

식품의 품질 및 안전 관리를 위한 테라헤르츠 분광/영상 기술의 응용

Application of terahertz spectroscopy/imaging technology for food quality and safety management

이상유 · 우소영 · 전향숙*

Sang Yoo Lee, So Young Woo, and Hyang Sook Chun*

중앙대학교 식품공학부 BK21 Plus 식품안전 전문인력 양성사업팀

Advanced Food Safety Research Group, BK21 Plus, School of Food Science and Technology,
Chung-Ang University

Abstract

Terahertz (THz) represents the portion of the electromagnetic radiation between the microwave and the infrared region and is within the frequency range of 0.1-10 THz. The ability of THz waves to pass through a wide variety of packaging materials, combined with their ability to characterize the molecular structure of many substances makes it an attractive tool for the application of food quality and safety management. This review provides current information on application of THz spectroscopy/imaging technology for food quality and safety management. The THz spectroscopy/imaging technology has been shown to be useful for detecting foreign bodies, vitamin/moisture,

pesticides, antibiotics, melamine etc. However, major barriers to the adoption of THz spectroscopy/imaging for food quality and safety management include THz signal loss in heterogeneous food matrices, high costs of sources and detectors, and absence of a library for the wide group of food compounds. Further research is needed to overcome these barriers.

Key words: Terahertz spectroscopy, Imaging, Food quality, Food safety

서론

테라헤르츠파(THz wave, $\text{THz}=10^{12}$ Hz)는 전자

* Corresponding Author: Hyang Sook Chun

Address: Advanced Food Safety Research Group, BK21 Plus, School of Food Science and Technology, Chung-Ang University, Anseong 17546, Korea.

Tel: +82-31-670-3290

Fax: +82-31-675-3108

E-mail addresses: hschun@cau.ac.kr

Received March 9, 2018; revised March 20, 2018; accepted March 20, 2018

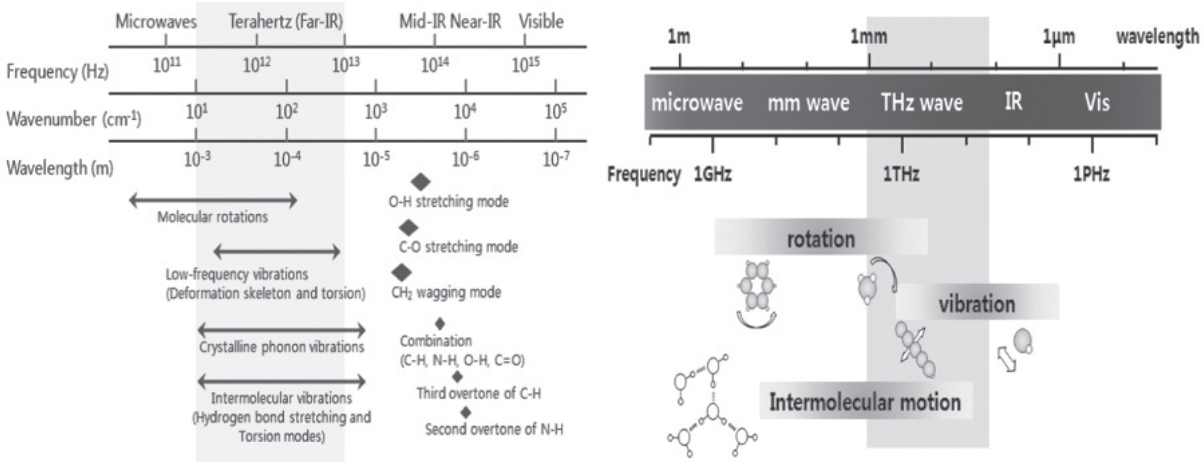


그림 1. 전자기파 스펙트럼 및 주파수에 따른 화학물질의 고유 분자운동

기파 스펙트럼에서 0.1~10 THz의 주파수 범위에 해당하며 마이크로파와 적외선 사이에 위치하고 그 파장은 30 μm ~ 3 mm에 이른다(손과 강, 2013). 그러므로 가장 짧은 파장의 전파이면서 가장 긴 파장의 광파에 해당한다. 이러한 THz 기술은 그동안 적합한 신호원(광원)이나 검출기술이 개발되지 않아 미개척 분야이었기 때문에 THz 갭(gap)이라 불리기도 했다. 그러나 최근 펨토초 레이저(femtosecond laser) 등 눈부신 과학기술에 힘입어 수많은 다양한 기술들이 등장함으로써 과학기술분야에서 가장 중요한 도구중의 하나로 인식되고 있다(윤 등, 2006). THz 기술은 2004년에 미국 MIT에서 발행하는 Technology Review에서 향후 “세상을 바꿀 10대 신기술”의 하나로 선정된 바 있다(Applied Research and Photonics, 2008). 이에 미국, 일본, EU 등을 중심으로 2000년 초부터 매우 다양하고 집중적인 연구들이 진행되어 괄목할만한 기술적 발전이 진행되고 있는 분야이다.

THz파는 광파가 지니고 있는 높은 공간분해능력, 전파가 보유한 물질투과성(특히, 비금속/비극성 물질은 강하게 투과), 그리고 이온화 에너지가 X-선에

비해 10⁻⁶배 정도로 낮아 인체에 비교적 안전한 특성을 지니고 있다(손과 강, 2013). 또한 THz파 영역에서는 물질들이 분자의 진동이나 회전 또는 분자간 결합에 해당하는 고유의 지문(fingerprint) 흡수 스펙트럼을 보여준다(Tonouchi, 2007). 이러한 물질투과성과 고유 스펙트럼을 이용하여 THz 분광 및 영상 기술이 발전되고 있고, 생물, 의료, 환경, 식품, 농업 등 여러 분야에 응용하려는 시도가 활발하게 이루어지고 있다. 이에 본고에서는 THz 분광/영상 기술의 식품 분야 응용을 확산하기 위한 일환으로 식품의 품질이나 안전관리에 응용한 최신 연구 사례를 살펴보았다.

테라헤르츠 분광/영상 기술

일반적으로 THz파의 신호원은 펄스형(pulsed wave)과 연속형(continuous wave)으로 구분된다. 펄스형 THz파를 이용한 대표적인 분광 기술이 THz 시간영역 분광법(THz time-domain spectroscopy, THz-TDS)이다. THz파의 광로 상에 분석하고자 하는 시료를 두게 되면 THz파의 일부는 반사 또는 흡수되고 일부는 투과하여 검출기에 도달한다. 시료가 있

을 때의 THz 파형과 시료가 없을 때의 THz 파형을 측정 후, 이들의 푸리에 변환한 스펙트럼을 비교하여 THz 대역의 주파수에 따른 투과 또는 흡수 스펙트럼을 얻을 수 있다(진 등, 2007). THz-TDS법은 THz파의 진폭 파형을 시간분해능으로 측정하고 있으므로 위상정보를 동시에 측정하는 점이 푸리에 분광법과 크게 다르며, 물질의 굴절율, 유전율, 도전율 등의 정보를 비파괴 방식으로 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 수많은 분자들이 THz 주파수 대역에서 회전 및 진동 천이로 인한 분자 고유의 흡수 특성을 보이고 있어, 이를 지문으로 물질의 동정 및 특성 분석 등 다양한 분석에 활용되고 있다(Tonouchi, 2007).

THz 전자기파를 물체에 조사하여 투과하거나 반사한 THz 광의 비행시간(time of flight)과 흡수량을 측정하고 그 데이터를 처리하여 물체의 영상을 얻을 수 있다. THz파를 이용한 물질의 상(image)을 얻기 위해서는 시간영역에서 얻어진 THz 파형으로부터 특정 주파수의 진폭변화, 스펙트럼 폭 및 일정 주파수 구간에서의 스펙트럼 적분값 등이 변수로 이용될 수 있다. 즉, THz 영상은 THz파의 초점면에 시료를 두고 이를 2차원으로 주사(scanning)하면서 각 점에서의 투과된 파형을 측정하고, 이 측정된 파형으로부터 영상을 얻는 기술이다(진 등, 2007). 그러나 주사형 영상의 경우 충분한 해상도의 영상을 얻기 해서 픽셀의 수를 늘려야 하고 그에 따른 주사시간이 늘어나는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 고속의 광지연기와 2차원 스테이지를 이용하는 방법, 적외선 CCD 카메라를 이용하는 방법 등이 고안되고 있다(Gowen et al., 2012). 펄스형 THz파 영상은 시료의 2차원 영상뿐만 아니라 시료의 두께 방향으로 시간영역 THz파 정보를 활용할 경우 3차원 단층 영상(tomography)도 얻을 수 있다. THz 영상기술을 이용하여 암진단, 화상, 치아진단 등의 의료영상, 반도체 칩 결합 검사, 위폐 감별, 폭

발물 검출, 지뢰 탐지, 식품 이물 검출 등 다양한 분야에 활용이 가능하다(진 등, 2009).

연속형 THz파는 광대역 펄스형 THz파와 달리 대역폭이 상대적으로 작으나 출력이 높아 고분해능의 스펙트럼을 얻을 수 있다. 뿐만 아니라 연속형 THz파 이용 분광 시스템은 대부분이 펌프초 등 펄스 레이저에 기반한 분광 시스템을 이용하기 때문에 레이저 자체의 가격이 고가이거나, 시스템의 안정성을 위하여 별도의 복잡한 온도, 진동 등에 대한 안정화 장치가 필요하여 시스템의 크기가 큰 펄스형 THz파를 이용한 분광기술과 비교할 때 저가로 소형화하기 용이하다는 장점이 있다(진, 2015). 따라서 최근 고출력의 연속형 THz파를 이용한 영상 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 연속형 THz파 기술은 의료, 국방, 식품, 인체 검색 등 고해상도를 요구하는 다양한 분야에 활용이 가능하다.

테라헤르츠 분광/영상 기술의 식품분야에의 응용

THz파 영역은 물질의 분자 진동이나 회전 또는 분자간 결합에 해당하는 고유 에너지 지문영역으로 이들 분광특성을 조사하여 물질의 분석에 활용할 경우, ①다양한 물질의 분석이 가능 ②정성 및 정량 동시 분석 가능, ③구조, 위치, 광학 이성질체의 구분 가능 ④포장을 개봉하지 않고 포장상태에서 확인 등이 가능한 특성을 가지고 있다. 따라서 테라헤르츠 분광/영상 기술을 이용하면 이물질, 신선도와 같은 식품의 품질관리나 식품 중에 의도적/비의도적으로 오염되는 물질의 안전관리에 활용될 수 있다(Tonouchi, 2007; 진 등, 2009).

가. 품질관리 분야

1) 식품내 이물질 검사

국내의 경우, 2008년에는 식품 이물질 혼입사고가 빈번하게 발생함에 따라 소비자 불안감이 가중

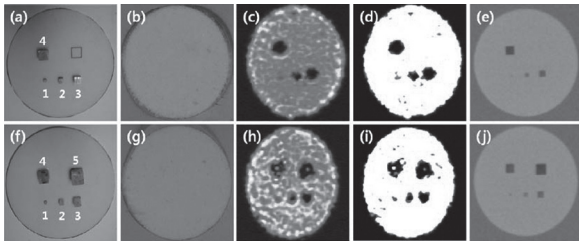


그림 2. THz 영상 및 X-선 검출기로 측정된 라면분말에 은닉된 알루미늄과 화강암 조각의 이미지. (a) 알루미늄 사진 (1: 1 mm 정육면체, 2: 2 mm 정육면체, 3: 3 mm 정육면체, 4: 4 mm 정육면체). (b) 라면분말에 은닉된 알루미늄 조각 사진, (c) 라면분말에 은닉된 알루미늄 조각의 CW THz 영상(필터링 전), (d) 필터링 후 라면분말에 은닉된 알루미늄 조각의 CW THz 영상, (e) 라면분말에 은닉된 알루미늄 조각의 X-선 영상, (f) 화강암 사진 (1: 1 mm 정육면체, 2: 2 mm 정육면체, 3: 3 mm 정육면체, 4: 4 mm 정육면체, 5: 5 mm 정육면체). (g) 라면분말에 은닉된 화강암 조각의 사진, (h) 라면분말에 은닉된 화강암 조각의 CW THz 영상(필터링 전), (i) 필터링 후 라면분말에 은닉된 화강암 조각의 CW THz 영상, (j) 라면분말에 은닉된 화강암 조각의 X-선 영상(Lee et al., 2012)

되어 사회적으로 큰 파장을 일으켰다. 2008년 발생한 식품사고의 유형은 이물혼입 41.5%, 부패/변질 20.7%, 화학물질 1.8%로 이물질에 의한 사고가 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 과거 발생했던 이물질 혼입사고는 식품산업 전반에 걸친 경제적 문제로 발전하였고 정부의 식품안전 정책을 불신하게 됨에 따라 이의 해결이 국가적 현안문제로 대두되었다. 식품제조현장에서 이물질의 검출을 위해서는 사람에 의존하거나 금속검출기 또는 X-ray 투시기 등을 이용하고 있다. 그러나 현 검출기 가운데 가장 검출력이 우수한 것으로 평가받고 있는 X-ray 투시기의 경우도 일정 밀도(1 kg/cm³ 이상)와 크기(0.4 mm 이상)를 가진 것만 검출이 가능하다. 따라서 다빈도 검출 이물인 벌레, 곰팡이 등 연질 이물질은 검출이 불가능하여 이물사고 재발 가능성을 항상 내포하고 있다. 이에 대해 앞서 기술한 THz파의 물질투과성(종이, 비닐 등 식품 포장재도 투과)을 활용하면 다

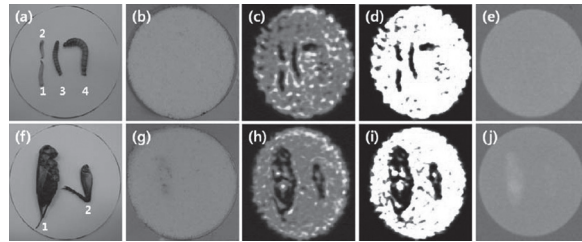


그림 3. THz 영상 및 X-선 검출기로 측정된 라면분말에 은닉된 벌레와 귀뚜라미 이미지. (a) 벌레 사진 (1: 길이 11 mm, 두께 2 mm, 2: 길이 8 mm, 두께 2 mm, 3: 길이 15 mm, 두께 2.5 mm, 4: 길이 22 mm 두께 3 mm), (b) 라면분말에 은닉된 벌레 사진, (c) 라면분말에 은닉된 벌레의 CW THz 영상(필터링 전), (d) 필터링 후 라면분말에 은닉된 벌레의 CW THz 영상, (e) 라면분말에 은닉된 벌레의 X-선 영상, (f) 귀뚜라미 사진 (1: 길이 35, 두께 5.5 mm, 2: 길이 50 mm, 두께 7 mm), (g) 라면분말에 은닉된 귀뚜라미의 사진, (h) 라면분말에 은닉된 귀뚜라미의 CW THz 영상(필터링 전), (i) 필터링 후 라면분말에 은닉된 귀뚜라미의 CW THz 영상, (j) 라면분말에 은닉된 귀뚜라미의 X-선 영상(Lee et al., 2012)

양한 크기와 밀도를 가진 식품 이물의 검색이 가능하고, 물질 고유의 투과, 흡수, 반사 특성을 이용한다면 검색된 식품 이물질의 성분 동정도 가능하다. 특히 X-ray 투시기와는 달리 인체 건강 및 식품에 미치는 영향이 미미하므로 THz파는 식품 속에 존재하는 이물질 탐지에 적합한 기술이라 할 수 있겠다(전 등, 2009; Lee et al., 2012; Ok et al., 2013; Ok et al., 2014; Ok et al., 2015).

THz 영상 기술을 이용해 식품을 투과할 때의 식품 내부 이물질의 굴절률 및 흡수율에 의한 세기 변화로 최대 1 mm 크기의 이물질도 검출할 수 있다(그림 2)(Lee et al., 2012). 기존에 금속검출기나 X-선검사기에서 보이지 않던 벌레, 머리카락 등 연질 이물질도 검출이 가능한 것으로 나타났다(그림 3)(Lee et al., 2012). Ok 등(2015)은 다각형 미러를 사용하여 식물 이물을 검출하기 위한 연속형 서브 THz 영상 시스템을 개발하고 식품내 연질 이물의 검출이 가능하다는 것을 검증하였다(그림 4)(Ok et

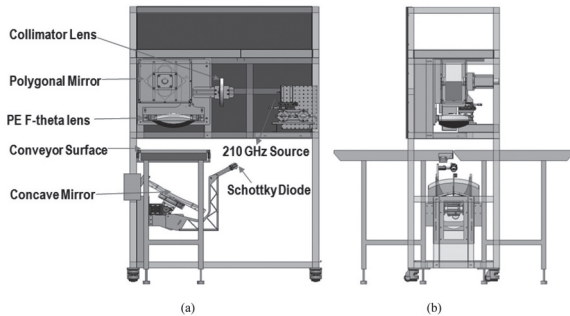


그림 4. 다각형 미러를 사용한 식품이물 검출용 연속형 서브 THz 영상 시스템 (a) 우측 및 (b) 정면도(Ok et al., 2015)

al., 2015). Jordens 등은 초콜릿 속에 혼합되어 있는 직경 1 mm의 금속 나사, 유리 파편 등의 이물에 대해 테라헤르츠 분광과 영상 분석을 실시하였다(Jordens and Koch, 2008). 그 결과, THz 시간영역 파형의 분석을 통해 초콜릿의 성분 물질과 기타 불순물을 구분해 내었고, 테라헤르츠 영상 처리 분석을 통해 초콜릿 속에 혼합된 유리 파편을 성공적으로 검출하였다.

2) 식품 내 주요 성분 함량 관리

가공식품이나 건강기능식품은 식품의 주요 영양 성분이나 지표성분의 양과 비율이 정해진 기준에 따라 관리되어야 한다. 그러나 최근 보고에 따르면 국내외 시장에서 판매되는 일부 가공식품이나 식이보충제의 경우 의도적 혹은 비의도적으로 표시된 함량보다 적은 경우가 있다. 따라서 주요 영양 성분이나 지표성분에 대한 함량 품질을 관리하고 규제기관에서는 표시 요구 사항을 준수하는지 확인하기 위해서는 신속하고 정확한 분석 방법이 필요하다. 비타민, 당, 아미노산 등과 같은 주요 식품 성분들이 THz 대역에서 고유한 흡수 스펙트럼을 보유하고 있음이 보고되었다(Tonouchi, 2007; 전, 2015; Kang et al., 2018). 이를 기반으로 THz-TDS를 이용하여 상업용 비타민 C 타블렛 제품 중 비타민 C

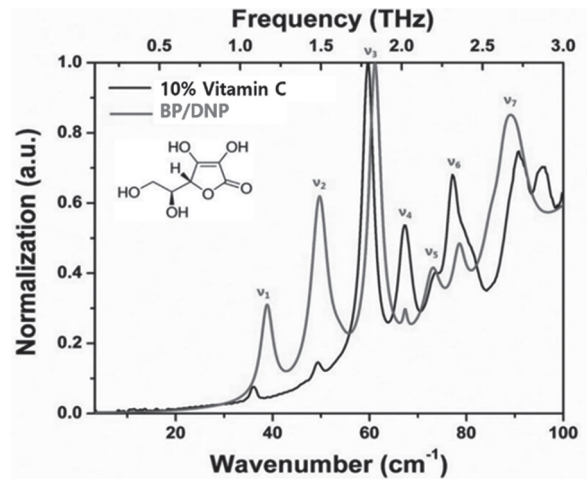


그림 5. 0.1 ~ 3 THz에서 측정된 비타민 C 스펙트럼(검정선)과 밀도 함수이론(DFT)을 이용한 시뮬레이션 스펙트럼(빨간선)의 비교 (Kang et al., 2018)

함량을 전처리 없이 현장에서 측정 할 수 있는 가능성이 연구되었다(Kang et al., 2018). 비타민 C의 특징적인 흡수 피크를 양자학적 계산으로 분석하여 각 흡수의 분자 기원을 밝힌 다음, 1.08 THz에서 나타나는 피크를 식이보충제 내 비타민 C 함량을 분석하기 위한 지문으로 선택하였다(그림 5). 비타민 C 농도 이외의 THz 흡광도에 영향을 미치는 태블릿의 곡률, 두께, 부형제 등을 살펴본 다음 비타민 C 농도 결정에 이를 보정하였다. 그런 다음 시판 중인 비타민 C 식이보충제 제품(n = 50)을 THz-TDS와 HPLC를 이용하여 분석한 결과 두 방법은 잘 일치하는 것으로 나타났다(그림 6). 이와 같은 결과는 THz-TDS가 시판 비타민 C 식이보충제 제품 중 비타민 C 함량의 in-situ 분석에 사용될 수 있음을 시사한다.

그 외 증류주의 알콜 함량 관리 등에도 THz-TDS의 이용가능성이 제시되었다. 40% 증류주 제품에 물을 비율별로 혼합하여 만든 주류의 광학적 특성을 THz-TDS에 의해 측정하면 시료 전처리 없이 물의 혼입여부를 파악할 수 있었다(그림 7 및 8)(전,

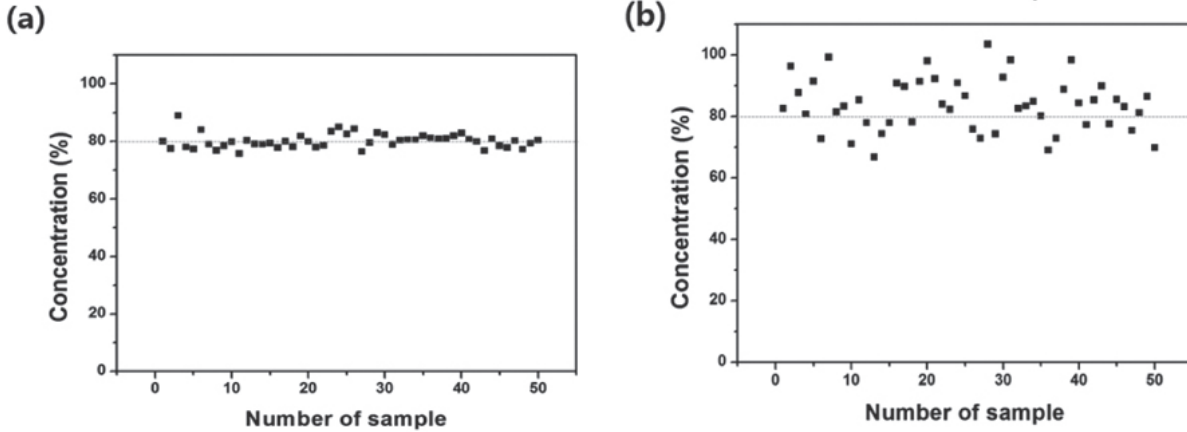


그림 6. THz-TDS(a)와 HPLC(b)를 이용한 비타민 C 식이보충제 내 비타민 C 함량 측정(Kang et al., 2018)

2015). 그러나 이종의 주류가 혼합되었을 경우에는 판별이 어려운 것으로 나타났다.

3) 기타 품질 관리

THz파는 전파 및 광학적 성질에 의해 X-ray와 달리 위상 변화 검출이 용이하기 때문에 이를 식품 내부 조직을 균일하게 관리하는데 이용될 수 있다. 예를 들어 홍삼은 건조과정에서 건조속도가 너

무 빠르게 되면 삼의 외부에 노화현상이 발생하여 홍삼의 외형 형태가 먼저 형성된 후에 내부건조가 이루어짐으로써 홍삼 제조시 최대 불량 요소인 균열 현상, 조직이 스펀지처럼 치밀하지 않거나 내공의 발생이 현저하게 증가되는 내백 현상이 발생한다. 고품질의 홍삼제품을 생산하기 위해서는 이러한 내백현상을 비파괴적으로 검사할 필요성이 크다. 이에 0.2 THz파 CW 광원을 이용할 경우 홍삼

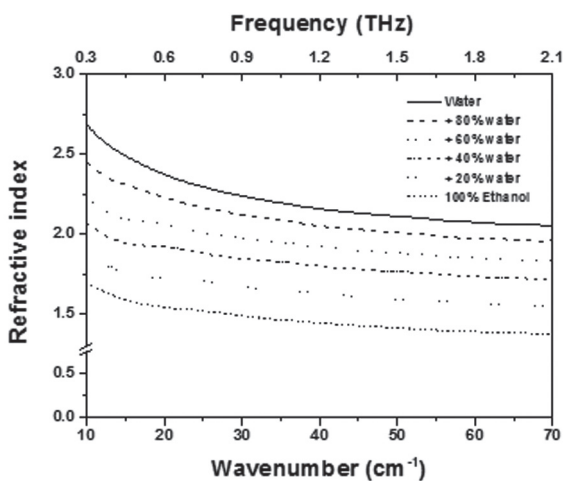


그림 7. 물의 혼합에 따른 에탄올의 굴절률 스펙트럼(전, 2015)

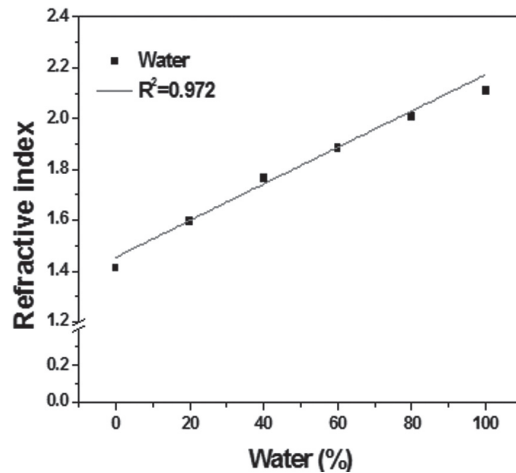


그림 8. 1.5 THz 대역에서의 물 혼합에 따른 에탄올의 굴절률 검량선(전, 2015)

내부 내백 부분의 관찰이 가능하였다(<http://www.ecofuturenetwork.co.kr/news/articleView>). X-ray 영상과 비교했을 때 THz 영상은 거의 동일한 특성을 얻을 수 있었다. 또한 THz대역은 자외선이나 가시광선 대역보다도 수분에 대해 감도가 높아, 미량의 수분도 그 변화를 파악할 수 있는 특성을 가지고 있어서 이 특성을 식품분석에 이용할 수 있다. Chua 등은 THz파의 수분에 대한 정밀도를 이용하여 소맥분에서 수분을 측정하였다. 0.1~2.0 테라헤르츠 범위 내에서 각기 다른 수분 함유량(8%, 12%, 18%)을 측정하고 예측 모델을 구축한 다음 시료의 수분 함량을 측정하였다(Chua et al., 2004).

나. 안전관리 분야

식품의 안전은 절대 타협할 수 없는 가치로 세계 각국에서는 식품 안전 연구 전략, 식품 안전 기준 강화, 문제 식품 수입 시 금지 조치 등 강력한 수단을 통해 전방위적 노력을 경주하고 있다. 특히 FTA 체결이 확산됨에 따라 식품의 수입증대에 따른 안전문제의 무국경(borderless)현상으로 식품안전에 대한 불확실성이 증가 되고 수입식품에 대한 국민 불안이 54.7%(2012년, 통계청 사회조사)에 이르고 있다. 특히 중국산 유제품 멜라민 파동, 농약이나 항생제 잔류 등 지역과 국경을 초월하는 식품사고 발생 및 유해물질의 잔류 문제 등에 빠르게 대처하기 위해서는 THz 분광 및 영상 분석법과 같은 신기술이 요구되고 있다(Shen and Ying, 2009).

1) 멜라민 등 위변조인자 검출

멜라민은 우유를 비롯한 유제품에 단백질 함량을 높이는 목적으로 첨가된다. 식품을 통해 멜라민에 노출된 영유아들이 신장 질환으로 사망하거나 치료를 받는 일이 발생하였다. 멜라민의 분석을 위해서는 주로 질량 분석법이나 크로마토그래피 분석법이 사용되나, 이는 복잡한 전처리 과정으로 인해

많은 시간을 필요로 하여 신속한 대처에서는 실효성을 가지기 어렵다. 펄스형 THz 분광 및 영상기술이 식품 내 멜라민을 검출하는데 사용되었다(Baek et al., 2016). 멜라민의 고유 스펙트럼과 이미지는 실온에서 THz-TDS를 이용하여 0.1~3 THz 주파수 범위에서 측정하였다. 2, 2.26, 2.6 THz에서 멜라민의 특정 흡수피크가 나타났고, 이 흡수 지문은 분유나 초코분말과 같은 식품 매트릭스에서도 동일한 주파수에서 나타났다. 멜라민은 2 THz에서 얻은 THz 이미지에서 농도 의존적으로 식별되었으며, 포장된 식품에서도 같은 결과가 나타났다. 식품 중 농도별로 첨가된 멜라민을 검정곡선으로 나타내었을 때 0.913 이상의 직선성을 나타내었고 13% 이하의 검출한계를 보였다. 이는 펄스형 THz 분광 및 영상 기술은 빠르고 쉽게 식품 위변조 물질 중 하나인 멜라민을 검출할 수 있으며, 포장된 식품의 비파괴 분석도구로 잠재능력을 가지고 있어 앞으로 다양한 식품 산업에 활용될 수 있다는 것을 나타낸다.

2) 농약, 항생제 등 잔류물질 분석

식품의 화학적 물질에 의한 위해는 식품 원료의 생산에서부터 최종 제품의 소비에 이르기까지 어떤 단계의 생산과정에서도 발생할 수 있다. 테라헤르츠 전자기파 분광을 이용하면 기존의 방식과는 다른 방법으로 다양한 분자의 회전에너지(rotation energy)나 진동에너지(vibration energy)에 관련한 주파수 값을 파악하여 농약, 항생제와 같은 화학물질의 검출에 응용할 수 있다(Tonouchi, 2007). THz-TDS 분광 기술을 사용하여 2종류의 농약(imidacloprid와 Mancozeb)을 측정하였다. 0.2~2.0 THz 대역에서 흡수율과 굴절율을 측정한 결과, 두 종 농약의 고유 흡수 피크가 관찰되었고, 굴절률 역시 현저한 차이를 보였다. Zhang 등은 THz-TDS 분광 기술을 이용하여 유기인계 농약의 분광 스펙트럼을 계산에 의한 결과와, 푸리에변환적외선분광법

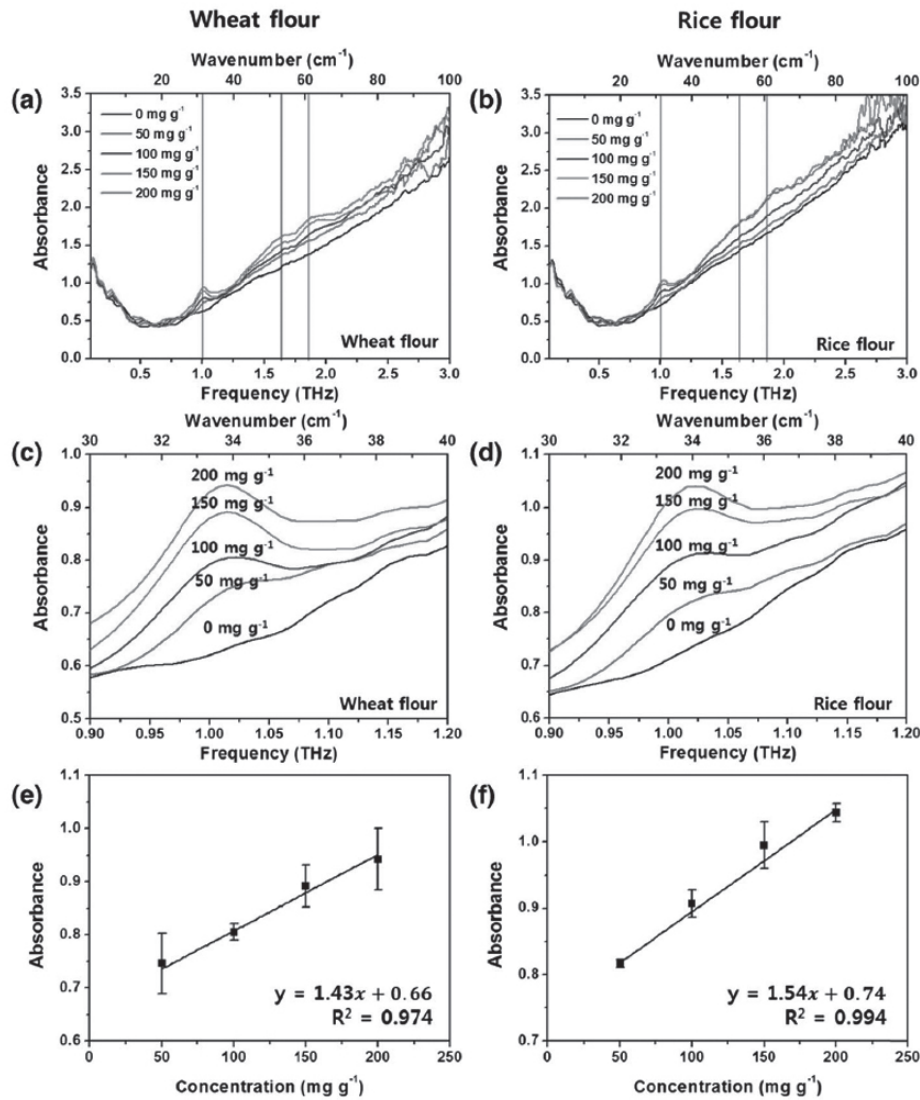


그림 11. 밀가루 및 쌀가루 중 측정된 메소밀의 THz-TDS 스펙트럼(1 THz=33.4 cm⁻¹)(Baek et al., 2016)

(FTIR)과 THz-TDS 분광법에 의해 얻은 실험 결과와 비교하였다. 그 결과, 계산 방법과 실험 결과는 서로 잘 부합되는 것으로 나타났으며, 특히 THz 영역의 저주파수에서 나타난 피크는 분자내 및 분자간 상호작용에 해당하는 것으로 해석하였다(Zhang et al., 2008). 또한 카바메이트계 살충제인 메소밀

등 다양한 농약이 식품 및 식품원료에 잔류되어 건강상 문제를 야기할 수 있다. 이에 밀가루와 초코분말 등 건조분말 식품에 메소밀을 0.1-1.0% 첨가한 다음 THz 흡수스펙트럼을 측정된 결과 식품기질에 영향을 받지 않고 메소밀의 특이 지문이 관찰되었다. 식품기질에 따라 다소 결과의 차이가 있으나 정

표 1. THz-TDS에 의한 밀가루 및 쌀가루에서의 methomyl 검출의 정확도와 정밀도(Baek et al., 2016)

Food matrix	Accuracy		Precision (between-day, n = 5)	
	Level spiked (mg g ⁻¹)	Recovery ^a (%)	Level spiked (mg g ⁻¹)	RSD (%) ^b
Wheat flour	99 ^c	96.34 ± 0.01	150	3.95
	199	88.61 ± 0.02	200	4.29
	299	92.01 ± 0.02		
Rice flour	117 ^d	88.63 ± 0.02	150	2.82
	235	90.85 ± 0.01	200	4.98
	353	88.84 ± 0.01		

^a Recovery = {(quantity found in blank control)/amount spiked} × 100
^b Relative standard deviation of three replicates on five different days
^c 10 × the standard deviation of the pure wheat flour matrix/the slope of the calibration curve
^d 10 × the standard deviation of the pure rice flour matrix/the slope of the calibration curve

확도 및 정밀도는 우수한 반면 약 3-4% 농도 수준에서 검출이 가능하였다(그림 11 및 표 1)(Baek et al., 2016). 한편 고춧가루에 오염된 메소밀을 측정 한 결과 시판 고춧가루의 입도에 따라 영향을 많이 받는 것으로 조사되어 분말식품이라도 입자가 다양한 식품을 측정할 때는 입도를 고려해야 할 것이다(전, 2015). 이외에도 다른 농약의 정성 및 정량 해석에 THz 분광 및 영상 기술을 사용가능성이 연구되었다(Maeng et al., 2014; 전 2015).

THz-TDS 분광법에 의해 항생제의 측정가능성도 보고되었다. Redo-Sanchez 등은 가축에 일반적으로 사용되는 11종 항생제에 대해 THz 분광법을 적용하였다. 그 결과, 11종 항생제 가운데 8종은 0.1-2 THz 주파수 범위에서 특정 지문을 나타내었으며, 2종 항생제(doxycycline과 sulfapyridine)의 주된 스펙트럼 특징은 3종 식품 매트릭스(사료, 우유, 계란 가루)와 혼합되었을 때 여전히 검출 가능하였다고 보고하였다(Redo-Sanchez et al., 2011).

3) 기타 안전관리 분야 응용

THz 분광/영상 기술을 이용한 바이러스나 세균류의 검사 가능성에 대해서도 보고되었다. 일반적으로 세균 등의 검사에는 배양이나 전자 현미경법, 혹은 특수 장치에 의한 유전자 검출처럼 번잡하고 어려운 기술 조작이 많이 요구되는 방법을 사용하

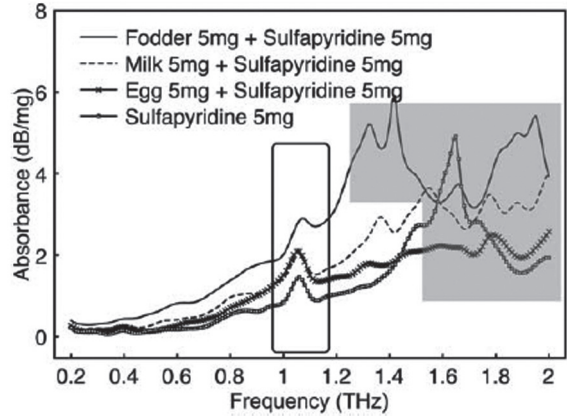


그림 12. 1.05 THz에서 3종 식품 매트릭스와 50% 비율로 혼합된 설파피리딘의 스펙트럼. 회색으로 표시된 부분은 SNR < 10 인 영역을 나타내므로 데이터 해석시 주의 요망

고 있다. 반면 THz과를 이용할 경우에 제안되는 검출 원리는 기본적으로는 바이러스나 세균류에서 THz과가 어떤 식으로 흡수 혹은 반사되는지를 계측하여 그 데이터를 데이터베이스와 비교하는 것이다. Choi 등은 10~300 GHz 범위 내에서 각각 투과 및 반사의 측정 방식을 사용하여 설탕, 전분과 바실러스(탄저병 세균과 유사한 아포 간균) 분말의 반사 계수와 굴절률 정보를 얻었다(Choi et al., 2004). 그 결과, 반사 혹은 투과의 측정에 의해 모두 다른 물질로 구분할 수 있었다. Globus는 여러 종류의 다른 세균을 식별할 수 있는가에 대한 연구를 실시하였다. 시판 푸리에변환적외선분광기를 사용하여 투과분석을 실시한 결과, 3~10 cm⁻¹의 THz대역 범위 내에서 여러 종 세균의 특징 흡수 피크를 얻었다. Alexei는 대장 간균, 아포 간균과 그들의 DNA 분자 공진 분광을 얻었으며, 아포 간균 포자의 공진 분광과 DNA 분자의 공진 분광의 존재에는 커다란 상관성이 있다는 사실을 발견하였다(25). 이외에도 우편 물이나 택배 포장 내 마약이나 폭약과 같은 유해 화학물, 플라스틱이나 금속 재질의 균열 확인 등에도



THz 분광/영상 기술이 활용되고 있다(전 등, 2009).

다. 기술 응용 제한성

식품 분야를 포함한 의료, 보안/국방, 정보통신 등 다양한 분야에서 THz 기술을 활용하기 위한 관심이 증가하고 있으나 기술 확산을 위해서는 가격, 안전성 등을 포함한 해결해야 할 선결과제가 남아있다. 광대역 THz파 발생이 가능한 THz-TDS(Terahertz time-domain spectroscopy)은 시스템은 그 크기가 크고 시스템 구축을 위한 비용이 매우 높은 단점을 가지고 있다(전 등, 2009). 이에 가격을 낮추기 위한 많은 대안 기술들이 개발되고 있다. 또한 THz파는 이온화 에너지가 X-선에 비해 10⁻⁶배 정도로 낮아 인체에 비교적 안전한 특성을 지니고 있는 것으로 알려져 있으나 최근 THz파를 노출시킨 쥐의 피부에서 염증 세포의 수가 최대 6배 이상 증가했다는 연구결과가 발표되면서 안전성에 대한 논란이 일고 있다(<http://www.etnews.com/20140618000108>). 이 실험에 사용한 THz파는 일반적으로 사용하는 것보다 1만~10만배 가량 높은 고출력이었기 때문에 향후 실제 노출되는 정도를 고려한 추가연구가 요구된다. 특히 식품분야의 경우, THz 대역에서의 식품 특유의 다양한 매트릭스 특성으로 인해 높은 신호 손실, 고유지문 추출의 어려움 등이 해결되어야 한다. 이러한 제한점들이 해결하면 종래 방법인 초음파·X선 검사 등을 대체할 수 있는 인간에 무해한 신개념 검사법 제공이 가능할 것으로 기대된다.

결론

THz파의 물질투과성과 물질 고유의 지문 스펙트럼 특성을 이용한 THz 분광 및 영상 기술이 발전되고 있고, 식품의 품질 및 안전관리에 응용하려는 시도가 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 기술의 확

산을 위해서는 가격, 안전성 문제뿐만 아니라 THz 대역에서의 식품 특유의 다양한 매트릭스 특성으로 인한 높은 신호 손실, 고유지문 추출의 어려움 등이 선결되어야 한다. 향후 지속적인 연구개발을 통해 선결 문제점이 해결된다면 THz 분광 및 영상 기술은 식품의 품질 및 안전관리에 핵심적인 역할을 할 것으로 기대된다.

참고문헌

- Applied Research and Photonics, Inc., Terahertz Spectroscopy Brings a New Dawn of Biological Research, USA, (2008)
- Baek SH, Lim SB, Chun HS. Detection of melamine in foods using terahertz time-domain spectroscopy. *J. Agric. Food Chem.* 62: 5403-5407 (2014)
- Baek SH, Kang JH, Hwang JH, Ok KM, Kwak K, Chun HS. Detection of methomyl, a carbamate insecticide, in food matrices using terahertz time-domain spectroscopy. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* 37: 486-497 (2016)
- Choi MK, Alan Bettermann DW, van der Weide. Potential for detection of explosive and biological hazards with electronic terahertz systems, *Phil. Trans. R. Soc. Lond* 362: 337-349 (2004)
- Chua HS, Upadhy PC, Haigh AD, Obradovic J, Gibson AAP, Linfield EH. Terahertz time-domain spectroscopy of wheat grain. *Infrared and Millimeter Waves, 2004 and 12th International Conference on Terahertz Electronics, 2004. Conference Digest of the 2004 Joint 29th International Conference on*, pp. 399-400, (2004)
- Gowen AA, O'Sullivan C, O'Donnell CP. Terahertz time domain spectroscopy and imaging: Emerging techniques for food process monitoring and quality control. *Trends Food Sci. Technol.* 25: 40-46 (2012)
- Jördens C, Koch M. Detection of foreign bodies in chocolate with pulsed terahertz spectroscopy. *Opt. Eng.* 47: 1-5 (2008)
- Kang JH, Song JH, Jung T, Kwak K, Chun HS. In-situ measurement of vitamin C content in commercial tablet products by terahertz time-domain spectroscopy. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* online published (2018)
- Lee YK, Choi SW, Han ST, Woo DH, Chun HS. Detection of foreign bodies in foods using continuous wave terahertz imaging. *J. Food Prot.* 75: 179-83 (2012)
- Maeng I, Baek SH, Kim HY, Ok G, Choi SW, Chun HS. Feasibility of using terahertz spectroscopy to detect seven different pesticides in wheat flour. *J. Food Prot.* 77: 2031-2037 (2014)
- Ok G, Choi SW, Park KH, Chun HS. Foreign object detection by sub-terahertz quasi-Bessel beam imaging. *Sensors (Basel)* 13: 71-85 (2013)

- Ok G, Kim HJ, Chun HS, Choi SW. Foreign-body detection in dry food using continuous subterahertz wave imaging. *Food Control* 42: 284-289 (2014)
- Ok G, Park K, Chun HS, Chang HJ, Lee N, Choi SW. High-performance sub-terahertz transmission imaging system for food inspection. *Biomed. Opt. Express* 29: 1929-1941 (2015)
- Ok G, Park K, Kim HJ, Chun HS, Choi SW. High-speed terahertz imaging toward food quality inspection. *Appl. Opt.* 53: 1406-1412 (2014)
- Redo-Sanchez A, Salvatella G, Galceran R, Roldós E, García-Reguero JA, Castellari M, Tejada J. Assessment of terahertz spectroscopy to detect antibiotic residues in food and feed matrices. *Analyst* 136: 1733-1738 (2011)
- Shen F, Ying Y. Application of terahertz spectroscopy and imaging techniques in food safety inspection. *Spectrosc. Spect. Anal.* 29: 1145-1149 (2009)
- Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology. *Nat. Photonics* 1: 97-105 (2007)
- Zhang Y, Peng XH, Chen Y, Chen J, Curioni A, Andreoni W, Nayak SK, Zhang XC. A first principle study of terahertz (THz) spectra of acephate, *Chem. Phys. Lett.* 452: 59-66 (2008)
- 권혁빈. 이젠 벌레 걱정 마세요 <http://www.ecofuturenetwork.co.kr/news/articleView.html?idxno=3173> 2018. 03. 02
- 박희범. KAIST. 원자력연구원 “테라헤르츠파 생체 부작용 일으킨다” 첫 보고 <http://www.etnews.com/20140618000108> 2014. 06. 18
- 손주혁, 강철. 테라헤르츠(THz) 전자기파의 발생 및 응용. *물리학과 첨단기술* pp. 34-38 (2003)
- 윤두협, 곽인환, 유용구, 류한철. 테라헤르츠파 기술의 현황과 전망. *전자통신동향분석* 21: 129-141 (2006)
- 전향숙. 식품오염인자 실시간 비파괴 지문인식 기술 보고서(2010-0020818). 한국연구재단 (2015)
- 전향숙, 김재호, 김종욱, 박경현, 신재길, 손주혁, 전석기, 최재익, 최성욱, 구민선, 김윤지, 김현정, 오세욱, 이나리, 장현주. 테라헤르츠 분광/영상 기술기반 식품 이물질 실시간 비파괴 탐지기술 개발. *산업기술연구회 기획보고서* (2009)
- 전향숙, 최성욱, 김현정. 테라헤르츠 분광/영상을 이용한 식품위해 요소의 검출. *Safe Food* 4: 40-46 (2009)
- 진윤식, 전석기, 김정일, 김근주, 손채화. 테라헤르츠파 발생 및 응용 연구. *물리학과첨단기술* pp. 1-6 (2007)