

데이터 처리를 통한 테라헤르츠 (THz) 파의 2차원 이미지 개선

손재화[†] · 진윤식 · 전석기 · 김근주 · 정순신

한국전기연구원 전기물리연구그룹
☎ 641-120 경남 창원시 성주동 28-1

정원용

경남대학교 정보통신공학부
☎ 631-701 경남 마산시 월영동 449

(2005년 9월 23일 받음, 2005년 11월 28일 수정본 받음)

테라헤르츠(terahertz; THz) 파를 이용한 2차원(2D) 투과 이미지의 개선 특성에 대해서 보고한다. THz 파 투과 신호의 진폭과 위상을 이용하여 다양한 시료에 대한 2차원 이미지를 얻었다. THz 파의 진폭과 위상 정보를 조합하는 새로운 방법을 제안하였고, 이 방법을 이용하여 피크 값의 크기 혹은 위상 중 어느 한가지만을 이용한 이미지보다 나은 이미지를 얻을 수 있었다. 또한 호모몰픽 필터링(homomorphic filtering) 디지털 이미지 처리(digital image processing) 가 노이즈를 저감시키는데 효율적이고 나은 품질의 이미지도 얻을 수 있음을 보인다. 이 결과를 이용하여 향후 실시간 이미징에 응용 가능하다.

주제어 : Terahertz, 2D imaging, Digital image processing.

I. 서 론

테라헤르츠(THz) 파는 마이크로파와 적외선 사이에 놓여 있는 0.1-10 THz 범위의 주파수를 가진 전자기파로 기존의 전파와 광 영역 사이에 위치한다. 이 영역은 전파와 광학기술의 기술적 한계영역에 속하게 되어 전자기 스펙트럼 중 가장 접근하기 어려운 영역의 하나로 알려져 왔다. 그러나 펄스 레이저의 상용화와 함께 재료기술의 발전과 초미세 공정기술의 발달로 고출력 THz 소스들이 등장하여 이 분야의 발달이 획기적으로 이루어졌다^[1]. 이로 인해 THz 파에 대한 관심이 전 세계적으로 고조되고 있는데 THz 파의 특성상 향후 다양한 응용 분야에 사용될 가능성이 크기 때문이다. THz 파가 가진 고유한 특성을 이용한 분광 및 이미징 기술은 신물질, 의료, 바이오, 보안, 국방, 환경, 우주 및 통신 등과 같은 다양한 고부가가치 서비스 및 첨단 산업 부문에서 관심을 갖고 있을 만큼 매력적인 연구 분야로 성장하고 있다^[2-5]. 또한 선진 각국에서 THz 관련 기술을 중요한 미래 기술의 하나로 포함시키고 있는 것만 보아도 향후 그 응용성과 파급효과가 상당할 것으로 예상된다.

THz 파는 그 발생 방법에 따라서 연속형과 펄스형으로 나눌 수 있는데 펄스 레이저에 의한 THz 파의 발생은 펄스형에 속하며 피코초 이하의 짧은 주기의 펄스 형태이므로 주파수 영역으로 변환하면 수백 GHz 에서 수(십) THz 에 이르는 초광대역의 주파수를 갖는 전자기파를 얻을 수 있다. 펄스형 THz 파의 발생은 주로 광전도 안테나법(Photoconductive Antenna: PCA)과 광정류법(Optical Rectification: OR) 그리고

반도체 표면 전계(Surface-Field of Semiconductor)에 의해 이루어진다. 또한 THz 파의 측정에는 광전도 안테나, 전광(electro-optic, EO) 샘플링, 볼로미터, 쇼트키 장벽 다이오드 그리고 SIS(superconductor-insulator-superconductor) 믹서 등을 사용하는 방법이 있다^[1].

THz 파의 응용 중에서도 가장 많이 연구되고 있는 분야는 THz 이미징이라고 해도 과언이 아니다. THz 이미징은 1995년 Hu and Nuss^[6]에 의해 최초로 시작된 이래로 지속적으로 연구되어 지고 발전되어져 오고 있다^[7-10]. THz 이미징은 테라헤르츠 시영역 분광법(THz Time-Domain Spectroscopy; THz-TDS)에 의한 방법^[7] 과 전광 샘플링(Free-Space Electro-Optic Sampling; EOS) 에 의한 스캔방법^[8], 그리고 EOS 법과 CCD카메라를 조합하여 실시간 2차원 영상을 얻는 방법^[10] 등이 있고 이 외에도 수백 nm의 분해능을 가진 고해상도의 이미지를 얻기 위한 근접장 이미징(near-field imaging) 방법 등도 있다^[11-13]. 최근에는 그 응용 분야를 확장하여 화학적인 분석이나 의료 혹은 바이오 분야에서 생체의 이미지를 얻는 연구들도 활발하게 이루어지고 있다^[14-15]. 향후 THz 파는 유전체, 반도체 그리고 생체조직 등과 같은 다양한 재료에 대한 실시간 영상 응용(Real-Time T-Ray Imaging) 에도 폭넓게 이용될 전망이다.

본 논문에서는 펄스 레이저 사파이어(Ti:Sapphire) 레이저로 여기한 광전도 안테나 및 ZnTe 결정을 이용한 광정류법에 의해 발생된 THz 펄스에 의한 2차원 이미징에 대해 기술한다. 이미징 시스템의 적용 가능성을 위한 기초실험으로서 살아있는 클로버 잎과 화폐의 워터마크, 마른 멸치와 땅콩의 T-Ray 영상을 얻었다. 또한 새로운 이미징 처리 기법을

[†]E-mail: chshon@keri.re.kr

적용한 이미지 개선을 통하여 각 시료의 경계 및 내부 구조를 파악한 결과를 보고한다.

II. 테라헤르츠(THz) 파 영상 시스템

2.1 시스템 구성

본 연구에서 2차원 THz 파 영상을 얻기 위하여 구축한 시스템의 개략을 그림 1에 보인다. THz 파의 발생에는 광전도 안테나법과 광정류법을 사용하였고 검출에는 광전도 안테나를 이용하였다. 광전도 안테나법을 이용한 THz 파의 발생과 검출은 참고논문^[16], 광정류법을 이용한 THz 파의 특성에 관해서는 참고논문^[17]를 참고하기 바라며, 여기에서는 주요 시스템의 개략에 대하여 간단히 기술한다.

여기용 레이저는 상용의 모드 잠금 티타늄 사파이어 레이저(Spectra Physics MaiTai)이며, 중심파장 800 nm에서 펄스 폭은 100 fs를 가지며 반복률은 80 MHz, 평균출력은 1000 mW 이다. 그림 1의 이미터 광전도 안테나는 저온성장 GaAs(LT-GaAs) 박막 위에 갭간격 200 μm 의 공면 스트립 안테나(coplanar strip antenna)를 증착하여 제작하였다. THz 펄스의 안테나와 자유공간 사이의 결합을 증가시키고 또한 THz 빔을 집속하는 효과를 내도록하기 위하여 직경 1 cm 의 초반구형(hyper-hemispherical) 실리콘 렌즈를 THz 이미터와 검출기의 뒷면(스트립 라인이 설치되지 않은 쪽)에 부착하였다. 광정류법에 의한 THz 파 발생시는 이미터 안테나 대신에 비선형 광결정(ZnTe^[110])을 설치하였다. 이미터 안테나 다음의 두개의 파라볼릭 미러는 THz 빔을 시료에 집속하기 위한 것이고 다음의 두개는 시료에서 투과된 THz 빔을 모아서 검출기 안테나에 집속시키기 위한 것이다. 후술하는 팽공 및 멀치의 이미징 실험에서는 두 번째와 세 번째의 파라볼릭 미러를 제거하고 초점길이 10 cm의 실리콘 렌즈 2개를 이용하여 THz 빔을 집속하였다. 집속된 THz 빔의 직경은 0.5 mm 이하로 측정되었다. 검출용 광전도 안테나는 갭 길이 0.5 μm의 쌍극자 안테나를 LT-GaAs기판위에 형성시켜 사용하였다.

2차원 이미징을 위해 시료를 시료홀더에 고정하고, 이 홀

더는 2개의 모터구동 선형 스테이지로 구성된 2차원 주사 스테이지(scanning stage)에 부착하였다. 컴퓨터를 이용하여 시료가 고정된 스테이지를 레이저 빔의 진행방향에 수직한 단면으로 주사하였고, 시료의 각 픽셀을 투과한 THz 파에 대한 정보를 Lock-in Amplifier와 컴퓨터를 이용하여 저장하고 분석하였다.

2.2 테라헤르츠(THz) 파의 이미징특성

THz 파를 물질에 조사하여 반사 또는 투과된 THz 파를 분석함으로써 물질의 광학적 분광 특성을 파악하는 시간영역 분광법은 그 자체로 물질의 물성을 파악하는데 유용하게 쓰일 수 있다. 이것을 더욱 더 발전시켜 THz 영상을 얻기 위한 방법이 개발되어 다양한 응용분야에 활용되고 있다. THz 를 이용한 2차원 이미지를 얻기 위하여 THz 파를 시료에 수직으로 조사하면서 원하는 해상도만큼 시료를 2차원으로 스캔하면서 각 점 또는 픽셀(화소)에서 투과된 파형을 얻게 된다. THz 파가 물질 내를 전파하면서 반사, 산란, 굴절, 흡수와 같은 과정을 거치면서 투과된 파형은, 입사파(기준파형)와 비교했을 때, 진폭이 감소하거나 위상의 지연이 발생하거나 파형의 선폭이 증가하는 등의 변화를 보이게 된다.

물질에 투과 또는 반사된 THz 파를 이용하여 물질의 상(image)을 얻기 위해서는 THz 파에 포함된 다양한 정보를 이용한다. 많은 정보 가운데 대상 물질의 특성을 가장 잘 표현할 수 있는 변수를 선택하여 영상화하는 기술이 중요하다. 시간영역에서 얻어진 THz 파형으로부터 피크의 최대값, 피크값의 차이(최대값과 최소값의 차이), 진폭의 변화, 어떤 피크가 나타나는 시간(위상)의 변화 그리고 일정한 시간 영역의 파형 적분값 등이 이미지를 형성하기 위한 변수로 이용될 수 있다. 이와 더불어 주파수 영역의 스펙트럼으로부터 특정 주파수의 진폭변화, 스펙트럼 폭 그리고 일정 주파수 구간에서의 스펙트럼 적분값 등도 영상 구성을 위한 변수로 이용될 수 있다^[18].

본 연구에서는 시간 영역에서 THz 파의 피크 값을 이용하는 방법, 피크 값의 차를 이용하는 방법, 위상 값의 변화를 이용하는 방법, 그리고 위의 값들을 조합하여 이미지를 얻는 방법 등을 사용하여 이미지를 얻어서 비교분석한다.

III. 이미지 처리 결과 및 고찰

3.1 펄스 피크값 또는 위상정보를 이용한 이미징

THz 파를 이용한 최초의 이미징 실험은 1995년 발표된 AT&T 벨 연구소의 B.B. Hu 와 M.C. Nuss 논문^[6] 인데 이 논문에서는 나뭇잎에 THz 파를 조사하여 수분에 의한 테라파의 감쇠를 이용하여 시료의 이미지를 얻었다. 본 연구에서는 THz 파의 이미징 특성을 알아보기 위하여 그림 2(a)에 보이는 바와 같은 살아있는 클로버 잎에 대한 T-Ray 영상 기초 실험을 시도하였다. 시료 앞의 크기는 가로 세로 각각 2 cm 정도이며, 얇은 비닐 사이에 끼어 고정시키고 이미징을

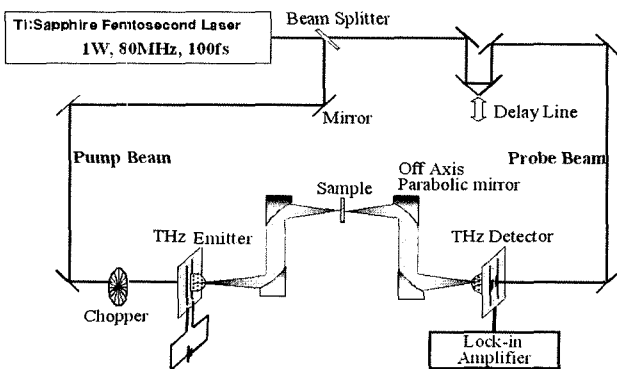


그림 1. 테라헤르츠(THz) 파 2차원 이미징 시스템 개략도.

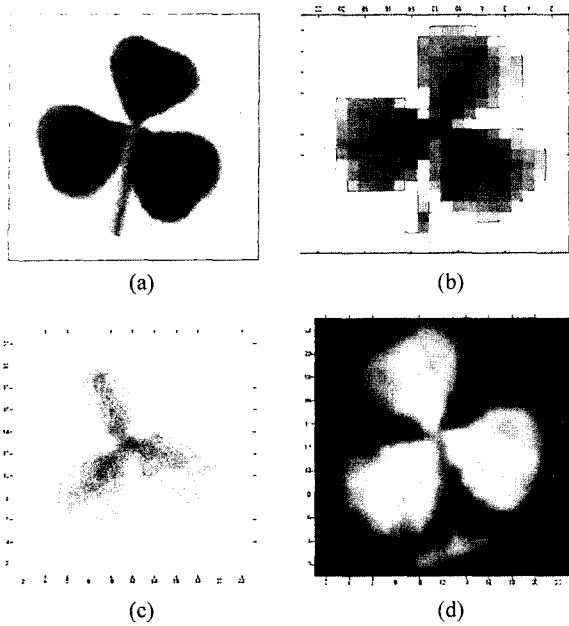


그림 2. 클로버 앞의 T-Ray 영상 (a) 광학사진, (b) 피크-피크 차이를 이용한 이미지, (c) (b)를 화상처리한 그림, (d) 피크점의 시간 지연을 이용한 이미지.

위하여 시료를 전술한 스테이지에 고정하여 1 mm 간격으로 스캔하였다(23X23 = 529 픽셀). 그림 2(b)는 펄스의 피크-피크 값의 차를 이용하여 영상화 한 것이며, 그림 2(c)는 그림 2(b)를 화상처리하여 배경의 잡음을 제거하고 평활화(moothing)를 통하여 실제의 모습에 근접하도록 한 것이다. 그림 2(d)는 THz 파의 피크점의 지연시간을 기준으로 하여 영상화 한 것이다. 그림 2(c)와 2(d)에서 클로버 앞의 각 부분에서의 수분의 차에 따른 명암이 확실히 드러남을 알 수 있다. 또한 줄기의 아래 부분에 시료를 고정하기 위하여 붙인 셀로판테이프의 형상도 뚜렷하게 드러남을 알 수 있다. 이 실험을 통하여 THz 파를 이용한 다양한 생체 영상 응용 가능성을 확인할 수 있다.

THz 파는 서브피코초의 시간분해능이 있으므로 굴절률의 차이가 매우 작은 물질들의 이미징에 적용할 수 있는 특징을 가지고 있다. 이러한 특징을 시험하기 위하여 우리나라 만원권 지폐에 있는 워터마크에 대한 이미징을 시도하였다. 그림 3에 만원권 지폐를 투과한 두 개의 시간영역 파형을 보인다. 실선은 THz 빔이 워터마크를 통과했을 때의 파형이며 점선은 워터마크가 없는 부분을 통과한 파형이다. 두 개의 파형 사이에는 30 fs의 위상지연이 발생하고 있음을 알 수 있는데, 이는 워터마크가 있는 부분과 없는 부분의 굴절률 차이에 의해 발생된 위상 변화에 기인한 것이다. 고정된 시간에서의 진폭의 차(ΔI)는 이미지 형성을 위한 충분한 대조(contrast)를 줄 수 있다. 그림 4에 진폭의 차이를 이용하여 구성한 워터마크의 이미지를 보인다. 이미징 데이터는 250 μm 간격으로 스캔하여 그림 1의 시간지연기(delay line)를

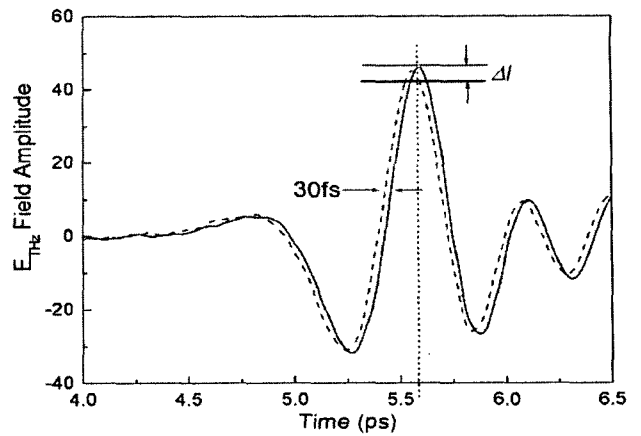


그림 3. 지폐의 워터마크를 투과한 파형(실선)과 워터마크가 없는 부분을 투과한 파형(점선)의 비교.

THz 파형의 피크 값이 나오는 시점에 고정함으로써 진폭 값만 획득하여 저장함으로써 이미징 시간을 단축할 수 있었다. 그림 4의 이미지에서 지폐 내에 숨겨진 워터마크를 선명하게 볼 수 있으며 특히 좌측하단에 보이는 태극마크 형태는 투과된 THz 파의 진폭이 매우 작은 값을 가지기 때문이며, 이는 태극마크의 무늬에 THz 파가 투과하기 어려운 금속성의 물질이 내재해 있음을 암시한다. 상기의 결과는 THz 파를 이용한 이미징 시스템이 30 fs의 작은 시간차를 구분할 수 있을 정도로 민감하며 이러한 고감도의 측정엔 펄스형 THz 파를 이용한 측정의 위상 민감성에 기인한 결과이다. 이 결과를 이용하면 위조지폐의 진위를 판별하는 기술에 응용될 수 있을 것이다.

3.2 펄스 피크값과 위상값을 조합한 이미징: 땅콩

다음으로 THz 파의 특성을 이용한 투과 실험으로서 속이 보이지 않는 땅콩을 껍질을 열지 않은 채로 THz 파를 조사하여 내부의 이미지를 얻는 실험을 하였다. 땅콩 이미징에 사용된 실험 조건은 다음과 같다. THz 파는 광정류법을 통해 얻었다. 800 nm 펄스초 터타늄 사파이어 레이저를 1 mm 두께의 ZnTe(110)에 조사하여 얻은 THz 파를 만들고 광전도 안테나를 사용하여 파형을 측정하였다. 이미지 샘플링에 사용된 면적은 3.3 cm × 2 cm인데 지름 0.6 mm의 구멍을 가진 금속판을 가로, 세로 모두 각각 0.5 mm 간격으로 이동시키며 신호를 측정하여 총 픽셀의 수는 66 × 40 (= 2640) 개가 된다. 땅콩은 그림 5(a)에서와 같이 양면테이프를 사용하여 종이위에 고정하여 사용하였고 그림 5(b)는 측정이 끝난 후 껍질을 열어놓은 땅콩의 내부 모습이다. 땅콩과 양면테이프를 통과하지 않고 종이만 통과하는 THz 파를 기준 파형으로 하고 모든 픽셀에서의 자료를 분석하여 땅콩의 THz 이미지를 얻을 수 있었다.

그림 6은 투과된 THz 파의 피크 값을 이용하여 얻은 이미지와 (a) 땅콩의 껍질 부분의 확대 이미지 (b) 그리고 껍질

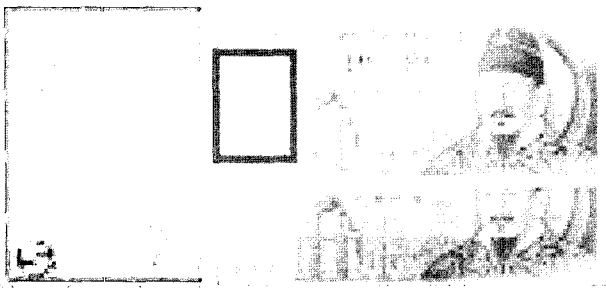


그림 4. 만원권 지폐속에 숨겨진 워터마크의 T-Ray 이미지.

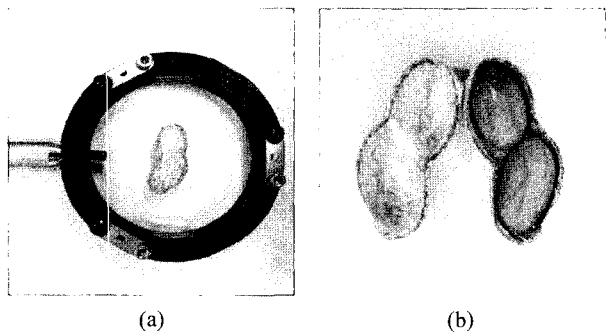


그림 5. 땅콩 이미지 실험에 사용된 실험 시료 (a) 이미징 실험에 사용된 세팅 (b) 절개 장면.

부분에서의 THz 파형의 차이를 일곱 개의 임의로 추출된 데이터를 통해 보여주고 있다. 그림 6(a)에서 보면 땅콩의 배경이 되고 있는 종이만 있는 부분과 양면 테이프가 붙어 있는 부분에서 투과된 THz 파의 피크 값이 확연히 구분되는 것을 볼 수가 있다. 그림 6(c)는 껍질 부분에서 임의로 선택된 일곱 개의 파형을 비교한 것인데 THz 파가 땅콩껍질의 내부(알) 영역에 들어서면서 투과되는 펄스의 피크 값이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 이처럼 측정 물리량의 변화가 분명할수록 더욱 선명한 이미지를 얻을 수 있게 된다.

그림 7은 앞서 기술한 바와 같이 THz 파의 피크 값, 피크

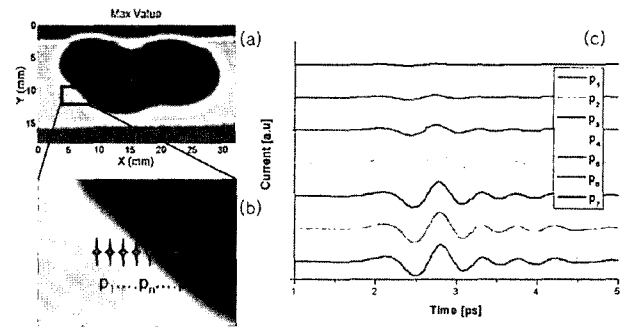


그림 6. (a) 각각의 위치에서 얻은 THz 파 펄스의 피크 값을 이용한 이미지 (b) 부분 확대된 이미지 (c) P₁에서 P₇의 위치에서 얻은 THz 파형.

값들의 차이, THz 파의 위상을 이용하여 이미지를 얻은 결과를 나타낸 것이다. 보는 바와 같이 피크 값을 이용한 이미지와 피크 값의 차를 이용하여 얻은 이미지는 큰 차이를 보이지 않는다. 또한 두 이미지 모두 땅콩 내부의 구조를 명확하게 보여주지는 않는다. 하지만 그림 7(c)에서 보는 바와 같이 위상을 이용하여 얻은 이미지는 땅콩 껍질의 경계는 앞의 두 이미지만큼 명확하지는 않지만 내부의 구조를 어느 정도 보여주고 있다. 또한 위상의 경우 그림 7(c)에서 알 수 있는 바와 같이 실험에서 시료를 고정하기 위해 사용된 테이프의 경계와 유무도 확인이 가능하다. 피크 값을 이용한 이미지(그림 7(a), 그림 7(b))에서 그림 6에서처럼 테이프 경계가 나타나지 않은 것은 이미지를 처리하면서 경계 부분만을 부각시키기 위해 나머지 부분을 같은 값으로 처리하였기 때문이다. 이를 통해 서로 다른 매질을 통과하는 THz 파의 특성 변화(피크 값과 위상의 변화)를 확인할 수 있다.

그림 7에서 나타난 결과를 이용하여 이번에는 땅콩의 경계와 내부 구조를 좀 더 명확하게 보기 위하여 다양한 방법을 이용하여 보았다. 그림 8는 그 결과를 나타낸 것이다. 그림 8(a)는 피크 값과 위상 값의 데이터를 정규화 한 후 더한 합의 이미지를 나타낸 것이고 그림 8(b)는 차의 이미지, 그림

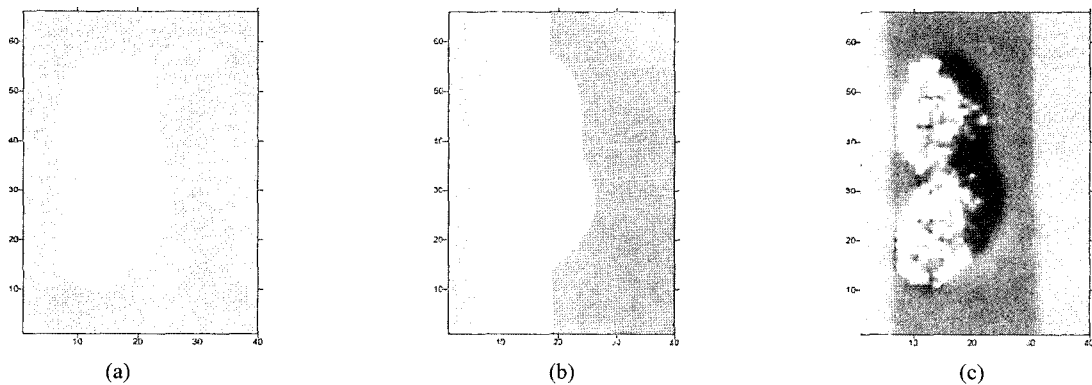


그림 7. 땅콩의 이미지 처리 결과 (a) THz 파의 피크 값을 이용한 이미지 (b) THz 피크 값들의 차이 (최대-최소)를 이용한 이미지, (c) THz 위상 (지연시간) 값을 이용한 이미지.

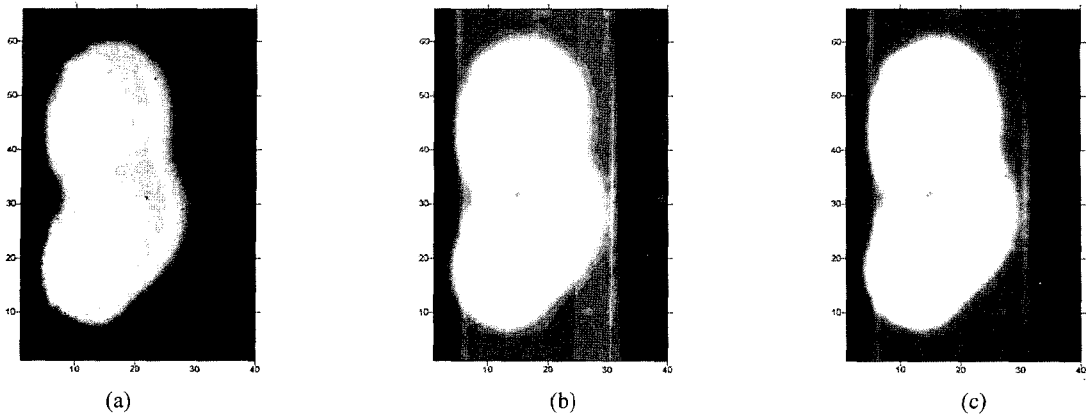


그림 8. 땅콩의 이미지 처리 결과: THz 파의 (a) 피크 값과 위상 값의 합의 이미지 (b) 피크 값과 위상 값의 차의 이미지, (c) 피크 값과 위상 값 차의 절대치를 이용한 이미지.

8(c) 는 그림 8(b) 의 데이터 값의 절대치를 취한 이미지이다. 그림 8을 그림 7와 비교해보면 그림 7의 이미지가 좀 더 실제 이미지에 가깝고 경계의 위치도 좀 더 실제에 근접해 있음을 알 수 있다. 또한 테이프 경계와 내부 모양들에 대한 좀 더 명확한 이미지를 볼 수 있다. 그림 7의 이미지들은 시료를 실제 크기보다 과소평가하는 경향이 있음도 알 수 있다.

위의 두 그림(그림 7과 그림 8) 과 실제 이미지를 비교해서 알 수 있는 또 한 가지 사실은 오른쪽 경계에 가까운 이미지들이 제대로 나타나지 않는다는 것이다. 그 원인으로는 땅콩의 두께가 두꺼운 부분의 수분함량이 많아 THz 파가 투과도가 좋지 않기 때문이라고 생각되어진다. 이로 인해 THz 파의 피크 값이나 위상이 투과도가 낮아지면서 노이즈 값에 근접하게 되면서 땅콩이 존재하는 부분에서의 경계가 명확하지 않고 요철이 있는 것처럼 보인다. 이것은 3.4절에 나타난 데이터 처리 방법을 동원하여 쉽게 해결되어질 수 있다.

3.3 펄스 피크값과 위상값을 조합한 이미징: 마른 멸치

마찬가지 방법으로 또 다른 시료인 마른 멸치에 대해서도 같은 실험을 수행하여 2차원 이미징 실험을 하였다. 그림 9 은 실제 실험에 사용된 광학 이미지 이다. 보이는 바와 같이 멸치는 될 수 있는 한 작고 두께가 얇으며 잘 마른 것을 사용하여 THz 파의 흡수가 적게 되도록 하였다. 이 실험은 땅콩 이미징 실험에서와 같이 THz 펄스는 광정류법을 통해 얻고 광전도 안테나를 사용하여 파형을 측정하였다. 이미지 샘플링에 사용된 면적은 4.25 cm × 1.35 cm인데 역시 땅콩 이미징 실험에서와 같은 조건으로 파형을 측정하여 총 픽셀의 수는 85 × 27 (2295) 개가 된다.

그림 10은 땅콩과 마찬가지로 멸치 시료에 대해서 이미징 실험한 데이터를 이미지 처리 방법을 써서 얻어진 그림이다. 앞서와 같이 THz 파의 피크 값(그림 10(a)), 피크 값들의 차이(그림 10(b)), 그리고 위상(그림 10(c)) 을 이용하여 이미지를 얻은 결과를 나타낸 것이다. 보는 바와 같이 피크 값을 이용한 이미지와 피크 값의 차를 이용하여 얻은 이미지는 큰

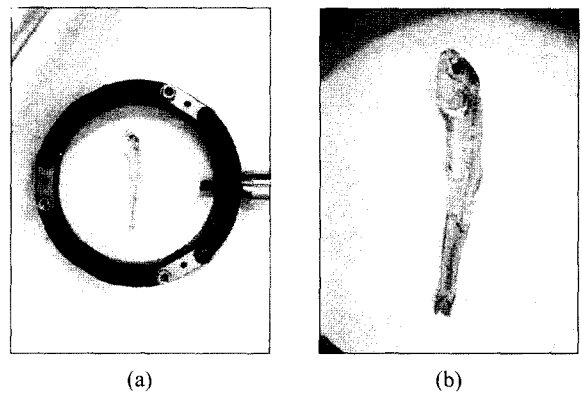


그림 9. 멸치 이미지 실험에 사용된 실물 시료 (a) 이미징 실험에 사용된 세팅 (b) 확대 장면.

차이를 보이지 않고 또한 두 이미지 모두 멸치의 윤곽은 뚜렷하지만 내부의 구조를 명확하게 보여주지는 않는다. 다만 피크 값의 경우가 차의 경우보다는 경계 값이나 테이프를 붙인 자국 등이 더 명확해 보인다. 위상을 이용하여 얻은 이미지는 그림에서 보는 바와 같이 경계와 내부 구조 모두 불명확하지만 내부의 구조가 피크 값의 경우보다는 많은 정보를 담고 있음을 알 수 있다. 이는 땅콩이나 멸치의 경우 모두 비슷한 해상도로 실험이 진행되었지만 멸치의 크기가 땅콩보다 더 작아서 멸치의 내부 구조를 보기 위해서는 좀 더 높은 해상도가 요구되기 때문이다. 하지만 앞서와 같이 위상을 이용한 이미지가 피크 값을 이용한 이미지보다는 좀 더 내부 구조를 보는데 유용함을 알 수 있다.

그림 11는 땅콩의 경우와 같이 피크 값과 위상 값의 조합을 이용한 결과를 나타낸 것이다. 그림 11(a) 는 피크 값과 위상 값의 데이터를 정규화 한 후 더한 합의 이미지를 나타낸 것이고 그림 11(b)는 차의 이미지, 그림 11(c)는 그림 11(b)의 데이터 값의 절대치를 취한 이미지이다. 그림 10과 비교해보면 이미지가 좀 더 실제 이미지에 가까운 것을 알

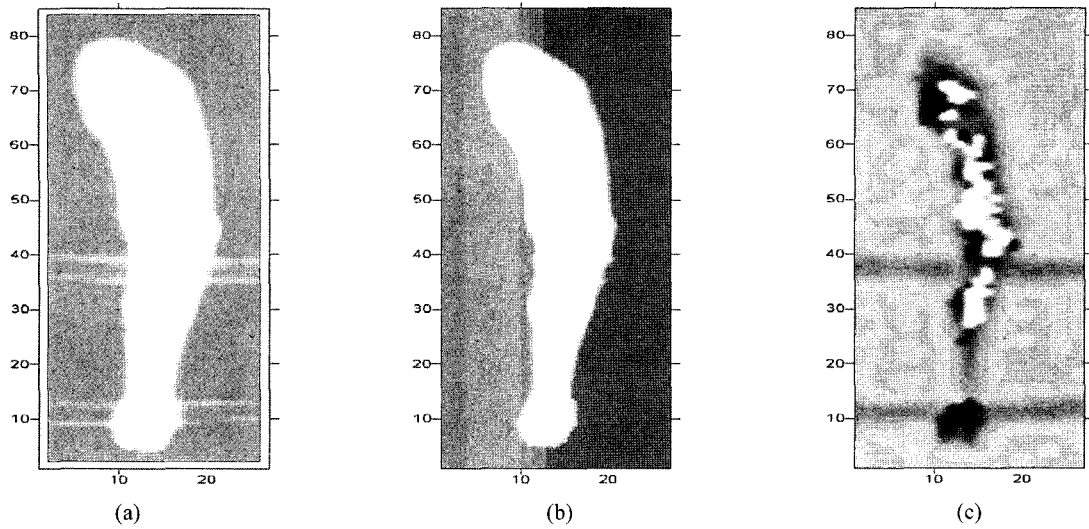


그림 10. 멸치의 이미지 처리 결과 (a) THz 파의 피크 값을 이용한 이미지 (b) THz 피크 값들의 차이 (최대-최소)를 이용한 이미지, (c) THz 위상 (지연시간) 값을 이용한 이미지.

수 있다. 특히 그림 11(b)에 나타난 바와 같이 꼬리 부분의 선명한 해상도가 돋보인다. 아울러 내부 구조도 그림 10의 이미지보다는 한결 나아져 있음을 알 수 있다. 테이핑에 의한 선들도 훨씬 또렷하게 구분된다. 이 두가지 결과로 볼 때 피크 값과 위상 값을 조합함으로써 경계와 내부의 이미지를 좀 더 분명하게 구분할 수 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 테크닉을 사용하여 이미지의 품질을 향상시킬 수 있음을 알 수 있고 실시간 영상을 얻는 경우에도 이러한 방법을 통하여 고밀도의 이미지를 얻을 수 있게 된다. 이 그림에서도 나타나듯이 이미지를 얻기 위한 실험의 해상도의 한계로 인하여 내부의 정확한 이미지를 얻을 수는 없었다.

3.4 이미지 처리를 통한 해상도 향상

햇볕이 눈부시는 야외에서 그림자를 수반하는 높은 농도영역(intensity range)의 이미지를 작은 농도영역의 기록 매체로 기록을 하면 조명도의 변화가 심한 이미지가 얻어지게 된다. 이를 개선하기 위하여, 농도영역을 줄이는 것과 동시에 국부대조(local contrast)를 증가시킬 필요가 있다. 농도 영역을 줄이기 위해서는 조명도를 줄일 필요가 있고 국부대조를 증가시키기 위해서는 반사율(reflectance)을 증가시켜야 한다.

한편, 이미지 $f(x, y)$ 는 조명도 $i(x, y)$ 와 반사율 $r(x, y)$ 의 곱으로, 즉

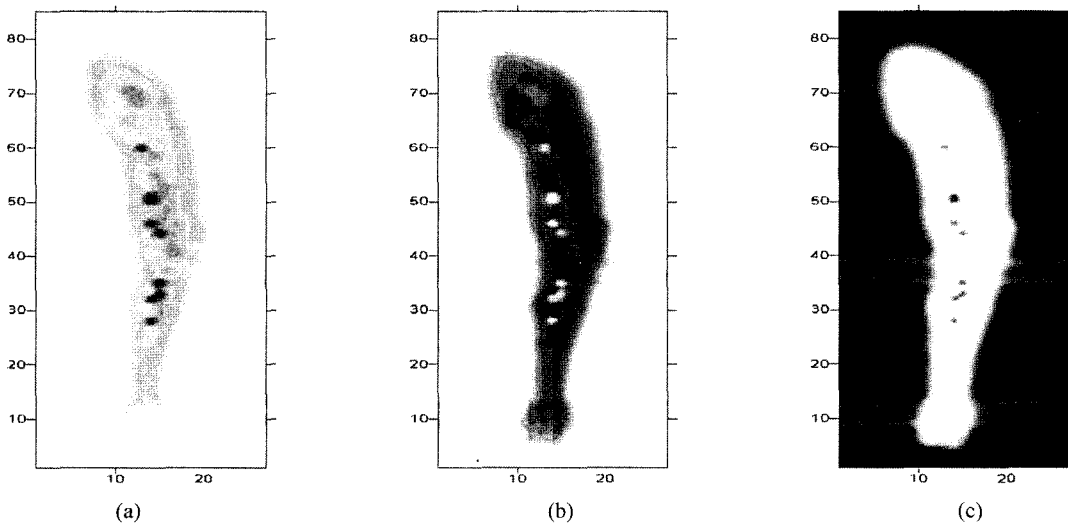


그림 11. 멸치의 이미지 처리 결과: THz 파의 (a) 피크 값과 위상 값의 합의 이미지 (b) 피크 값과 위상 값의 차의 이미지, (c) 피크 값과 위상 값 차의 절대치를 이용한 이미지.

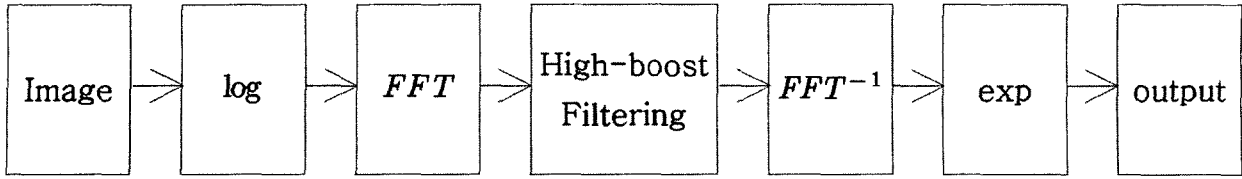


그림 13. 호모몰픽 필터링 기법.

$$f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y)$$

로 표시되기 때문에, 각각의 성분을 별개의 독립적으로 처리할 수 없기 때문에 log 함수를 사용하여

$$\log f(x, y) = \log i(x, y) + \log r(x, y)$$

와 같이 분리하여 각각 별도로 처리하여 밝은 영역과 어두운 영역을 동시에 효과적으로 이미지를 개선하는 호모몰픽 필터링(Homomorphic Filtering) 기법을 그림 12에 나타낸다^[9].

호모몰픽 필터링을 땅콩 이미지에 적용한 결과(그림 13(b)) 피크 값을 이용하여 얻은 이미지(그림 7, 그림 8, 그림 13(a)) 보다 노이즈에 의한 내부의 요철이 사라지고 땅콩 내 외부의 경계선이 뚜렷이 나타나며 땅콩 내부의 균일한 밀도를 깨끗이 확인 할 수 있었다. 물론 경계선 부근의 모자이크성 가공물(artifact)은 향후 이미지 윤곽처리기법을 사용하여 개선하고자 한다.

IV. 결 론

THz 파의 투과에 의한 2차원 이미징 실험과 그 가능성 및 데이터 처리 기법에 대하여 토의하였다. 몇 가지 특징적인 시료들을 이용하여 투과된 THz파의 크기 및 위상을 검출하여 이미지 처리에 이용하였다. 이미지를 얻기 위한 방법으로

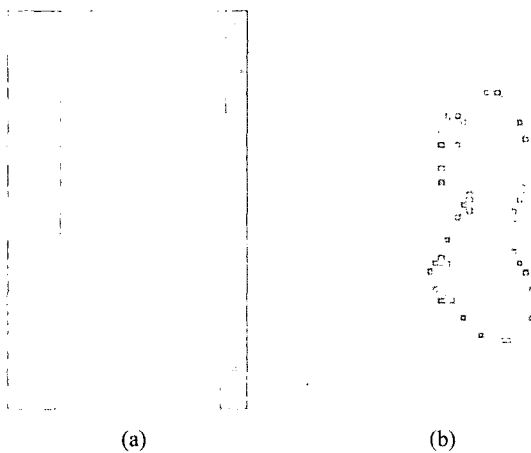


그림 13. (a) 피크 값을 이용한 이미지 (b) 호모몰픽 필터링 기법을 이용한 이미지.

THz파의 최대값, 최대 최소값의 차, 최대값이 나타나는 시간 지연(위상)을 이용하였다. 각 값에 의한 이미지를 비교 분석한 결과 THz 파 펄스의 크기는 주로 경계 값의 검출에 유용하고 위상은 내부 구조를 파악하는데 유용함을 알 수 있었다. 이 결과를 이용하여 경계 값과 아울러 내부 구조를 파악하기 위하여 두 값을 조합하여 더 선명한 이미지를 얻어낼 수 있었다. 또한 호모몰픽 필터링(homomorphic filtering) 기법을 이용하여 이미지의 노이즈를 저감시킨 결과도 제시하였다. 2차원 이미징 실험을 통하여 얻은 결과를 발전시켜 향후 실시간 이미징에도 응용 가능하리라 기대된다.

참고문헌

- [1] 진윤식, "테라헤르츠파와 응용기술", *전기의 세계*, 제 54권, pp. 45-53, 2005.
- [2] B. Ferguson and X. -C. Zhang, "Materials for terahertz science and technology," *Nature Materials*, vol. 1, pp. 26-33. 2002.
- [3] R. M. Woodward, B. E. Cole, V. P. Wallace, R. J. Pye, D. D. Arnone, E. H. Linfield and M. Pepper, "Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue," *Phys. Med. Biol.* vol. 47, pp. 3853-3863, 2002.
- [4] M. C. Kemp, P. F. Taday, B. E. Cole, J. A. Cluff, A. J. Fitzgerald, W. R. Tribe, "Security applications of terahertz technology," *Proc. of SPIE*, vol. 5070, pp. 44-51, 2003.
- [5] 전태인, 김근주, "좁은 간격의 테라헤르츨 다이폴 안테나를 이용한 이진신호의 발생과 검출", *한국광학회지*, 제 13권, pp. 430-433, 2002.
- [6] B. B. Hu and M. C. Nuss, "Imaging with terahertz waves," *Opt. Lett.*, vol. 20, pp. 1716-1718, 1995.
- [7] D. M. Mittleman, R. H. Jacobsen, and M. C. Nuss, "T-ray Imaging," *IEEE Trans. Plasma Science*, vol. 2, pp. 679-692, 1996.
- [8] Q. Wu, T. D. Hewitt, and X. -C. Zhang, "Two-dimensional electro-optic imaging of THz beams," *Appl. Phys. Lett.* vol. 69, pp. 1026-1028, 1996.
- [9] D. M. Mittleman, S. Hunsche, L. Boivin, and M. C. Nuss, "T-ray Tomography," *Opt. Lett.*, vol. 22, pp. 904-906, 1997.
- [10] Z. Jiang and X. -C. Zhang, "T-ray Tomography," *Opt. Lett.*, vol. 23, pp. 1114-1116, 1998.
- [11] S. Hunsche, M. Koch, I. Brener, and M. C. Nuss, "T-ray near-field imaging," *Opt. Comm.*, vol. 150, pp. 22-26, 1998.

- [12] Q. Chen, Z. Jiang, G. X. Xu, and X. -C. Zhang, "Near-field terahertz imaging with a dynamic aperture," *Opt. Lett.*, vol. 25, pp. 1122-1124, 2000.
- [13] H. T. Chen, R. Kersting, and G. C. Cho, "Terahertz imaging with nanometer resolution," *Appl. Phys. Lett.* vol. 83, pp. 3009-3011, 2003.
- [14] K. J. Sibert, H. Q. Rainer Leonhardt, T. Löffler, M. Thomson, T. Bauer, H. G. Roskos, and S. Czasch, "Continuous-wave all-optoelectronic terahertz imaging," *Appl. Phys. Lett.* vol. 80, pp. 3003-3005, 2002.
- [15] B. Ferguson, S. Wang, D. Gray, D. Abbott, and X. -C. Zhang, "Identification of biological tissue using chirped probe THz imaging," *Microelectronics Journal*, vol. 33, pp. 1043-1051, 2002.
- [16] 진윤식, 김근주, 손채화, 정순신, 김지현, 전석기, "광전도안테나에 의한 광대역테라헤르츠파의 발생특성", *한국전기학회 논문지*, 제54권 6호, pp.286-292, 2005.
- [17] 진윤식, 전석기, 김근주, 손채화, 정순신, "ZnTe 결정을 이용한 테라헤르츠파의 발생 및 검출 특성", 한국광학회지 투고중.
- [18] M. Herrmann, M. Tani, and K. Sakai, "Display modes in time-resolved terahertz imaging," *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 39, pp. 6254-6258, 2002.
- [19] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, and S. L. Eddins, *Digital image processing using matlab (2nd Edition)* (Prentice-Hall, USA, 2003).

Improvement of Two-Dimensional Terahertz Image by Digital Image Processing

Chae-Hwa Shon[†], Yun-Sik Jin, Seuk-Gy Jeon, Keun-Ju Kim and Sun-Shin Jung

*Applied electro-physics research group, Korea Electrotechnology Research Institute,
Changwon 641-600, Korea*

Chong Won Yong

*Information and Communication Engineering department,
Kyungnam University, 449 Wolyong-dong Masan Kyungnam, Korea*

[†]E-mail: chshon@keri.re.kr

(Received September 23, 2005, Revised manuscript November 28, 2005)

Two-dimensional (2D) images that are produced by terahertz (THz) irradiation are presented. It is possible to obtain 2D image of various materials by observing the amplitude and the phase of the THz signals which go through them. Better images are produced by combining the amplitude and phase of the signal rather than using only one of these. Homomorphic filtering that is one of the well-known technique of digital image signal processing is effective to reduce the noise signal and can provide better quality images. The results can be applied to real-time imaging afterwards.

OCIS Codes : 070.6020, 110.0110, 230.2090.