소형 CW Sub-THz 시스템을 이용한 테라헤르츠 이미징

Terahertz Imaging Using Compact Continuous Wave Sub-Terahertz System

장진석 · 권일범 · 윤동진 · 서대철

Jin-Seok Jang · Il-Bum Kwon · Dong-Jin Yoon · Dae-Cheol Seo

요 약

전기적인 장치를 기반으로 한 테라헤르츠 송신기(Terahertz Transmitter: Tx)를 이용하여 0.34 THz의 전자기파를 발생시키는 소형 CW sub-THz 이미징 시스템을 제시하였다. Tx에 의해 발생된 0.34 THz의 전자기파는 테라헤르츠 수신기(Terahertz Receiver: Rx)를 이용하여 샘플의 진폭(magnitude)과 위상(phase) 정보를 각각 측정하였다. 이 논문에서는 보다 좋은 이미지 해상도를 얻기 위하여 데이터 수집 시 이미지의 분해능(resolution)에 영향을 미치는 주사 스테이지(scanning stage)의 시간 지연과 스텝 거리를 변수로 두어 다양한 샘플들을 주사하여 그 결과를 측정, 비교하였다. 또한 플라스틱, 종이, 나무 등 다양한 샘플들의 이미징 측정을 통해 테라헤르츠 파의 응용 가능성을 확인하였다.

Abstract

This paper presented compact CW sub-THz imaging system using the terahertz transmitter(Tx) that generates 0.34 THz electromagnetic wave based on electronic device. Using 0.34 THz electromagnetic wave generated by Tx, we measured transmitting terahertz wave magnitude and phase information respectively with terahertz receiver(Rx) based on sub harmonic mixer. This paper measured and compared images of several samples to obtain better imaging results by changing time delay and step distance of scanning stage which affect image resolution. Also, through the imaging measurement of various samples, we were able to assure possibility of application of terahertz wave.

Key words : THz Imaging, CW Sub-THz Wave, Terahertz Transmitter and Receiver, Phase and Magnitude, Image Resolution, Nondestructive Testing

I. 서 론

현재, 테라헤르츠(Terahertz: THz) 전자기파에 대한 응용기술이 전세계적으로 많은 관심을 끌고 있다. THz 파는 일반적으로 0.1 THz에서 10 THz에 이르는 주파수 영역을 나타내고 있으며, 전파와 광파의 가운데에 위치함에 따라 전파가 가지는 투과성과 광파가 가지는 직진성을 동시에 보유한다는 장점을 가지고 있다. 또한, THz 파 에너지는 대부분의 분자들이 가지는 에너지 즉, 비틀림, 진동, 회전 에너지 등과 공명을 잘 일으키므로 물질 고유의 독특한 흡수 스펙트럼을 확인할 수 있다. 이러한 THz 파의 특성을 이용한 응용이 분광학, 이미징 분야에서 최근 활발히 연구되고 있다[1]~[5].

일반적으로 THz 파를 발생시키기 위한 방법으로는 크게 레이저와 같은 광학장치를 이용하는 방법[6],[7],

「본 연구는 교육과학기술부 지원으로 한국표준과학연구원 주요 사업으로 수행되었음(KRISS-10-011-131).」

한국표준과학연구원 안전측정센터(Safety Metrology Center, Korea Research Institute of Standards and Science)

· 논 문 번 호 : 20091009-117

· 교 신 저 자 : 서대철(e-mail : dcseo@kriss.re.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 3월 17일

표 1. CW와 펄스형 THz 시스템의 비교
Table 1. Comparison of CW and pulsed THz systems.

	CW THz system	Pulsed THz system
Cost of system	$50,000~$150,000	$300,000~$1,000,000
System complexity	Low	High
Weight of system	~2 kg	~300 kg
Output power	Low	High
Frequency	<1 THz	1 THz <
Information provided	Transmitted energy	Electric field magnitude, depth of scattering centers, optical path length(transmission time), absorption spectrum, phase, pulse shape
Scanning speed	0.005s per at 1 mm step size(limited by translation stage maximum speed of 0.2 m/s)	20~0.05s per waveform
Date complexity	Low	High

다이오드와 같은 전자장치를 이용하는 방법[8],[9]으로 나뉘는데, 광학적인 장치를 이용하는 경우, 넓은 주파수 스펙트럼을 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 물질 고유의 흡수 스펙트럼(absorption spectrum)[10], 깊이(depth)와 거리 정보(range information)[11] 등과 같은 물체의 광범위한 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 샘플 측정 시 소요 시간이 길며, 규모가 크고 설치 비용이 많이 든다는 단점도 있다. 이러한 단점은 물체의 실시간 비 파괴 검사를 목표로 하는 이미징 연구 분야에서는 치명적인 약점이 된다. Table 1은 광학장치를 이용한 Pulsed THz 시스템과 전자장치를 이용한 CW THz 시스템을 비교한 것으로 두 시스템의 일반적인 차이를 나타내고 있다[7].

이미징을 위한 source로써의 THz 파는 전통적인 마이크로파에 비해 충분히 짧은 파장을 가지기 때문에 공간 분해능이 매우 우수하며, 물과 금속을 제외한 거의 모든 물체를 투과할 수 있다. 또한 현재 의학, 보안 등의 분야에서 다양한 용도로 사용되고 있는 x-ray, r-ray보다는 매우 낮은 에너지를 가지고 있어 인체에 무해하다는 장점을 가진다. 이러한 특성들은 최근 THz 파가 이미징 분야에서 세계적인 관심을 끌고 있는 이유 중의 하나이기도 하다[12],[13].

이 논문에서 우리는 THz 이미징을 통한 물체의 실시간 비 파괴 측정을 목표로 하는 그룹으로써, 많은 연구실에서 주로 사용하고 있는 광학장치를 이용한 거대하고 복잡하며 샘플 스캔 시 많은 측정 시간이 걸리는 광학시스템과 비교하여 이미징 시스템을 소형화하고 간결화 할 수 있을 뿐만 아니라 샘플의 빠른 측정이 가능하고 상대적으로 적은 설치비용이 드는 방법으로 다이오드, 발진기(oscillator), 배율기(multipliers) 등과 같은 전자장치를 이용한 소형 CW sub-THz 이미징 시스템을 제시한다[8],[14].

본 실험에서 사용된 CW sub-THz 이미징 시스템은 그 발생과 검출이 순수한 전자장치를 이용한 것으로, 위상 잠금된 PDRO(Phase Locked Dielectric Resonator Oscillators)와 배율기를 이용하여 0.34 THz의 전자기파를 발생시켰으며, Schottky diode detector로부터 진폭과 위상 신호를 각각 측정하여 비교하였다. 이 논문을 통해 이미지 측정 시 해상도에 영향을 미치는 요인인 주사 스테이지의 시간 지연과 스텝 거리를 조절하여 샘플을 이미징 함으로써 최적의 이미지 측정을 위한 조건을 제시하고 종이상자, 나무상자, 플라스틱 용기 등 다양한 재질의 포장재 내부 이미지 확인을 통해 비파괴 측정 도구로써 THz 이미징 기술의 실용화 가능성을 확인하였다.

Ⅱ. Experimental Setup

Fig. 1은 실험에서 사용된 CW sub-THz 이미징 시스템의 전체 구성도이며, Fig. 2(a), (b)는 Tx와 Rx를 구성하고 있는 장치들의 다이어그램을 나타낸 것으로 Virginia Diode Inc(VDI)사의 구성 요소들을 이용하여 시스템을 구성하였다. Tx의 경우, PDRO에 의해 발생된 14.007 GHz의 초기 전자기파는 3배의 배율을 갖는 RF amplifier를 거쳐 증폭이 된다. 이렇게 증폭된 42.021 GHz의 전자기파를 주파수 체배기(frequency multiplier)를 이용하여 수동적으로 주파수를 올리게 되는데, 이때 주파수가 올라가는 만큼 파워가 떨어진다는 단점이 있다. RF amplifier에서 나오는 42.021 GHz의 전자기파는 다시 2배의 배율을 갖는 주파수 체배기 3개를 거치면서 8배로 주파수가 증폭되어 최종 336.168 GHz(약 0.34 THz), 17 mW의 출력을 가지는 전자기파가 된다. Fig. 2(b)는 Rx의 구성을 나타낸 것으로 높은 주파수의 RF 신호는 직접 검출하는 것이 어렵기 때문에 mixer를 이용하여 다루기 쉬운 낮은 주파수의 신호로 변환을 한다. 먼저 Tx와 마찬가지로 PDRO에 의해 발생된 14 GHz의 전자기파는 2배율의 RF amplifier에 의해 28 GHz로 증폭된 후 각각의 2배율, 3배율의 주파수 체배기를 거치면서 최종 168 GHz가 된다. 이 전자기파는 LO (Local Oscillator)로 사용하는 SHM(Sub Harmonic Mixer)에 의하여 168 MHz의 IF(Intermediate Frequency)로 변조됨으로써 시스템이 최종적으로 336.168 GHz의 RF 신호를 안정적으로 검출할 수 있는 수신기가 된다. 이렇게 Tx에 의해 발생된 파장 약 0.9 mm의 0.34 THz 파는 Rx에 의해 진폭과 위상에 대한 정보로 나뉘어져 lock-in 증폭기로 읽고, 그 데이터를

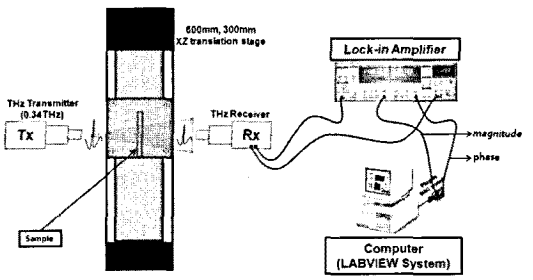


그림 1. CW sub-THz 이미징 시스템의 개략도
Fig. 1. Schematic of CW sub-THz imaging system.

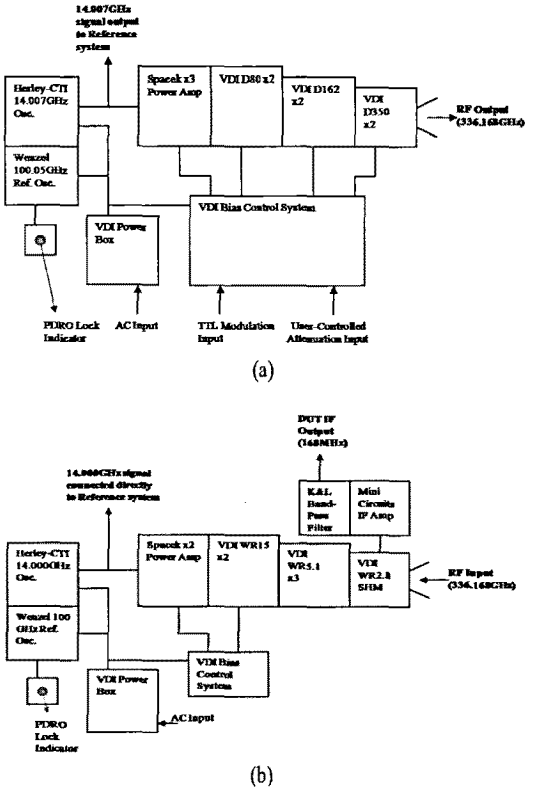


그림 2. (a) THz 송신기와 (b) THz 수신기의 다이어그램
Fig. 2. Diagram of (a) THz transmitter(Tx), (b) THz receiver(Rx).

컴퓨터에 각각 저장하였다. Tx의 최대 출력은 17 mW이며, Rx의 mixer 변환 손실은 10.5 dB이다. 시스템의 동작 범위(dynamic range)는 94 dB이며, 최대 104 dB까지 증가한다. Fig. 3(a), (b)는 Lock-in 증폭기에서 측정한 Tx-Rx의 안정도를 나타낸 그림으로 시간 변화에 따른 진폭과 위상의 변동률을 보여준다. 진폭의 경우, 시간이 지남에 따라 0.005 dBm 정도의 변동률을 나타내었고, 위상은 3~5 deg 정도의 변동률을 나타낸다. 이는 실험에서 사용된 Tx-Rx가 sub-THz 이미징 시스템을 구성하는데 필요한 높은 출력과 안정성을 가지고 있음을 보여준다.

샘플은 XZ translation stage에 고정시켜 이동시켰고, 이미지는 샘플을 point by point 방식으로 주사하여 얻었다.

Ⅲ. Results and Discussions

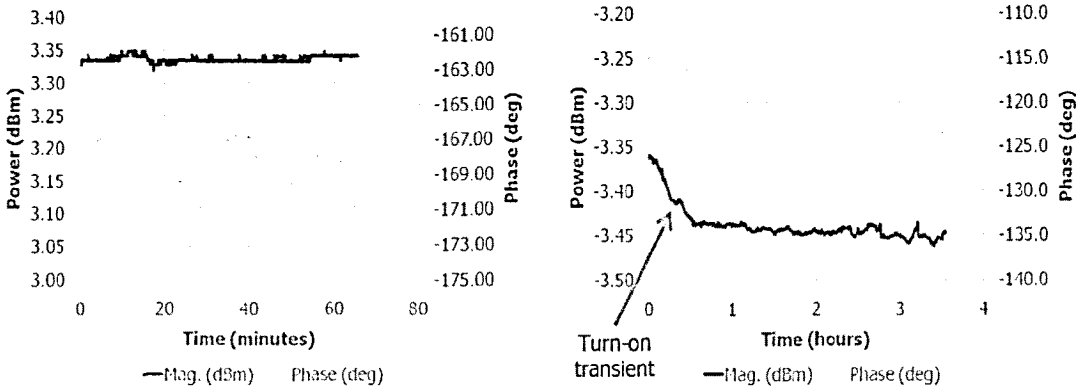


그림 3. (a) 분에 따른 Tx-Rx의 0.34 THz 안정도, (b) 시간에 따른 Tx-Rx의 0.34 THz 안정도
Fig. 3. (a) Full Tx-Rx 0.34 THz stability with minutes, (b) Full Tx-Rx 0.34 THz stability with hours.

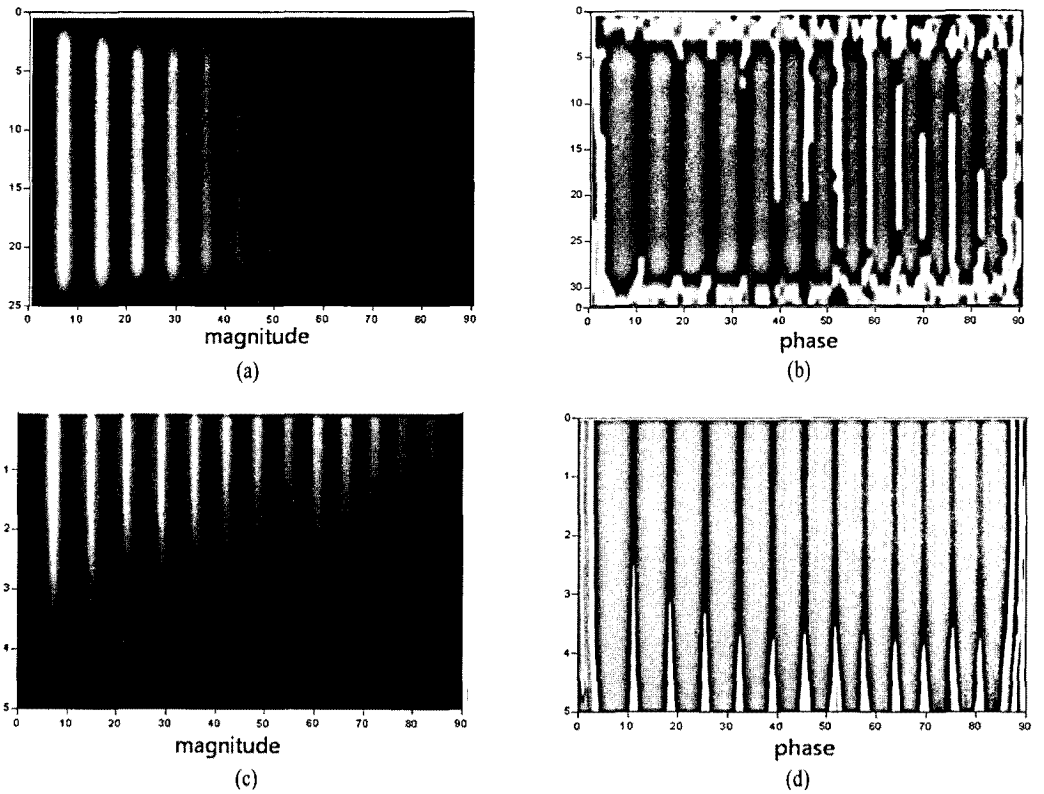


그림 4. 알루미늄 슬릿의 THz 이미지: 스텝 거리 1 mm의 (a) 진폭과 (b) 위상 이미지, 스텝 거리 0.1 mm의 (c) 진폭 (d) 위상이미지
Fig. 4. THz image of aluminum slit: (a) magnitude and (b) phase image of step distance 1 mm, (c) magnitude and (d) phase image of step distance 0.1 mm.

3-1 THz Imaging 해상도

알루미늄 슬릿을 이용하여 스텝 거리에 따른 이미지를 측정하였다. 각 슬릿 사이의 간격은 5 mm로 일정하게 유지한 상태에서 슬릿의 폭을 0.5~3 mm로 다양하게 한 후 스텝 거리를 각각 1 mm, 0.1 mm

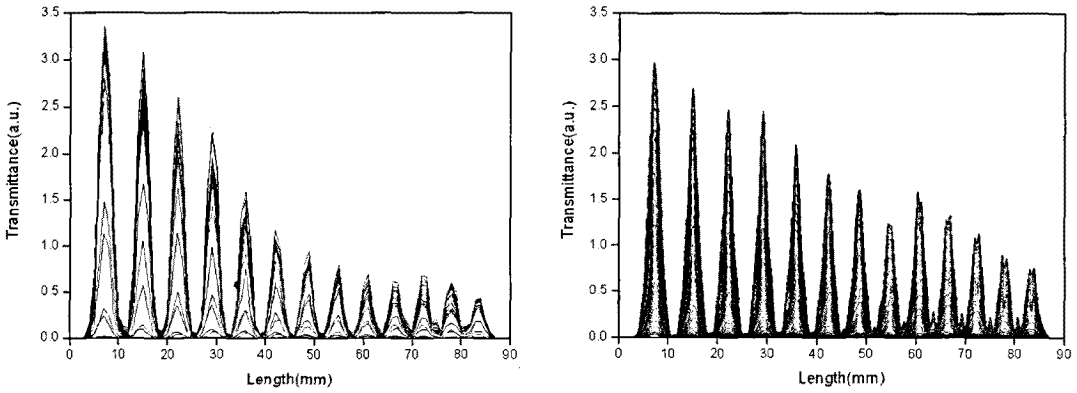


그림 5. 알루미늄 슬릿의 투과도: (a) 스텝 거리 1 mm와 (b) 스텝 거리 0.1 mm
Fig. 5. Transmittance of aluminum slit: (a) step distance 1 mm and (b) step distance 0.1 mm.

로 하여 0.34 THz 파를 투과시켜 나타낸 이미지를 Fig. 4(a)~(d)에 나타내었다. 스텝 거리 1 mm로 측정한 Fig. 4(a), (b)의 경우, 샘플 전체의 진폭과 위상에 대한 이미지 측정 결과를 나타내었고, 스텝 거리 0.1 mm로 측정한 Fig. 4(c), (d)는 슬릿의 일부분만 측정하여 결과를 나타내었다. 각 측정 결과에서 알 수 있

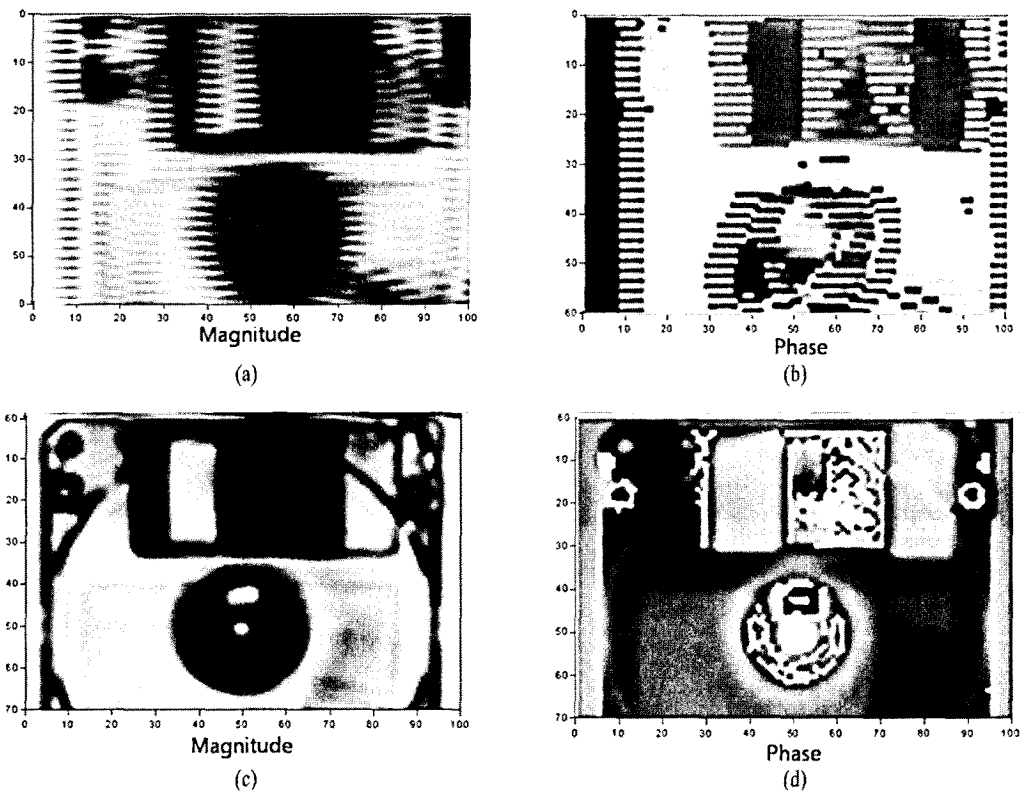


그림 6. 플로피디스크의 THz 이미지: 시간 지연 0초의 (a) 진폭과 (b) 위상 이미지, 시간 지연 1.5초의 (c) 진폭과 (d) 위상 이미지
Fig. 6. THz image of floppy disk: (a) magnitude and (b) phase image of time delay 0 sec, (c) magnitude and (d) phase image of time delay 1.5 sec.

듯이 스텝 거리 1 mm와 0.1 mm의 진폭과 위상 이미지 모두 각각의 슬릿에 대한 식별이 가능함을 확인하였으며, 스텝 거리에 따른 해상도의 차이도 확인할 수 있었다. 각 슬릿의 모서리 부분에서 나타난 퍼짐현상은 THz 파의 회절에 의한 것이다.

Fig. 5(a),(b)는 알루미늄 슬릿의 투과도 그래프를 나타낸 것으로, 스텝 거리 0.1 mm일 때의 투과도 그래프가 스텝 거리 1 mm일 때와 비교하여 다양한 폭의 슬릿을 THz 파가 투과함에 있어서 매우 안정된 정렬상태를 나타내고 있음을 보여준다. 이러한 투과 그래프 정렬상태의 차이가 이미지의 해상도에 상당한 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

또한, 플로피디스크와 신용카드에 0.34 THz 파를 투과시켰을 때 샘플 각 부분의 흡수율 차이에 따라 THz 파의 투과율을 확실하게 구별할 수 있었으며, 데이터 수집에 있어서 주사 스테이지의 시간 지연의 차이가 이미지의 해상도에 상당한 영향을 미치는 것을 확인하였다. Fig. 6(a)~(d)와 Fig. 7(a)~(d)는 데이터 수집 시 시간 지연을 각각 달리 했을 때의 플로피디스크와 신용카드의 THz 이미지를 진폭과 위상정보로 나누어 나타낸 것이다. Fig. 6(a), (b)에서 나타난 것처럼 시간 지연이 0초인 경우, 샘플에 대한 형태는 식별할 수 있으나 이미지 분해능이 떨어지는 반면, 시간 지연을 1.5초로 했을 때의 이미지는 Fig. 6(c), (d)와 같이 0초에 비해 훨씬 선명한 영상을 얻을 수 있었다. 신용카드도 이와 마찬가지로 시간 지연을 0초로 측정한 Fig. 7(a), (b)의 이미지와 비교해서, 시간 지연을 1.5초로 측정했을 때가 Fig. 7(c), (d)에서 보이는 것과 같이 카드에 내재된 칩과 테두리, 금속활자 부분의 이미지 측정 결과에서 뛰어난 분해능을 나타냄을 확인할 수 있다.

실험에서 사용된 Tx-Rx 시스템은 그동안 다른 그

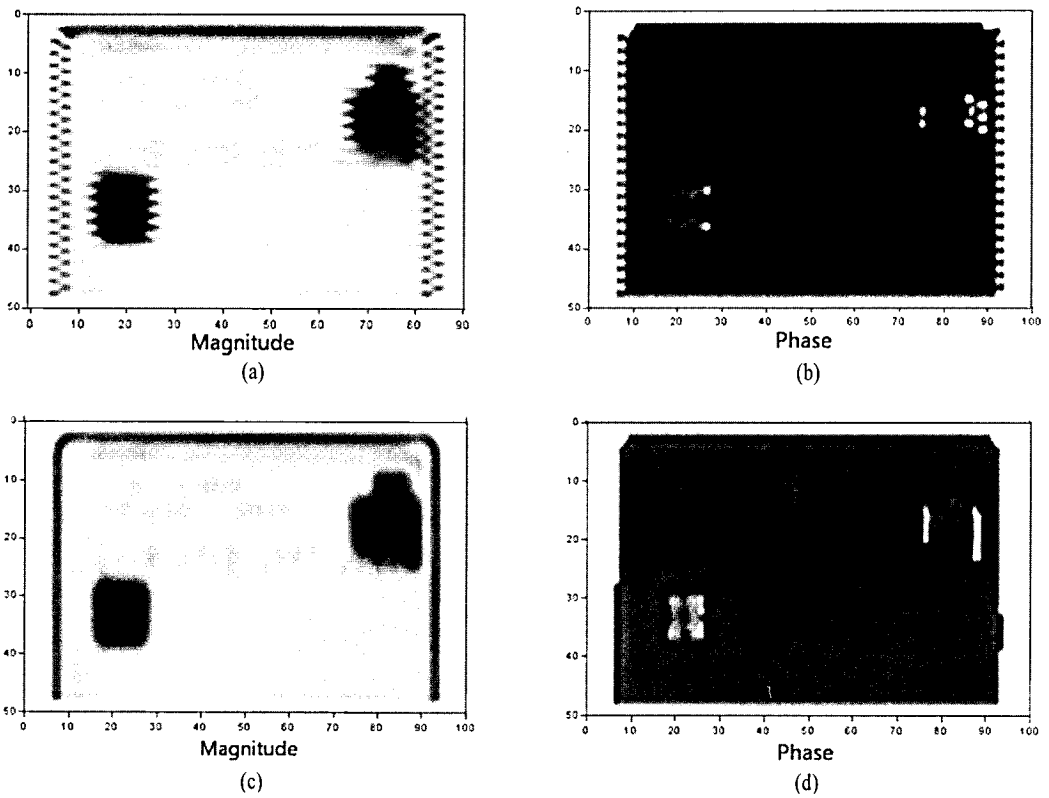


그림 7. 신용카드의 THz 이미지: 시간 지연 0초의 (a) 진폭과 (b) 위상 이미지, 시간 지연 1.5초의 (c) 진폭과 (d) 위상 이미지

Fig. 7. THz image of credit card: (a) magnitude and (b) phase image of time delay 0 sec, (c) magnitude (d) phase image of time delay 1.5 sec.

룹에서 주로 진폭 또는 위상에 대한 한가지 정보만을 이용하여 이미징 실험을 실시한 것과는 달리 진폭과 위상 신호를 동시에 측정하여 그 결과를 이미지로 나타내었다. 진폭에 대한 정보는 주로 경계 값의 검출에 유용하고, 위상에 대한 정보는 물체의 내부 구조를 파악하는데 유용하다는 결론[15]이 실험적으로 얻어진 바 있듯이 Tx-Rx 시스템을 이용하여 동시에 얻어진 진폭과 위상 정보는 앞으로 실시될 실시간 CW THz Imaging의 연구에 있어서 다양한 샘플들의 보다 정확하고 심도 있는 측정을 가능하게 할 것

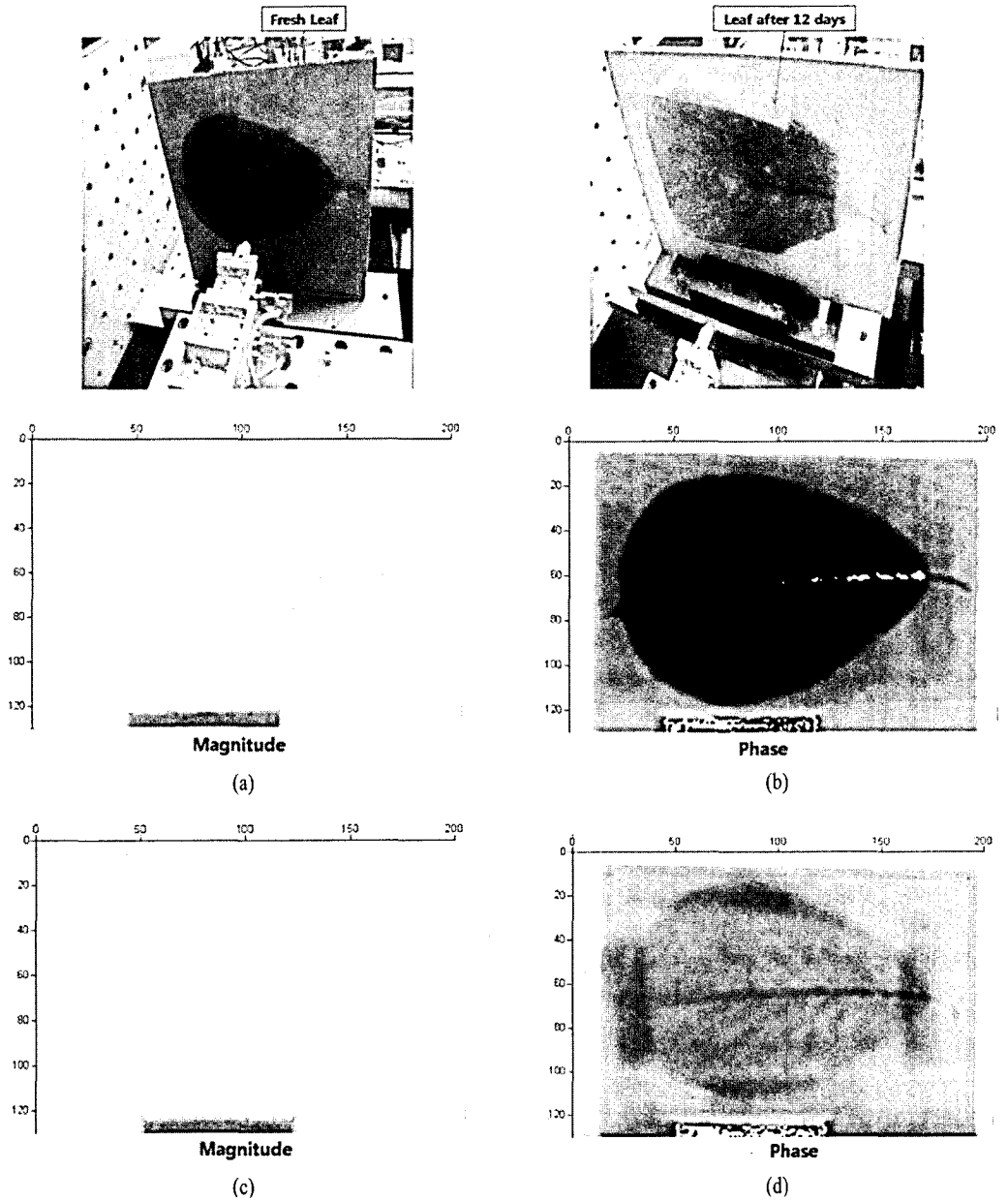
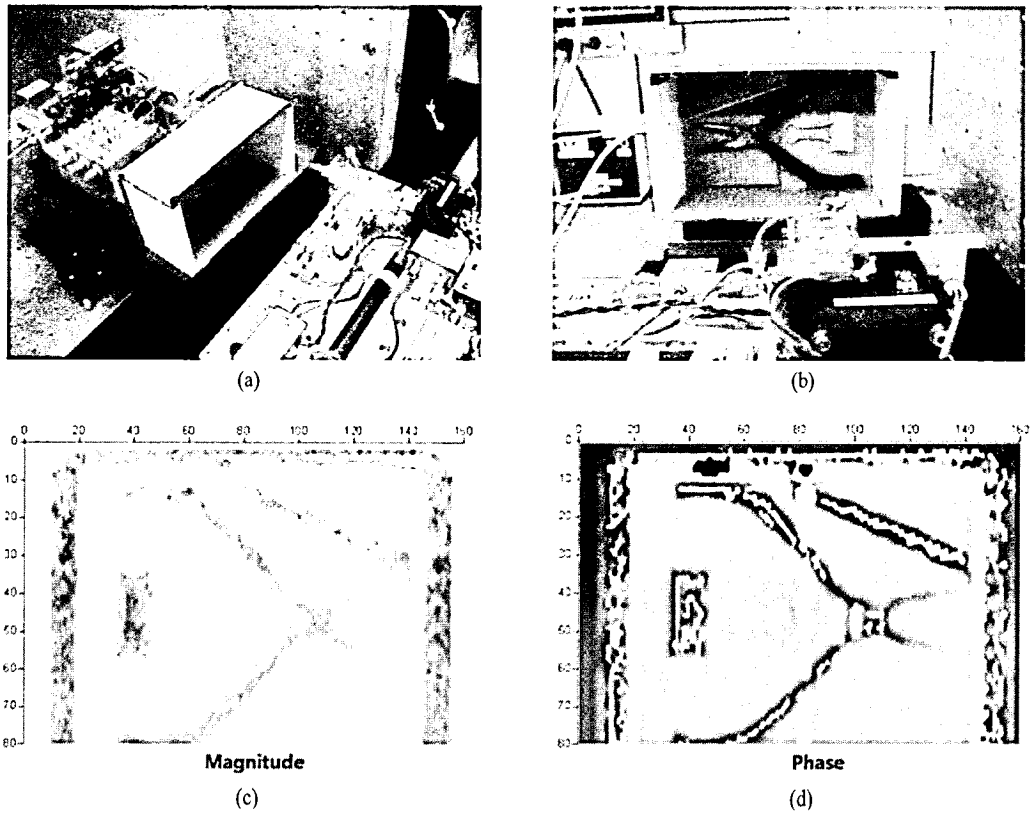


그림 8. 나뭇잎의 THz 이미지: 신선한 나뭇잎의 (a) 진폭과 (b) 위상 이미지, 12일 경과한 나뭇잎의 (c) 진폭과 (d) 위상 이미지

Fig. 8. THz image of a leaf: (a) magnitude and (b) phase image of fresh leaf, (c) magnitude and (d) phase image of a leaf after 12 days.



(a) (b) (c) (d)

그림 9. 덮개가 없을 때의 종이상자 내부의 THz 이미지
Fig. 9. THz image of paper box without cover.

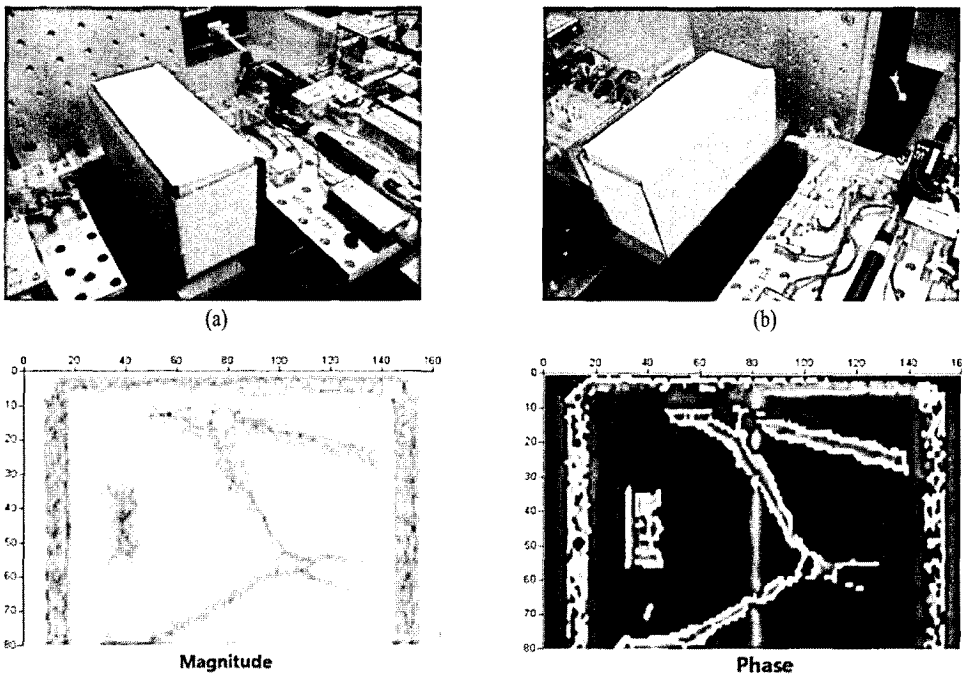
이다.

3-2 수분함유량에 따른 나뭇잎의 이미지 변화

THz 파는 수분에 대한 흡수가 강하기 때문에 수분의 함유량에 따른 생체 조직이나 세포의 변화를 쉽게 관찰할 수 있다. 조직 세포의 경우, 정상일 때와 암이 발생했을 때의 수분의 차이는 확연히 다른 차이를 나타낸다. 암이 발생한 조직 세포는 정상세포보다 많은 수분을 함유하고 있어 THz 파의 많은 흡수를 보일 것이다. 그 예로 나뭇잎의 수분 함유량에 따른 THz 파 이미지 측정을 실시해 보았다. 우선 나뭇가지에서 나뭇잎을 확보한 후 그 무게를 측정한 결과, 나뭇잎의 무게는 3.10 g을 나타내었고, 사진에 나타낸 것과 같이 나뭇잎을 고정시켜 THz 파를 투과 시킨 후 이미지를 측정하였다. 그리고 같은 샘플을 12일 경과한 후 무게를 측정하였고, 1.13 g의 무게를 나타내었다. 이는 시간이 경과함에 따라 수분이 빠져나가 나타난 결과로 Fig. 8에 그 차이를 이미지로 나타내었다. 그림에 나타난 것과 같이 많은 수분을 함유하고 있을 때의 나뭇잎은 수분의 함유량에 따라 잎사귀와 줄기 부분이 선명하게 구분되는 반면, 오랜 시간이 지나 수분이 감소된 나뭇잎은 그 형태가 희미하게 나타났다. 만약, 나뭇잎에 함유된 수분이 모두 빠져나간다면 나뭇잎은 형태를 구분할 수 없게 될 것이다. 이와 같이 THz 파는 수분에 매우 민감한 반응을 보이므로 의학 분야에서 생체조직의 암이나 화상 등의 질환을 진단하는데 유용하게 사용될 것이다.

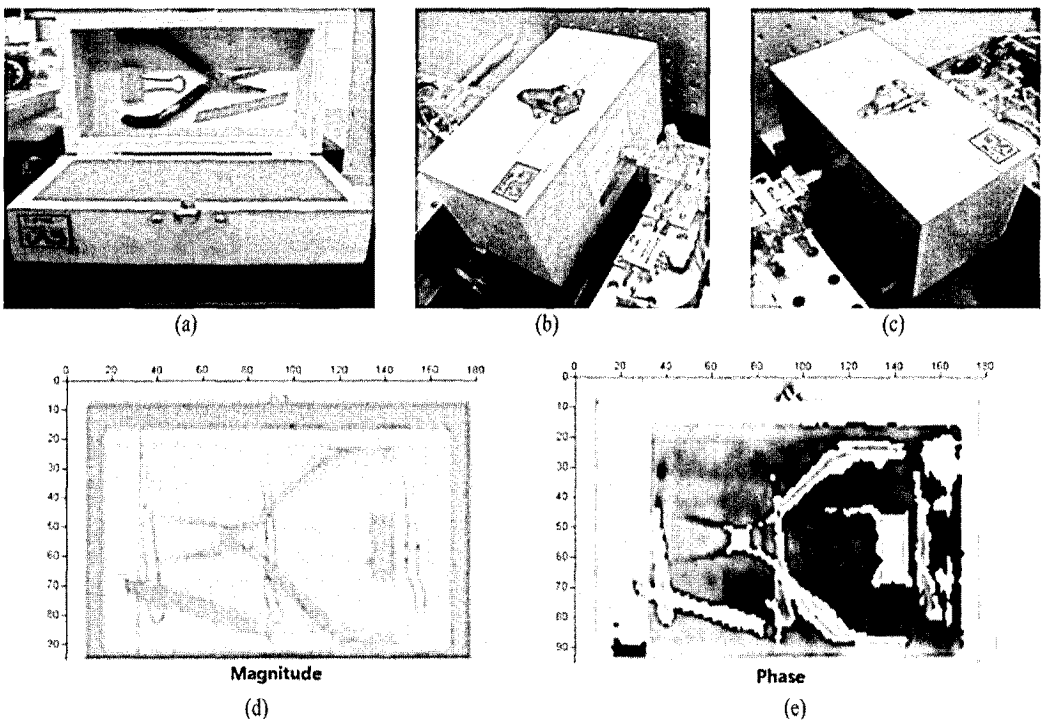
3-3 감춰진 위험물 확인을 위한 이미징 실험

최근 공항이나 공공장소에서의 보안 검색을 위한 기술 연구가 전 세계적으로 활발히 수행되고 있는 가운데 THz 이미징 기술이 새로운 대안으로 떠오르고 있다. THz 파는 인체에 무해하며 물과 금속을 제



(a) (b) (c) (d)

그림 10. 덮개가 있을 때의 종이상자 내부의 THz 이미지
Fig. 10. THz image of paper box with cover.



(a) (b) (c) (d) (e)

그림 11. 나무상자 내부의 THz 이미지
Fig. 11. THz image of wood box.

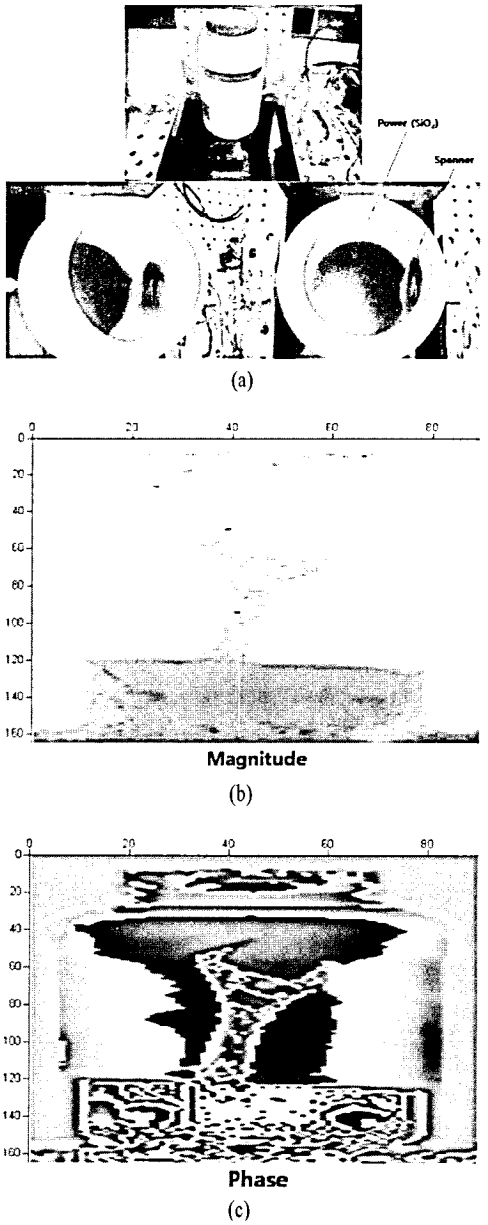


그림 12. 플라스틱통 내부의 THz 이미지
Fig. 12. THz image of plastic bottle.

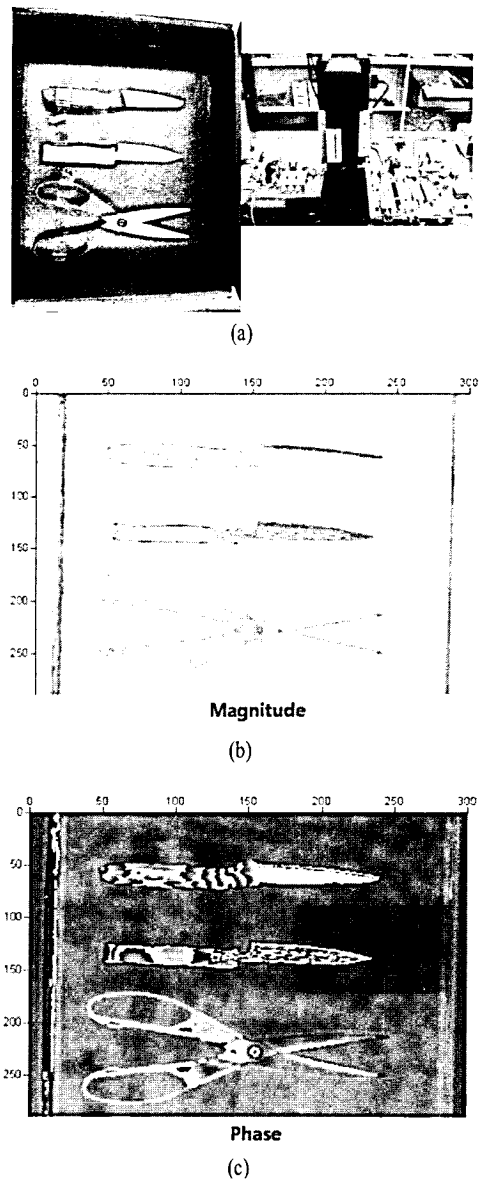


그림 13. 숨겨진 무기의 THz 이미지
Fig. 13. THz image of concealed weapons.

외한 거의 모든 물질을 투과할 수 있기 때문에 감춰진 위험물의 확인을 가능하게 한다. 그림 9~13들은 각각 다른 종류의 포장재 외부를 이미징하여 포장재 내부 물체에 대한 이미지를 확인한 것이다. Fig. 9와 Fig. 10은 덮개가 있을 때와 없을 때의 종이상자를 이미징하여 상자 내부를 확인한 결과로 두 실험 모두 내부 물체를 확실히 구별할 수 있었다. Fig. 11과 Fig. 12는 나무상자와 플라스틱 통 내부를 각각 이미징 실험한 결과로 이 또한 종이상자의 이미징 결과와 마찬가지로 포장재 내부의 물체를 정확하게 구별할 수 있었다. 마지막으로 Fig. 13은 두꺼운 종이상자 내부에 금속 나이프, 세라믹 나이프, 가위 등의 위험물을 위치한 후 내부를 이미징 측정한 결과이다. 그림에 나타난 것처럼 THz 파는 종이, 플라스틱, 세라믹 등의 비금속 물체에 대한 투과성이 뛰어남을

보여주는 동시에 다양한 물질의 포장재 내부를 확인할 수 있는 유용한 도구임을 보여준다.

Ⅳ. 결 론

0.34 THz의 전자기파를 발생시키는 THz 송신기와 이를 검출하는 THz 수신기를 이용하여 소형 CW THz 이미징 시스템을 구성하여 샘플들의 2차원 이미지를 측정하였다. 실험을 통해 이미지 해상도와 관련된 주사 스테이지의 시간 지연과 스텝 거리를 변수로 두어 샘플 이미지 측정을 한 결과, 데이터 수집 시 시간 지연이 길수록, 그리고 스텝 거리가 짧을수록 이미지의 해상도가 훨씬 증가함을 확인하였다. 또한 수분변화에 따른 나뭇잎의 이미지 변화와 종이상자, 나무상자, 플라스틱 통 등에 감춰진 위험물 확인을 위한 이미징 실험 결과, THz 이미징 기술이 바이오, 의학, 보안 등 다양한 분야에서 비파괴 영상기술로써 응용이 가능한 도구임을 확인할 수 있었다. 그러나 소형 CW THz 이미징 시스템의 현장에서의 직접적인 실용화를 위해서는 현재의 시스템과 비교하여 실시간 영상화가 가능할 정도의 빠른 스캔 속도와 간편한 이동을 위한 발전된 소형화·간결화가 이루어져야 할 것이다.

본 실험의 결과는 CW THz imaging 측정에서 필요한 최적의 이미징 조건을 제시하기 위한 기초실험이며, 실험에서 사용된 소형 CW sub-THz 이미징 시스템은 앞으로 진행될 의료, 보안, 우주, 통신 등 다양한 분야에서의 빠르고 쉬운 실시간 THz 비파괴 검사를 실현하는데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] R. A. Cheville, D. Grischkowsky, "Far-infrared terahertz time-domain spectroscopy of flames", *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 15, p. 1646, 1995.

[2] C. Ronne, P. O. Astrand, and S. R. Keiding, "THz spectroscopy of liquid H_2O and D_2O", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 82, no. 14, p. 2888, 1996.

[3] J. S. Jang, T. I. Jeon, Y. J. Lee, J. H. Yoon, and Y. J. Lee, "Characterization of α-hydroquinone and β-hydroquinone clathrates by THz time-domain spectroscopy", *Chem. Phys. Lett.*, vol. 468, no. 1-3, pp. 37-41, 2009.

[4] Q. Song, Y. Zhao, A. R. Sanchez, C. Zhang, and X. Liu, "Fast continuous terahertz wave imaging system for security", *Opt. Comm.*, vol. 282, no. 10, pp. 2019-2022, 2009.

[5] Y. Oyama, L. Zhen, T. Tanabe, and M. Kagaya, "Sub-terahertz imaging of defects in building blocks", *NDT&E Int.*, vol. 42, no. 1, pp. 28-33, 2009.

[6] Martin van Exter, D. Grischkowsky, "Characterization of an optoelectronic terahertz beam system", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.*, vol. 38, no. 11, pp. 1684-1691, Nov. 1990.

[7] N. Karpowicz, H. Zhong, J. Xu, K. I. Lin, J. S. Hwang, and X-C Zhang, "Comparison between pulsed terahertz time-domain imaging and continuous wave terahertz imaging", *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 7, pp. 293-299, 2005.

[8] N. Karpowicz, H. Zhong, C. Zhang, K. I. Lin, J. S. Hwang, J. Xu, and X-C Zhang, "Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 5, 054105, 2005.

[9] A. Dobroiu, M. Yamashita, Y. N. Ohshima, Y. Morita, C. Otani, and K. Kawase, "Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator", *Appl. Opt.*, vol. 43, no. 30, pp. 5637-5646, 2004.

[10] Y. Chen, H. Liu, Y. Deng, D. Veksler, M. Shur, and X-C. Zhang, "Spectroscopic characterization of explosives in the far infrared region", *SPIE Defense and Security Symp.* #5411-2, Apr. 2004.

[11] K. McClatchey, M. T. Reiten, and R. A. Cheville, "Time resolved synthetic aperture terahertz impulse imaging", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 79, no. 27, pp. 4485-4487, 2001.

[12] S. Nakajima, H. Hoshina, M. Yamashita, and C. Otani, "Terahertz imaging diagnostics of cancer tissues with a chemometrics technique", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 4, 041102, 2007.

[13] D. T. Petkie, C. Casto, F. C. D. Lucia, S. R. Mu-

rrill, B. Redman, R. L. Espinola, C. C. Franck, E. L. Jacobs, S. T. Griffin, C. E. Halford, J. Reynolds, S. O'Brien, and D. Tofsted, "Active and passive imaging in the THz spectral region: phenomenology, dynamic range, modes, and illumination", *J. Opt. Soc. Am. B.*, vol. 25, no. 9, pp. 1523-1531, 2008.

[14] A. R. Sanchez, N. Karpowicz, J. Xu, and X-C. Zhang, "Damage and defect inspection with terahertz waves", *The 4th International Workshop on Ultrasonic and Advanced Methods for Non-destructive Testing and Material Characterization*, Dartmouth. MA. USA, Jun. 2006.

[15] 손채화, 진윤식, 전석기, 김근주, 정순신, "데이터 처리를 통한 테라헤르츠(THz) 파의 2차원 이미지 개선", *Hankook Kwanghak Hoeji*, 16(6), 2005년 12월.

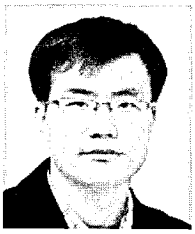
장 진 석

2006년 2월: 한국해양대학교 전기전자공학부 (공학사)
2009년 2월: 한국해양대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2009년 3월~현재: 한국표준과학연구원 안전측정센터
[주 관심분야] 테라헤르츠 이미징, 분광법

윤 동 진

1983년 2월: 부산대학교 기계설계학과 (공학사)
1985년 2월: 부산대학교 기계공학과 (공학석사)
1995년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
1986년 7월~현재: 한국표준과학연구원 안전측정센터
[주 관심분야] 비파괴평가, 보안검색, 음향방출

권 일 범



1987년 2월: 한국항공대학교 항공기계공학과 (공학사)
1989년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
1989년 2월~1992년 8월: 포항산업과학연구원 연구원
1997년 2월: 한국과학기술원 항공우주공학과 (공학박사)
1997년 3월~현재: 한국표준과학연구원 안전측정센터
[주 관심분야] 광섬유 센서, 구조 안전 모니터링

서 대 철

1993년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학사)
1995년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
2002년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
2004년 9월~현재: 한국표준과학연구원 안전측정센터
[주 관심분야] 테라헤르츠 이미징, 광섬유 센서