법이 존재하지만 식품 분야에서는 보통 방사선이나 초음파, 근적외선 등의 빛이 사용되며 식품에서 반사되거나 투과되는 빛의 양과 스펙트럼

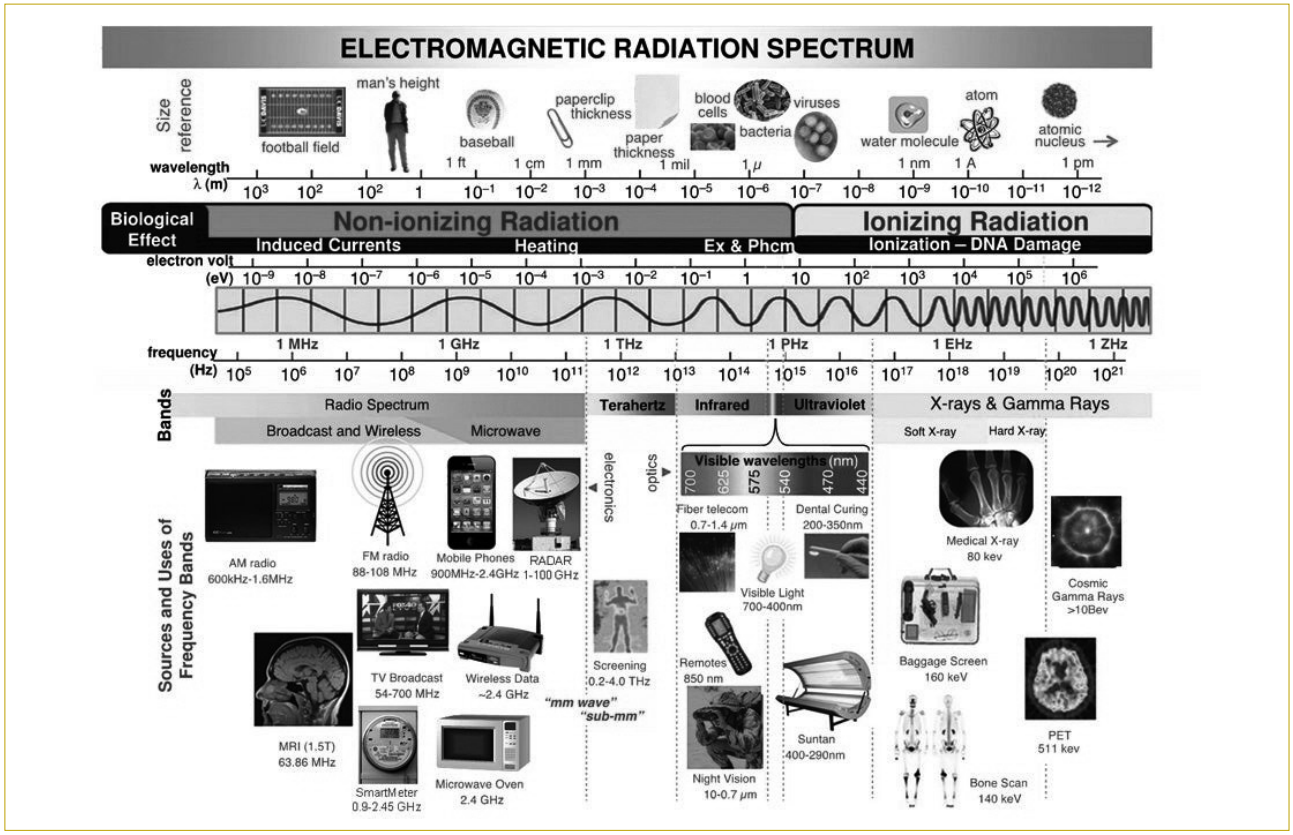

그림 1. 전자기파 스펙트럼 및 응용 영역 [17]

분석을 통해서 식품 성분을 측정한다 [13]. 이러한 원리로 사과나 수박 같은 과일을 자르지 않고도 크기, 색상, 신선도, 당도 및 내부 결함 등을 확인할 수 있다. 또한 식품 비파괴 검사는 분석 대상을 훼손하지 않는 것 이외에도 이화학 분석처럼 유기용매를 사용하지 않아 안전하며 컨베이어 벨트 상에서 식품을 이동하는 짧은 시간에 검사할 수 있다는 장점이 있다.

그림 1에서 볼 수 있듯이, 전자기파의 영역은 라디오파에서부터 테라헤르츠파, 적외선, 가시광선, 자외선, X-ray까지 주파수 혹은 파장에 따라 여러 대역으로 나눌 수 있다 [14]. 이중 투과성이 가장 우수한 X-ray를 이용하면 식품 내부에 은닉된 경질성 이물(돌, 금속, 유리, 패각, 뼈 등)을 효과적으로 검출할 수 있다 [15]. 하지만 연질성 이물(벌레, 비닐, 머리카락 등)은 해당 검사 장치로도 찾아내기 어려우며 전자기파의 주파수가 높을수록 파장은 짧아지고 에너지 준위가 높아져 생체 물질이 이온화될 수 있는 위험이 발생한다. 이러한 문제들은 식품을 비롯한 바이오 분야에서 X-ray를 대체할 수 있는 비파괴 검사 장치에 대한 개발 필요성을 야기했다. 때문에 상대적으로 에너지 준위가 낮은 비이온화 방사선에 해당하는 전자기파 대역(라디오파, 마이크로파, 밀리미터파, 테라헤르츠파)을 이용한 검사 기술이 주목받았다 (표 1).

전자기파 기반 비파괴 검사의 주요 기술적 요인은 검사 대상에 대한 전자기파의 투과율과 검사 결과의 영상화를 위한 영상의 해상도이다. 전자기파 투과율에 대한 영향 요인은 물질이 가지는 복소 굴절률(Complex refractive index)이며, 이 값은 실수부에 굴절률, 허수부에 흡수계수로 표현되는 복소수로 상대적으로 밀도가 높은 재질의 굴절률의 값이 높게 나타나는 것이 특징이다. 특히 수분을 많이 함유한 시료의 경우 흡수계수 값에 영향을 받게 되어 전자기파의 종류에 따라 투과도에 차이가 발생할 수 있다 [16]. 다음으로 검사 영상의 해상도는 보통 검출기의 사이즈에 의해 결정되지만, 물리적인 핵심 지표는 사용하는 전자기파의 파장이다. 즉, 그림 1에서 보듯이 가시광선 대역에서 세포나 박테리아 수준을 볼 수 있지만 바이러스는 관측이 불가능하다. 밀리미터파 대역 영상의 경우 종이 클립, 마이크로파 대역은 수 cm 크기의 물체를 분간할 수 있는 해상도를 갖는다 [17].

2. 테라헤르츠파 기반 비파괴 검사 기술

비이온화 방사선 중 테라헤르츠(THz)파는 0.1-10 THz의 주파수에 해당하며 밀리미터파와 원적외선 사이의 전파 영역으로서 가시광 및 적외선에 비해 물질을 잘 투과하는 특성을 갖는다 [18]. THz 기술은 1980년대 펨토초 레이저(femtosecond laser)를 이용한 분광 시스템이 개발된 이후 높은 투과성, 생체 안정성(비이온화 전파), mm 수준의 영상 해상도 등의 특성을 바탕으로 보안 기술, 물성 평가, 반도체 검사, 식품 검사 등 다양한 분야에 응용되었으며 차세대 비파괴 전자기파로 주목받고 있다 [19,20].

(1) 테라헤르츠파 분광 및 영상 시스템의 분류

THz파 분광 및 영상 시스템은 작동 원리 및 소스에 따라 표 2 와 같이 분류할 수 있으며, 크게 펄스파 및 연속파 시스템, THz 시간 영역 분광법(THz-TDS), 그리고 THz 이미징 시스템으로 나누어 설명할 수 있다 [21]. 먼저 ① 펄스파 THz 시스템은 초고속 레이저인 펨토세컨드(1 fs =

표 1. 기존 식품 이물 검사 장치의 검출 성능

농식품 내 이물의 종류	금속검출기	X-ray 검출기	테라파 검출기
철, 스테인레스, 구리 등 금속이물	O	O	O
뼈, 유리, 경질플라스틱 등 경질이물	X	O	O
연질플라스틱, 고무, 벌레 등 연질이물	X	X	O

10^{-15}초) 레이저 펄스, 일광 및 자유전자 레이저 등을 이용하여 THz를 발생시키며 일반적으로 발생기와 검출기로 구성된 두 개의 광전도 안테나가 있다. 발생기의 광전도 안테나는 전기적으로 바이어스가 걸려있고, 검출기의 광전도 안테나에는 시간 지연 신호를 생성한다. 펄스파 시스템은 저주파수 대역에서 빛의 파동을 변환하는데, 주로 시간 영역의 신호를 주파수 영역의 신호로 변환하는 푸리에 변환을 사용한다. ② 연속파 THz 시스템은 THz를 생성하기 위해 두 개의 주파수 안정화 레이저를 결합하는 방식을 사용한다. 이 시스템은 연속적인 신호를 생성하며, 설치 과정이 간단하고 경제적인 장점이 있다. 주로 2 MHz의 주파수 해상도를 가지며, 날카로운 스펙트럼 특성을 식별하는 데 사용된다. ③ THz 시간 영역 분광법(THz-TDS)은 레이저를 사용하여 THz 파형을 생성하고, 이를 통해 물질의 흡수 계수와 굴절률을 측정한다. 주로 초고속 레이저를 사용하여 펨토세컨드(fs) 펄스를 생성하며, 이를 통해 THz파를 발생시킨다. THz 파형은 샘플과 상호 작용하여 정보를 전송하고, 이를 검출기가 감지하는 과정을 거치며 얻어진 데이터는 주로 시간 영역에서 주파수 스펙트럼으로 변환된다. ④ THz 이미징 시스템은 펄스 및 연속파, THz-TDS 기술을 기반으로 하며 각각 다양한 정보를 제공한다. 이미징 시스템은 보통 표면의 미세한 세부 정보를 보다 잘 파악하기 위해 표본을 이동시키며 촬영하는데 이와 같은 시스템은 식품안전 모니터링 및 검사에 유용한 도구로 활용될 수 있다.

(2) 식품안전 모니터링을 위한 테라헤르츠 분광 및 영상 시스템의 응용

THz radiation은 비이온화 및 비파괴적 특성을 바탕으로 식품 조성물을 분석하는 새롭고 정확하며 경제적인 방법으로 식품안전을 위한 다양한 응용이 가능하다. 대표적인 응용 분야를 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 수분 및 잔류농약 검출. 수분 함량은 시료에 포함된 물의 양으로, 종자 및 곡물, 음식 및 음료, 농산물 및 토양, 펄프 및 종이 제품, 석유 제품과 같은 물질에 포함된다. THz 복사는 식품 속 수분 지도를 감지하고 이미지를 형성하여 재료의 수분 함량을 비파괴적으로 평가하는 데 사용될 수 있다 [22]. 수분 감지를 위해 THz 이미징 및 센싱을 사용한 최초의 응용은 식물 잎의 수분 수준을 모니터링하기 위한 연구였다. 잎은 건조 정도에 따라 수분 함량과 굴절률의 변화를 보인다. 때문에 THz의 진폭 및 시간 영역 스펙트럼은 잎의 건조 정도에 따라 변화하고 건조 시간이 길어질수록 THz 방사선의 투과율은 증가하며 흡수율은 감소한다. 식물 잎의 수분 검출로부터 얻은 의미 있는 정보는 또한 잔류 농약의 존재를 분석하는데 응용될 수 있다. 잔류 농약은 농작물의 손상을 방지하고 작물 수확량을 증가시키지만, 환경 오염과 건강 위험을 초래할 수 있다. 따라서 농약의 검출은 소비자에게 안전한 식품을 제공하는데 매우 중요하다. 나노 안테나는 THz-TDS와 함께 잔류 농약을 감지하는 목적으로 사용될 수 있으며 수 ppm 수준의 검출 감도를 갖는다 [23]. 또한,

<table>
<tr><th colspan="4">Operational principle</th></tr>
<tr><th colspan="3">Active
(Source + Detector)</th><th>Passive
(Detector only)</th></tr>
<tr><td>Incoherent
(Amplitude)</td><td colspan="2">Coherent
(Amplitude + Phase)</td><td rowspan="3">Array detector
(camera)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Continuous wave
(Source: Vacuum electronics,
Solid-state device, Lasers)</td><td colspan="2">Frequency domain
spectroscopy & Imaging</td><td>Time domain
spectroscopy
& Imaging</td></tr>
<tr><td>Frequency
sweep</td><td>Single
frequency</td><td>Pulsed wave</td></tr>
</table>

THz 이미징을 이용하면 전처리 과정 없이도 농약을 검출할 수 있다. THz 분광 시스템의 향상을 위해서 웨이블릿 임계값(Wavelet threshold) 노이즈 제거 방법 및 스펙트럼 기준선 보정 방법이 사용될 수도 있다. 밀도 함수 이론(Density functional theory)은 THz-TDS와 결합하여 분자 역학을 더 잘 특성화하기 위해 사용되었다. 농약은 기하학적 구조와 진동 주파수로 인해 생성된 분자 간 또는 분자 내 운동으로 인해 THz 범위에서 서로 다른 흡수가 발생하며, 다양한 농약(디메토에이트, 염화피리드, 메토밀, 카보퓨란, 프로닐, 티디아주론)에 대한 분자적 지문이 보고되었다 [24].

둘째, 식품의 원산지 식별 및 불순물의 검출. 원산지가 다른 식품은 품질과 구성 성분에 차이가 있을 수 있기 때문에 식품의 원산지 식별은 잘못된 원산지 표기나 사기 행위로부터 진품성과 추적성을 확보하기 위해 중요하다. THz-TDS를 기반으로 한 비파괴적 접근법은 원산지가 다른 동일한 식품 감지에 활용될 수 있다. 대표적으로 옥수수, 녹차, 대두 및 올리브오일의 원산지나 유전자 변형 여부를 식별할 수 있으며, 약초의 독성 여부를 구분하는 용도로도 응용할 수 있다 [25 - 29]. 2008년 중국에서 발생한 멜라민 파동처럼 식품에 저렴한 원료 및 이종의 첨가물 혼합은 심각한 건강 문제를 유발할 수 있다. 따라서 이러한 위험을 방지하기 위해 THz파 기술은 다양한 식품에서 오염 및 이종 물질을 신속하고 신뢰성 있게 식별하는데 사용될 수 있다. THz파 분광 시스템을 사용하면 우유 가루에 첨가된 멜라민을 식별할 수 있으며 2.04 THz에서 최대 흡수 피크가 관측된다. 또한 쌀의 이종 식별이나 [30,31], 아카시아 꿀에 교묘히 첨가된 전화당의 양을 정량화할 수 있다 [32].

셋째, THz 분광 및 영상 기술은 인라인(Inline) 감지와 식품 부패를 모니터링하기 위해 사용될 수 있다. 일례로 초콜릿 온도 조절 공정에서 THz 기술을 사용하여 초콜릿의 다형성을 모니터링하는 것이 가능하다. 지방 성분의 결정 변화로 인해 초콜렛 표면에 생성되는 하얗고 얇은 막은 흔히 나타나는 현상(Fat bloom)이다. 그러므로 초콜릿의 다형성을 THz 스펙트럼으로 모니터링하여 팻 블룸 발생을 피할 수 있다 [33]. 이러한 모니터링은 다양한 식품 생산 프로세스에 적용될 수 있으며, 예를 들어 발효 모니터링에도 사용된다. 발효 모니터링을 통해 설탕을 사용하지 않은 음료수 생산에 대한 기초가 마련되었다 [34]. THz 분광 및 영상 기술은 또한 요거트 제조 중에 발생하는 젖산 발효 과정, 달걀의 껍질 두께 측정, 그리고 분말의 밀도 변화 모니터링을 위해 사용될 수 있다 [35 - 37]. 식품 부패를 모니터링하기 위한 THz 기반의 비파괴 검사 또한 많은 관심을 받고 있다. 사과와 배의 부패 정도는 전송 벡터 네트워크 분석기를 활용하여 0.75-1.1 THz 주파수 범위에서 감지되었다 [38]. 이를 위해 과일의 수분 함량 변화를 모니터링하고, 이를 통해 수분 함량 및 과일 내부 조성을 결정하는 흡수 계수를 측정했다. 또한, 0.2-2.0 THz 주파수 범위에서 THz-ATR(Absolute Total Reflectance) 분광법을 사용하여 돼지고기의 신선도를 확인했으며, 신선도 k값 모델을 통해 ATP 분해 정도를 평가했다 [39]. 고해상도 회전형 THz 분광법은 포장된 연어에서 생성되는 H_2S와 같은 휘발성 유기 화합물 검출에 사용되었다 [40]. 이 연구 결과는 대서양 연어의 부패 지표로서 다양한 분자 구성 요소를 모니터링하는데 유용한 정보를 제공한다.

넷째, 식품 이물 및 결함 식별. 이물질 혼입으로부터 식품안전을 보장하기 위해서는 빠르고 정확하며 신뢰할 수 있고 경제적일 뿐만 아니라 비이온화 및 비파괴적인 검사 기술의 사용이 필수적이다. THz파는 이러한 많은 요구사항을 충족하며 비극성 유전체와 식품 포장재로 사용되는 판지 및 폴리머와 같은 저밀도 재료에 대한 높은 투과 특성을 보인다. 특히 식품 내부에 은닉된 이물 검출 시 보편적인 X-ray 영상으로는 식별할 수 없는 종이, 플라스틱, 나무, 세라믹, 벌레 등을 THz 영상을 통해 외부 조명 환경에 관계없이 식별할 수 있다. 또한 대부분 생물체에는 THz 영역에서 특징적인 지문 스펙트럼을 갖고 있기 때문에 마이크로미터 크기의 이물질까지 분석이 가능하여 식품 이물 모니터링을 위한 비파괴 검사 기술로 적합하다.

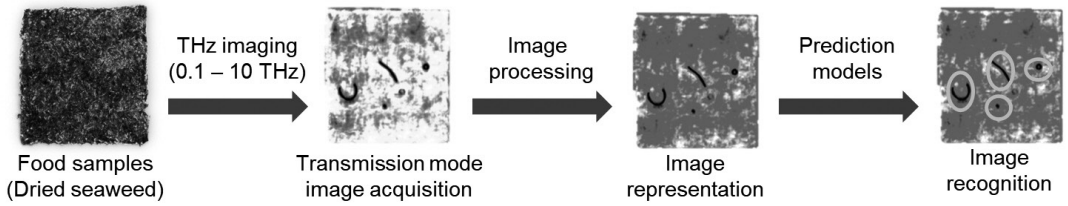

그림 2. THz transmission mode를 이용한 김 속 이물 판별 프로세스 [한국식품연구원 데이터]

THz 이미징을 이용한 일반적인 식품 속 이물 판별 절차는 이미지 획득, 가공, 예측 모델을 통한 이미지 인식으로 이루어진다 (그림 2).

식품 이물 검사의 응용 측면에서 THz 시스템은 포장 식품의 누설 결함 감지에 사용될 수 있으며 감지 성능은 운반 속도에 영향받는다 [41]. 때문에 빠른 속도로 운반되는 식품 모니터링을 위해 kHz 프레임 속도로 이미지를 캡처할 수 있는 고속 THz 이미징 기술이 개발되었으며 초콜릿 속 이물 식별에 활용되었다 [42]. THz-TDS 시스템은 2차원 전동 스테이지를 사용한 스펙트럼 및 이미지 수집을 통해 소세지에서 금속 이물을 식별하기 위해 구축되었다 [43]. 금속 이물의 경우 THz 신호에 반사되는 특성으로 인해 오염된 샘플 이미지에서 이물 영역은 어두운색으로, 투과된 영역은 밝은색으로 표현될 수 있다. THz 이미징 시스템의 스캐닝 속도와 범위, 해상도 등은 검사의 효율성 및 응용성에 직접적인 영향을 미친다. 때문에 이러한 성능들을 개선하기 위한 연구가 이루어졌으며, 다각형 및 f-thetha 렌즈를 사용해서 80 mm/s의 빠른 스캐닝 속도, 고해상도 (210 GHz) 및 약 150 mm의 감지 범위를 갖는 sub-THz 투과 이미징 시스템이 개발되었다 [44]. 또한 140 GHz 소스와 axicon 렌즈를 사용한 서브 파장 래스터 스캐닝 투과 이미징 시스템이 개발되어 식품 내부에 존재하는 1 mm 선폭 크기의 이물 검출이 달성되었다 [45]. 이외에도 THz-TDS 반사 영상 기술과 이중 편광 이미징 시스템을 사용해 곡물 내 혼입된 곤충과 초콜릿 및 냉동 빵 조각에 숨겨진 유리 파편의 영상 검출이 가능했다 [46]. 특히 고수분 식품의 경우, 수분 함유량에 따라 전자기파에 대한 식품의 흡수계수 값이 크게 영향받아 불투명한 이미지가 형성되는 문제가 있었지만 식품의 냉동 과정을 거치면 이물 검출이 가능했다.

Ⅲ. 향후 전망 및 결론

앞서 살펴본 바와 같이 THz파를 이용한 검사 기술은 식품안전 위해인자 및 이물 검출, 식품 원산지 및 부패 모니터링 등 다양한 응용분야가 존재하며 특히 연질성 물질의 투과 및 인체에 안전한 특성으로 인해 육안으로 확인할 수 없는 식품 내부에 은닉된 이물질을 검출할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 하드웨어, 이미징 기술 및 시료 준비 방법에서의 많은 진전에도 불구하고 THz 기반 검사 기술은 더욱 실용적인 장치로 발전하기 위해 다음과 같은 많은 개선과 노력이 필요하다. 첫째, 기술 비용의 절감이 필요하다. 낮은 시장 수요에 의한 높은 기술 비용은 기술의 응용 분야를 연구 및 학술 분야로 제한하는 원인이 된다. 따라서 다양한 산업 현장 적용 사례 발굴을 통해 기술 수요를 증가시키고 더욱 저렴하고 효율적인 소스 및 검출기를 개발해야 할 것이다. 둘째, THz파와 식품 재료 간의 상호 작용에 관한 추가 연구가 필요하다. 식품 특유의 다양한 매트릭스 특성으로 인한 높은 신호 손실 문제와, 고유 지문 추출의 어려움 등이 해결되어야 한다. 셋째, 검출 시스템의 성능 개선이 필요하다. THz 분광법은 식품에 포함된 미량의 독소 검출에 있어 일반적인 화학 및 면역 분석 방법에 비해 여전히 검출 감도가 낮은 한계가 있다. 따라서 검

출 감도를 높이기 위한 추가적인 노력이 필요하다. 넷째, 일반적으로 단위 시간당 대량의 제품을 검사해야 하는 제조 환경의 요구 사항을 충족하기 위해 스캐닝 속도 및 데이터 처리 속도를 개선해야 한다. 다섯째, THz 스펙트럼 데이터를 분석하고 처리하기 위한 통계 및 화학 측정 모델 개발과 더불어 다양한 식품에 대한 THz 스펙트럼을 체계적으로 데이터베이스화하고 지능정보 기술(AI)과 융합하여 소형 칩 형태로 운용 가능한 고성능, 고효율의 AI 감지 시스템 형태로 발전시켜야 할 것이다. 향후 추가적인 연구와 노력을 통해 문제점들이 해결된다면 식품 분야에 대한 THz파 기반 비파괴 검사 기술의 더욱 폭넓은 응용이 기대된다.

Ⅳ. 감사의 글

본 연구는 2024년도 산업통상자원부 연구개발비(고속검사가 가능한 식품안전 진단용 센서 시스템 개발, 20026764)로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 식품의약품안전처. 2024. 식품안전 관리지침

2. 식품의약품안전처. 2022. 식품접객업소 영업자를 위한 이물혼입 방지 가이드라인

3. Hernández-Mesa, M., Escourrou, A., Monteau, F., Le Bizec, B., & Dervilly-Pinel, G. (2017). Current applications and perspectives of ion mobility spectrometry to answer chemical food safety issues. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 94, 39-53.

4. Causon, T. J., Ivanova-Petropulos, V., Petrusheva, D., Bogeva, E., & Hann, S. (2019). Fingerprinting of traditionally produced red wines using liquid chromatography combined with drift tube ion mobility-mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 1052, 179-189.

5. Hernández-Mesa, M., Ropartz, D., García-Campaña, A. M., Rogniaux, H., Dervilly-Pinel, G., & Le Bizec, B. (2019). Ion mobility spectrometry in food analysis: Principles, current applications and future trends. *Molecules*, 24(15), 2706.

6. Graves, M., Smith, A., & Batchelor, B. (1998). Approaches to foreign body detection in foods. *Trends in Food Science & Technology*, 9(1), 21-27.

7. 보건복지포럼. 2009. The Policy for the Improvement of Management System for Foreign Matters in Food

8. 식약일보. 2022.07.13. "최근 5년간 가공식품 이물 전체 신고 건수 39.5% 벌레 · 곰팡이"

9. Cozzolino, D. (2009). Near infrared spectroscopy in natural products analysis. *Planta medica*, 75(07), 746-756.

10. Adebayo, S. E., Hashim, N., Abdan, K., & Hanafi, M. (2016). Application and potential of backscattering imaging techniques in agricultural and food processing-A review. *Journal of Food Engineering*, 169, 155-164.

11. Su, W. H., He, H. J., & Sun, D. W. (2017). Non-destructive and rapid evaluation of staple foods quality by using spectroscopic techniques: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57(5), 1039-1051.

12. K.H. Norris. (1962). A SIMPLE PHOTOMETER WITH WIDE DYNAMIC RANGE. *Measurement of Thermal Radiation Properties of Solids*: A Symposium Held September 5, 6, 7, 1962. Vol. 31. Washington, Office of Scientific and Tec, 1963.

13. Dwivedi, S. K., Vishwakarma, M., & Soni, A. (2018). Advances and researches on non destructive testing: A review. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3690-3698.

14. Cheng, J., Zhang, H., Ning, M., Raza, H., Zhang, D., Zheng, G., ... & Che, R. (2022). Emerging materials and designs for low-and multi-band electromagnetic wave absorbers: the search for dielectric and magnetic synergy?. *Advanced Functional Materials*, 32(23), 2200123.

15. Haff, R. P., & Toyofuku, N. (2008). X-ray detection of defects and contaminants in the food industry. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 2, 262-273.

16. Artemov, V., & Artemov, V. (2021). The Interaction of Electromagnetic Waves with Water. *The Electrodynamics of Water and Ice*, 51–104.

17. RAMÍREZ LUZ, R. A. M. Ó. N. (2005). Sistemas de radiocomunicaciones. Ediciones Paraninfo, SA.

18. Tonouchi, M. (2007). Cutting-edge terahertz technology. *Nature photonics*, 1(2), 97–105.

19. Han, P. Y., & Zhang, X. C. (2001). Free-space coherent broadband terahertz time-domain spectroscopy. *Measurement Science and Technology*, 12(11), 1747.

20. Bogomazova, A. N., Vassina, E. M., Goryachkovskaya, T. N., Popik, V. M., Sokolov, A. S., Kolchanov, N. A., ... & Peltek, S. E. (2015). No DNA damage response and negligible genome-wide transcriptional changes in human embryonic stem cells exposed to terahertz radiation. *Scientific reports*, 5(1), 7749.

21. Rawson, A., & C. K, S. (2022). Recent advances in terahertz time-domain spectroscopy and imaging techniques for automation in agriculture and food sector. *Food Analytical Methods*, 1–29.

22. Nie, P., Qu, F., Lin, L., Dong, T., He, Y., Shao, Y., & Zhang, Y. (2017). Detection of water content in rapeseed leaves using terahertz spectroscopy. *Sensors*, 17(12), 2830.

23. Lee, D. K., Kim, G., Son, J. H., & Seo, M. (2016, February). Highly sensitive terahertz spectroscopy of residual pesticide using nano-antenna. In *Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications IX* (Vol. 9747, pp. 118–123). SPIE.

24. Qu, F., Lin, L., He, Y., Nie, P., Cai, C., Dong, T., ... & Luo, S. (2018). Terahertz multivariate spectral analysis and molecular dynamics simulations of three pyrethroid pesticides. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 39, 1148–1161.

25. Zhang, H., Li, Z., Chen, T., & Liu, J. J. (2018). Detection of poisonous herbs by terahertz time-domain spectroscopy. *Journal of Applied Spectroscopy*, 85, 197–202.

26. Wei, X., Zheng, W., Zhu, S., Zhou, S., Wu, W., & Xie, Z. (2020). Application of terahertz spectrum and interval partial least squares method in the identification of genetically modified soybeans. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 238, 118453.

27. Luo, H., Zhu, J., Xu, W., & Cui, M. (2019). Identification of soybean varieties by terahertz spectroscopy and integrated learning method. *Optik*, 184, 177–184.

28. Li, M., Dai, G., Chang, T., Shi, C., Wei, D., Du, C., & Cui, H. L. (2017). Accurate determination of geographical origin of tea based on terahertz spectroscopy. *Applied Sciences*, 7(2), 172.

29. Zhang, H., Li, Z., Hu, F., Qin, B., Zhao, Y., Chen, T., & Hu, C. (2018). Sensitive distinction between herbs by terahertz spectroscopy and a metamaterial resonator. *Spectroscopy Letters*, 51(4), 174–178.

30. Sun, X., Zhu, K., Hu, J., Jiang, X., & Liu, Y. (2019). Nondestructive detection of melamine in milk powder by terahertz spectroscopy and correlation analysis algorithm. *Journal of Applied Spectroscopy*, 86, 661–665.

31. Li, C., Li, B., & Ye, D. (2020). Analysis and identification of rice adulteration using terahertz spectroscopy and pattern recognition algorithms. *IEEE Access*, 8, 26839–26850.

32. Liu, W., Zhang, Y., Li, M., Han, D., & Liu, W. (2020). Determination of invert syrup adulterated in acacia honey by terahertz spectroscopy with different spectral features. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(5), 1913–1921.

33. Weiller, S., Tanabe, T., & Oyama, Y. (2018). Terahertz non-contact monitoring of cocoa butter in chocolate. *World Journal of Engineering and Technology*, 6(02), 268.

34. Fawole, O., Sinha, K., & Tabib-Azar, M. (2015, November). Monitoring yeast activation with sugar and zero-calorie sweetener using terahertz waves. In *2015 IEEE SENSORS* (pp. 1–4). IEEE.

35. Akiyama, K., Horita, K., Sakamoto, T., Satozono, H., Takahashi, H., & Goda, Y. (2019). Monitoring the progress of lactic acid fermentation in yogurt manufacturing using terahertz time-domain-attenuated total-reflection spectroscopy. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 40, 1160–1167.

36. Khaliduzzaman, A., Konagaya, K., Suzuki, T., Kashimori, A., Kondo, N., & Ogawa, Y. (2020). A nondestructive eggshell thickness measurement technique using terahertz waves. *Scientific Reports*,

10(1), 1052.

37. Markl, D., Dong, R., Li, J., & Zeitler, J. A. (2018, September). In-situ monitoring of powder density using terahertz pulsed imaging. In *2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* (IRMMW-THz) (pp. 1-3). IEEE.

38. Ren, A., Zahid, A., Imran, M. A., Alomainy, A., Fan, D., & Abbasi, Q. H. (2019, July). Terahertz sensing for fruit spoilage monitoring. In *2019 Second International Workshop on Mobile Terahertz Systems* (IWMTS) (pp. 1-4). IEEE.

39. Liang, Q. I., Maocheng, Z. H. A. O., Jie, Z. H. A. O., & Yuweiyi, T. A. N. G. (2019). Preliminary investigation of Terahertz spectroscopy to predict pork freshness non-destructively. *Food Science and Technology*, 39, 563-570.

40. Hindle, F., Kuuliala, L., Mouelhi, M., Cuisset, A., Bray, C., Vanwolleghem, M., ... & Bocquet, R. (2018). *Monitoring of food spoilage by high resolution THz analysis. Analyst*, 143(22), 5536-5544.

41. Morita, Y., Dobroiu, A., Otani, C., & Kawase, K. (2007). Real-time terahertz diagnostics for detecting microleak defects in the seals of flexible plastic packaging. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 1(3), 338-345.

42. Downes, L. A., MacKellar, A. R., Adams, C. S., & Weatherill, K. J. (2019, September). High-speed THz imaging for production line monitoring. In *2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* (IRMMW-THz) (pp. 1-2). IEEE.

43. Wang, C., Zhou, R., Huang, Y., Xie, L., & Ying, Y. (2019). Terahertz spectroscopic imaging with discriminant analysis for detecting foreign materials among sausages. *Food Control*, 97, 100-104.

44. Ok, G., Park, K., Chun, H. S., Chang, H. J., Lee, N., & Choi, S. W. (2015). High-performance sub-terahertz transmission imaging system for food inspection. *Biomedical optics express*, 6(5), 1929-1941.

45. Ok, G., Park, K., Lim, M. C., Jang, H. J., & Choi, S. W. (2018). 140-GHz subwavelength transmission imaging for foreign body inspection in food products. *Journal of food engineering*, 221, 124-131.

46. Takehara, D., Endo, M., Ishibashi, T., Shimizu, M., Kusanagi, S., Nozokido, T., & Bae, J. (2018, September). Dual-polarization imaging with real-time capability using a terahertz noise source for food inspection. In *2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves* (IRMMW-THz) (pp. 1-2). IEEE.