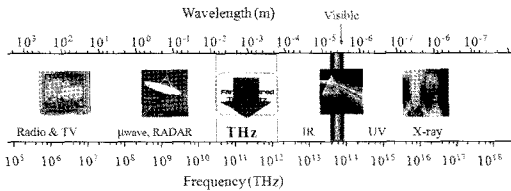


# Terahertz Waveguide Spectroscopy

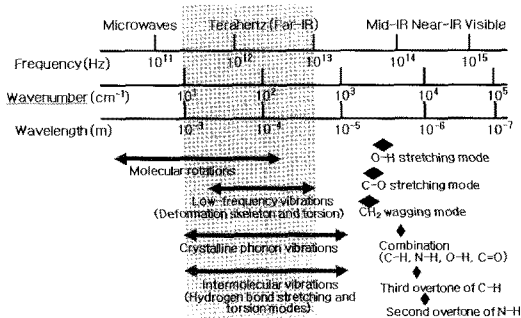
전태인 (한국해양대학교)

## I. 서론

테라헤르츠(Terahertz : THz ( $10^{12}$ Hz))파는  $1\text{THz}=0.3\text{mm}=33.3\text{cm}^{-1}=4.1\text{meV}$ 의 값을 갖는 <그림 1>과 같이 마이크로파와 원적외선의 중간에 위치하는 전자기파로 과거, 발생과 검출



<그림 1> 전자기파의 종류에 따른 파장과 주파수 스펙트럼



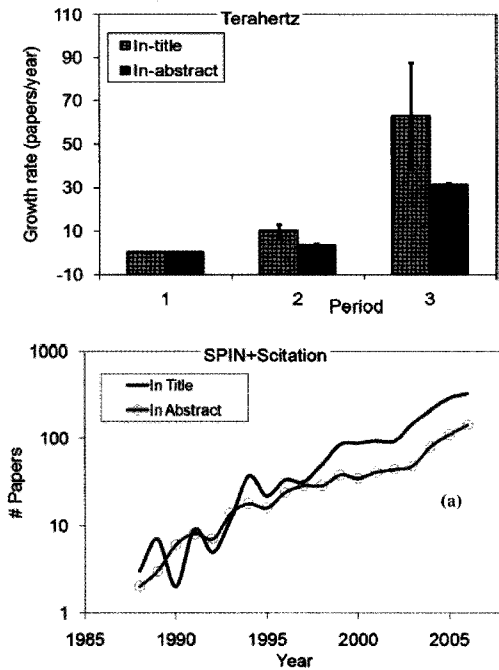
<그림 2> 화학성분들의 운동에 관련된 주파수 대역

의 기술적 한계로 전자기파의 영역 중 인류가 유일하게 정복하지 못한 영역으로 과학자들 사이에서는 “THz Gap” 이라고 불리어 왔다.

1980년대 펄스 레이저의 발전과 더불어 광전도성 chip의 개발로 THz파의 발생과 검출이 이루어져 최근 비약적으로 관련 연구가 이루어지고 있다.

<그림 2>는 여러 가지 화학성분들의 THz 주파수 스펙트럼에서의 관련된 운동을 표시한 그림이다. 그림에서와 같이 분자간 진동이나 회전 그리고 포논 진동 등이 THz 영역에 해당되어 많은 화학 물질들의 특성 변화가 THz 영역에서 잘 나타난다. 따라서 많은 과학자들이 각종 물질에 대한 THz 영역에서의 특성변화에 많은 관심을 가지고 있다.

2008년 IEEE에서 발표한 자료에 따르면 <그림 3>과 같이 THz 과학 기술 동향을 발행된 논문 (leading journals)의 title과 abstract를 이용하여 laser, microwave, Raman, infrared와 비교 분석하였다<sup>[1]</sup>. 이 때, 비교분야의 논문 발행 패턴을 분석한 결과, 다음과 같은 4단계(Discovery, Acceptance, Adoption, and Maturity)로 구분할 수 있으며 현재 THz는 Acceptance 단계로



〈그림 3〉 SCI 논문(leading journals) 분석 자료

다른 분야의 응용 보다는 THz 기술 자체에 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다. 하지만, 최근 다른 분야로의 응용이 활발하여지는 adoption 단계로의 진입 가능성도 보여주고 있어 더 늦기 전에 THz의 기초 연구에 매진하여 앞으로 커지게 될 THz 응용 시장을 선점하여야 할 것이다.

IEEE는 기초 보다 응용에 관한 논문들이 주로 게재되는 학술지이다. 기초 연구가 주로 게재되는 논문집을 포함하면 훨씬 더 많은 연구가 이루어지고 있다.

1980년대 최초의 THz 연구가 이루어진 후 THz 파를 이용하여 실시된 응용연구가 분광학(spectroscopy) 분야이다. 이후 THz 분광학은 과학의 전분야로 급속히 확산되어 THz 이미지를 포함한 많은 연구가 이루어졌다.

한편 THz waveguide 연구는 1986년 최초의

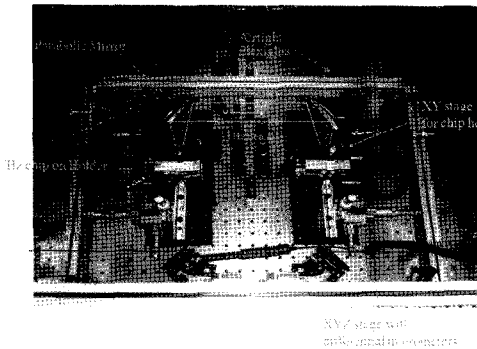
THz의 발생과 검출 과정에서 이미 이루어졌다. 즉 하나의 THz chip에서 THz파를 발생시키는 전송선을 따라서 수십 mm를 전파한 THz 펄스를 전송선의 끝 부분에서 검출하였다. 이후 1990년대 중반부터 튜브, coaxial cable, 평행판과 같은 도파로를 통하여 THz 파를 전송시키는 연구가 이루어졌다. 따라서 1990년대 후반부터 이러한 두 분야가 접목된 THz 도파로를 이용한 분광법이 이루어지기 시작하였다. 이러한 새로운 분광 기술은 한정된 공간에 THz 파를 집속시켜 기존의 THz 분광법으로 관찰 할 수 없는 여러 가지 현상 및 물질의 특성을 연구 할 수 있게 한다.

따라서 본론에서는 THz 시간영역 분광법, THz 도파로, 그리고 이들 두 분야가 결합된 THz 도파로 분광법에 대하여 알아보하고자 한다.

## II. 본 론

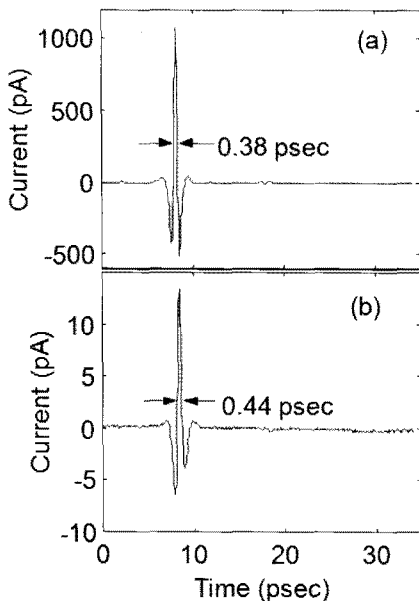
### 1. THz 시간영역 분광법

〈그림 4〉는 THz 분광시스템의 사진으로 50cm x 70cm 밀폐된 공간에 설치되어 있다. 펌프초 레이저에 의해 발생된 THz 파는 parabolic 거울을 통하여 반사되어 수신측으로 전달된다. 따라서 측정하고자 하는 시료를 두 개의 parabolic 거울사이에 두고 테라파를 투과 시켜 시료의 특성을 분석 할 수 있다. 이때 공기중에 포함되어있는 수분의 진동모드가 THz 영역에 있어 이를 제거하기 위해 실험도중 건조한 공기를 계속 넣어 일반적으로 상대습도가 3%미만까지 낮추어 측정한다.

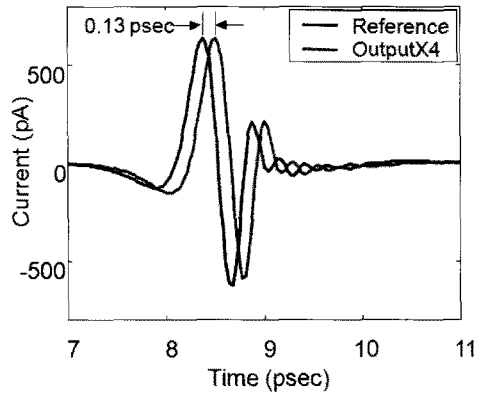


<그림 4> THz 분광시스템

THz를 이용한 시간영역 분광법의 가장 큰 장점은 최대 ~10000:1까지 1) 높은 신호대 잡음비와 시료에 직접 THz 파를 투과 또는 반사시키는 2) 비접촉 비파괴의 방법으로 분광측정이 가능하며 시료에 대한 THz 파의 크기변화 뿐만 아니라 3) 위상변화를 측정할 수 있다는 것이다. <그림 5>는 금속의 성질이 있는 10um 두께의 전도성폴리머를 THz 파가 통과하기 전과 통과



<그림 5> (a) 시료 통과 전 THz파 (b) 시료 통과 후 THz 파



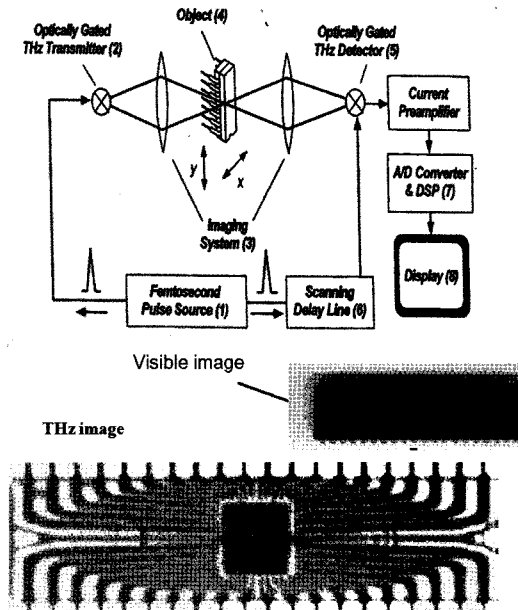
<그림 6> 시료 통과 전후의 시간지연(위상차)

한 후의 펄스모양이다<sup>[2]</sup>. 시료를 통과한 THz 펄스의 경우 통과 전과 비교하여 약 100배의 신호가 줄어들었지만 여전히 400:1의 신호대 잡음비를 가지고 있다.

<그림 6>은 15um 두께의 전도성 폴리머에 대한 THz 파의 통과 전후 시간지연(위상차)을 보여주는 그림이다. 그림에서와 같이 0.13psec의 시간지연은 시료의 굴절률과 관계가 있다<sup>[3]</sup>. 따라서 이러한 THz 파의 크기변화와 위상변화를 직접 측정함으로써 시료의 흡수율, 굴절률, 전기전도도 등 전기적 광학적 특성을 측정할 수 있다.

이와 같은 THz 파의 크기와 위상변화에 의한 특성분석은 THz 이미징을 가능하게 하였다. 즉 THz 파를 실리콘 렌즈 또는 parabolic 거울을 통하여 초점을 만들어 대상 물체의 스캔하는 방법으로 <그림 7>과 같은 최초의 THz 이미징을 구현하였다. 그림은 반도체 칩의 내부모습으로 플라스틱 재질의 cover를 THz 파가 투과하여 내부에 있는 반도체에 흡수되는 정도를 이미징화 하였다<sup>[4]</sup>.

최근 들어 이러한 THz 이미징을 통하여 우편물에 포함된 마약 탐지, 공항에서의 폭발물 검색 등 보안 분야와 바이오 물질 분석 및 암 검출 등

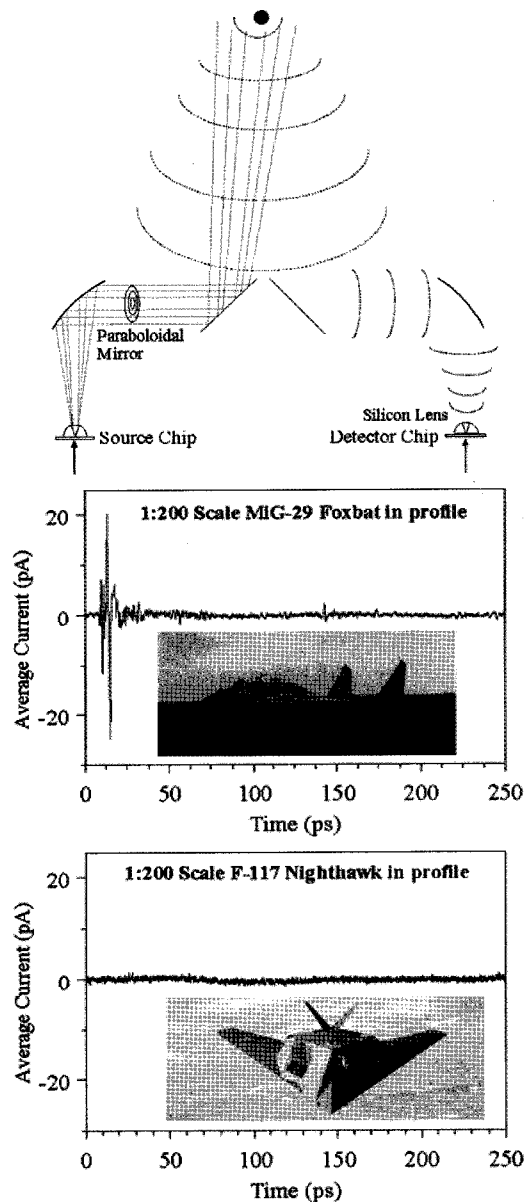


〈그림 7〉 THz 이미징 장치도 및 반도체 칩의 THz 이미지

의료분야에서 활발한 연구가 이루어지고 있다.

금속과 같은 물질의 경우 흡수도가 아주 높아 THz 파의 투과가 어려우며 반사가 잘 일어난다. 따라서 THz 반사에 의한 분광법이 가능하다. 전기전도도가 큰 반도체의 경우 THz 주파수 대역에서 굴절률의 변화가 심해 반사에 의한 THz 측정에서 THz 파의 크기와 위상변화를 측정할 수 있다. 최근 영국의 TeraView 회사에서는 THz 분광용 시스템을 제품화 하여 학계, 기업, 연구소 등에 제품을 공급하고 있다.

같은 원리로 두 개의 parabolic 거울 사이에 평면거울을 넣어 THz 파를 목표물에 반사시켜 <그림 8>과 같은 THz 레이더를 구성할 수 있다<sup>[5]</sup>. 목표물의 위치에 200:1로 축소된 MIG-29기와 F-117 Nighthawk의 모형을 놓고 반사되어오는 THz 파를 측정한 그림이다. 실험실 내에서 수백 배 축소된 모형에 대한 레이더 실험은



〈그림 8〉 THz 레이더 구성도 및 MIG-29와 F-117에 반사된 THz 반사파

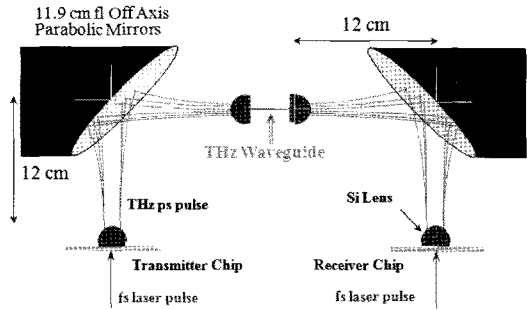
파장을 같은 비율로 축소해야만 실제 상황과 같은 결과를 볼 수 있다. 따라서 GHz의 레이더를 THz 파를 이용하여 제한된 공간에서 실제상황과 같은 효과를 구현할 수 있다.

## 2. THz Waveguide

THz waveguide 관련 연구는 1980년대 최초의 THz 펄스를 반도체 칩 위의 금속선을 따라 전송시켰다. 이후 1990년에 공기중으로 전파하는 THz 파를 실리콘 렌즈를 이용하여 280um 지름의 stainless 금속 튜브에 입사하여 THz 도파로 실험을 구현하였다. <표 1>은 미국의 Grischkowsky 그룹에 의해 구현된 THz 도파로 실험을 정리한 표이다. 원형, 사각형 튜브, polymer 필름, 평형판, coaxial cable, 금속선, 그리고 금속표면을 따라 THz 파를 전송시켰다.

이러한 연구는 THz waveguide spectroscopy 실현 가능성을 보여주며 가장 큰 장점으로는 THz 파를 수집에서 수백 마이크로 사이즈의 한정된 공간에 에너지를 집중시켜 전송하므로 기존의 THz 시공간 분광법으로 분석하기 어려운 분말, 박막 등의 시료에 대한 분석이 가능하다.

<그림 9>는 원형, 사각형 튜브, polymer 필름에 의한 THz waveguide 실험 장치도이다. THz 빔을 waveguide 내로 집중시키기 위해 silicon



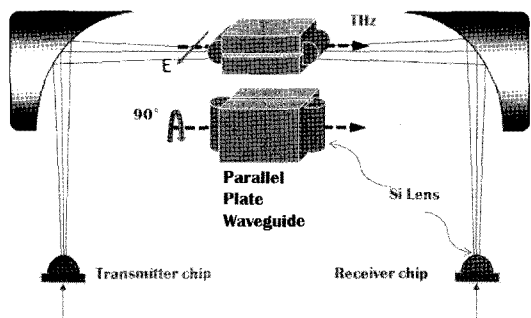
<그림 9> 원형 또는 사각 튜브 waveguide를 이용한 THz 도파로 실험장치도

lens를 그림과 같이 사용하였다. 이러한 waveguide 내부를 통과하는 THz 파는 waveguide의 크기에 따라 특정한 mode에 대한 차단주파수가 존재한다. 따라서 THz waveguide spectroscopy를 사용하기 위해 차단주파수가 측정된 THz 대역폭 밖에 존재하도록 waveguide의 크기를 줄여야 한다. 하지만, Waveguide의 크기가 줄어들수록 측정하고자 하는 시료를 원형 또는 사각형 waveguide 내에 두기가 어려운 단점이 있다. Sample 설치에 대한 이러한 단점을 보완할 수 있는 평형판 도파로에 관한 연구가 최근 그 대안으로 연구 되고 있다.

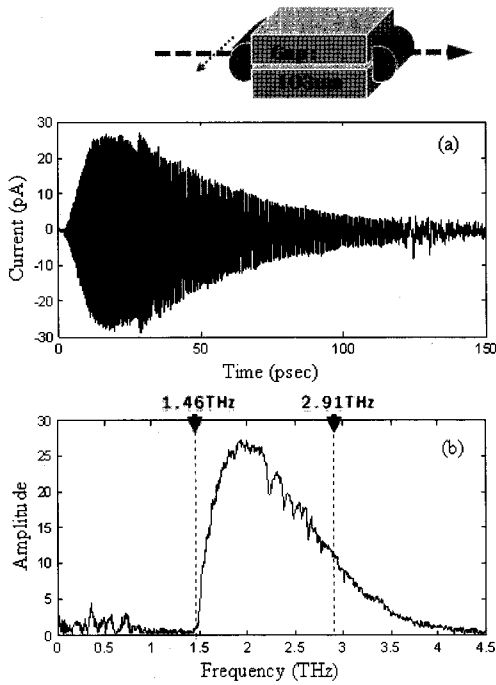
<그림 10>은 평형판 도파로를 이용한 THz waveguide 실험 장치도로 THz 파가 지나가는

<표 1> 구현된 THz waveguide

Stainless-Steel Circular Tube	D=280µm L=24mm		THz	1990, 10 Optics Letters 24, 1431
Brass Rectangular Tube	W=250 µm H=125 µm L=250mm			2000, 5 J. Opt. Soc. Am. B 17, 851
High-Density Plastic Ribbon	t=116 µm L=20mm			2000, 10 J. Appl. Phys 88, 4449
Parallel Plate Metal Waveguide	t=90 µm W=15mm L=250mm			2001, 11 IEEE Micro. wire. com. Lett 11, 444
Copper Coaxial Cable	Dauf=330µm Din=90µm L=105mm			2004, 12 APL, 85, 6092
Metal Wire	D=0.52 mm L=283cm			2005, 4 APL, 86, 161904
Aluminum Sheet	W=10cm L=98cm			2006, 2 APL, 88, 061113

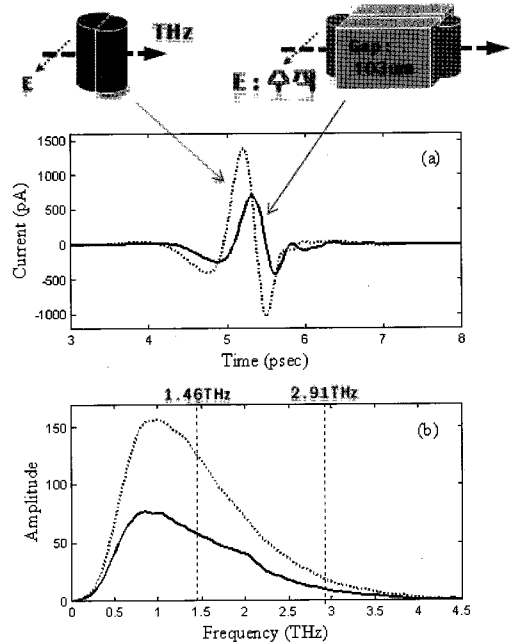


<그림 10> 평형판 waveguide를 이용한 THz 도파로 실험장치



〈그림 11〉 TE 모드 측정 (a) 측정된 THz 시간영역 신호 (b) 주파수 스펙트럼

경로에 THz 파를 평형도파로 내로 집속시키고 방출시키기 위한 silicon lens를 waveguide 양단에 부착시켰다<sup>[6]</sup>. THz의 편광 방향과 금속면의 방향이 〈그림 11〉과 같이 수평이면 TE 모드가 존재하여 분광법으로 사용하기에 적절하지 않지만 금속면이 〈그림 12〉와 같이 수직이면 TM 모드가 존재하여 분광법으로 사용하기에 적절하다. 하지만 앞서 설명한 원형 또는 사각형 도파로와 같이 평형도파로의 간격이 크면 높은 모드의 TM 모드가 존재하며 차단 주파수가 역시 존재한다. 따라서 〈그림 11〉과 같이 약 100 $\mu$ m 이하의 간격을 유지하면 차단주파수가 측정되는 주파수 범위내에 존재하지 않아 분광법을 이용하기에 이상적이다. 이러한 평형판 도파로는 두 평행판 사이에 측정하고자 하는 물질을 삽입시

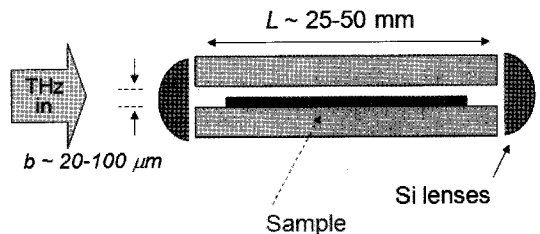


〈그림 12〉 TM 모드 측정 (a) 측정된 THz 시간영역 신호 (점선: 평형도파로가 없을 경우, 실선: 평형도파로가 있을 경우) (b) 주파수 스펙트럼

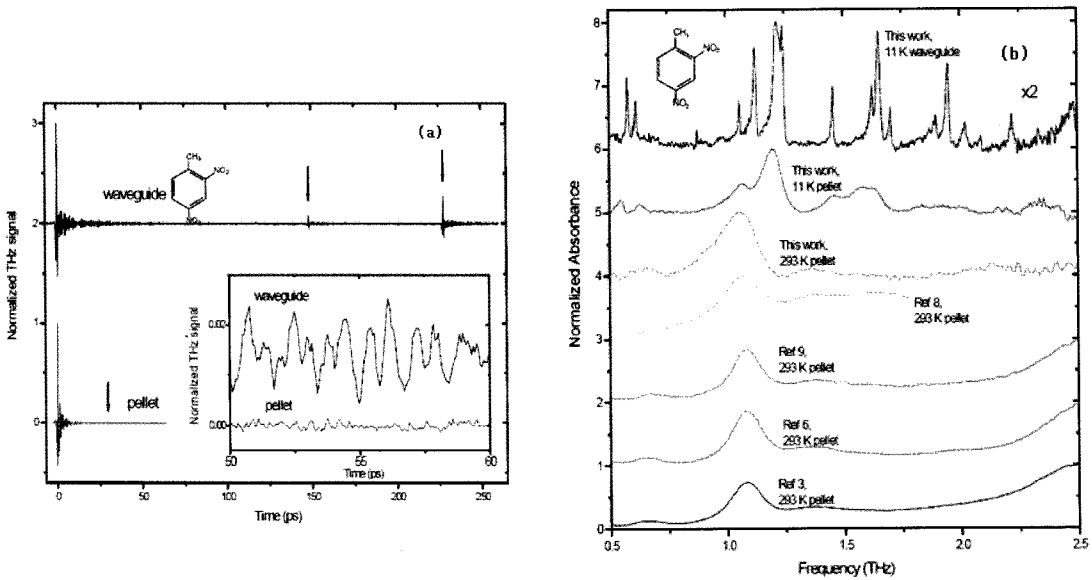
켜 조립하면 되므로 설치가 간편하다.

### 3. 평형판도파로 THz 분광법

평형판도파로 분광법은 앞서 설명한 바와 같이 두 개의 평행도로 내에 〈그림 13〉과 같이 sample을 위치 시켜 silicon lens에 의해 집속된 THz 파를 통과시킨다.



〈그림 13〉 평형판도파로와 sample



〈그림 14〉 DNT 폭발물에 대한 기존의 시간영역 분광법과 평형판도파로 분광법의 비교  
 (a) 측정된 THz 시간영역 신호 (b) 흡수도 스펙트럼

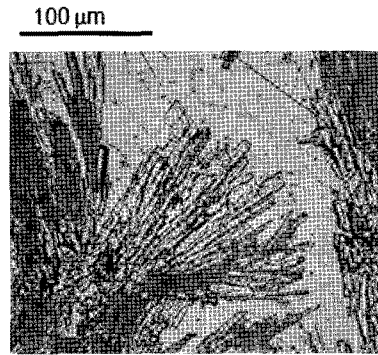
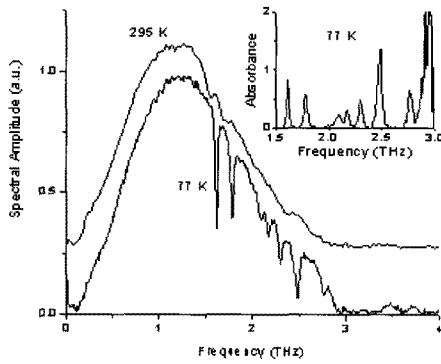
최근 폭발물의 일종인 DNT를 기존의 시간영역 분광법과 평형판도파로 분광법 방법으로 비교한 연구 결과가 <그림 14>와 같이 보고되었다 [7]. DNT를 두께 3mm로 압축하여 pellet으로 만든 후 기존의 시간영역 분광법으로 특정한 data는 main 펄스 뒤의 신호가 깨끗한데 반하여 평형판도파로 내에 100um의 아주 얇은 두께의 박막으로 코팅한 DNT 측정에서는 main 펄스 뒤에 삽입 그림과 같이 많은 정보가 검출되었음을 알 수 있다. 이러한 신호에 대한 스펙트럼은 평형판도파로의 측정이 훨씬 더 정밀하고 많은 정보를 가지고 있음을 보여준다.

그림 (b)에서 두 가지 측정 중 phonon에 의한 영향이 적은 11K의 극저온에서의 흡수도의 변화를 살펴보면 기존의 시간영역 분광법은 약 1.2THz 부근에서 대역폭이 넓은 resonance가 존재함을 알 수 있지만 평형판도파로 분광법의 경우 모든 영역에서 아주 작은 resonance들을

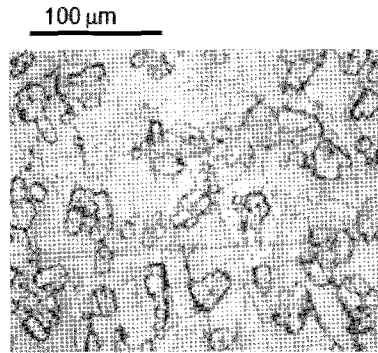
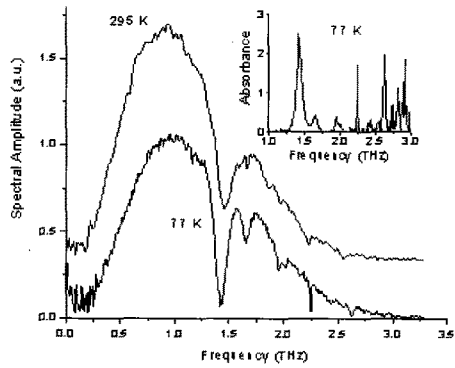
측정 할 수 있다. 이러한 차이점은 공항과 주요 시설물에서의 보안검색에서 폭발물에 대한 THz 영역에서의 지문(finger print)을 제공할 수 있다.

대부분의 생화학 물질들은 액체 상태로 존재하며 이로 인해 THz 영역에서 흡수가 많은 기존의 시간영역 분광법으로는 측정이 어려웠다. 하지만 평형판 도파로 표면에 이들 액체를 떨어뜨린 후 액체성분이 증발하면 수십 micron 두께의 박막이 형성된다. 이러한 박막형태의 생화학 물질을 평형판도파로를 이용한 분광측정이 <그림 15>에 있다 [8]. 그림에서와 같이 3THz 주파수 영역에서 각 물질에 대한 고유 지문을 77K의 저온 상태에서 선명히 관찰 할 수 있다.

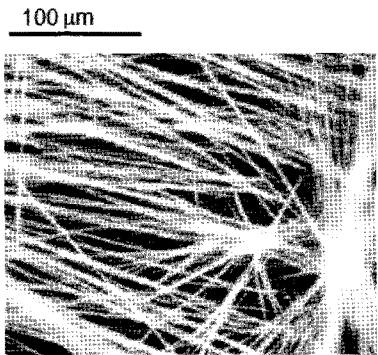
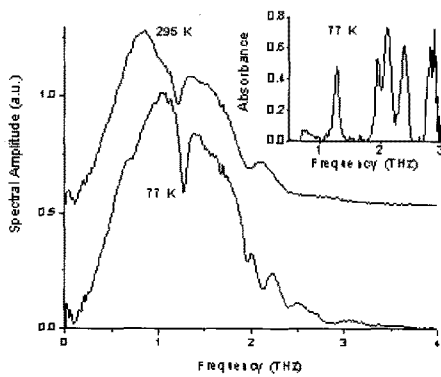
이와 같은 waveguide를 이용한 THz 분광법은 집속된 THz 파를 이용함으로써 기존의 시간영역 분광법으로 측정하기가 어려운 박막, 극미량의 생화학 물질 등 그 측정범위를 획기적으로



(a)



(b)



(c)

〈그림 15〉 생화학 물질에 대한 평형판도파로 분광법 (a) Deoxycytidine (b) Alanine (c) Glycine



확대 할 수 있다. 따라서 앞으로의 발전 가능성이 매우 높은 분야로 기대된다.

### 참고문헌

- [1] A. R. Sanchez, and X.-C. Zhang, "Terahertz Science and Technology Trends", IEEE, Vol.14, 2 (2008)
- [2] Tae-In Jeon, D. Grischkowsky, A. K. Mukherjee, and Reghu Menon, "Electrical characterization of conducting polypyrrole by THz time-domain spectroscopy," Appl. Phys. Lett. 77, 2452-2454 (2000)
- [3] T.-I. Jeon, D. Grischkowsky, A. K. Mukherjee, and Reghu Menon, "Electrical and optical characterization of conducting poly-3-methylthiophene film by THz time-domain spectroscopy," Appl. Phys. Lett. 79, 4142-4144 (2001)
- [4] B. B. Hu and M. C. Nuss, "Imaging with terahertz waves," Opt. Lett. 20, 1716-1719 (1995)
- [5] R. A. Cheville and D. Grischkowsky, "Time domain THz impulse ranging studies," Appl. Phys. Lett., Vol.67, pp.1960-1962, 1995
- [6] E. S. Lee, J. S. Jang, S. H. Kim, Y. B. Ji and T.-I. Jeon, "Propagation of Single-Mode and Multi-Mode Terahertz Radiation Through a Parallel-Plate Waveguide," J. Korean Phys. Soc. Vol.53, 1891 (2008)
- [7] N. Laman, S. Sree Harsha, D. Grischkowsky, and Joseph S. Melinger, "7 GHz resolution

waveguide THz spectroscopy of explosives related solids showing new features," Opt. Express 16, 4094-4105 (2008)

- [8] N. Laman, S. S. Harsha, D. Grischkowsky, and J. S. Melinger, "High resolution waveguide THz spectroscopy of biological molecules," Biophys. J. 94, 1010-1020 (2008)

### 저자소개



전 태 인

1988년 2월 동아대학교, 물리학 학사  
 1990년 2월 동아대학교, 전자공학 석사  
 1997년 5월 Oklahoma State University, 전기공학 박사  
 1997년 5월 ~ 1998년 2월 Oklahoma State University, Post-Doctor  
 2004년 2월 ~ 2005년 7월 Oklahoma State University, Visiting professor  
 1998년 3월 ~ 현재 한국해양대학교, 교수  
 주관심 분야 : Terahertz waveguide spectroscopy