

공학석사 학위논문

건물 사이의 테라헤르츠 펄스 전파를 통한
대기의 날씨 및 감쇠율 측정

Measurement of Weather Condition and Power Attenuation in
the Atmosphere by Propagation of Terahertz Pulse Between
Buildings

지도교수 전태인

2015년 2월

한국해양대학교 대학원

전기전자공학부

문 업 배

본 논문을 문암배의 공학석사 학위논문으로 인준함.

| | | |
|-----|-------|-----|
| 위원장 | 주 양 익 | (인) |
| 위원 | 전 태 인 | (인) |
| 위원 | 길 경 석 | (인) |

The seal of Korea Maritime University is a circular emblem. It features a stylized ship's mast and funnel in the center, with wavy lines representing water below. The text 'KOREA MARITIME UNIVERSITY' is written in a semi-circle at the top. At the bottom, the Korean characters '한국해양대학교' are written in a semi-circle. The year '1945' is inscribed in the center of the seal.

2014년 12월

한국해양대학교 대학원

목 차

| | |
|--|-----|
| List of Tables | iv |
| List of Figures | v |
| Abstract | vii |
| | |
| 1. 서 론 | 1 |
| | |
| 2. 본 론 | |
| 2.1 실험 장치 구성 | 3 |
| 2.2 Receive Chip의 변경에 따른 THz 신호 변화 | 8 |
| 2.2.1 LT-GaAs[5-10-5 μ m]를 사용하여 얻은 THz 신호 | 8 |
| 2.2.2 LT-GaAs[10-100-10 μ m]를 사용하여 얻은 THz 신호 | 12 |
| 2.3 날씨 변화에 따른 THz 신호 특성 | 16 |
| 2.3.1 눈, 비, 흐린 날씨에 따른 THz 신호 | 16 |
| 2.3.2 수증기 밀도의 변화에 따른 THz 신호 | 19 |
| 2.3.3 수증기 밀도의 변화에 따른 THz 신호 지연 정도 | 23 |
| 2.3.4 수증기 밀도의 변화에 따른 THz 신호 흡수율 | 25 |
| 2.4 습도 변화에 따른 THz 신호 특성 | 27 |
| 2.4.1 Slow scan을 이용한 연속적 습도 변화에 따른 THz 신호 변화 .. | 27 |
| 2.4.2 Fast scan을 이용한 THz 신호 측정 및 Slow scan과의 비교 | 30 |
| 2.4.3 Fast scan을 이용한 시간 변화에 따른 THz 신호 변화 | 33 |
| 2.5 건물 내에서 측정한 THz 신호 | 36 |
| 2.6 저주파 대역을 이용한 THz Bit Pulse | 41 |
| | |
| 3. 결론 | 45 |
| | |
| 참고문헌 | 47 |

List of Tables

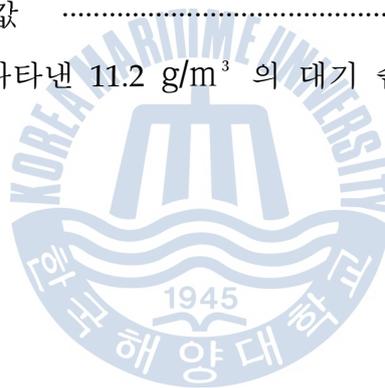
| | |
|--|----|
| Table. 1 신호를 측정할 날씨에 대한 정보 | 16 |
| Table. 2 신호를 측정할 대기 환경에 대한 정보 | 19 |



List of Figures

| | |
|--|----|
| Fig. 1 테라헤르츠 주파수 대역을 전자기파의 스펙트럼에서 표현 | 1 |
| Fig. 2 대기 중으로 THz 펄스(Pulse) 전송에 대한 기본 실험 장치 구성 | 3 |
| Fig. 3 대기 중으로 THz 펄스(Pulse) 전송에 대한 미러(Mirror) 배치도 | 4 |
| Fig. 4 (a) 탈부착 가능한 M1와 M10 사진과 THz 파의 발생 및 검출 경로 | 5 |
| (b) 구형 미러(Spherical Mirror)인 M3 | |
| Fig. 5 실제 건물 사진 및 대기 중에서의 THz 전자기파의 경로 | 7 |
| Fig. 6 LT-GaAs[5-10-5 μ m]를 도식적으로 표현 | 8 |
| Fig. 7 (a) Input pulse와 Output pulse의 시간 영역 비교 | 9 |
| (b) Input pulse와 Output pulse의 주파수 영역 비교 | 10 |
| Fig. 8 Output pulse의 확대 시킨 그래프 (Fig. 7(b)의 아래쪽 신호) | 11 |
| Fig. 9 LT-GaAs[10-100-10 μ m]를 도식적으로 표현 | 12 |
| Fig. 10 (a) Input pulse와 Output pulse의 시간 영역 비교 | 13 |
| (b) Input pulse와 Output pulse의 주파수 영역 비교 | 14 |
| Fig. 11 LT-GaAs[5-10-5 μ m]를 사용하여 취득한 Output pulse(Blue)와 | 15 |
| LT-GaAs[10-100-10 μ m]를 사용하여 취득한 Output pulse(Red)의 비교 | |
| Fig. 12 날씨에 따른 시간 영역의 신호 크기 비교 | 17 |
| Fig. 13 날씨에 따른 주파수 영역의 신호 크기 비교 | 18 |
| Fig. 14 수증기 밀도 차이에 따른 시간 영역 비교 | 20 |
| Fig. 15 수증기 밀도 차이에 따른 주파수 영역 비교 | 21 |
| Fig. 16 수증기 밀도 차이에 따른 시간 영역 신호 지연 정도 비교 | 23 |
| Fig. 17 수증기 밀도에 대한 시간 지연 정도 비교 | 24 |
| Fig. 18 수증기 밀도 차이에 대한 감쇠율의 비교 | 26 |
| Fig. 19 (a) 외부 습도의 변화에 따른 신호의 변화 | 28 |
| (b) 외부 습도의 변화 | |
| Fig. 20 Slow scan 시스템과 Fast scan 시스템 | 30 |

| | |
|---|----|
| Fig. 21 Fast scan과 Slow scan의 시간 영역 신호 비교 | 31 |
| Fig. 22 Fast scan과 Slow scan의 주파수 영역 신호 비교 | 32 |
| Fig. 23 (a) THz 신호 측정 후, 즉시 측정 시작한 THz 신호와 비교 | 33 |
| (b) THz 신호 측정 후, 60초 경과 후 측정 시작한 THz 신호와 비교 | 34 |
| (c) THz 신호 측정 후, 120초 경과 후 측정 시작한 THz 신호와 비교 .. | 35 |
| Fig. 24 실내에서 THz 펄스(Pulse) 전송에 대한 미러(Mirror) 배치도 | 36 |
| Fig. 25 Input pulse와 25m 경로를 진행한 Output pulse | 38 |
| Fig. 26 25m 전파되어 측정된 THz 대역의 Transmission | 39 |
| Fig. 27 (a) 외부의 대기 수증기 밀도가 4.8 g/m^3 , 8.5 g/m^3 , 11.2 g/m^3 일 때, 186m 경로를 진행하여 검출한 THz 시간 영역 비교 | 41 |
| (b) (a)에 대한 주파수 영역의 비교, 가장 큰 신호는 4.8 g/m^3 , 중간은 8.5 g/m^3 , 가장 아래의 신호는 11.2 g/m^3 | |
| Fig. 28 (a) Fig. 27(b)의 11.2 g/m^3 인 주파수 영역에서 0.38THz 이하의 대역을 IFFT 취하여 계산한 값 | 43 |
| (b) Fig. 27(a)에서 나타낸 11.2 g/m^3 의 대기 습도환경에서 측정된 THz bit pulse | |



Measurement of Weather Condition and Power Attenuation in the Atmosphere by Propagation of Terahertz Pulse Between Buildings

Eom Bae Moon

Department of Electrical and Electronics Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

In this experiment, A broadband Terahertz (THz) pulse was measured through a 186m long path between buildings by using a long path THz Time-Domain-Spectroscopy system. The total THz path was 186m and 158m propagating of the path subject to atmosphere influence. According to the change in weather such as amount of clouds, rain and snow, we have transmitted a broadband THz pulse and received the signal and the frequency domain of the output pulse.

When the water vapor density of the atmosphere changed from 1.1 g/m³ to 11.2g/m³ , the determination of water vapor from 0.35 to 1 THz was reported. Comparing the experiments using a fast scan and a slow scan represented the shift of the time domain by the change in humidity.

KEY WORDS: Terahertz (THz); Weather condition; Atmospheric propagation; Water absorption; Terahertz communication

This effect on the weather conditions were observed by using a low frequency band, which was to be expected that the bandwidth can be used for the THz propagation application in the future.

Another system which path is 25m and the demonstrated amplitude transmission of THz frequency domain through the indoor of laboratory with 45% relative humidity at 21 degrees Celsius have been made. As a result, It is possible to propagate into atmosphere regardless of water vapor if the THz is under 0.37THz was realized. This means that low frequency bandwidth ($<0.37\text{THz}$) was experienced with negligible attenuation and group velocity dispersion due to transmission. Such stable main pulse shape appears to be suitable for the THz bit in a digital THz communication.



제 1 장 서 론

테라헤르츠(Terahertz, THz) 영역은 마이크로파인 전파와 적외선영역인 광파 사이에 있는 주파수 대역의 전자파로써, 비전도성의 물질은 투과하고 금속에는 반사하는 전파와 광파의 독특한 특성을 복합적으로 가지고 있다. 게다가, 1THz(=10¹²Hz)의 에너지는 4.1meV로 X선인 1exahertz(=10¹⁸Hz)의 에너지 3.3keV 보다 약 80만배 낮기 때문에 투과한 물질을 비파괴 하는 특성을 가진다. 이는 미국 과학전문 잡지(Technology Review,2004,2.)에서 세상을 바꿀 10대 신기술로 테라헤르츠를 소개한 바가 있다.

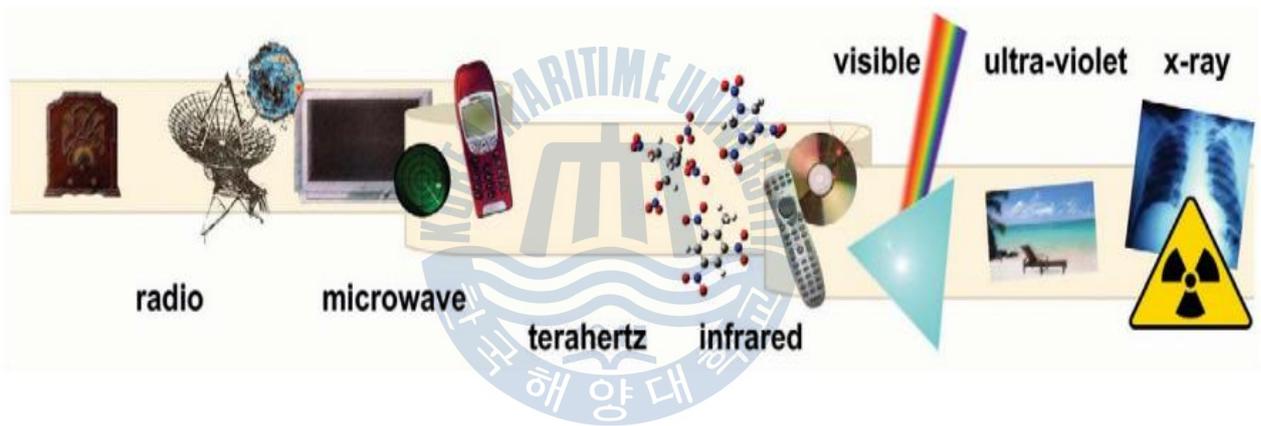


Fig. 1 테라헤르츠 주파수 대역을 전자기파의 스펙트럼에서 표현

기존에 많은 발달을 이루어온 전자 및 광학 기술로는 테라헤르츠 발생에 대한 적용이 어려워 연구가 활발하지 않았지만, 1980년 이후 안정된 광 펄스(Optical pulse)의 제공과 반도체 공학의 발전에 따라 테라헤르츠 시간 영역 분광학(THz Time-Domain Spectroscopy)의 도래로 0.1 THz에서 3 THz사이의 ‘테라헤르츠 갭(Terahertz gap)’이라고 불리는 대역의 연구가 본격적으로 가능하였으며, 그에 따라 많은 연구 및 실용성에 적용 되고 있다. 이는 분광학을 통해 의료계통으로 약품에 대한 특성 확인¹, 분광학을 이용한 각성 물질 약품 검출², DNA 융합 반응에 대한 THz의 특성변화³, 글루타민 산의 성분 변화에 따른

THz의 주파수 특성⁴ 과 상용 관련된 가솔린 성분에 따른 특성분석⁵ 이 연구 되었을 뿐만 아니라 Imaging 기법으로 'Goya'의 그림 작품의 진품 여부 판정⁶, 고무 내의 구리 동선의 절단 및 손상에 대한 판정여부⁷, 100mm X 100mm부피의 물질을 80초의 시간동안 3차원으로 Imaging 측정⁸ 과 본 연구실에서 평행판 도파관(Parallel-Plate WaveGuides)를 통한 센싱 및 필터 연구들^{9,10,11}이 연구하였다. 이처럼 실용적으로 THz의 특성을 이용하기 위한 연구가 다양한 분야에 걸쳐 진행되고 있다.

다양한 분야에 대해 연구가 진행 되는 와중에 GHz 대역의 통신 주파수 채널 사용이 포화상태에 이룸에 따라, THz 대역의 통신 주파수에 관한 관심 및 연구가 활발히 진행 되고 있다^{12,13}. 그러나 THz 대역의 성질로써 수분에 대한 흡수율이 비교적 다른 주파수 대역보다 크기 때문에 대기 상으로 전파가 쉽지 않은 실정이며, 167m의 거리에 THz Wave를 전송 및 검출하였을 때 0.07THz에서 0.37THz 사이의 대역을 사용¹⁴하여, 실험으로 디지털 펄스를 이용한 장거리 통신에 대한 어플리케이션(Application) 구현을 예상하고 있다. 또한, 대기 중으로의 THz 전파에 관한 연구는 많은 그룹에서 진행^{15,16,17,18,19,20,21,22}하였었다.

본문에서는 전파된 THz가 각각 다른 수증기 밀도와 날씨(흐림, 눈, 비)에 의해 변하는 시간 영역 신호와 스펙트럼을 분석하여 수분의 영향이 비교적 적게 받는 주파수 대역을 확인했으며, THz 대역의 감쇠율을 나타내어 기존 선행 논문과 비교할 수 있었다^{18,19}. 이는 THz 대역을 이용하여 통신할 경우 실내 뿐만 아니라 외부 통신의 사용에도 적용될 것으로써 날씨 변화에 따른 신호의 변화 정보를 나타내었다. 또한, Fast scan과 Slow scan을 사용하여 외부의 습도 변화에 따른 시간 영역 신호의 변동을 지켜보았으며, 외부로 신호를 전파한 신호에서 수분에 대한 흡수율이 적은 0.37THz 이하의 주파수 대역을 선택하여, 그 구간 영역의 함수를 시간영역 함수로 변환하는 역푸리에변환(IFFT)을 이용해 구한 신호와 검출되었던 원 신호와 비교하여, THz bit pulse 통신 가능성을 살펴 보며 미래에 상용화 되는 것을 예상할 수 있다.

제 2 장 본론

2.1 실험 장치 구성

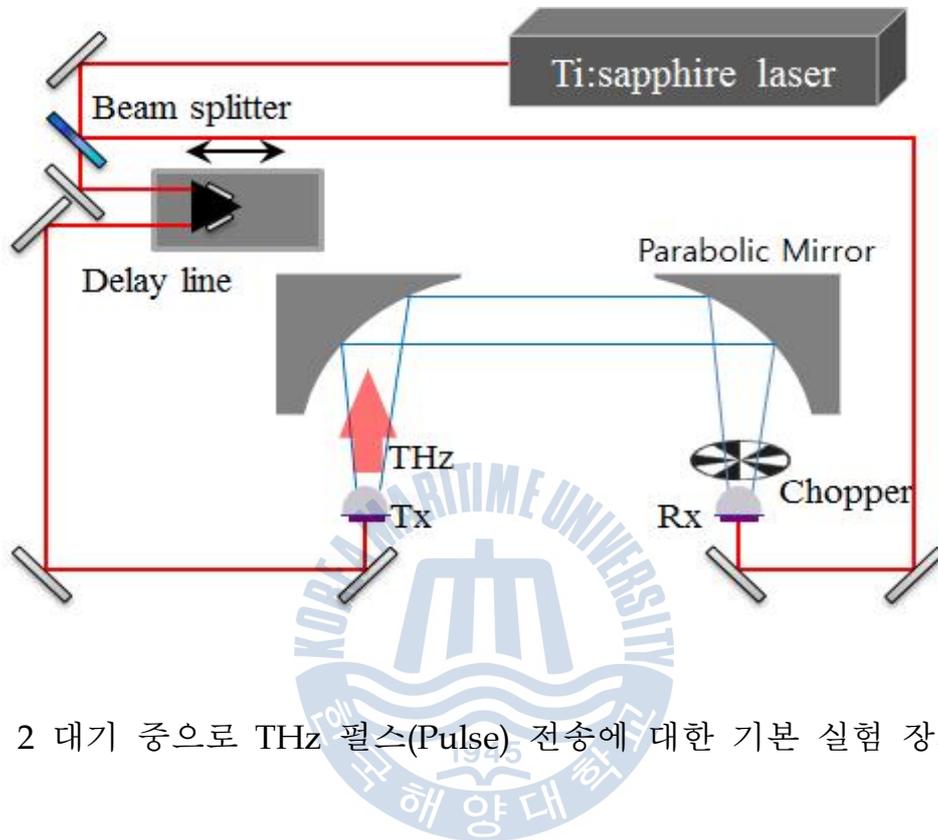


Fig. 2 대기 중으로 THz 펄스(Pulse) 전송에 대한 기본 실험 장치 구성

Fig. 2는 본 논문에서 사용되는 실험 장치 구성을 도식적으로 나타낸 것으로 Terahertz-Time Domain System (THz-TDS)이다.²³ Ti:sapphire laser에서 발생된 펄스(파장:800nm, 반복률 : 84MHz)를 이용하여 광배분기(Beam splitter)를 거쳐 송신부(Transmitter, Tx)에 있는 GaAs[10-80-10 μ m]의 반도체 기판과 수신부(Receiver, Rx)에 있는 LT-GaAs[5-10-5 μ m] 또는 LT-GaAs[10-100-10 μ m]의 반도체 기판에 전파되어, THz 전자기파의 발생 및 검출을 가능케 한다. 이때 송신부인 Tx에는 DC전압을 80V 인가하여, 두 금속 선 사이에 강한 정전계를 형성시킨 후 레이저 펄스(Power : 15.58mW)가 두 금속 라인 사이에 입사되면, 자유 전하들이 발생되어 인가 되어 있는 DC전압에 의하여 자유 전하들이 가전도대에서 전도대로 이동하여 전류 $J(t)$ 가 발생되고 전류 $J(t)$ 의 미분에 해당하는 전자

기파인 THz 전자기파가 발생된다. 발생하는 THz 전자기파에 관한 식을 아래와 같이 표현 하였다.

$$E(t) \propto \frac{\partial J}{\partial t} \tag{1}$$

Rx에는 Tx와는 다르게 DC전압을 인가하지 않으며, THz 검출 시에는 두 금속 선 사이에 레이저 펄스(Power : 14.23mW)가 인가되어, 자유 전자들이 발생하고 THz 전자기파 펄스가 Rx측에 동시에 입사되면, 자유 전자들이 전기의 힘에 의해 움직여서 결국 전류가 발생하게 된다. 이 전류를 Lock-In Amplifier(SR 570)를 이용하여 THz 전자기파를 측정한다.

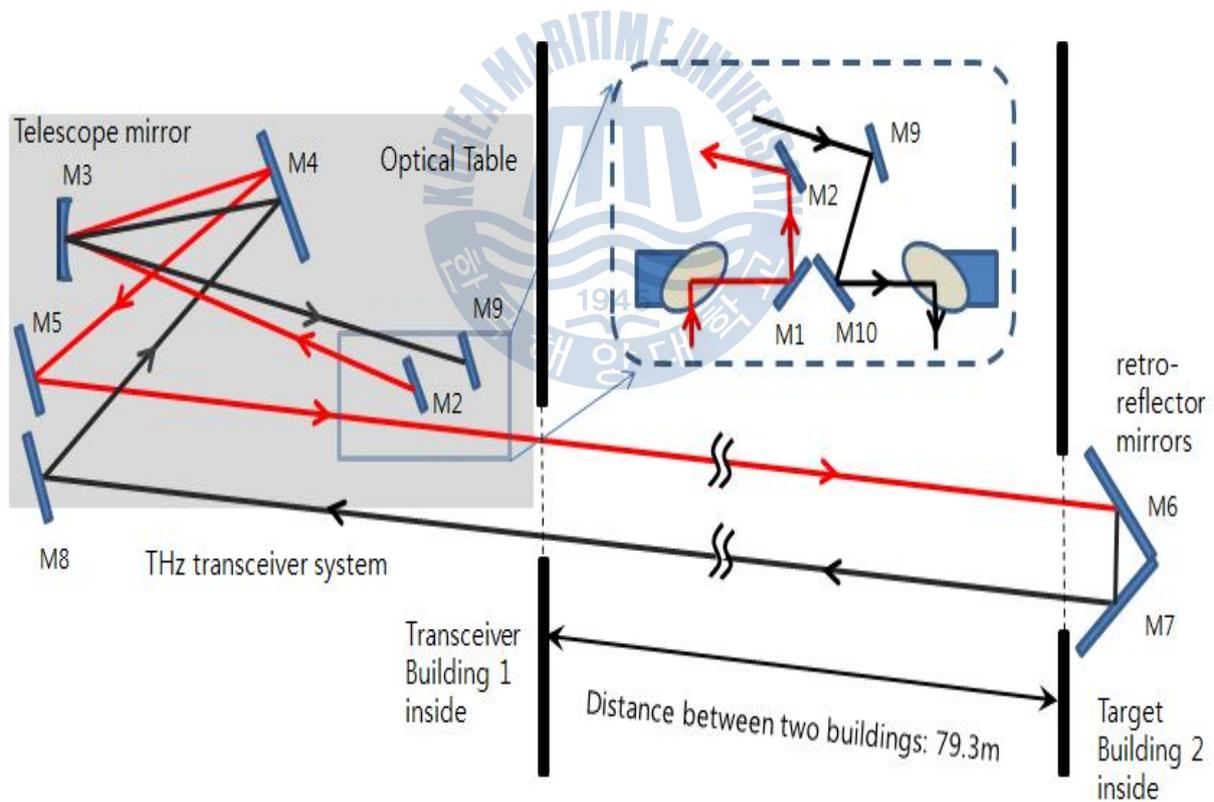


Fig. 3 대기 중으로 THz 펄스(Pulse) 전송에 대한 미러(Mirror) 배치도

Fig. 3는 본 논문에서 연구를 위해 배치된 각 미러(Mirror)를 도식적으로 나타낸 것이다. THz-TDS을 이용하여 발생된 THz 전자기파를 건물 3층 높이(9.5m)의 Building 1에서 Mirror로 경로에 따라 전파되며, 지정된 건물 3층 높이(9.5m)의 Building 2으로 THz 전자기파가 진행한 후 다시 반사되어, 발생된 경로와 평행하게 전파되어 신호를 검출하는 것으로 총 길이는 186m이다. 두 건물 사이의 거리는 79.3m로써 이 공간은 대기에 노출되어 외부의 습도 및 온도가 변할 때 마다 그에 따른 신호를 취득하였다.

M1와 M10의 Mirror 밑바닥에는 자석으로 되어 탈부착이 가능하게 제작하여, 제거 시에는 두 파라볼릭 미러(Parabolic Mirror) 사이의 거리가 0.6m인 상태에서 측정 가능케 하였으며, 본 연구를 진행할 시에는 M1와 M10의 Mirror를 부착한 뒤 THz 전자기파 진행 경로를 변경하여 실험 하였다.

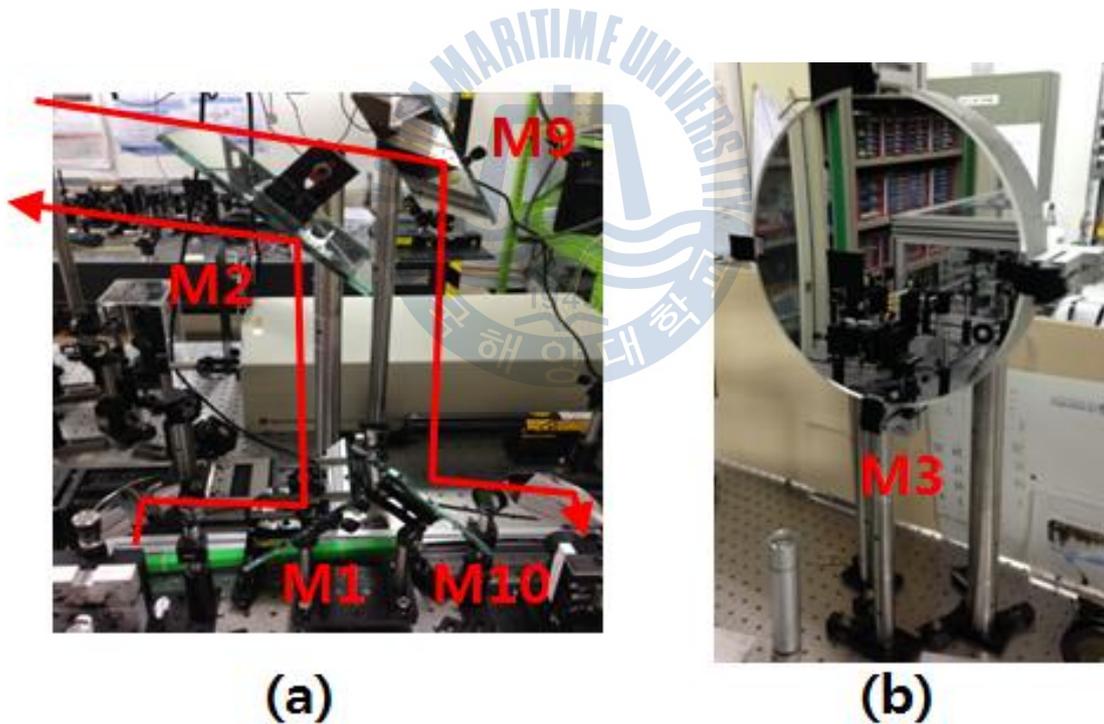


Fig. 4 (a)탈부착 가능한 M1와 M10의 사진과 THz 전자기파의 발생 및 검출 경로
(b)구형 미러(Spherical Mirror)인 M3

Fig. 3에서 점선 모양[Fig. 4(a)]으로 표현 되어있으며, Fig. 4(a)에 보여지는 M1와 M10의 Mirror를 부착시켜 Z축으로 THz 전자기파의 진행 방향을 변경하여 M2를 거쳐 M3으로 진행시킨다. M3는 Edmund Optics 회사의 제품으로 구형 미러(Spherical Mirror)로 지름은 12.5 Inch(31.75cm)이며, Focal-Length(FL)은 125 Inch(317cm)이기에 M2에서 부터 M3의 위치를 FL의 길이만큼 벌려서 고정시켰다. 또한 THz는 전자기파이기에 시각적으로 보이지 않는 이유로써 헬륨네온 레이저(HeNe-Laser)를 이용하여 THz 전자기파의 경로와 동일하게 구성하여 진행방향에 대해 예측하였다. M5에서는 Building 2로 전자기파를 보내기 위한 Mirror로써 Mirror 뒷면에 Mount를 설치하여 세밀하게 조정이 가능하게 하여 광 테이블 및 여러 요소에 의한 THz 경로가 변경되더라도 조정이 가능하다. 실험 중 먼지 유입과 Ti:sapphire laser 기계 및 Mirror의 보호를 위해 Building 1,2와 외부 공간의 사이에 비닐을 부착 하였다. 이 때 사용한 비닐은 20 μ m미만으로 THz의 파장 범위(1THz의 파장:0.3mm)보다 매우 작기에 비닐에 의한 영향은 무시할 수 있다^{14,15,16}. Building 2는 M6과 M7의 각도를 직각으로 제작하여 입사된 전파가 반사되어 평행하게 나아갈 수 있도록 제작하였고, Building 1으로 부터 입사되는 전자기파의 높이를 맞추기 위하여, M6과 M7 미러를 높여주는 프로파일(Profile)을 이용한 1.25m의 지지대를 만들었다. 높이에 대한 길이가 길어질수록 안정도가 떨어지기에 건물의 바닥에 구멍을 뚫어 지지대를 고정하였으며 벽에도 보조물을 이용하여 M6,M7을 지탱하는 지지대를 보완하여, 진동에 대한 안정도를 향상시켰다. Mirror를 고정 및 지지시키는 데 사용된 물질은 가볍고 튼튼하며 쉽게 가공이 가능하기 위해 프로파일을 이용하여 주로 제작하였다.

위와 같은 방식으로 설치 한 뒤 THz의 신호를 검출하기 위해서는 계산해야 될 한 가지 사항이 존재한다. 이는 Ti:sapphire laser의 반복률(repetition rate)을 이용하여 각 펄스간의 파장 간격을 구하여, 그 간격의 배수에 해당하는 거리만큼 설정해줘야 THz 전자기파 신호를 검출할 수 있다.

$$c = f \times \lambda \tag{2}$$

위의 빛의 속도에 MaiTai Laser 공진기의 반복율인 84MHz(84×10^6)를 대입하면 펄스 간의 파장 간격인 $\lambda = 3.57\text{m}$ 로 구해진다. 이를 기준으로 하여 52번째 펄스를 사용하기 위해, Tx 경로를 185.588m(약 186m)의 길이로 늘려 THz 전자기파를 검출하였다. 신호 발생을 위해 Mirror들을 위치를 세밀하게 조절하여 전체 길이로써 약 186m에 대한 길이를 맞춘 후, Tx에서 발생된 전자기파는 각 순차대로 M1에서 M10까지 전파 되어 Rx에서 검출 가능케 하였다.



Fig. 5 실제 건물 사진 및 대기 중에서의 THz 전자기파의 경로

Fig. 5에서는 Fig. 3에 대한 실제 건물 모습에 대한 사진으로써 3층(지상으로부터 9.5m)에 위치한 Building 1이 Transceiver Building이며, 이곳에서부터 THz가 발생되어 대기 중으로 79.3m 전파된 뒤, Building 2인 Target Building에서 M6, M7을 거쳐 다시 Building 1로 전파되어, Tx로부터 총 186m의 경로를 거친 후 THz 전자기파 신호를 얻을 수 있다.

2.2 Receive Chip의 변경에 따른 THz 신호 변화

2.2.1 LT-GaAs[5-10-5 μ m]를 사용하여 얻은 THz 신호

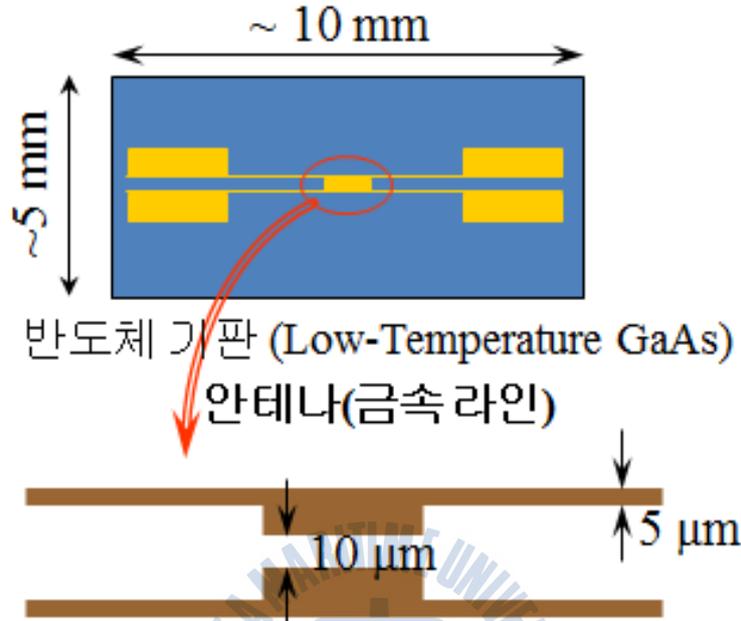


Fig. 6 LT-GaAs[5-10-5 μ m]를 도식적으로 표현

Rx에 사용된 반도체 기판으로는 LT-GaAs[5-10-5 μ m]으로 나비넥타이(Bow tie) 모양을 하고 있으며 SOS(Silicon on Sapphire)의 반도체 기판 보다 넓은 대역폭과 전류를 검출 할 수 있다.²⁴ LT-GaAs[5-10-5 μ m]은 금속 안테나 선 사이의 공간이 10 μ m로써 THz 전자기파 검출 시 넓은 대역폭(~4THz)이 출력되는 장점을 가지고 있다. LT-GaAs[5-10-5 μ m]를 이용하여 M1과 M10을 제거한 뒤 파라볼릭 미러(Parabolic Mirror)사이의 0.6m 거리를 측정 한 단거리 신호(Input pulse)와 M1과 M10을 부착한 후 186m의 거리를 측정 한 장거리 신호(Output pulse)를 비교해 본다.

Fig. 7은 단거리 신호(Input pulse)와 장거리 신호(Output pulse)를 측정 한 값에 대한 시간 영역 및 주파수 영역의 그래프이다. (a)는 장거리 신호(Output

pulse)의 신호의 크기가 상대적으로 작기 때문에 10배 확대하였다. 또한, 두 신호는 133ps까지 측정하였으며 주파수 해상도(resolution)는 7.4 GHz이다. Delay Line을 이용하여 1,000개의 데이터를 각각 20 μ m 간격으로 설정하여 신호를 얻었으며 20 μ m의 간격으로 움직였기에, 레이저 빔의 경로는 입사와 반사까지 고려하여 40 μ m씩 움직여 각 데이터 측정 당 0.1332 ps가 소요 되었다. Delay Line을 이용한 1,000개의 모든 데이터를 찍는 동안에는 190초가 소요된다.

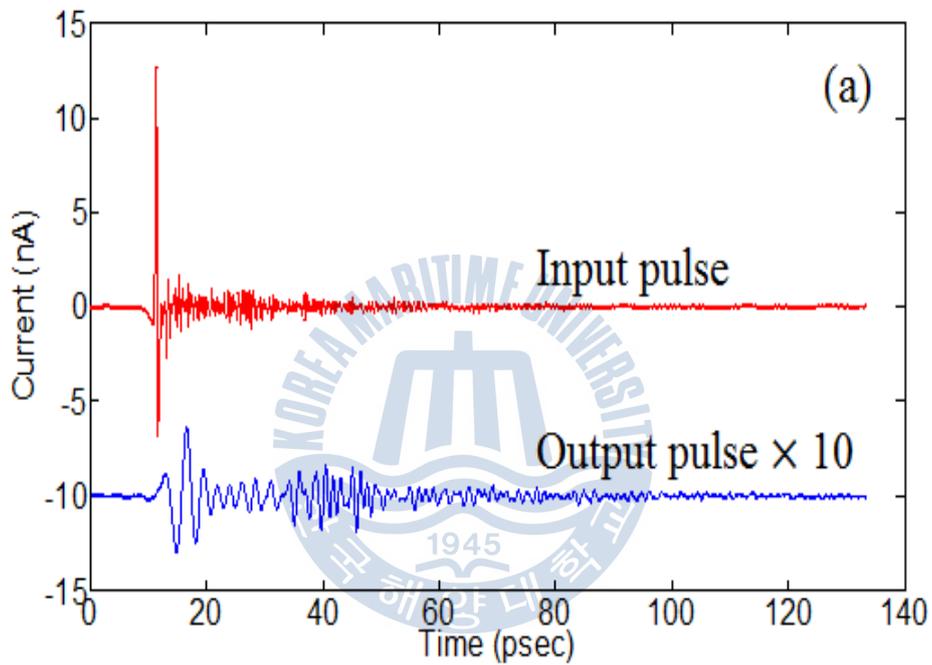


Fig. 7 (a) Input pulse와 Output pulse의 시간 영역 비교

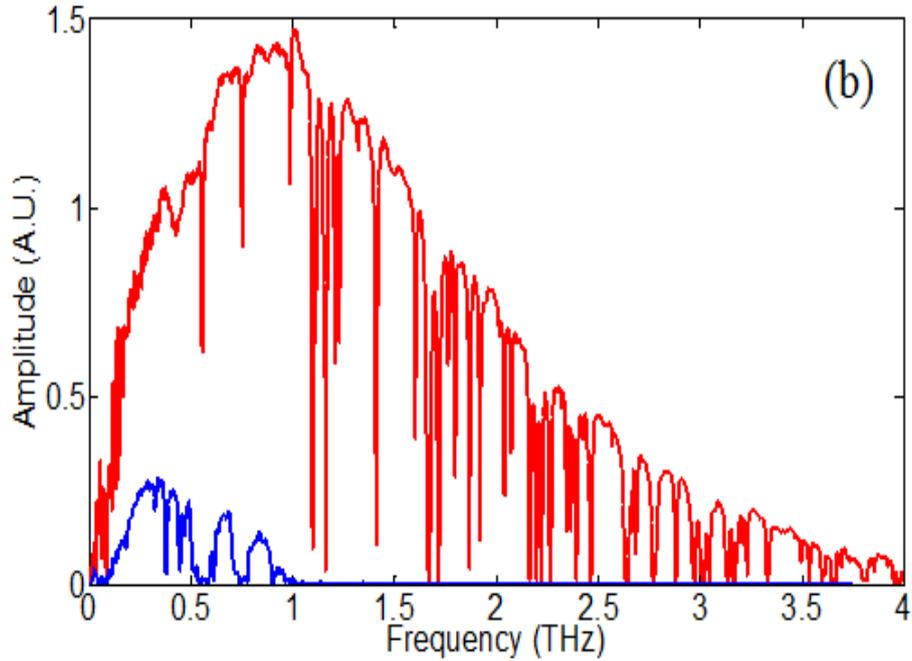


Fig. 7 (b) Input pulse와 Output pulse의 주파수 영역 비교

Input pulse의 SNR은 5,300 : 1 이며, 상대습도는 27.8%이다. Output pulse의 SNR은 300 : 1이며 상대습도는 43.1%이다. Output pulse의 경로의 길이가 Input pulse의 경로 길이보다 185m 이상 길기 때문에, 수분 영향을 지속적으로 받아 흡수율에 의해 신호의 크기도 줄어들 뿐만 아니라, 수분에 의한 굴절률 상승으로 THz 펄스가 군속도분산(Group Velocity Dispersion)이 발생되기 때문에, Input pulse의 파형에 비해 Output pulse의 파형이 전체적으로 넓게 퍼져진 것을 볼 수 있다.

Fig. 7(b)는 Input pulse와 Output pulse의 주파수 영역을 나타낸 것으로, Input pulse인 빨간색 신호는 LT-GaAs[5-10-5 μ m]으로 4THz까지 넓은 대역폭을 검출 할 수 있다. 그러나 파란색 신호의 Output pulse는 186m의 경로를 거쳐 얻은 신호로써, 2THz에서 4THz의 고주파 영역은 THz 대역의 수분에 대한 흡수로 모두 감쇄 되어, 1THz까지만 검출 된 것을 관찰할 수 있다.

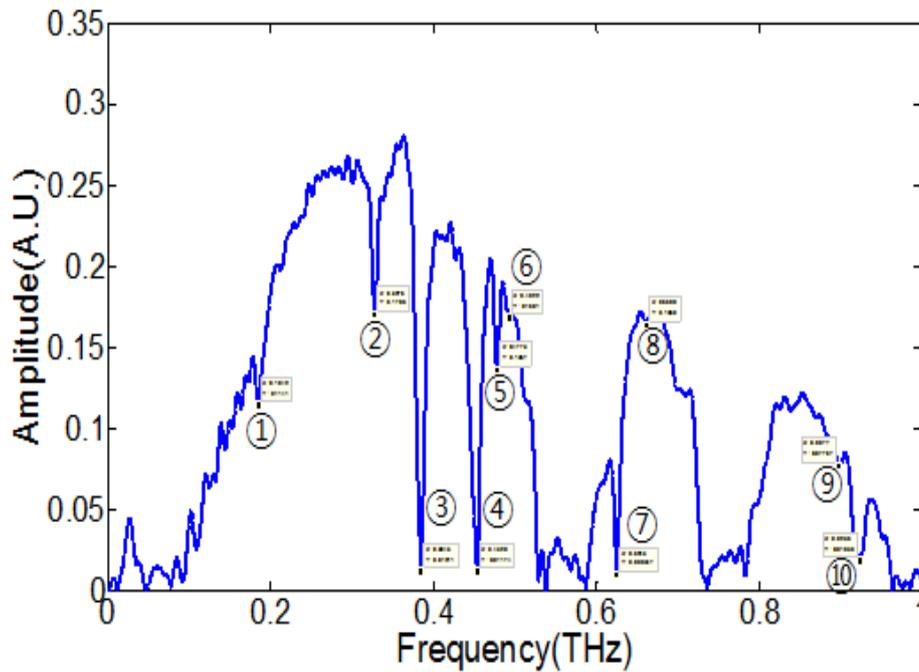


Fig. 8 Output pulse의 확대 시킨 그래프 (Fig. 7(b)의 아래쪽 신호)

Fig. 8의 그래프는 참고 문헌 [14]의 그림 5에서 수분에 의해 강력하게 흡수된 주파수 대역이 유사한 것을 볼 수 있다. (①0.18THz, ②0.32THz, ③0.38THz, ④0.45THz, ⑤0.47THz, ⑥0.49THz, ⑦0.62THz, ⑧0.66THz, ⑨0.89THz, ⑩0.92THz) 참고 문헌 [22]의 그림 3에서 주파수에 따른 흡수 계수(Absorption Coefficient)가 Fig. 8의 수분에 의해 흡수되는 주파수 영역과 동일함을 볼 수 있다.

2.2.2 LT-GaAs[10-100-10 μ m]를 사용하여 얻은 THz 신호

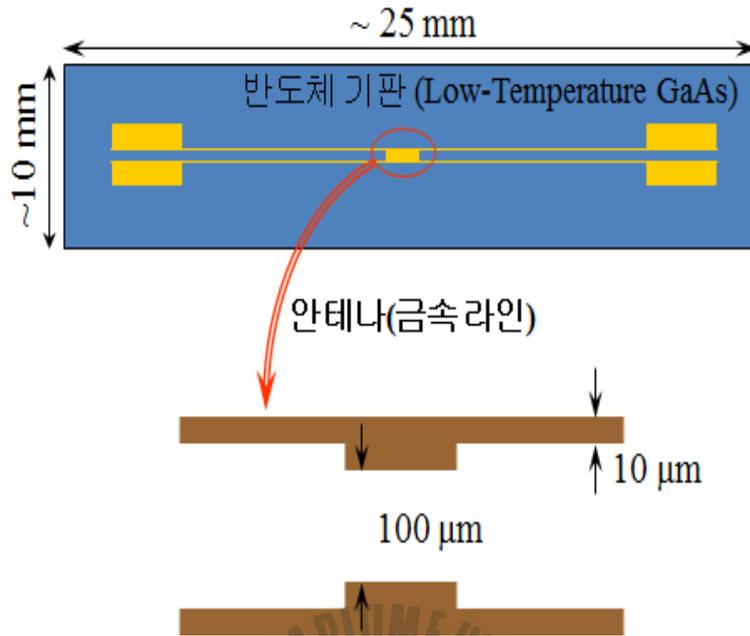


Fig. 9 LT-GaAs[10-100-10 μ m]를 도식적으로 표현

Rx에 LT-GaAs[5-10-5 μ m]을 이용하여 0.6m 거리에서 THz 전자기파를 측정한 Input Pulse의 스펙트럼을 보면 Fig. 7(b)의 빨간색이다. 이처럼 LT-GaAs[5-10-5 μ m]를 이용하면 넓은 대역폭인 4THz까지 신호가 검출 된다. 이러한 반도체 기판은 넓은 대역폭을 필요로 하는 평행 도파로, 분광학 등의 연구에는 적합하지만, 장거리로 THz 전자기파를 송·수신하는 본 연구에서는 적합하지 않다. 장거리 전송에 의하여 1THz 이상의 주파수 영역은 모두 손실이 발생하기에 넓은 대역폭을 검출 할 수 있는 LT-GaAs[5-10-5 μ m]보다는 비교적 좁은 대역폭(~2THz)을 검출하지만, 스펙트럼의 크기는 크게 검출 할 수 있는 반도체 기판을 필요로 하는 실정이다.

그리하여 기존에 사용한 반도체 기판에서 안테나 금속 라인의 구조만 변경한 기판을 사용하기로 결정하여, LT-GaAs[10-100-10 μ m]으로 교체 하였다. 이 반도체 기판은 이전에 사용하였던 기판 보다 안테나 금속선 두께는 2배, 금속선 사

이의 공간은 10배 커졌으며 금속선 라인의 길이가 길어짐²⁵에 따라 저주파 영역의 크기가 향상 되는 것을 볼 수 있었다.

이전과 마찬가지로 LT-GaAs[10-100-10 μ m]를 이용하여 M1과 M10을 제거한 뒤 파라볼릭 미러(Parabolic Mirror)사이의 0.6m 거리를 측정한 단거리 신호 (Input pulse)와 M1과 M10을 부착한 후 186m의 거리를 측정한 장거리 신호 (Output pulse)를 비교해 본다.

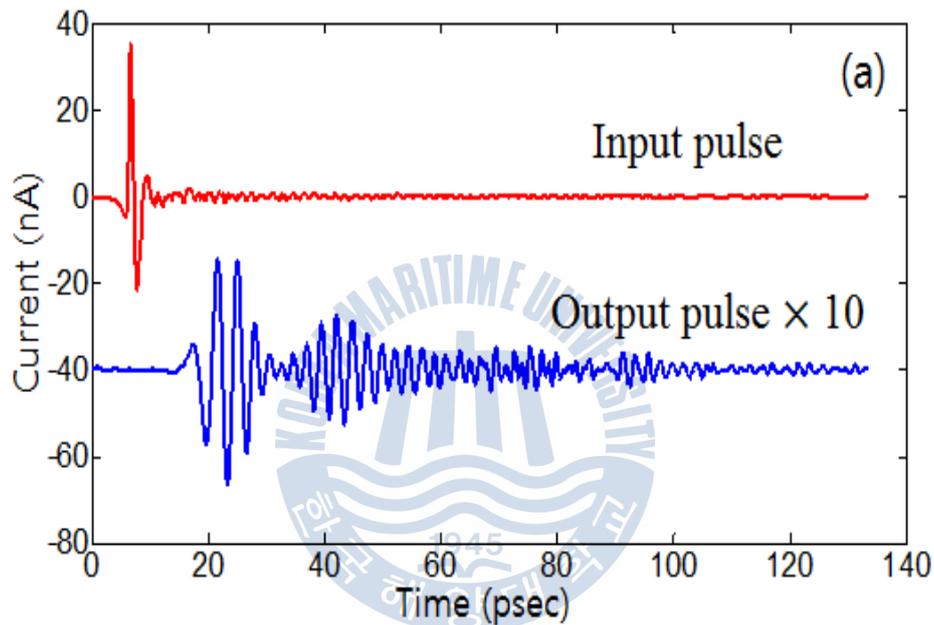


Fig. 10 (a) Input pulse와 Output pulse의 시간 영역 비교

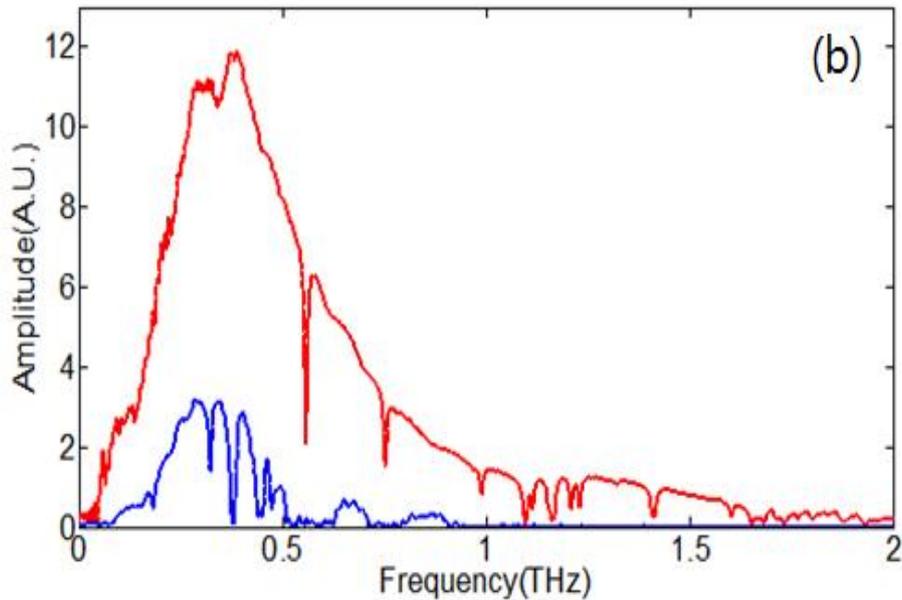


Fig. 10 (b) Input pulse와 Output pulse의 주파수 영역 비교

Fig. 10는 Rx에 LT-GaAs[10-100-10 μ m]을 사용하여 단거리 신호(Input pulse)와 장거리 신호(Output pulse)를 측정할 때의 시간 영역 및 주파수 영역의 그래프이다. (a)는 장거리 신호(Output pulse)의 신호의 크기가 상대적으로 작기 때문에 10배 확대하였다.

LT-GaAs[5-10-5 μ m]를 사용해 측정한 신호인 Fig. 7 (a) Input pulse의 전류 최고점간(Peak to peak)크기는 12.7nA이며, LT-GaAs[10-100-10 μ m]를 사용한 Fig. 12(a) Input pulse의 전류 최고점간 크기는 56.7nA로써 4.47배 증폭 하였다.

Fig. 10 (b)은 Receive chip을 LT-GaAs[10-100-10 μ m]으로 교환하여 측정한 신호의 주파수 영역으로, Input pulse의 주파수 영역은 빨간색 신호이며, Output pulse의 주파수 영역은 파란색 신호이다. 이같이 chip의 교환으로써 장거리 THz 전자기파 전송 실험의 검출 크기를 향상시켰다. 뿐만 아니라 Input pulse의 S/R은 15,000 : 1 이고 상대습도는 28.1% RH이며, Output pulse의 SNR은 1,400 : 1이고 상대습도는 54.0%이다. 단순히 신호 크기만 증가 된 것이 아닌,

SNR 비율도 4배(Output pulse기준)정도 커진 것을 볼 수 있다.

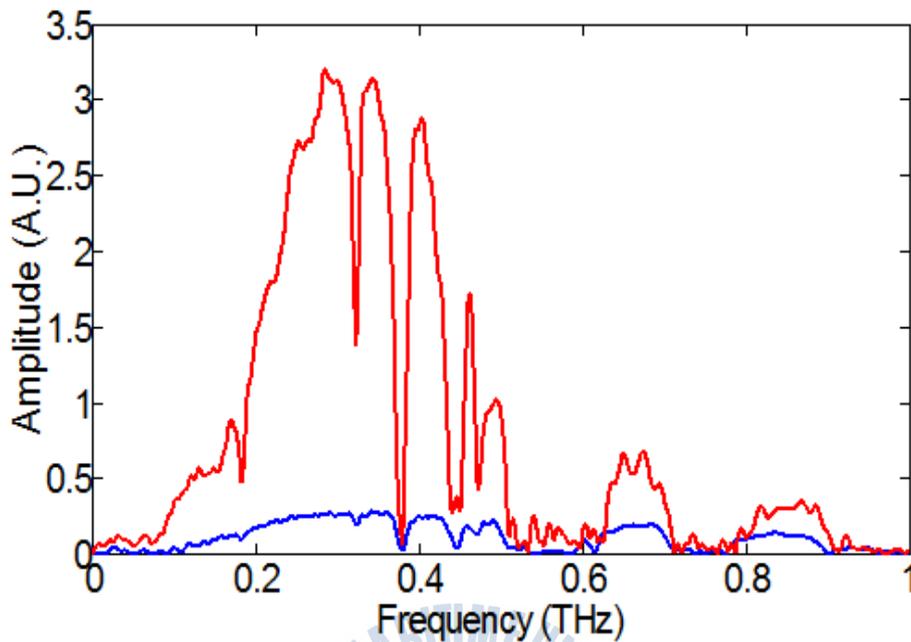


Fig. 11 LT-GaAs[5-10-5 μ m]를 사용하여 취득한 Output pulse(Blue)와 LT-GaAs[10-100-10 μ m]를 사용하여 취득한 Output pulse(Red)의 비교

Fig. 11을 보면 직관적으로 반도체 기판의 교환 전/후에 대한 신호의 주파수 스펙트럼 결과에 대한 비교를 살펴 볼 수 있다. 확실하게 LT-GaAs[10-100-10 μ m]를 사용한 신호의 스펙트럼은 크기뿐만 아니라, Fig. 8에 나타난 수분에 의한 THz 흡수 대역과 동일하게 보이고 있다. 이로써 상대습도, 외부환경 등의 조건에 의해 생기는 손실효과에 대해서 민감하게 반응하는 대역의 주파수 범위 (0.57THz ~ 1THz)에 대해 반도체 기판을 교환하기 이전 보다 크기의 변화를 수치적으로 자세히 지켜볼 수 있다.

2.3 날씨 변화에 따른 THz 신호 특성

2.3.1 눈, 비, 흐린 날씨에 따른 THz 신호

Tx에는 GaAs[10-100-10 μ m]의 반도체 기판을 사용하며 15.01mW를 입사 시켰으며, Rx에는 LT-GaAs[10-100-10 μ m]을 사용하며 14.58mW를 입사시켜 Input pulse에서는 대역폭이 2THz까지 나오는 시스템으로 실험을 시행하였다.

Table. 1 신호를 측정한 날씨에 대한 정보

| 측정한 날씨 | 날씨 | 온도 | 상대 습도 | 풍속 | 강수량 |
|------------|----|--------|----------|---------|----------|
| 2014.02.07 | 흐림 | 7.7° C | 71.7% RH | 2.8 m/s | - |
| 2014.02.07 | 비 | 8.1° C | 72.1% RH | 3.3 m/s | 2.0 mm/h |
| 2014.02.11 | 눈 | 2.9° C | 79.4% RH | 2.0 m/s | 3.3 mm/h |

환경적 요건은 눈, 비, 흐린 날씨로써 Table. 1에 측정한 때의 자료가 나타나 있다. 온도, 상대 습도, 풍속은 THz 펄스가 통과하는 건물 사이에서 측정한 것이며, 풍속은 3~4분정도 측정한 자료를 평균화 한 것이다. 흐린 날씨와 비 내린 날씨의 측정한 날씨가 같은 이유는 비 내리기 전에 구름이 잔뜩 끼어 흐려진 상태에서 측정한 자료와 비가 내리는 이후에 측정한 자료를 사용했기에 측정한 날씨가 동일하다.

2014.02.07에 비가 내린 때에 측정한 시간은 13시 36분부터 14시 39분으로 190초 정도 측정하였으며 그 시간 때에 강수량은 기상청 자료를 참고하여 나타내었다. 실험실이 위치한 부산광역시 영도구 동삼동 에서 측정한 강수량/강설량이다. 눈이 내린 2014.02.11.은 11시 45분부터 11시 48분까지 190초 측정하였다.

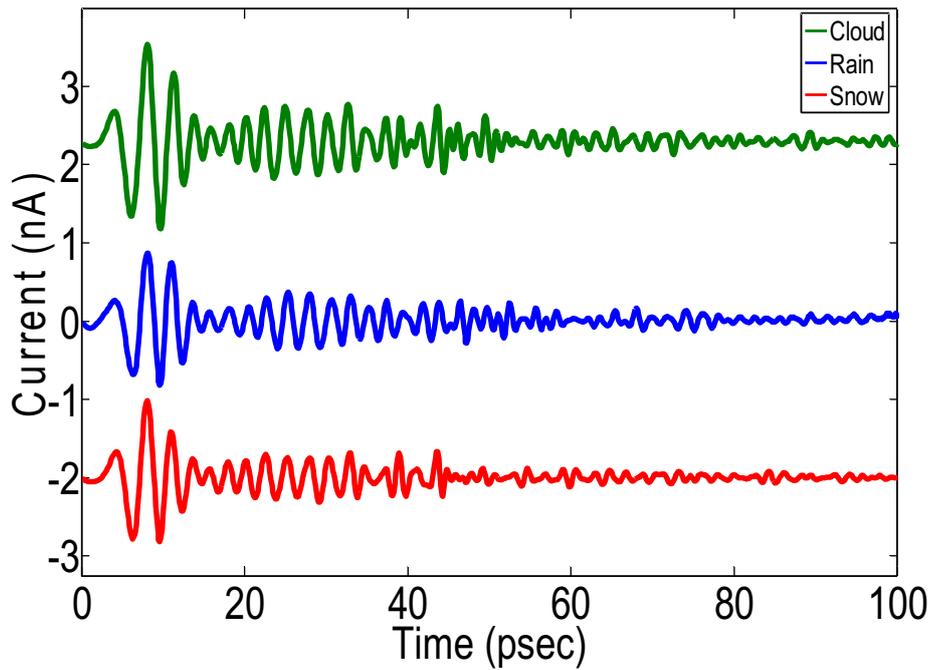


Fig. 12 날씨에 따른 시간 영역의 신호 크기 비교

Fig. 12에 나타난 바와 같이 각 날씨에 따른 시간 영역의 신호 크기를 비교하였다¹⁹. 세 개의 모든 신호가 Fig. 7(a)의 Output pulse와 같이 펄스가 넓게 퍼져 있는 것을 볼 수 있다. 측정된 상대 습도는 높지만 대기 중으로 직접적인 비가 내리지 않은 흐림 상태에 신호가 가장 크게 나왔다. 흐린 날씨 직 후 비가 내리는 때에 측정된 신호는 흐린 날씨의 상태보다 신호의 크기가 감소된 것을 볼 수 있다. 이로써 대기 중의 상대 습도와는 별개로 수분 입자에 의한 THz 전자기파의 감소를 지켜 볼 수 있었다. 눈이 내린 때에는 비가 내린 때보다 상대 습도가 7.7% 높지만 THz 전자기파 크기는 비슷하다. 이는 눈이 내린 때의 온도가 비가 내린 때보다 낮기 때문에 체적 분포 당 존재하는 습도량이 비슷하기 때문에 이와 같은 결과가 발생되었다.

결과적으로 대기 중의 수분의 양 및 상대 습도에 따라 THz 전자기파 크기가 반비례하다는 것이다.

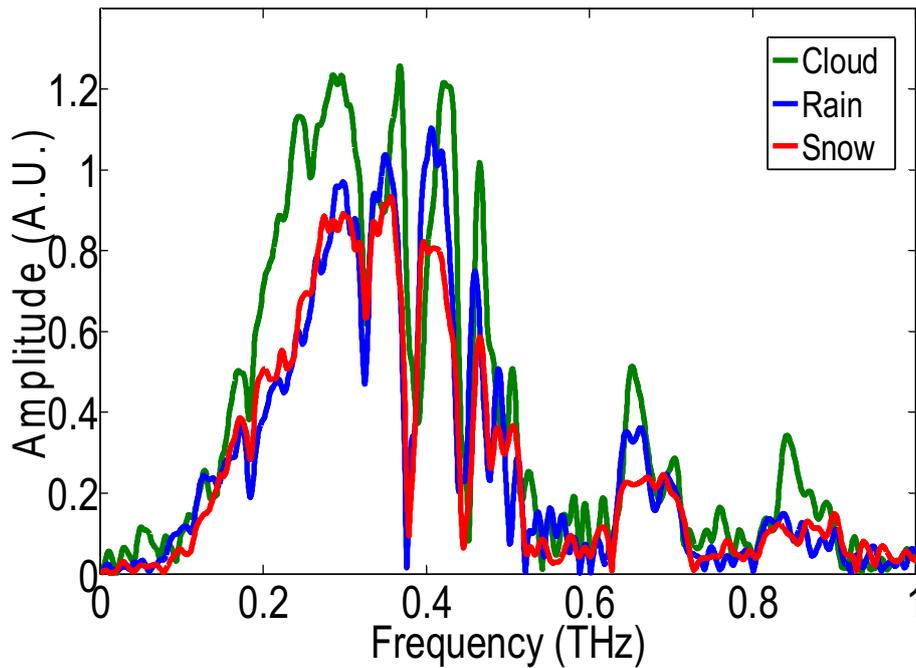


Fig. 13 날씨에 따른 주파수 영역의 신호 크기 비교

위의 그래프는 흐림, 비와 눈이 내릴 때 얻은 신호에 대해 FFT(Fast Fourier Transform)하여 얻은 주파수 영역을 비교한 그래프이다. 상대습도가 RH 71.7%이지만 신호가 통과하는 경로에는 직접적으로 수분이 부딪히는 일이 적은 흐린 날씨에는 상대적으로 가장 큰 신호의 값이 나타났다. 그러나 비가 오는 상황에서의 주파수 영역은 상대습도가 RH 0.4% 차이 나는 흐린 날씨의 신호보다 크기가 작아졌다. 상대습도의 차이가 크지 않지만 수분 분자와 부딪히는 일이 잦기 때문에, 상대적으로 흐린 날씨의 신호에 비해 전체적으로 작아졌다. 마지막으로 눈이 내린 때는 상대습도가 RH 79.4%로써 비가 온 상황의 상대습도보다 RH 7.3% 커졌다. 이는 수분의 영향이 적은 0.37THz 미만은 수분에 의한 흡수가 적어 눈이 내린 날씨의 신호와 비가 내린 날씨의 신호가 비슷하지만, 수분의 영향에 대해 민감한 0.37THz 이상의 대역은 비교적 감소된 크기를 볼 수 있다.

위와 같은 스펙트럼으로써 날씨 상황에 따른 THz 전자기파의 변화를 관찰하였으며, 실험을 통해 THz 전자기파로 날씨 변화의 측정을 보여주고 있다¹⁹.

2.3.2 수증기 밀도의 변화(1.1 g/m³ 에서 11.2 g/m³)에 따른 THz 신호

수분에 대한 흡수율이 높은 THz 전자기파^{18,19,21,22}를 본 연구실의 시스템을 이용하여 186m 전파시키며, 대기 중에 노출된 158.6m의 수증기 밀도 변화에 따른 THz 전자기파의 시간 영역 및 주파수 영역에 대한 실험 결과를 나타내었다.

Table. 2 신호를 측정된 대기 환경에 대한 정보

| 측정한 날짜 | 온도 | 상대 습도 | 수증기 밀도 | 풍속 |
|------------|---------|----------|-----------------------|---------|
| 2014.03.06 | 9.6° C | RH 12.5% | 1.1 g/m ³ | 1.3 m/s |
| 2014.02.25 | 14.8° C | RH 37.7% | 4.8 g/m ³ | 1.2 m/s |
| 2014.04.17 | 18.3° C | RH 54.0% | 8.5 g/m ³ | 2.9 m/s |
| 2014.04.17 | 17.6° C | RH 73.9% | 11.2 g/m ³ | 3.1 m/s |

대기의 환경적 변화에 따라 측정된 신호에 대한 정보를 Table. 2에 나타내었다. 여기서 주목해야 될 점은 수증기 밀도 이다. THz 대역은 수분에 대한 흡수율이 크기 때문에, 수분과 밀접한 관련이 있는 대기의 수증기 밀도에 따라 THz 전자기파의 신호가 차이가 난다. 그리하여 수증기 밀도가 각각 다른 날에 대한 자료를 이용하여 서로 비교 하였다.

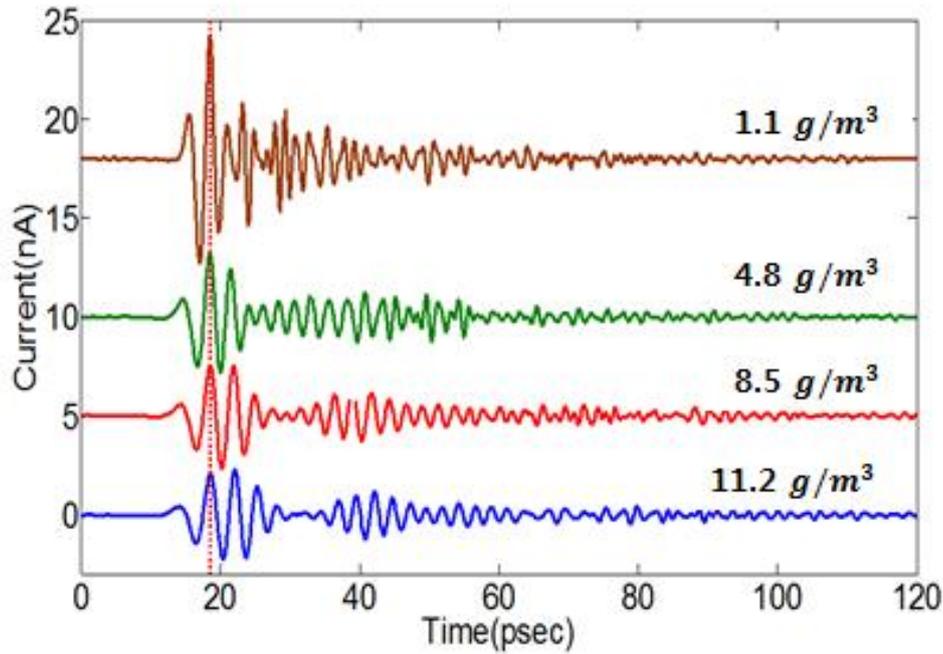


Fig. 14 수증기 밀도 차이에 따른 시간 영역 비교

Fig. 14는 Table. 2의 자료를 이용하여 시간 영역으로 THz 전자기파를 검출하여 나타낸 것이다. 건물 외부의 수증기 밀도 1.1 g/m^3 부터 11.2 g/m^3 까지를 위에서부터 아래로 순차대로 나열하였다. 4가지의 신호는 Delay Line을 사용해 1,000개의 데이터를 $20 \mu\text{m}$ 의 간격으로 측정하였으며, 데이터 측정 당 0.1332 ps 가 소요 되었다. 시각적으로 쉽게 알아보기 위해 신호 중에 전류(Current[nA])가 가장 큰 점을 기준으로 하여 그래프를 만들었으며, 신호가 큰 점의 시간 영역은 18.55 ps 로 맞추었다. 이는 Fig. 14에서 수직으로 눈금자 표시 되어있다.

대기 중의 수증기 밀도가 낮아 비교적 건조 하였던, 1.1 g/m^3 의 신호는 5가지의 신호 중에 가장 크게 신호가 출력 되었으며, 수분에 대한 굴절률 영향이 적기 때문에 신호의 펄스(Pulse) 모형이 다른 상대 습도의 신호보다 수평으로 퍼지지 않는 것으로 군속도분산(GVD)의 영향이 적은 것을 볼 수 있다. 또한, 대기 중의 수증기 밀도가 1.1 g/m^3 인 상태여서 수분에 대한 영향이 상대적으로 적기 때문에, 거리가 0.6 m 인 수분에 대한 영향을 적게 받는 Fig. 12(a)의 Input pulse의 펄스 모양과 Fig. 14의 1.1 g/m^3 신호의 펄스 모양이 서로 유사하다. 또

한, 1.1 g/m^3 신호의 전류 최고점간(Peak to peak)크기는 11.55 nA 이며, 상대 습도가 가장 큰 11.2 g/m^3 의 전류 최고점간(Peak to peak)크기는 4.49 nA 로 신호 크기로는 2.56배 차이가 난다.

그 외의 신호들은 수증기 밀도가 상승함에 따라 펄스 모양도 수평으로 퍼지면서, 전류 크기도 수증기 밀도와 반비례적으로 작아진다. 11.2 g/m^3 의 신호는 흐린 날로써 대기 중의 수분이 비교적 많은 날이기에 THz 전자기파의 전송·검출에 영향이 많이 끼쳐 신호가 작아진 것이다.

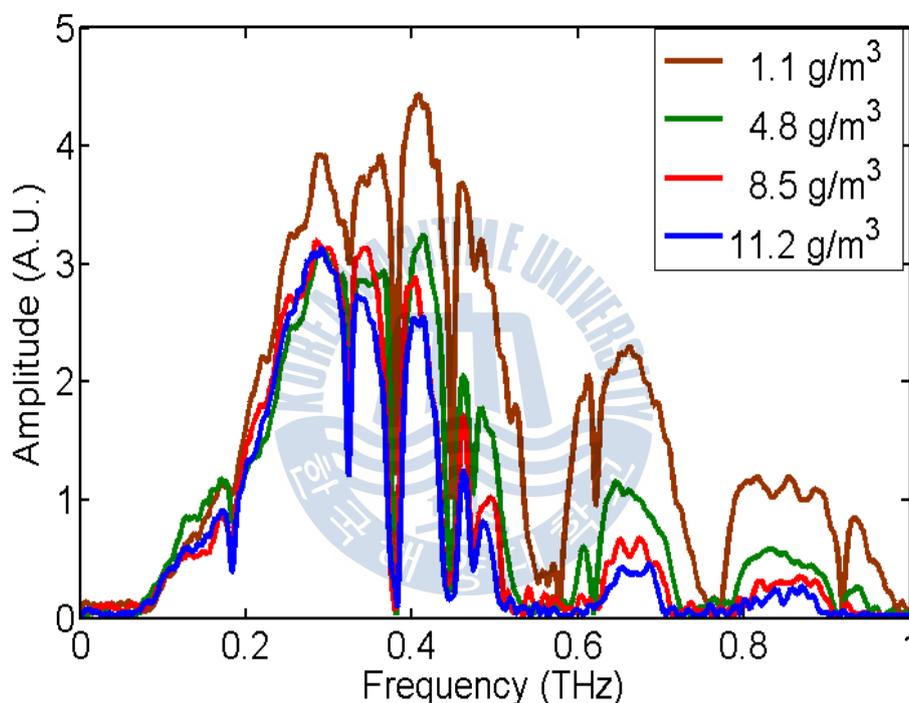


Fig. 15 수증기 밀도 차이에 따른 주파수 영역 비교

Fig. 15는 측정된 신호의 상대 습도에 대해 FFT(Fast Fourier Transform)하여 얻은 주파수 영역을 비교한 그래프이다. 수증기 밀도의 변화에 따라 반비례적으로 각 주파수 대역의 크기가 작아지는 것을 살펴 볼 수 있다. 특히, 0.37 THz 이상의 주파수 영역 범위에서부터 크기가 확연하게 줄어든다. 이는 선행 연구에서 나타낸 THz 대역의 흡수율 특징^{14,16,20}으로 저주파 대역에서는 흡수율이 상대적으로 적으며, 고주파 대역으로 갈수록 흡수율이 커진다.

이처럼 THz 대역의 주파수를 이용한 통신을 하기 위해서는 대기 중의 습도가 높을수록, THz 전자기파의 전송이 원활하게 이루어지지 않는 문제가 존재한다. 이러한 이유로써 현재에는 THz 대역을 이용한 통신을 하기 위해, 수분에 대한 영향이 적은 주파수 대역으로 저주파 대역인 0.37THz 이하의 대역을 사용하는 것이 가장 적절하다¹⁴.



2.3.3 수증기 밀도의 변화(1.1 g/m^3 에서 11.2 g/m^3)에 따른 THz 신호 지연

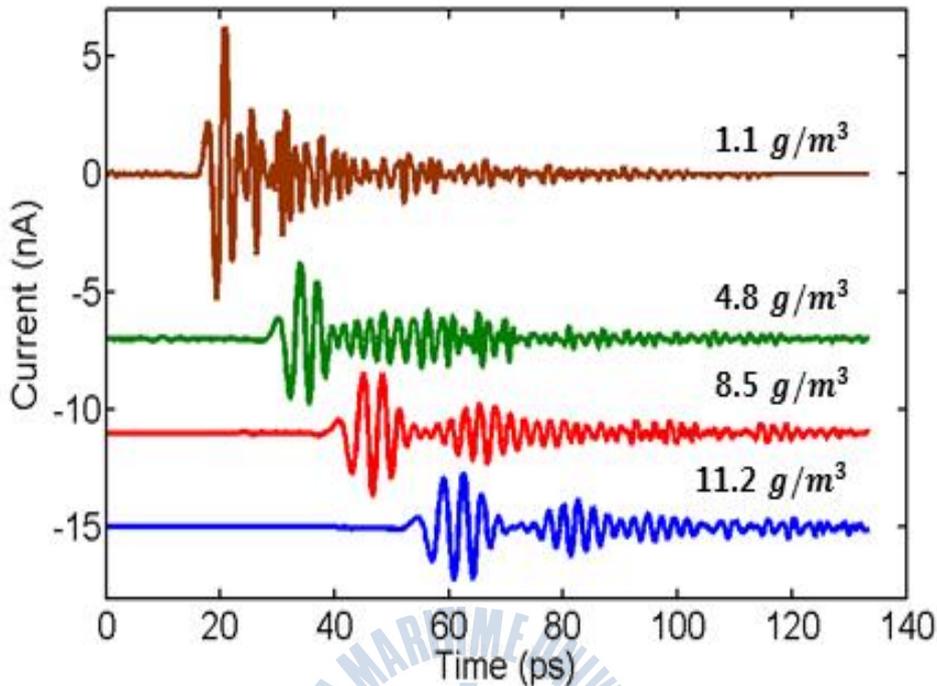


Fig 16. 수증기 밀도 차이에 따른 시간 영역 신호 지연 정도 비교

대기 중의 수분 함유량에 따라 신호의 모양이 분산되며, 신호가 발생 되는 지점이 지연되기도 한다. 위 그래프는 Fig 14.의 신호에서 1.1 g/m^3 의 신호를 기준으로 186m를 진행하였을 때 수증기 밀도의 크기에 따라 밀려난 정도를 표시한 그래프 이다. 보는 바와 같이 수증기 밀도가 높을수록 신호가 발생 되어지는 때는 비례적으로 늦춰지게 된다^{17,18}. 지연되는 시간을 알기위해 기준으로 잡은 점은 THz 펄스 신호가 나타나는 직 후 위상이 두 번째로 바뀐 위치의 시간 영역이다. 그 이외의 위치를 선택하는 경우 지연이 수분에 의해 영향을 받기 때문에 지연 정도의 신빙성을 떨어뜨리기에 신호 발생 후 가까운 위치를 선택해 비교하였다. 4.8 g/m^3 인 신호는 1.1 g/m^3 에 비해 4.17 psec 지연되었고, 8.5 g/m^3 인 신호는 1.1 g/m^3 에 비해 7.39psec 지연, 11.2 g/m^3 인 신호는 1.1 g/m^3 에 비해 11.12psec 지연되었다.

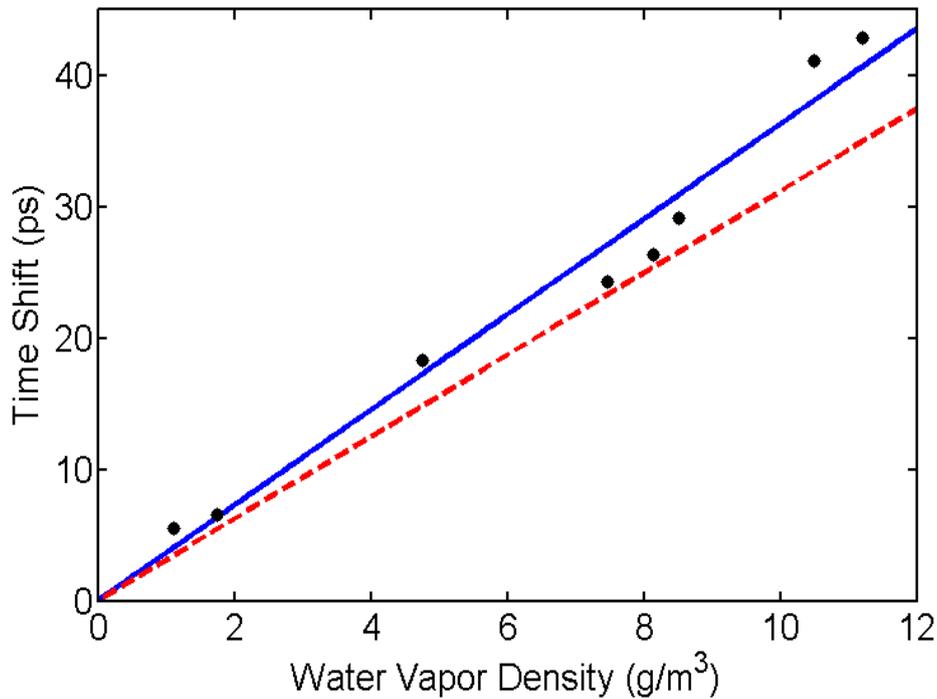


Fig 17. 수증기 밀도에 대한 시간 지연 정도 비교

Fig 17.은 측정된 신호의 수증기 밀도에 따라 지연되는 정도를 그래프로 나타내었다. 이 또한 Fig 16.과 같이 THz 펄스 신호가 나타나는 직후 위상이 두 번째로 바뀐 위치의 시간영역을 기준으로 측정하였으며, Fig. 17의 검정색의 점이 실험을 통해 나온 지연 정도의 값이다. 1.1 g/m³, 4.8 g/m³, 8.5 g/m³, 11.2 g/m³ 뿐만 아니라 그 외에 측정된 상대 습도에 대한 데이터 값을 추가하였다. 파랑색 선이 실험을 통해 나온 값에 대한 평균적인 정렬값(Fitting)이다. 빨강의 점선은 이와 비슷한 실험을 했던 Oklahoma University Group의 수증기 밀도에 따른 지연 정도를 나타낸 것이다¹⁷.

본 연구실에서 외부의 수증기 밀도에 따라 영향을 받는 공간은 158.6m로써 그래프의 기울기는 3.63이다. 이는 Oklahoma University Group의 수증기 밀도를 조절하는 공간의 길이는 137m로 본 연구실과 비교하여 상대 습도에 영향을 받는 공간의 길이가 짧아 그 기울기는 3.13이다. 이는 Oklahoma University Group에서 수증기 밀도의 변화 길이¹⁷에 대한 비율만큼 연산해 주면 본 연구실의 기울기 값이 유사하게 나타남으로 실험 결과에 대한 신빙성을 더해준다.

2.3.4 수증기 밀도의 변화에 따른 THz 신호 흡수율

THz는 각 주파수 대역마다 수분에 대한 감쇠율(Power Attenuation)이 존재한다. 이는 많은 실험에 의해 증명되었으며, 감쇠율 뿐만 아니라, 흡수율로 나타내어 연구되어왔다^{18,21,22}. 본 연구에서도 아래의 수식을 이용한 감쇠율을 구해보았다.

$$PowerAttenuation(dB/Km) = -20 \times \log_{10} \left(\frac{THz_{output}}{THz_{Input}} \right) \times \frac{1}{Distance} \quad (3)$$

거리의 수치는 km로써 Output pulse의 1.1 g/m³ 와 11.2 g/m³ 의 차이에 대한 값에 1km당 감쇠하는 THz의 신호이다.

(3) 식의 감쇠율의 THz_{Input} 은 Fig 15.의 1.1 g/m³의 주파수영역을 대입하며, THz_{output} 은 THz_{Input} 과 비교할 신호를 넣는 것이다. THz_{output} 은 Fig 15.의 11.2 g/m³의 검출된 신호이다. 이를 log상수로 취하고, 그에 상응하는 거리를 나누어 주면 원하던 감쇠율이 나타난다. 그에 상응하는 거리는 대기에 노출된 거리로써 대기의 수증기 밀도 변화에 따라 신호의 형태 및 주파수 영역이 변하기 때문에 158.6m로 설정하였다. 이를 통해 수증기 밀도의 차이인 10.1 g/m³ 감쇠율의 변화를 살펴보겠다.

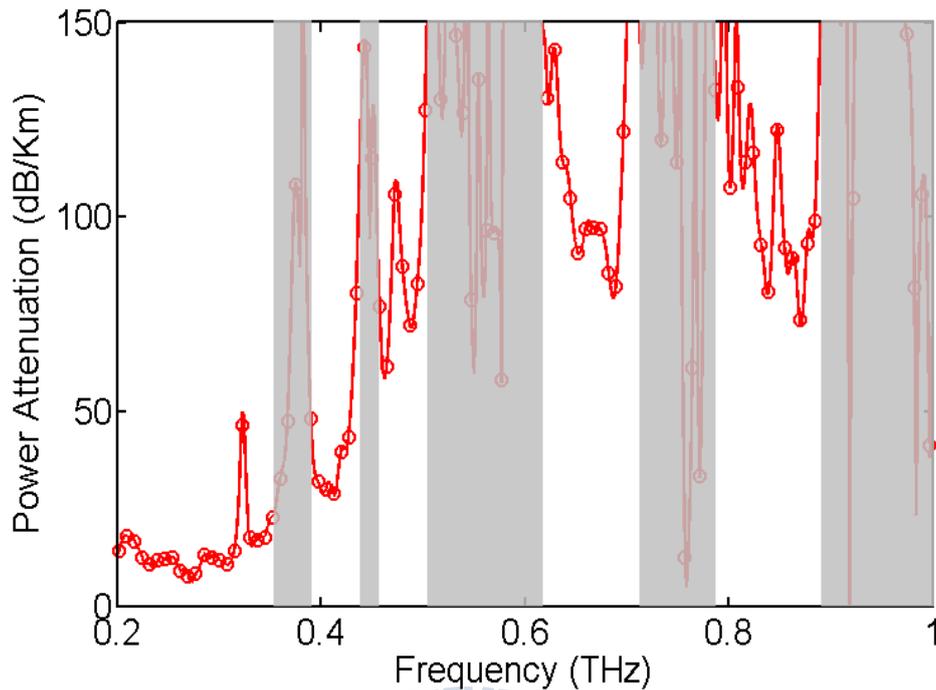


Fig 18. 수증기 밀도 차이에 대한 감쇠율의 비교

Fig 18.은 수증기 밀도 1.1 g/m^3 와 11.2 g/m^3 의 차이에 대한 감쇠율이다. 주파수 범위에서 회색 라인은 THz 대역에서 나타난 수분에 의한 흡수율 영향이 큰 주파수 대역을 나타낸 것이다. 즉, THz의 특성에 의해 수분에 의한 감쇠율, 흡수율이 큰 주파수 범위를 제외한 나머지를 나타내었다. 이 같이 비교적 THz 전자기파가 대기 중으로 수분에 의한 영향을 적게 받고, 송수신 가능한 주파수 대역을 THz Transmission Windows이라고 한다^{14,20}.

수증기 밀도에 따른 감쇠율을 비교해 볼 수 있었다. 이는 과거 시뮬레이션으로 진행되었던 THz 대역의 흡수율에 대해 실험적으로 증명하였다. 이를 통해, 수증기(수분)에 대한 감쇠율 영향이 큰 영역을 피하며, 그 외의 영역으로 흡수율이 적은 THz Transmission Windows을 이용하여 통신 시스템에 이용할 수 있는 대역을 설정 할 수 있는 정보를 제공할 것이다.

2.4 습도 변화에 따른 THz 신호 특성

2.4.1 Slow scan을 이용한 연속적 습도 변화에 따른 THz 신호 변화

THz 전자기파의 발생부터 측정까지의 거리는 186m로써, MaiTai Laser의 공진기의 84.00MHz의 반복률에 의해 52번째 펄스를 사용하여 측정할 수 있었던 거리이다. 모든 경로에서 외부의 대기에 노출되는 거리는 158.6m이며, 그 외의 31.4m는 실내에 위치하여 항상 온도는 $21 \pm 1^\circ\text{C}$ 와 습도는 RH $45 \pm 1\%$ 가 유지된다. 그러므로 외부의 환경에 따라 THz 신호를 지켜보았다.

모든 186m 측정은 Delay Line을 이용하여 1,000개의 데이터를 각각 20 μm 간격으로 설정하여 20cm의 길이를 190초 동안 신호를 측정하였다. 이를 Slow scan이라고 지칭하겠다. 190초의 측정 시간 동안 외부의 습도, 온도는 항상 변한다. 날씨에 따른 변폭정도가 다를 뿐이다. 측정 시간 동안 날씨가 크게 변하지 않는다면 외부 습도는 $\pm 5\%$ 정도 움직이며, 외부 온도는 $\pm 2^\circ\text{C}$ 정도 변동된다. 그러나 비가 오다가 날이 맑아지거나 그 반대의 상황이 벌어질 때 측정한다면 외부 습도는 RH $\pm 11\%$ 움직이며, 외부 온도는 $\pm 4^\circ\text{C}$ 이상 변화된다. 이러한 원인 때문에 측정한 신호를 비교해 보면, 각 시간 영역의 신호 크기가 약간 지연되거나 앞당겨지는 것을 살펴 볼 수 있다. 이런 결과를 분석하기 이전에 온도의 변화폭은 워낙 적어 신호에 큰 영향을 주지 않는다고 가정하였다. 그리하여 186m의 THz 신호를 측정하는 동시에 외부의 습도를 시간별로 측정하여 습도의 변화를 관측하였다^{17,19,22}. 이를 통해 습도의 변화에 따른 THz 전자기파의 시간 영역의 변화를 지켜보았다.

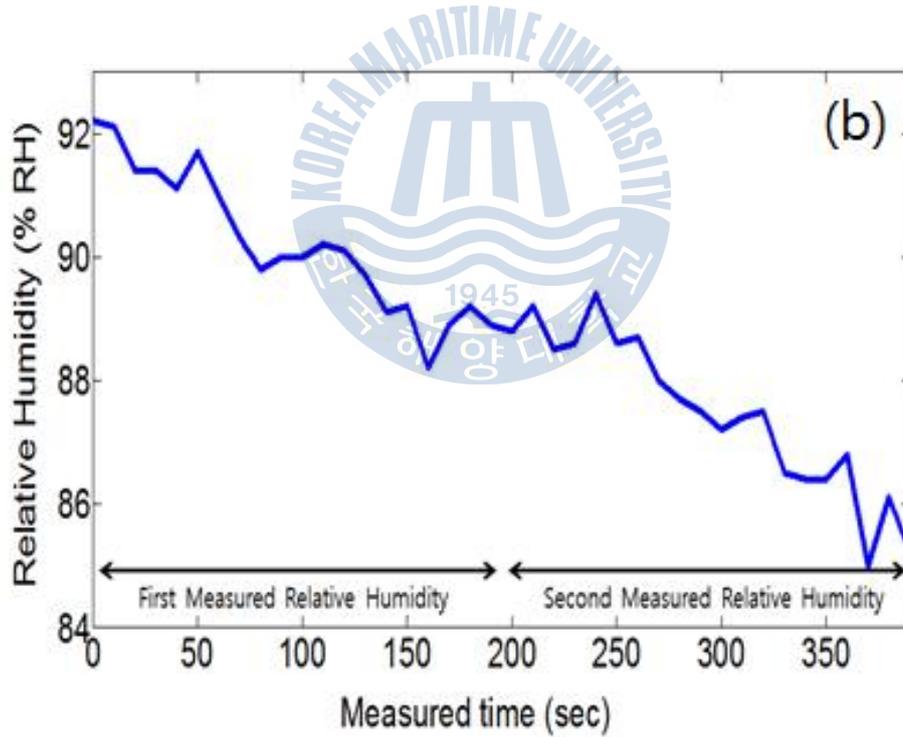
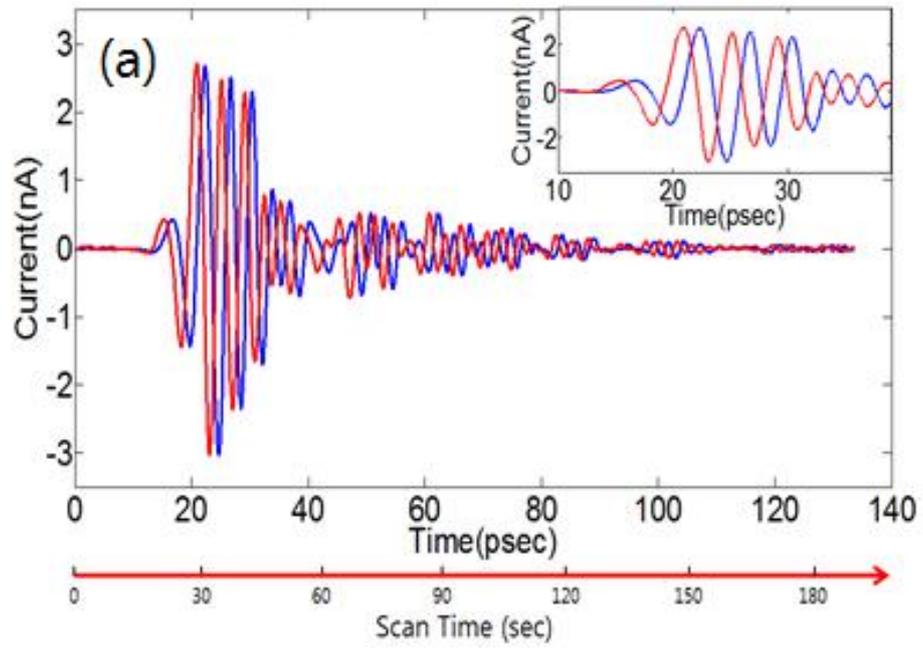


Fig. 19 (a) 외부 습도의 변화에 따른 신호의 변화
 (b) 외부 습도의 변화

Fig. 19 (a)의 신호는 동일한 시스템에서 측정된 신호로 총 거리는 186m이며, 연구실 외부의 길이는 158.6m이다. 외부 습도 (b)는 평균 RH 87.6%으로 2014년 9월 3일에 측정된 실험 데이터이다. Fig. 19 (a)의 파란색의 신호는 14시 16분부터 14시 19분까지 측정하였고, 그에 상응하는 외부 습도는 (b) 그래프에서 0초부터 190초 까지를 나타내고 있다. Fig. 19(a)의 파란색 신호 측정이 후 연달아 측정된 빨간색 신호는 14시 19분부터 14시 22분까지 측정하였으며, 그와 동시에 측정된 외부 습도는 (b) 그래프에서 200초부터 390초 까지를 나타내고 있다.

Fig. 19(a)의 확대된 그래프에 나타난 바와 같이, 20psec 부근을 살펴보면 연달아 찍은 신호이지만 신호가 겹쳐져 Overlap 되지, 얇고 어긋나 있는 것을 관찰할 수 있다. 20psec 측정 시 소요되는 시간은 27초이므로, (b)의 습도 그래프에서 각각 측정 시작한 뒤 27초 후를 보면, 두 신호의 습도 크기가 다른 것을 확인할 수 있다. 첫 번째 측정된 데이터의 17초 일 때 상대 습도와 두 번째 측정된 데이터 시간인 217초 때의 상대 습도를 비교해 보면, 첫 번째 측정된 습도가 높기 때문에 신호에 대한 수분의 영향이 크다. 그러므로 Fig. 19 (a)에서 20psec의 신호를 살펴보면 습도의 변화에 의해 두 번째 측정된 신호가 시간 영역 데이터에서 첫 번째 신호에 비해 앞당겨 졌다. 이로써 외부의 습도에 따라 변화되는 THz 신호를 통해 외부 환경에 대한 상대 습도에 의한 민감한 특성을 살펴보았다. 이러한 데이터를 종합하여 볼 때 습도의 변화에 따라 신호의 지연과 앞 당겨짐이 반복해서 나타나는 것을 관찰할 수 있다.^{17,18}.

2.4.2 Fast scan을 이용한 THz 신호 측정 및 Slow scan과의 비교

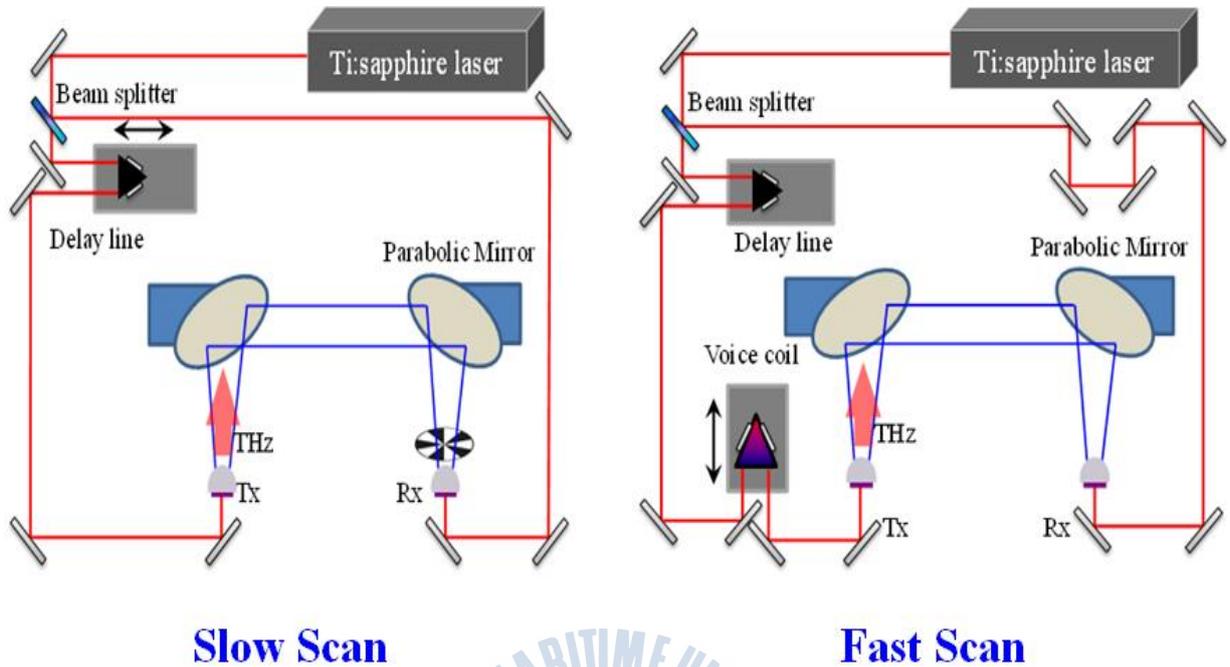


Fig. 20 Slow scan 시스템과 Fast scan 시스템

186m 측정을 Delay Line을 이용하여 1,000개의 데이터를 각각 20 μ m 간격으로 설정하여 20cm의 길이를 190초 동안 신호를 측정하는 Slow scan과는 다르게, 이번에는 20cm의 신호구간을 0.5초안에 찍는 Fast scan을 사용해서 신호를 검출해 보겠다. Fast scan을 동작시키기 위해 Voice coil을 이용하여 1Hz의 속도부터 10Hz 속도까지 앞뒤로 움직여 신호를 측정할 수 있다. Voice coil의 설치로 인하여 Receive 측(Rx)의 레이저 경로를 보상해 주었다.

Fast scan을 이용할 시에는 Delay line은 고정시켜 두고 Voice coil의 경로에 THz 신호가 검출될 수 있게 조정하면 신호가 측정 될 수 있다. 신호 측정 시에는 Lock-In Amplifier(SR 570)를 이용하여 THz를 측정하는 것이 아니라, Current Amplifier를 이용하여 Receive chip으로부터 생성된 THz 전류를 증폭시킨 후 Data Acquisition(DAQ)를 이용하여 전압 신호를 받아 THz 신호를 측정할 수 있다.

Current Amplifier에서는 Sensitivity를 2nA/V로 맞추어 2nA당 1V가 변환되게 지정한 뒤, Current Amplifier가 나타낼 수 있는 한계 전압인 5V 미만이 출력 되게 하여 신호를 보존 하였다. 또한, Filter FREQ를 100Hz에서 10kHz로 설정하여 원 신호에 대한 노이즈와 저주파 신호를 제거하였다. 이 같은 Slow scan을 이용하여 190초 동안 측정하였던 THz 전자기파를 Fast scan을 이용하여 0.5초 이내로 측정 가능케 하였다.

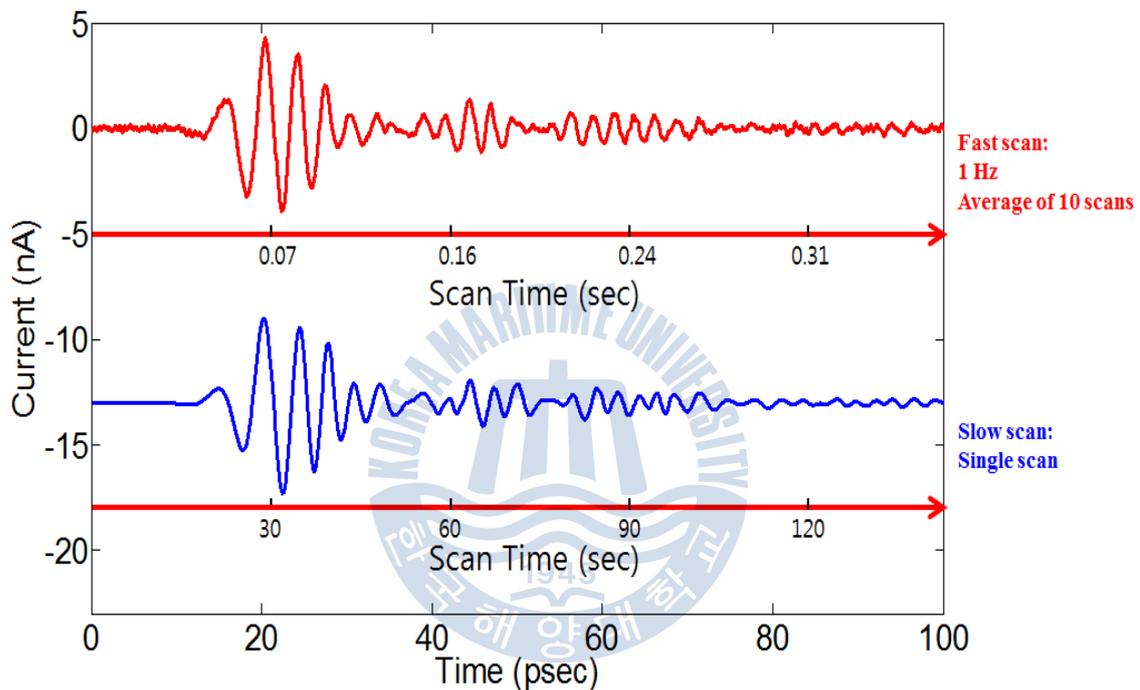


Fig. 21 Fast scan과 Slow scan의 시간 영역 신호 비교

Fig. 21에서 빨강 선의 전자기파 신호는 Fast scan을 이용하여 취득한 THz 신호로써 10개의 데이터를 평균화 하여 나타낸 신호 이며, 파랑 선의 전자기파 신호는 Slow scan을 이용하여 취득한 THz 신호이다. Fast scan에서 10개의 평균화를 통하여 신호의 잡음(Noise)를 제거하였다. 또한, 신호를 취득하기 위한 소요 시간을 각 신호 밑에 표기하였다. Fast scan에서 100psec 이내의 신호를 측정 하는데 걸린 시간으로는 한 개의 데이터를 취득하는 데 0.4초

이내에 측정할 수 있었고, Slow scan에서는 145초 이내에 측정할 수 있었다. 빠른 측정 시간을 통해 외부의 대기 변화에 대해 큰 영향을 받지 않는 신호를 검출하였다. 이런 Fast scan을 이용한 짧은 시간에 측정 가능케 한 것을 통하여, THz를 이용한 실시간 어플리케이션을 구현할 것으로 예상된다^{26,27}.

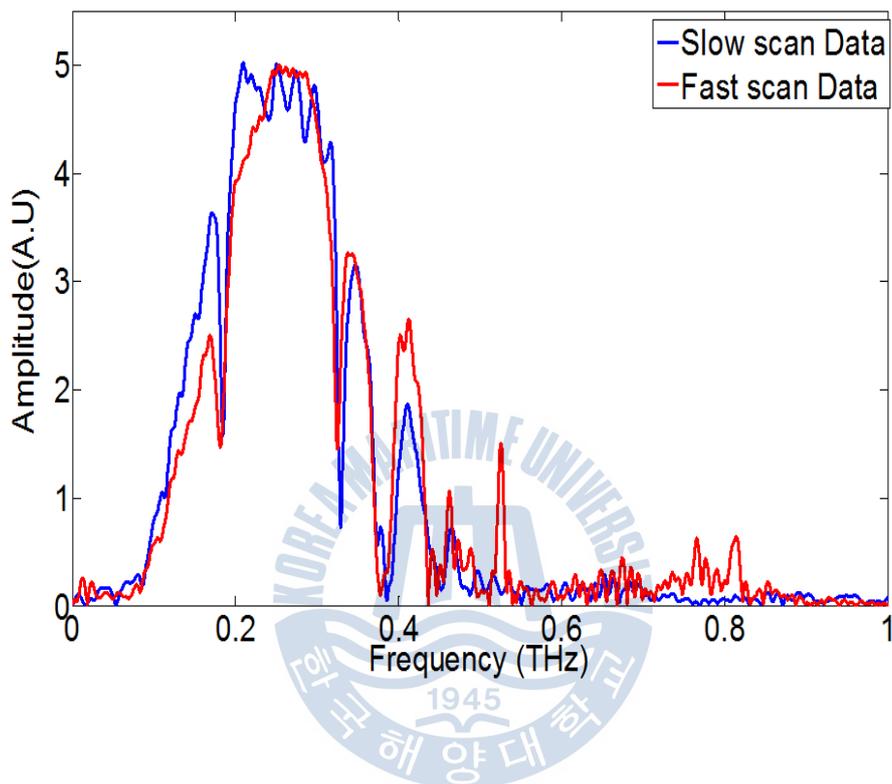


Fig. 22 Fast scan과 Slow scan의 주파수 영역 신호 비교

Fig. 22는 Fast scan과 Slow scan을 이용하여 측정한 THz 신호의 주파수 영역이다. 강력한 수분 흡수율을 가지는 각 주파수 대역과 서로 일치 하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 0.1THz에서 0.18TH와 0.38THz에서 0.43THz 그 외의 정확하게 맞아 떨어지지 않는 부분은 Current Amplifier의 Filter FREQ을 이용한 필터링(Filtering) 선택의 한계점에 의하여 주파수가 크기가 영향을 끼쳤다. 이는 세분화 되어있는 필터링(Filtering)을 거친다면 충분히 Slow scan의 신호와 Fast scan의 신호의 동일화를 이룰 수 있다.

2.4.3 Fast scan을 이용한 시간 변화에 따른 THz 신호 변화

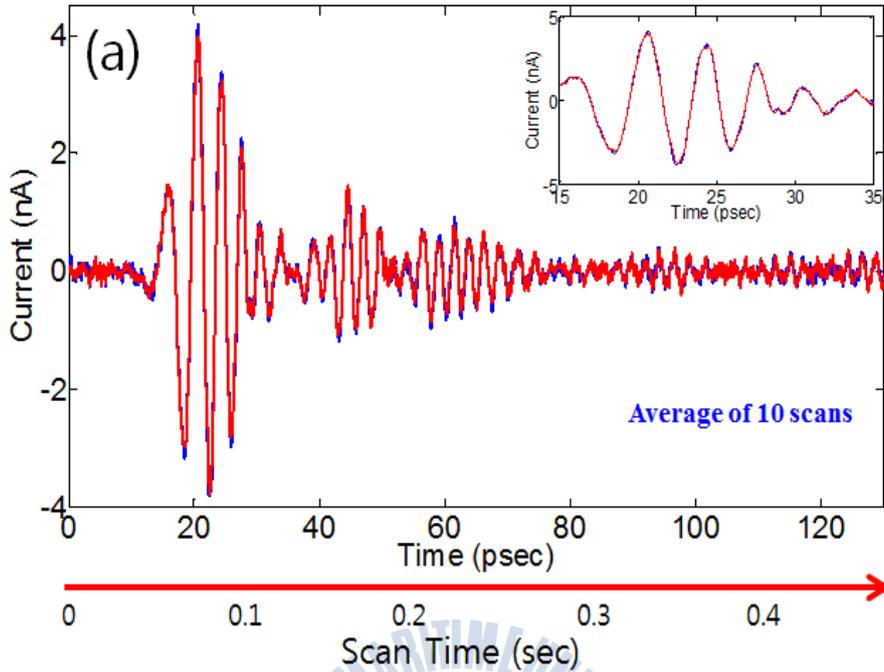


Fig. 23 (a) THz 신호 측정 후, 즉시 측정 시작한 THz 신호와 비교

Fig. 23 (a)는 Fast scan을 이용하여 10초 동안 10개의 데이터를 취득한 뒤 이를 평균화 하여 나타낸 값이 파란색 선이며, 10개의 측정 직후 이어서 추가로 10개의 데이터를 측정한 값을 평균화 한 것이 빨간색 선이다. 즉, 순차적으로 측정하여 짧은 시간동안 대기 중의 변화가 적을 것으로 예상하여 실험하였다.

외부의 습도는 평균 RH 65.3%이고, 평균 온도는 23.1°C였으며, 평균 풍속은 1m/s였다. 측정 시간동안 습도의 변화는 $\text{RH} \pm 2\%$ 로써 변화가 적었다. 이런 결과로써 측정한 두 개의 THz 신호는 대부분 겹쳐지는(Over-lapped) 것을 볼 수 있다. 우측 상단의 신호는 15psec부터 35psec까지 확대한 그래프로 신호가 겹쳐지는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 순차적으로 측정한 두 개의 THz 신호의 크기는 큰 차이가 없었다.

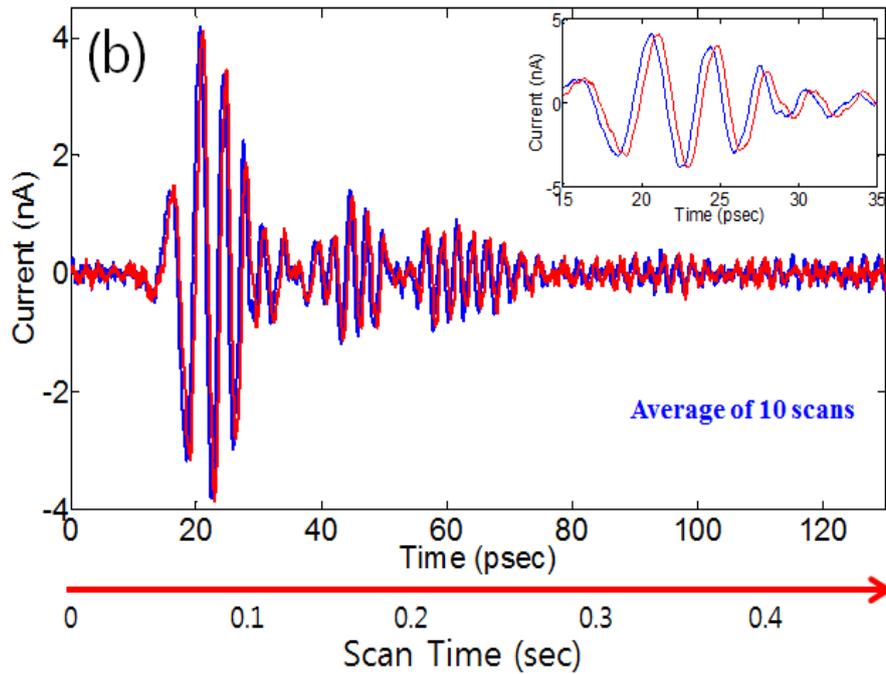


Fig. 23 (b) THz 신호 측정 후, 60초 경과 후 측정 시작한 THz 신호와 비교

Fig. 23 (b)는 Fast scan을 이용하여 10초 동안 10개의 데이터를 취득한 뒤 이를 평균화 하여 나타낸 값이 파란색 선이며, 첫 번째 측정 한 뒤 60초 후 추가로 10개의 데이터를 측정한 값을 평균화 한 것이 빨강색 선이다. Fig. 23 (b)의 파랑색의 신호는 Fig. 23 (a)의 파랑선의 신호와 동일한 값이다.

우측 상단의 그래프를 참고하면 Fig. 23 (a)에서는 순차적으로 측정한 두 THz 신호가 겹쳐지는(Over-lapped) 것을 나타내었지만, Fig. 23 (b)에서는 60초의 간격을 두고 측정한 신호에서 서로 0.44psec 차이가 발생하였다. 60초 후에 측정한 빨강선의 THz 신호가 뒤로 지연되는 것을 보고, 60초 동안 외부의 습도가 상승 된 것을 예측해 볼 수 있다. 이 같은 실험 데이터로 외부의 습도 변화를 예상할 수 있다.

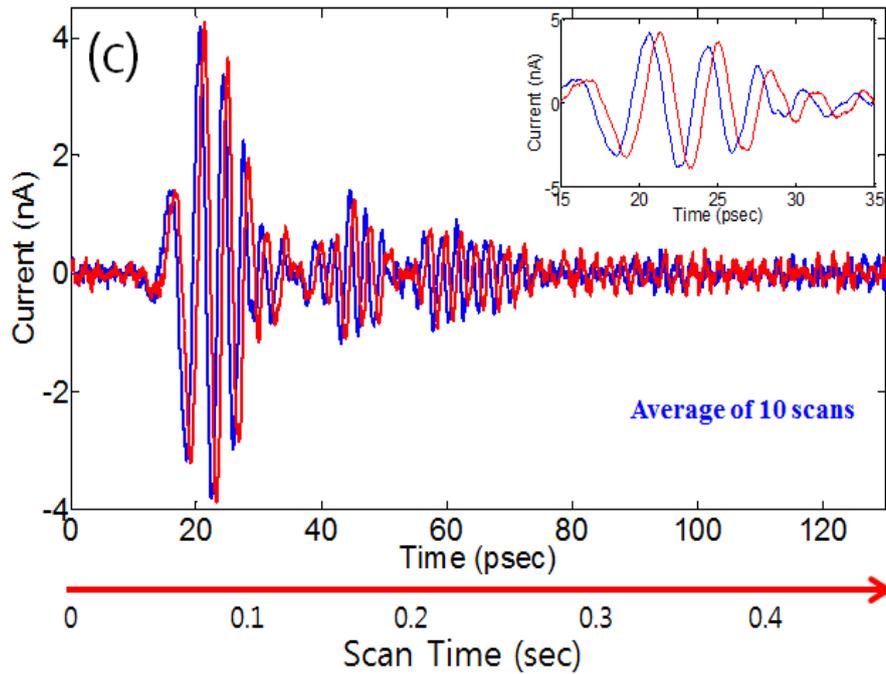


Fig. 23 (c) THz 신호 측정 후, 120초 경과 후 측정 시작한 THz 신호와 비교

Fig. 23 (c)는 Fast scan을 이용하여 10초 동안 10개의 데이터를 취득한 뒤 이를 평균화 하여 나타낸 값이 파란색 선이며, 첫 번째 측정 한 뒤 120초 후 추가로 10개의 데이터를 측정한 값을 평균화 한 것이 빨강색 선이다. Fig. 23 (c)의 파란색의 신호는 Fig. 23 (a)의 파랑선의 신호와 동일한 값이다.

우측 상단의 그래프를 참고한다면 Fig. 23 (a)에서는 순차적으로 측정한 두 THz 신호가 겹쳐지는(Over-lapped) 것을 나타내었지만, Fig. 23 (c)에서는 120초의 간격을 두고 측정한 신호에서 서로 0.78psec 차이가 발생하였다. 120초 후에 측정한 빨강선의 THz 신호가 뒤로 지연되는 것을 보고, 120초 동안 외부의 상대 습도가 상승 된 것을 예측해 볼 수 있다. 또한, 0.78psec로써 Fig. 23 (b)에서 지연된 0.44psec보다 0.34psec 지연됨을 관찰하였으며, 외부의 대기 습도는 꾸준히 상승 된 것을 예상할 수 있다.

수분에 민감한 THz의 특성을 이용하여 공기 중의 상대 습도 변화를 확인 할 수 있었으며, 이를 응용하여 날씨 예측에도 적용이 가능할 것이라 예상된다.

2.5 건물 내에서 측정된 THz 신호

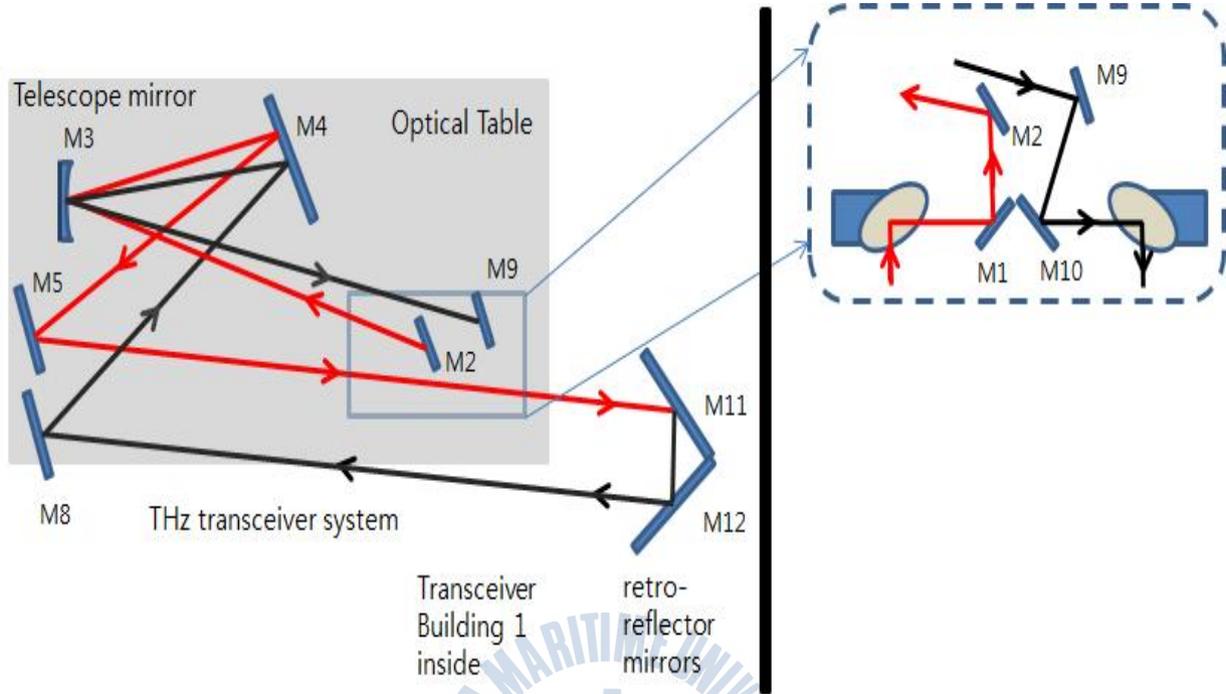


Fig. 24 실내에서 THz 펄스(Pulse) 전송에 대한 미러(Mirror) 배치도

Fig. 24는 본 논문에서 연구를 위해 배치된 각 미러(Mirror)를 도식적으로 나타낸 것이다. THz-TDS을 이용하여 발생된 THz 전자기파를 Fig. 3와 같이 건물 밖으로 진행 되는 것이 아닌, Building 1에서 Mirror로 경로에 따라 진행되어 Retro reflector(M11와 M12)에 반사되는 것으로 186m 거리에서 측정된 신호의 경로와 유사하게 전파하여 신호를 검출하는 것이다¹⁵. 이는 Fig. 3의 경로 중간에 Retro reflector(M11와 M12)을 설치하였으며, 측정할 시에는 Fig. 3에서 설정한 광학 시스템은 전혀 조절 하지 않고 실험을 진행하였다. Retro reflector(M11와 M12) 또한 Fig. 3의 Retro reflector(M6와 M7)와 똑같이 프로파일로 제작하여 설치하였다. 다만, Retro reflector(M6와 M7)와 다른 점은 미러 뒷면에 조절 나사를 넣어 Mirror Mount와 같이 Mirror에 의해 반사되는 THz의 경로 변화를 줄 수 있다는 점이다. 이를 통해 Fig. 3에서 설정한 광학 시스템을 전혀 조

절하지 않을 수 있었다.

$$c = f \times \lambda \quad (2)$$

Ti:sapphire laser의 반복률(repetition rate)을 이용하여 각 펄스간의 파장 간격을 구해 그 간격의 배수에 해당하는 거리만큼 설정해줘야 THz의 신호를 검출할 수 있다. (2)를 통해 구했던 $\lambda = 3.57\text{m}$ 을 이용하여 7번째 펄스를 사용하여 건물 내에 설치 할 수 있는 가장 적합한 거리를 24.99m(약 25m)로 선정해 Retro reflector(M11와 M12) 위치를 정하고 고정시켰다. 고정 시킨 후 Retro reflector(M11와 M12)의 조절나사를 이용하여 THz 경로를 186m와 같은 경로로 진행 시키도록 했다. 이는 M1과 좌측의 Parabolic Mirror 사이에 헬륨네온(He-Ne) 레이저를 입사시켜 각 Mirror에 반사된 뒤, 186m의 THz 경로와 같게 전파 되도록 설정하였다. 모든 경로를 거쳐 M10과 우측의 Parabolic Mirror의 사이에 Metal Mirror를 넣어 헬륨네온(He-Ne) 레이저 경로를 한 지점으로 향하게 한다. 그 후 52번째 펄스와 7번째 펄스를 측정할 시에도 헬륨네온(He-Ne) 레이저가 향한 한 지점은 똑같이 향하도록 설정하여 186m와 25m의 경로 일치시켰다.

이를 이용하여 Input pulse와 MaiTai Laser의 반복률에 의한 7번째 펄스를 이용한, Output pulse를 시간 영역, 주파수 영역과 주파수 대역별 투과율을 비교하였다.

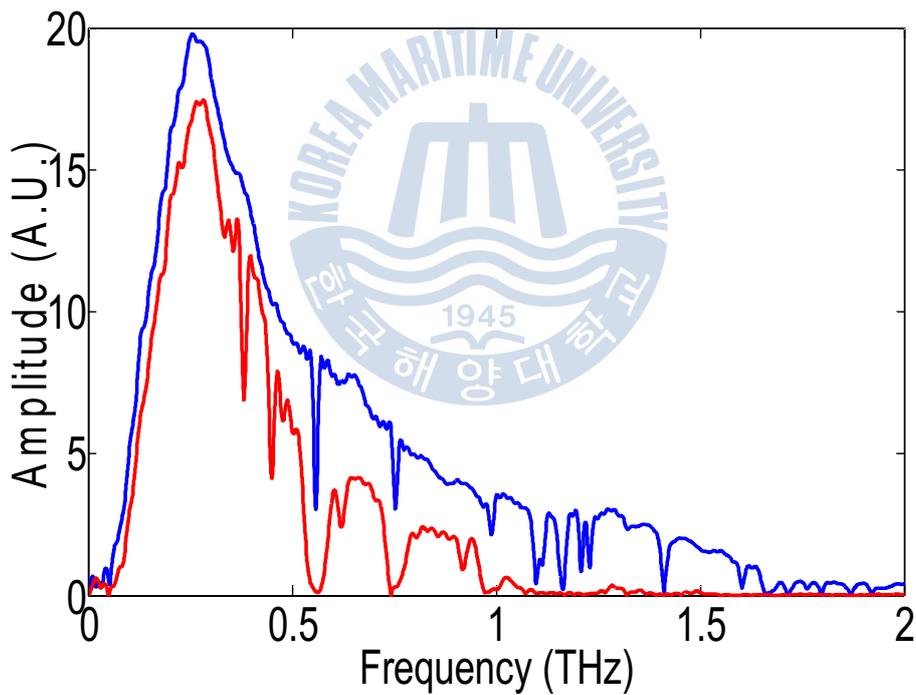
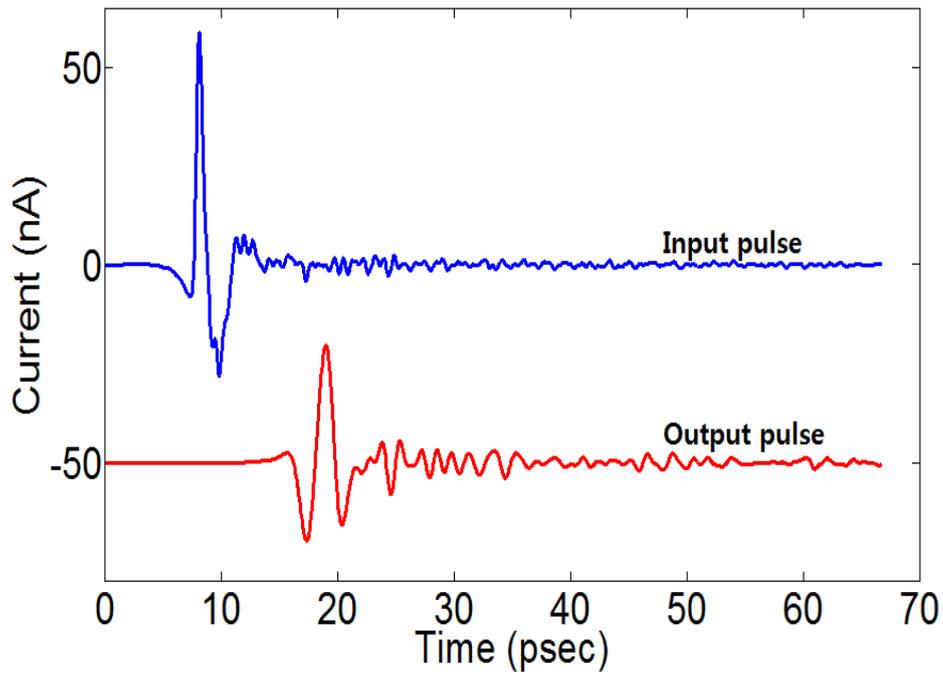


Fig. 25 Input pulse와 25m 경로를 진행한 Output pulse

Fig. 25의 그래프에서 파랑선의 신호는 Parabolic Mirror사이의 0.6m를 걸쳐 검출된 THz 신호이며, 빨강선의 신호는 연구실 내부의 25m를 진행하여 나타난 신호이다. 2014년 9월 3일에 측정한 신호로써 연구실 안의 상대 습도는 42%

RH이고, 온도는 22.1°C 이었다.

Fig. 25과 Fig. 12를 비교한다면 25m 경로를 진행한 신호의 크기가 6배 큰 것을 볼 수 있다. 이론상으로 거리가 멀어짐에 따라 0.37THz 미만의 신호는 흡수율이 크지 않아^{19,22} 186m를 진행하였을 때 0.37THz 주파수 미만의 영역과 25m를 진행하였을 때의 0.37THz 주파수 미만 영역의 크기가 큰 차이가 없어야 한다. 그러나 이같이 차이 나는 것은 186m의 경로를 거쳐 오는 THz신호가 구형 미러(Spherical Mirror)에 반사된 이후 완벽하게 평행으로 전자기파가 진행되는 것이 아니기에 거리가 멀어짐에 따라, 상대적으로 신호가 적게 나오고 있다. 만약 구형 미러(Spherical Mirror)에 반사된 THz 신호를 충분히 반사할 만큼의 큰 Mirror가 존재한다면, 186m와 25m의 0.37THz 미만 영역에 해당하는 저주파 대역은 일치할 것이다¹⁴.

Fig. 25에서 Output pulse는 0.37THz 미만 대역의 Input pulse 주파수 영역과 유사하다. 그러나 그 이상의 고주파 대역은 수분에 대한 흡수율이 상대적으로 크기 때문에^{19,21} 확연하게 감쇠되는 것을 살펴 볼 수 있다.

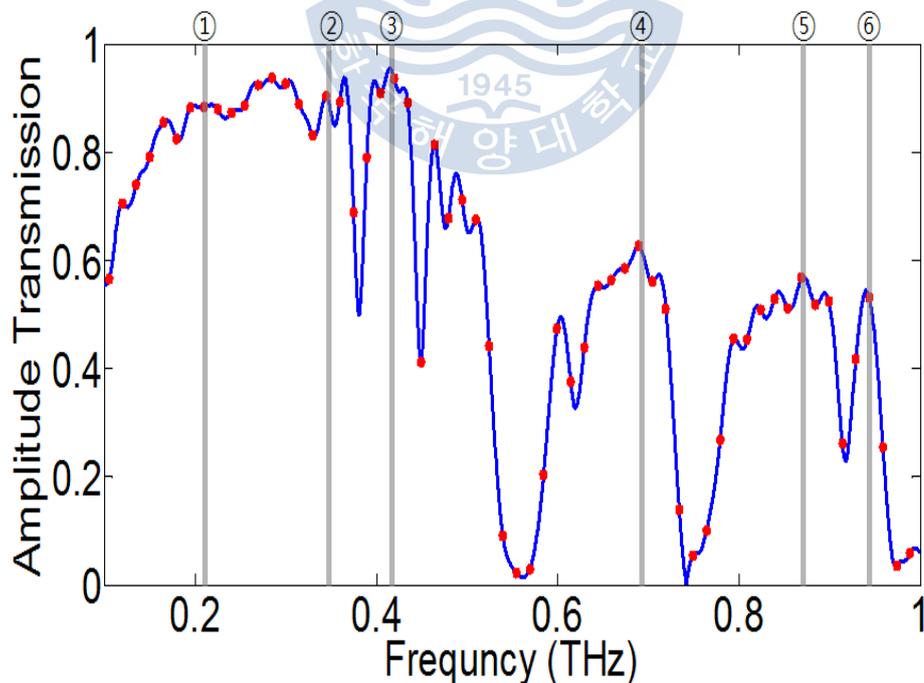
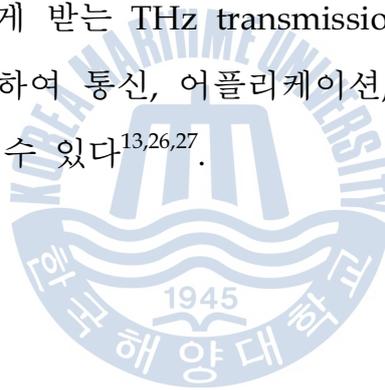


Fig. 26 25m 전파되어 측정된 THz 대역의 Transmission

Fig. 26은 선행 연구¹⁵ 와 같이 연구실 내의 상대 습도 42% RH, 온도 22.1°C 인 상태에서 Input pulse에 대해 25m 경로를 진행한 THz 신호인 Output pulse의 투과 정도를 나타낸 것이다. 빨강의 극점은 실제 측정한 데이터에 대한 투과율을 나타낸 것으로 주파수 해상도(resolution)는 7.4GHz이다. 이에 대해 영 채우기(Zero-Padding)를 하여 표기한 것이 파란색 선으로 0.1THz에서 1THz까지의 투과율을 나타내었다. 이로써 수분의 영향이 미칠지라도 저주파 대역에는 큰 영향 없이 전송되며, 고주파 영역에서는 크게 흡수 되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 26에서 나열한 회색 선은 Fig. 18에서 보여준 THz transmission Windows의 대역에 대하여 나타낸 것이다. ①은 2.1THz, ②는 0.35THz, ③은 0.41THz, ④는 0.68THz, ⑤는 0.85THz, ⑥은 0.93THz로써 0.1THz에서 1THz까지 수분에 대한 영향을 적게 받는 THz transmission Windows이다. 수분의 영향이 적은 각 대역을 이용하여 통신, 어플리케이션, 레이더 분야에 실용적으로 사용 될 수 있음을 예상할 수 있다^{13,26,27}.



2.6 저주파 대역을 이용한 THz Bit Pulse

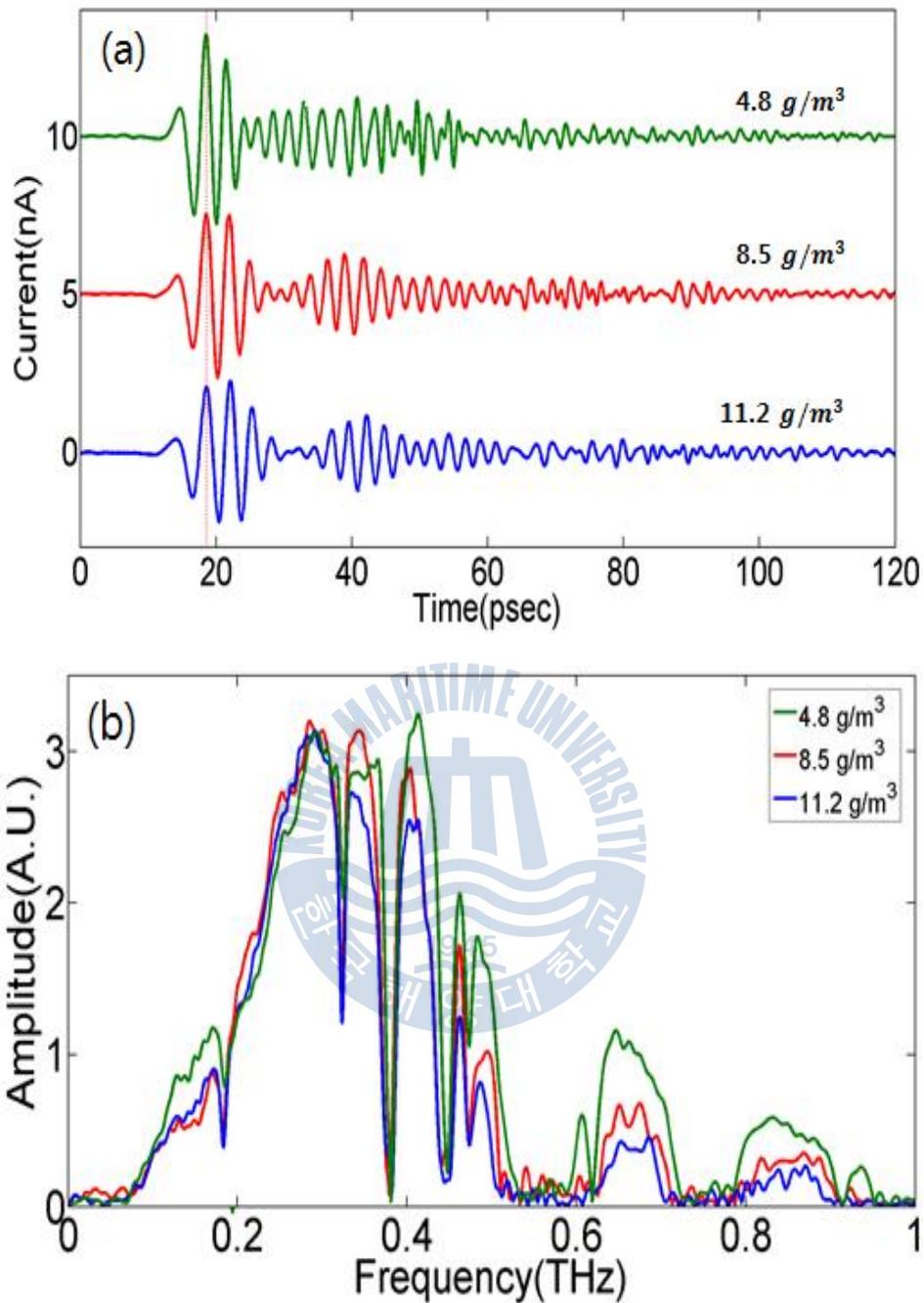


Fig. 27 (a) 외부의 대기 수증기 밀도가 4.8 g/m^3 , 8.5 g/m^3 , 11.2 g/m^3 일 때, 186m 경로를 진행하여 검출한 THz 시간 영역 비교
 (b) (a)에 대한 주파수 영역의 비교, 가장 큰 신호는 4.8 g/m^3 , 중간은 8.5 g/m^3 , 가장 아래의 신호는 11.2 g/m^3

Fig. 27은 전체 186m 중 외부의 대기 환경인 158m에 대한 수증기 밀도 변화에 따라 나타난 신호의 시간 및 주파수 영역이다. Fig. 14 (a)에서 살펴보면 수증기 밀도가 커질 때마다 THz 신호는 작아지며, 수분의 굴절률에 의한 군속도 분산(GVD)으로 신호 펄스 모양이 옆으로 넓게 퍼진다¹⁴. Fig. 27(b)에는 0.37THz 이상의 주파수 영역에서는 상대 습도에 따라 크기가 변하지만, 0.37THz 미만의 주파수 영역에서는 4.8 g/m³, 8.5 g/m³, 11.2 g/m³의 수증기 밀도(습한 정도) 차이가 생기더라도 큰 변화가 없다. 이는 저주파 대역인 0.37THz는 수분에 대한 영향이 적다는 것을 보여 주고 있다. 이를 근거할 내용으로 각각의 THz 신호에서 18.55psec에 표시된 빨간 점선 부분인 가장 큰 펄스의 모양은 수증기 밀도에 따라 크게 영향 받지 않고 형태를 유지하고 있다.

결국, 대기 중의 수증기 밀도가 높더라도 이상적인 THz 펄스 모양은 유지될 것이다. 이같은 이상적인 THz 펄스를 나타내기 위해 Fig. 27(b)의 수분에 대한 영향이 적은 0.37THz이하 대역을 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) 취하여 그 신호의 파형과 외부 수증기 밀도에 대한 실험값을 비교해보겠다.



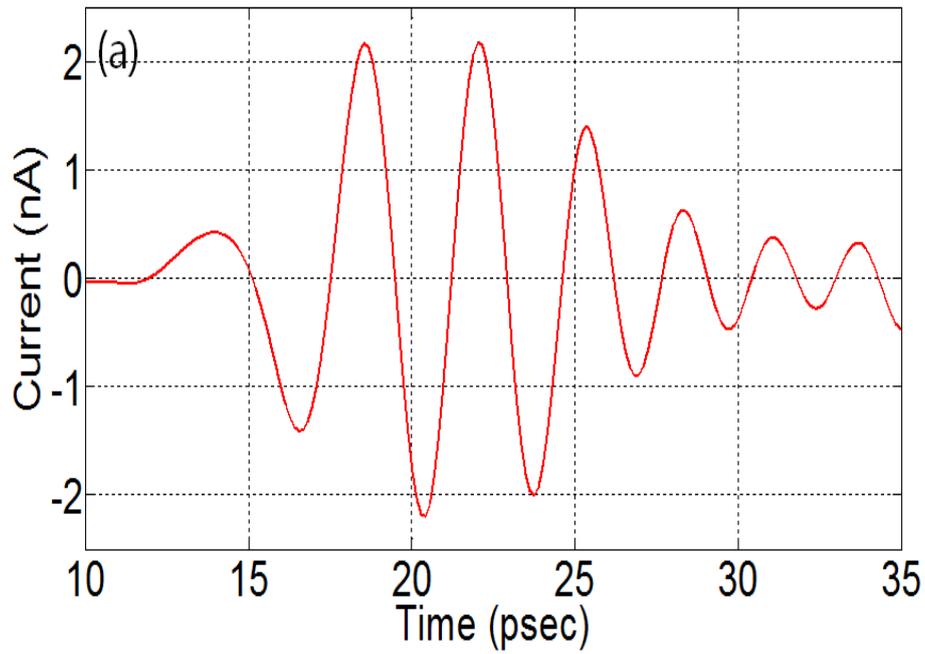


Fig. 28 (a) Fig. 27(b)의 11.2 g/m^3 인 주파수 영역에서 0.37THz 이하의 대역을 IFFT 취하여 계산한 값

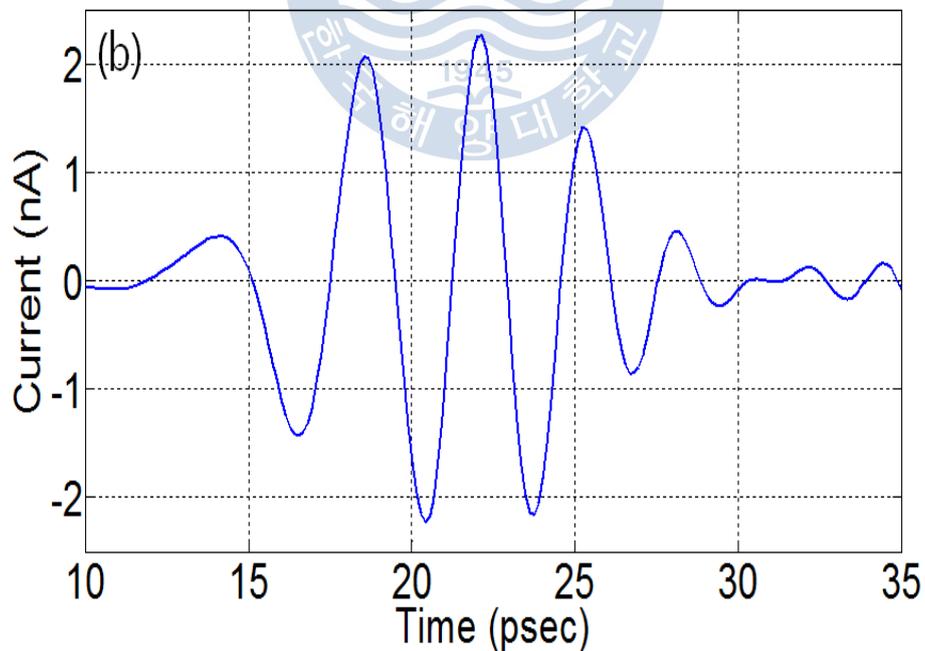
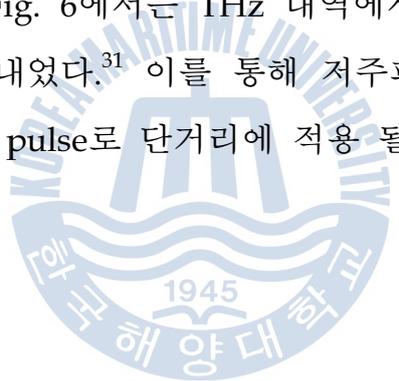


Fig. 28 (b) Fig. 27(a)에서 나타낸 11.2 g/m^3 의 대기 습도환경에서 측정된 THz bit pulse

Fig. 28 을 통해 11.2 g/m^3 에 대한 Output pulse의 THz bit pulse를 비교해 보았다. 실제 측정된 신호는 Fig. 28 (b) 이며, (b)의 신호에서 0.37THz 이하의 대역에 대해 IFFT 취한 신호는 (a)이다. 이 두 개의 신호는 크기가 거의 일치하고 있다. 이로써 실제 측정된 11.2 g/m^3 의 신호에는 THz bit pulse에 포함된 저주파 대역이 대부분 포함되어 있는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 28의 분석으로 THz bit pulse는 저주파 대역의 성분으로 구성된 신호이며, 저주파 대역의 특징인 수분에 의한 감쇠 영향과 지연되는 영향이 적은 것을 알 수 있다.

0.37THz 이하의 주파수에 특정 신호를 넣어 송신 한다면 수분에 영향을 크게 받지 않기 때문에, 신호를 수신하여 복원을 통해 THz 디지털 통신에 적용이 가능하다¹⁴. 또한, 수분에 대한 흡수율이 적은 주파수 대역인 저주파 대역으로 THz bit pulse를 이용하여, 1km 이상 거리에도 전파의 송수신이 가능할 것이다.^{28,29,30}. 또한, Ref. 31의 Fig. 6에서는 THz 대역에서 전파 될 수 있는 거리에 대한 시뮬레이션으로 나타내었다.³¹ 이를 통해 저주파 대역뿐만 아니라 고주파 대역의 구간 또한 THz bit pulse로 단거리에 적용 될 수 있을 것이다.



제 3 장 결 론

본 논문에서는 장거리 THz TDS를 이용한 THz 장거리 전송에 관하여 관찰된 다양한 특성들을 서술하였다. 이전의 연구에서는 저주파 대역에서 적은 흡수율과 고주파 대역으로 갈수록 커지는 흡수율을 실내에서 공기 중의 수분량 조절로 주파수별로 나타나는 수분 흡수 대역을 지켜보았다. 그러나 본 연구실에서는 수분에 대한 THz 전자기파의 특성을 보기 위해 장거리 시스템을 제작하였으며, 세계 최초로 대기 중으로 THz 전자기파를 186m의 거리만큼 전파하였으며, 이는 기존의 장거리 시스템을 연구했던 Oklahoma 그룹보다 21m 긴 거리로 진행하는 데 성공하였다.

장거리 THz 전송에 의해 1THz 이상의 주파수 대역은 모두 대기의 수분과 거리에 의해 모두 흡수되거나 감쇠되어, 신호의 검출이 힘들기 때문에 Receive Chip에는 LT-GaAs[10-100-10 μ m]를 이용하여 주파수 스펙트럼은 줄이되, 1THz 미만의 저주파 대역의 크기는 향상시켜 모든 실험을 진행하였다.

THz TDS를 이용하여 외부의 날씨 변화인 흐림, 비, 눈 내리는 상황에 대하여 신호를 측정하고, 주파수 분석을 하였다. 이를 이용하여 날씨에 따른 주파수 특성을 살펴보면, 수분에 영향이 적어 실용적으로 사용 가능한 THz 주파수 대역을 확인 할 수 있었다. 또한, 186m 중 외부에 노출되어 있는 158.6m의 수증기 밀도의 차이인 10.1 g/m³ 변화에 따라 THz 주파수 영역별 감쇠율도 수식으로 도출하였으며, 1.1 g/m³ 부터 11.2 g/m³ 까지 수증기 밀도에 따른 시간 영역 신호의 지연(Delay) 정도를 확인하였다. 이런 데이터로 수증기 밀도에 따른 Time shift 그래프를 나타내었으며, 이는 Oklahoma Statu Univ. Group의 실험 결과와 이론적으로 맞아 떨어지는 결과를 도출 할 수 있었다.

위의 신호를 측정하는 데 190초의 시간이 걸린 것을 빠른 시간에 따라 관찰하기 위해 Fast scan을 이용하여 짧은 시간에 신호를 취득하여, 시간에 따른 대기 습도의 변화를 통해 시간 영역에서 신호의 앞당겨짐과 지연됨을 살펴 볼 수

있었다. 이로써 사전에 대기의 습도가 급격히 올라가 THz 신호가 작아진다면 비가 내릴 가능성이 높아진다는 예측이 가능하다. 이런 결과로 향후 날씨에 대한 측정을 THz 전자기파를 이용하여 예측 가능 할 것이다. 이를 통해 수증기 밀도에 따른 기상 측정 분야에 응용될 정보를 제공하였다.

추가적으로, 본 연구실 내에서 Maitai laser의 공진기에 의한 반복률인 84.00Hz으로 발생하는 레이저의 7번째 pulse를 이용하여 산출된 거리인 25m의 장거리 시스템을 설계하였다. 186m에 비해 가까운 거리이며, 대기의 수분에 영향이 적은 실내이기에 25m의 THz 전자기파가 186m의 THz 전자기파의 크기에 비해 감소되지 않았다. 주파수 영역에서도 0.37THz미만의 대역에서는 일정하게 약간 감소할 뿐이었다. 이를 나타낸 것이 25m의 THz 전송률 곡선으로 Reference 신호와 비교하여 상대적으로 전송 되는 비율이 확인하였다.

마지막으로, 0.37THz 미만 저주파수 영역에서는 수분에 대한 흡수율이 낮다는 특성으로 통신에 접목시켜, THz bit pulse에 신호를 담아 송수신한다면, 포화상태의 통신 주파수 대역 문제를 해결할 수 있는 실마리를 제공할 것이라 예상된다. 본 연구실에서는 THz 디지털 통신에 적용 할 수 있는 연구를 실험을 통해 증명하고 살펴보았다. 이러한 THz를 실생활에 적용하여 사용되는 것은 현 시점에서 힘들지만, 연구를 통하여 가까운 미래에 다양한 분야로 활용될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Strachan, C. J., et al., 2005. Using terahertz pulsed spectroscopy to quantify pharmaceutical polymorphism and crystallinity. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 94(4), 837-846.
- [2] Davies, A. G., et al., 2008. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs. *Materials Today*, 11(3), 18-26.
- [3] Nagel, M., et al., 2002. Integrated planar terahertz resonators for femtomolar sensitivity label-free detection of DNA hybridization. *Applied optics*, 41(10), 2074-2078.
- [4] He, M., et al. 2013. Surface plasmon-enhanced terahertz spectroscopic distinguishing between isomers in powder form. *Applied optics*, 52(4), 824-828.
- [5] Liu, G., He, M., Tian, Z., Li, J., & Liu, J. 2013. Terahertz surface plasmon sensor for distinguishing gasolines. *Applied optics*, 52(23), 5695-5700.
- [6] Seco-Martorell, C., et al. 2013. Goya's artwork imaging with Terahertz waves. *Optics express*, 21(15), 17800-17805.
- [7] Takahashi, S., et al. 2014. Observation of damage in insulated copper cables by THz imaging. *NDT & E International*, 61, 75-79.
- [8] Jin, K. H., et al. 2012. High-speed terahertz reflection three-dimensional imaging for nondestructive evaluation. *Optics express*, 20(23), 25432-25440.
- [9] Jin, K. H., et al. 2012. High-speed terahertz reflection three-dimensional imaging for nondestructive evaluation. *Optics express*, 20(23), 25432-25440.

- [10] Lee, E. S., Lee, S. G., Kee, C. S., & Jeon, T. I., 2011. Terahertz notch and low-pass filters based on band gaps properties by using metal slits in tapered parallel-plate waveguides. *Optics express*, 19(16), 14852-14859.
- [11] Lee, E. S., & Jeon, T. I., 2012. Tunable THz notch filter with a single groove inside parallel-plate waveguides. *Optics express*, 20(28), 29605-29612.
- [12] Nagatsuma, T., Song, H. J., & Kado, Y., 2010. Challenges for ultrahigh speed wireless communications using terahertz waves. *J. Terahertz Sci. Technol*, 3(2), 55-65.
- [13] Song, H. J., & Nagatsuma, T., 2011. Present and future of terahertz communications. *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*, 1(1), 256-263.
- [14] Yang, Y., Mandehgar, M., & Grischkowsky, D., 2011. Broadband THz pulse transmission through the atmosphere. *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*, 1(1), 264-273.
- [15] Yang, Y., Shutler, A., & Grischkowsky, D., 2011. Measurement of the transmission of the atmosphere from 0.2 to 2 THz. *Optics express*, 19(9), 8830-8838.
- [16] Melinger, J. S., Yang, Y., Mandehgar, M., & Grischkowsky, D., 2012. THz detection of small molecule vapors in the atmospheric transmission windows. *Optics express*, 20(6), 6788-6807.
- [17] Yang, Y., Mandehgar, M., & Grischkowsky, D., 2012. Time domain measurement of the THz refractivity of water vapor. *Optics express*, 20(24), 26208-26218.
- [18] Yang, Y., Mandehgar, M., & Grischkowsky, D., 2014. Determination of the water vapor continuum absorption by THz-TDS and Molecular Response Theory. *Optics express*, 22(4), 4388-4403.

- [19] Liebe, H. J., 1983. An atmospheric millimeter wave propagation model (No. NTIA-83-137). NATIONAL TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION ADMINISTRATION BOULDER CO INST FOR TELECOMMUNICATION SCIENCES.
- [20] Yang, Y., Mandehgar, M., & Grischkowsky, D., 2012. Understanding THz pulse propagation in the atmosphere. *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*, 2(4), 406-415.
- [21] Yao, J., Wang, R., Cui, H., & Wang, J., 2012. Atmospheric Propagation of Terahertz Radiation. *REMOTE SENSING - ADVANCED TECHNIQUES AND PLATFORMS*, 371.
- [22] Slocum, D. M., Slingerland, E. J., Giles, R. H., & Goyette, T. M., 2013. Atmospheric absorption of terahertz radiation and water vapor continuum effects. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 127, 49-63.
- [23] Tripathi, S. R., et al. 2012. Measurement of chloride ion concentration in concrete structures using terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS). *Corrosion Science*, 62, 5-10.
- [24] Warren, A. C., et al. 1991. Subpicosecond, freely propagating electromagnetic pulse generation and detection using GaAs: As epilayers. *Applied physics letters*, 58(14), 1512-1514.
- [25] Zhang, J., Hong, Y., Braunstein, S. L., & Shore, K. A. (2004). Terahertz pulse generation and detection with LT-GaAs photoconductive antenna. In *Optoelectronics, IEE Proceedings-* (Vol. 151, No. 2, pp. 98-101). IET.
- [26] Federici, J. F., et al. 2005. THz imaging and sensing for security applications – explosives, weapons and drugs. *Semiconductor Science and Technology*, 20(7), S266.
- [27] Liu, H. B., Zhong, H., Karpowicz, N., Chen, Y., & Zhang, X. C., 2007. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications. *Proceedings of the IEEE*, 95(8), 1514-1527.

- [28] Mandehgar, M., Yang, Y., & Grischkowsky, D., 2013. Atmosphere characterization for simulation of the two optimal wireless terahertz digital communication links. *Optics letters*, 38(17), 3437-3440.
- [29] Mandehgar, M., Yang, Y., & Grischkowsky, D., 2014. Experimental confirmation and physical understanding of ultra-high bit rate impulse radio in the THz digital communication channels of the atmosphere. *Journal of Optics*, 16(9), 094004.
- [30] Yang, Y., Mandehgar, M., & Grischkowsky, D., 2014. THz-TDS Characterization of the Digital Communication Channels of the Atmosphere and the Enabled Applications. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 1-33.
- [31] J. Federici, & L. Moeller, 2010. Review of terahertz and subterahertz wireless communications. *Journal of Applied Physics*, 107(11), 111101.

