

지반 매질용 물리적 변화 관측을 위한 마이크로미터급 해상도의 레이저 기반 영상화 기술의 개발

최종 보고서

2016. 10. 14

주관연구기관 / 한국과학기술원
공동연구기관 / 포항공과대학교

국토교통부

국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘지반 매질용 물리적 변화 관측을 위한 마이크로미터급 해상도의 레이저 기반 영상화 기술의 개발’(연구개발 기간 : 2014. 7. 11 ~ 2016. 7. 10) 과제의 최종보고서 12부를 제출합니다.

2016

주관연구기관명 : 한국과학기술원 (대표자) 강성모 (인)

공동연구기관명 : 포항공과대학교 (대표자) 김도연 (인)

주관연구기관책임자: 권태혁

공동연구기관책임자: 김승철

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	14CTAP-C07758 4-01	해당 단계 연구 기간	2015. 7. 11. ~ 2016.7. 10.	단계구분	2/2 (해당단계)/(총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	지반 매질용 물리적 변화 관측을 위한 마이크로미터급 해상도의 레이저 기반 영상화 기술의 개발			
연구책임자	권태혁	해당단계 참여 연구원 수	총: 14명 내부: 4 명 외부: 10명	해당단계 연구개발비	정부:200,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계: 200,000 천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 14명 내부: 5명 외부: 12명	총 연구개발비	정부:400,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계: 400,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국과학기술원 건설및환경공학과			참여기업명: 없음	
국제공동연구	상대국명: 없음			상대국 연구기관명: 없음	
위탁연구	연구기관명: 없음			연구책임자: 없음	

지반매질 내부의 물리적 변화를 관찰하기 위한 지반 매질용 물리적 변화 관측을 위한 마이크로미터급 해상도의 레이저 기반 영상화 통합시스템을 제안함. 지반매질의 테라헤르츠에 대한 종류별 두께별 함수비에 따른 투과율 및 지반매질의 동결상태에 따른 흡수정도를 규명을 하였음. 지하구조물인 터널에 널리 사용되는 숏크리트의 재령일에 따른 함수비변화를 측정하는데 본 시스템을 적용 시켰보았으며 이와 숏크리트의 강도와의 관계를 알아봄. 최종적으로 구축한 테라헤르츠 펄스 레이저를 이용한 테라헤르츠 타임 도메인 기반 영상화 시스템을 이용하여 지반매질샘플의 건조균열을 관찰 하고 분석하였으며 지반 매질용 물리적 변화 관측을 위한 마이크로미터급 해상도의 레이저 기반 영상화 통합시스템의 실제적용 가능성을 확인함.

보고서 면수: 57쪽

연구의 목적 및 내용	최근 광학분야에서의 고출력 펄스레이저 기술의 발전으로 인해 테라헤르츠파에서부터 적외선, 자외선에 이르기까지 여러 파장대역(혹은 주파수대역)의 레이저가 개발됨에 따라 반도체, 의료 및 기계산업 분야에서 활발히 쓰이고 있지만, 지반공학 분야에서는 그간 활용이 거의 미비함. 지반공학분야에서 지반 매질 내부에서 일어나는 변화관측을 필요로할 때, X-ray CT와 같은 장비가 필요하며 이러한 장비의 공간적, 경제적, 기능적(해상도)제약으로 인해 지반매질내부를 측정하기에 많은 번거로움이 있음. 이를 해결하고자 지반 매질 내부의 물리적 변화를 시각적으로 확인할 수 있는 ‘지반 매질용 물리적 변화 관측을 위한 마이크로미터급 해상도의 레이저 기반 영상화 기술’개발을 연구목적으로 함. 본 연구는 KAIST 건설환경공학과와 포항공과대학교(POSTECH) 막스프랑크 한국/포스텍 연구소의 아토초과학 연구센터와의 공동연구로 진행되었으며, KAIST는 지반매질 내부의 물리적 변화 관측용 레이저 기반 영상화 통합 시스템의 개발을 주제로, POSTECH은 지반시료용 레이저 하드웨어 구축 및 영상처리기술 개발을 목표로 연구를 수행하였음.
----------------	---

연구개발성과	(1) 지반 매질의 물리적 변화관측을 위한 마이크로미터급 해상도의 레이저 기반 영상화 장비·장치 (2) 흙의 구성물질 및 함수비에 따른 레이저 파장 흡수관계 표 (3) 이미지 프로세싱 소프트웨어 구축 (4) 지반 시료 내부의 물리적 변화에 대한 레이저 기반 최적 영상화 시스템				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 지반 매질 시료를 이용한 실내 실험시, 시료 내부 구조적 배열 상태를 확인할 때 사용가능. - 지반 내부에서의 현상(미생물 활동, 동결융해, 균열 생성, 파괴 등)의 진행 상태를 눈으로 확인하고자 할 때 사용가능. - 지반 내부의 물리적 변화의 이해를 높임. - 건설산업에서 현장조사시 지반에 대한 분석시 사용. - 타 건설 재료 및 공학 재료에서의 내부 구조 시각화 및 분석시 사용 가능. - 후속 연구를 통한 지반 매질 내부의 물리적 변화를 관찰할 수 있는 3D 레이저 영상화 시스템을 구축할 수 있음. - 후속연구를 통한 본 지반과 유사환경에서의 장비/장치 모델 또는 제품화 하기 위한 시제품을 제작하여 시험 성능을 검증 할 수 있으며 신뢰성을 평가할 수 있음. 이에 따른 검증과 신뢰성을 바탕으로 실제 현장에서 사용가능한 기술로 발전시킬 수 있을 것으로 기대됨.				
핵심어 (5개 이내)	레이저	테라헤르츠	지반	영상화	-

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	Terahertz laser has been used in various fields such as medicine, semiconductor, chemistry, and mechanical industry. However, application of terahertz laser to soil imaging has not been conducted actively. This research aims on to develop a micrometer-level THz laser-based imaging system for pore-scale physical processes in soils.				
Results	(1) Micrometer-level THz laser based imaging apparatus (2) Absorption coefficients of soils in terahertz frequency (3) Development of an imaging processing code (4) Optimumization of the imaging system based on the laser for observing physical variation in a soil specimen				
Expected Contribution	- It is used to observe the structural arrangement of inner soil. - Processing of phenomena such as freezing, melting, crack, and failure occur in soil can be observed. - Increase of understanding about physical variation of inner soil. - Analysis of soil for site investigation by construction company. - other material except for soil can be observed. - Through the successive study, 3D imaging system which enables to observe physical variations in soils by terahertz laser can be developed. - Through the successive study, development prototype can be made for commercialization.				
Keywords	Laser	Terahertz	Soil	Imaging	

< Contents >

1. Project overview	7
2. Previous literature and current technology review	8
3. Research results	11
4. Achievements and expected contribution	12
5. Application	54
6. Collected information from outside Korea	55
7. Security grade	55
8. Status of facilities and equipments registered in R&D system	55
9. Safety action	55
10. Research archives	55
11. Miscellaneous	57
12. Reference	57

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	7
2. 국내외 기술 개발 현황	8
3. 연구 수행 내용 및 성과	11
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	12
5. 연구개발성과의 활용 계획	54
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	55
7. 연구개발성과의 보안등급	55
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	55
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	55
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	55
11. 기타 사항	57
12. 참고 문헌	57

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- 기존의 지반 매질 내부를 관측할 수 있는 촬영 장비인 X-ray, CT, MRI, 초음파 등의 방사선, 높은 가격, 낮은 해상도 등의 문제를 해결하고 지반 매질 내부의 물리적 변화를 시각적으로 확인할 수 있는 지반 매질용 물리적 변화 관측을 위한 마이크로미터급 해상도의 레이저 기반 영상화 기술의 개발을 통해 지반내부를 시각적으로 보다 편리하게 관측하고자 함.
- 특정기관에서 측정가능한 장비가 아닌 지반매질 내부를 관측하고자 하는 모든 관측자가 손쉽게 관측하기 할 수 있도록 지반 매질 내부의 물리적 변화관측의 보편화에 기여하고자 함.

2. 연구개발의 필요성

- 레이저는 주파수가 증가함에 따라 라디오(Radio), 마이크로(Micro), 테라헤르츠(Terahertz), 적외선(Infrared), 자외선(Ultraviolet), 엑스레이(X-ray), 감마선(Gamma) 영역으로 나눌 수 있으며(그림 1 참조), 이 중에서 테라헤르츠(Terahertz, THz)는 마이크로파와 적외선 사이의 영역으로 적외선 영역보다 에너지가 작으며 빛의 직진성을 가짐. 나무 플라스틱과 같은 비이온화물질을 투과하는 특성과 금속물질에서는 반사하는 특성을 가지고 있음. 이와 같은 테라헤르츠 대역의 특성을 이용하여, 물질을 통과한 테라헤르츠(THz) 레이저의 감쇄율, 흡수율, 반사율의 차이를 바탕으로 시각화 할 경우 매질 내부를 3D로 영상화하는 용도로 사용할 수 있음.

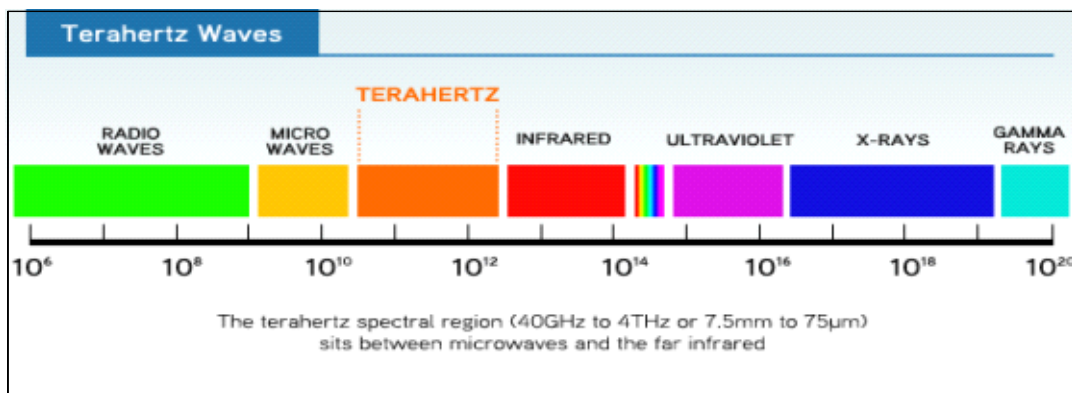


그림 1. 진동수에 따른 빛의 영역대와 테라헤르츠
(출처: <http://www.br-labs.com/divisions/terahertz/>)

- 레이저로 지반시료 내부의 상태를 영상화하는 원천 기술을 개발할 경우, 이러한 원천 기술로 얻어지는 상대적인 장점은 다음과 같음.
 - (a) THz 레이저는 X-ray에너지의 100만분의 1로도 물질을 투과하여 영상화 할 수 있어 인체에 무해함. 또한 토양 시료 내부에 존재하는 미생물에 데미지를 가하지 않기 때문에 토양 내부의 미생물 영향에 대한 연구가 가능함.
 - (b) X-ray CT와 같이 방사능을 노출하지 않고 납으로 격리된 방이 필요하지 않으므로 장비의 크기 조정과 공간의 사용이 자유로움.
 - (c) 레이저 광원 장비의 다양화로 인해 현장용 이동식 레이저 기반 이미징 장비의 개발이 가능함.
 - (d) X-ray CT에 비해 초기 설치비용이 매우 경제적임.
- 따라서 지반 내부를 레이저를 이용하여 영상화 하는 원천 기술을 개발할 경우, 매질 내부의 상태를 영상화함으로써, 이를 이용하여 공학적 거동과 공극스케일에서의 변화의 연관성에 대한 연구가 가능해질 것으로 예상됨.

- 특히, 테라헤르츠 대역의 레이저를 매질에 투과시켜 반사된 파와 투과된 파의 에너지 강도값을 이용하여 지반의 수분의 분포, 균열의 분포 등에 대한 정보를 영상화 할 수 있으며, 이는 획기적인 원천기술의 개발임.
- 펄스 형태의 테라헤르츠파를 이용할 경우, optical coherence tomography와 같이 지반 내부의 영상을 3차원(3D)화하여 깊이 단위로 물성의 변화를 관찰하는 것이 가능함.
- 또한, 이러한 레이저 기반 영상화 기법은 이동이 가능하도록 패키지화 할 경우, 지반 및 토목 구조물들의 건전도 검사로의 확장 적용이 가능하며, 기존의 비파괴검사 기법들과 더불어 활용이 가능할 것으로 예상됨.

3. 연구개발 범위

- 본 연구는 이론적 연구를 통한 개별 요소 기술의 기능과 특성을 정립하고 실험적인 증명을 하는 단계(TRL1-TRL2-TRL3)로 정의됨
- 레이저를 이용한 지반매질의 영상화에 대한 연구는 전혀 이루어진 바가 없는 지반공학 분야의 새로운 기술임.
- 본 연구를 통해, 레이저를 이용한 지반 매질의 영상화 기술의 개념 증명 및 가능성 확인을 위해 실험실 환경에서 단위 요소기술에 대한 기초기술을 확보할 예정임.
- 지반 매질 내부의 물리적 변화를 관측할 수 있는 새로운 기술은 창의도전연구의 기초원천기술 과제의 성격에 부합하다고 판단됨.
- 지반 매질의 영상화 기술을 통하여 매질 내부의 물리적 변화의 과정들을 실시간으로 시각화 하고자 하는 실험적 연구임.

구분		표기	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☒	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☒	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☒	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	TRL 6	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

제2장. 국내외 기술 개발 현황

- 테라헤르츠파는 빛과 전파의 중간 영역에 속하는 전자파로서 플라스틱, 나무, 종이, 옷감 등 비이온화 물질은 투과하고 금속에서는 반사하는 특성을 가지고 있음. 특히 생체 세포에 매우 안전한 특성을 이용한 보안검색, 생체의료 분야에 적용하기 위한 기술개발이 활발함.
- 테라헤르츠파에 관한 국내 특허 출원은 2000년까지 3건에 불과하였으나, 2004년 7건, 2008년 15건, 2010년 36건으로 꾸준히 증가하여 총 140건이 출원 되었음.
- 이를 기술 분야별로 살펴보면, 테라헤르츠파를 발생시키는 광원기술이 32%를 차지하고 있으며, 테라헤르츠파 증폭기와 도파관을 포함하는 소자기술이 26%, 의료영상을 포함하는 영상기술이 19%, 물질의 성분분석기술이 11%임.

- 최근 3년간 등록된 국내 특허의 예를 보면 다음과 같음.

특허명	다중 접합 반도체의 공극 검사 장치 및 방법
출원인	한국전기연구원
특허등록번호	1012640990000
특허등록 일자	2013.05.08
내용	테라헤르츠파를 이용하여 다중 접합 반도체에 대한 공극 검사를 수행하므로, 수중 검사가 불필요하여 실시간으로 다중 접합 반도체에 대한 전수 검사가 가능함과 동시에 공기에 대한 투과가 가능하므로 공극 이후에 대한 검사 또한 가능한 효과를 갖음.
대표도	

특허명	테라헤르츠파 발생/검출기 및 그의 제조방법
출원인	한국전자통신연구원
특허등록번호	1012913190000
특허등록 일자	2013.07.24
내용	본 발명은 생산성을 향상시킬 수 있는 테라헤르츠파 발생/검출기 및 그의 제조방법을 개시함. 그 발생/검출기는, 기판; 상기 기판 상의 전면에 형성된 포토 컨덕티브 층; 상기 포토 컨덕티브 층 상에 형성되고, 소정 간극을 갖고 서로 이격되는 제 1 전극과 제 2 전극; 및 상기 제 1 전극과 상기 제 2 전극 상에서 형성되고, 상기 제 1 전극과 상기 제 2 전극사이의 상기 간극 내부를 매립시키는 렌즈를 포함.
대표도	

특허명	테라헤르츠 단일 픽셀 회절 영상 장치
출원인	한국과학기술원
특허등록번호	1011078530000
특허등록 일자	2012.01.12
내용	본 발명의 실시예는 테라헤르츠 빔을 이용하는 테라헤르츠 단일 픽셀 회절 영상 장치에 관한 것으로, 보다 상세하게는 테라헤르츠 빔을 광원으로 하여 대상 물체의 2D 영상을 복원하는 테라헤르츠 단일 픽셀 회절 영상 장치에 관련된 본 발명의 실시예에 따른 테라헤르츠 단일 픽셀 회절 영상 장치는 테라헤르츠 빔을 광원으로 하고, 위상 지연 장치를 이용하여 대상 물체에 조사된 테라헤르츠 빔의 스펙트럼을 굴절시켜 2D 영상을 복원할 수 있음.
대표도	

특허명	테라헤르츠 전자기파를 이용한 이미징 장치 및 이미징 방법
출원인	광운대학교 산학협력단, 서울시립대학교 산학협력단
특허등록번호	1011493530000
특허등록 일자	2012.05.17
내용	본 발명은 FOCUSS 알고리즘을 이용하여 이미지를 재구성하는 테라헤르츠 전자기파를 이용한 이미징 장치 및 이미징 방법에 관한 것임. 본 발명에 따르면, 압축 센싱을 하여 샘플 영상 정보를 얻으므로 대상체의 스캐닝에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있으며, FOCUSS 알고리즘을 이용하여 샘플 영상 정보로부터 이미지를 재구성하므로 정확한 이미지를 재구성할 수 있음.
대표도	

(2) 테라헤르츠파 관련 국외 특허 출원 동향

- 특허정보넷 키프리스(<http://kportal.kipris.or.kr>)에 따르면 본 연구 시작 전, 2014년 4월 30일 일자로 Terahertz에 관한 특허 중 Terahertz imaging과 관련된 특허의 비중은 미국이 73%, 중국이 12%, 독일이 21%, 호주가 16%, 대만이 8%, 유럽이 57%, 일본이 17%, 영국이 27%, 프랑스가 11%, 캐나다가 39%로 나왔음. 이를 통해 미국에서는 terahertz관련 특허중 절반이상이 terahertz image와 관련된 특허로 terahertz를 이용한 imaging기법에 관해 많은 관심을 가지고 있다는 것을 짐작해 볼 수 있음.
- 그림 12와 같이 관련 특허의 개수를 보면, 미국이 84%로 절대 다수를 차지하고 있으며, 그 뒤로 유럽, 일본, 중국, 독일의 순으로 나열될 수 있음.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

연 차	연구 내용	연구 결과
1차년도	매질 성분 및 입자크기에 따른 파장 대역별 투과율	흙(Clay)의 대표 광물인 Kaolinite와 모래(Sand)의 대표 광물인 Ottawa F110 20/30에 대해 두께 THz Frequency 영역별 투과율을 측정된 결과 0~0.7THz 영역에서는 흙이 더욱 투과가 잘되었으며 0.7THz 이후에는 모래가 더 투과율이 높음.
	매질 함수비에 따른 투과율 규명	함수비가 높을수록 투과율이 작음.
	시료 크기별 투과율 규명	시료두께가 두꺼울수록 투과율이 작음.
	염도에 따른 투과율 규명	염도가 높을수록 투과율이 낮음.
	일정 함수비에서 동결상태에서의 흙 시료에 대한 투과율 규명	동결상태에서 온도가 낮을수록 투과율이 낮음.
	염도가 동결상태에 미치는 영향 규명	동결상태에서 온도가 낮을수록 투과율이 낮게 나왔지만 염도가 미치는 영향은 미비함.
	반사율을 이용한 쏫크리트강도추정	반사율이 높은 곳은 이미지가 밝게 나왔으며 반사된 THz 파의 강도가 클수록 강도가 클 것으로 예상되는 결과를 얻음.
	매질의 물리적 변화 이미징 적용성 검토	매질의 상변화 및 입사각도 변화, 외부 펄스레이저 인가에 따른 펌프-프로브 실험 가능성의 검증.
	레이저 기반 영상화 기법 구현	2차원 공간상에서 수십 Hz~수백 Hz의 스캐닝 속도를 갖는 투과/반사 이미 영상화 기법 구현.
2차년도	펄스레이저 실험 시스템의 구축	고출력 펄스 레이저 구축 완료 및 시료의 순간적인 열적 특성 인가에 따른 투과율 또는 반사율 측정이 가능한 시스템 구현.
	2차원 자동화 스테이지 구축 및 제어 시스템 개발	시료의 밀리미터급 이상의 해상도를 가진 2차원 이미지 획득을 위한 3축 시료 스테이지의 구축 및 시료의 특성과 크기에 따른 레이저 이미지의 공간 분해능 및 특성을 파악
	획득 데이터 처리 및 영상화 기법 개발	획득 데이터 FFT처리 코드 및 주파수별 영상화 이미지 획득 시스템 구축
	흙의 건조균열 이미지화	젖은 흙시료가 건조 되면서 생긴 균열을 이미지를 통해 확인 할 수 있었으며 0.5-1 THz에서 뚜렷한 이미지를 확인함.
	레이저 기반 영상화 통합 시스템 제안	지금까지 해왔던 연구의 데이터를 종합하여 동일한 지반매질 시료에 대한 함수비 데이터 값, 환경에 따른 투과율과 반사율 데이터값, 시료두께에 따른 파의 투과율과 반사율 데이터값을 합쳐서 하나의 매질에 대한 투과 이미지가 나타내는 수치값 데이터 생성. 2차원 이미징 실험 결과를 분석함으로써 최적 통합시스템 설계 및 제안을 함.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

목 표	달 성 도 (%)	내 용
매질 성분 및 입자크기에 따른 파장 대역별 투과율규명	100%	- 흙의 구성 물질과 지반내부에 있는 공극의 유체(가스, 액체)상태의 물질에 대한 파장별 투과율/반사율 문헌 조사 - Kaolinite, quartz sand의 구성물질에 따른 시료를 준비 후, 지정된 파장에서 실험을 수행
매질 함수비에 따른 투과율 규명	100%	흙 시료의 함수비를 0%부터 100%까지 33%간격으로 증가시키면서 레이저를 투과시켜 투과율과 반사율을 알아봄
시료 크기별 투과율규명	100%	흙 시료 두께를 1mm, 1.5mm, 2mm로 달리하여 시료두께에 따른 이미지 변화를 분석하여 시료 두께에 따른 투과율과 반사율을 알아봄
염도에 따른 투과율규명	100%	염도가 다른 물에서의 투과율을 규명하였음.
일정 함수비에서 동결상태에서의 흙시료에 대한 투과율 규명	100%	일정 함수비의 흙 시료를 동결상태로 만들어 온도변화에 따른 투과율을 알아봄
염도가 동결상태에 미치는 영향 규명	100%	일정 물의 양에 0.5M의 염도를 맞춰서 동결상태에서의 온도변화에 따른 레이저 투과율을 알아봄.
반사율을 이용한 숏크리트강도 추정	100%	혼합비와 재령일이 다른 모르타르 샘플에 대해 THz 반사를 통한 모르타르 샘플의 강도를 추정해봄.
매질의 물리적 변화 이미징 적용성 검토	100%	- 지반 구성 물질 종류에 따른 레이저 파장별 투과, 흡수, 반사 특성을 조사하고 적절한 레이저 파장 대역을 도출해 내기 위한 레이저 특성 조사 - 지반내부에 존재하는 물질들의 영역별 파에 대한 흡수율 문헌 조사
레이저 기반 영상화 기법 구현	100%	시료의 조성 변화를 관찰하기 위해 필요한 레이저 파장 대역 및 파워를 설정하고 이를 구현하기 위한 레이저 광원 개발 기법에 대한 기술 조사 및 기법 구현.
펄스레이저 실험 시스템의 구축	100%	기술 조사를 바탕으로 도출된 레이저 광원을 구현하기 위한 레이저 장비 구축
2차원 자동화 스테이지 구축 및 제어 시스템 개발	100%	시료의 밀리미터급 이상의 해상도를 가진 2차원 이미지 획득을 위한 3축 시료 스테이지의 구축 및 시료의 특성과 크기에 따른 레이저 이미지의 공간 분해능 및 특성을 파악

획득 데이터 처리 및 영상화 기법개발	100%	획득 데이터 FFT처리 코드 및 주파수별 영상화 이미지 획득 시스템 구축
흡의 건조균열 이미지화	100%	젖은 흡시료가 건조 되면서 생긴 균열을 이미지를 통해 확인 할 수 있었으며 0.5 THz - 1 THz에서 뚜렷한 이미지를 확인할 수 있었음.
레이저 기반 영상화 통합 시스템 제안	100%	지금까지 해왔던 연구의 데이터들을 종합하여 동일한 지반매질 시료에 대한 함수비 데이터 값, 환경에 따른 투과율과 반사율 데이터값, 시료두께에 따른 파의 투과율과 반사율 데이터값을 합쳐서 하나의 매질에 대한 투과 이미지가 나타내는 수치값 데이터생성 및 2차원 이미징 실험 결과를 분석함으로써 최적 통합시스템 설계 및 제안을 함.

2. 연구개발 주요내용

(1) 상온에서의 지반시료의 흡수율 측정

(1-1) 샘플시료 및 실험 방법

- 시료는 흙과 모래의 대표 광물인 Kaolinite (그림 1)와 Silica sand (그림 2)를 사용하였음.
- 표 1의 시료를 이용하여 Silica sand와 Kaolinite 모두 실험전 110℃에서 24시간 동안 오븐건조를 하였음. 함수비에 따른 실험을 위해 사용된 시료는 표 2와 같은 조건으로 맞췄음. 상온에서 그림 4에서와 같이 Advantest사에서 나온 TAS7500SP 장비를 이용하여 투과 실험을 하였음. TAS7500SP는 0.1 THz ~ 4 THz의 범위에서 레이저에 대한 투과율을 측정할 수 있음. 샘플홀더는 가루시료용을 사용하였음.

표 1. 사용한 시료의 구성성분

Silica sand			Kaolinite		
Element	Weight(%)	Atomic(%)	Element	Weight(%)	Atomic(%)
O	53.45	66.82	O	55.69	68.48
Al	0.84	0.62	Al	21.83	15.92
Si	45.71	32.56	Si	21.72	15.21
			K	0.76	0.38

표 2. 사용한 시료샘플의 조건

	표시	함수비 (w, %)	공극률 (n, %)	포화도 (S, %)
Silica Sand	S00	0	37	0
	S12	12	42	45
	S27	27	42	100
Kaolinite	C00	0	49	0
	C29	29	50	78
	C37	37	50	100

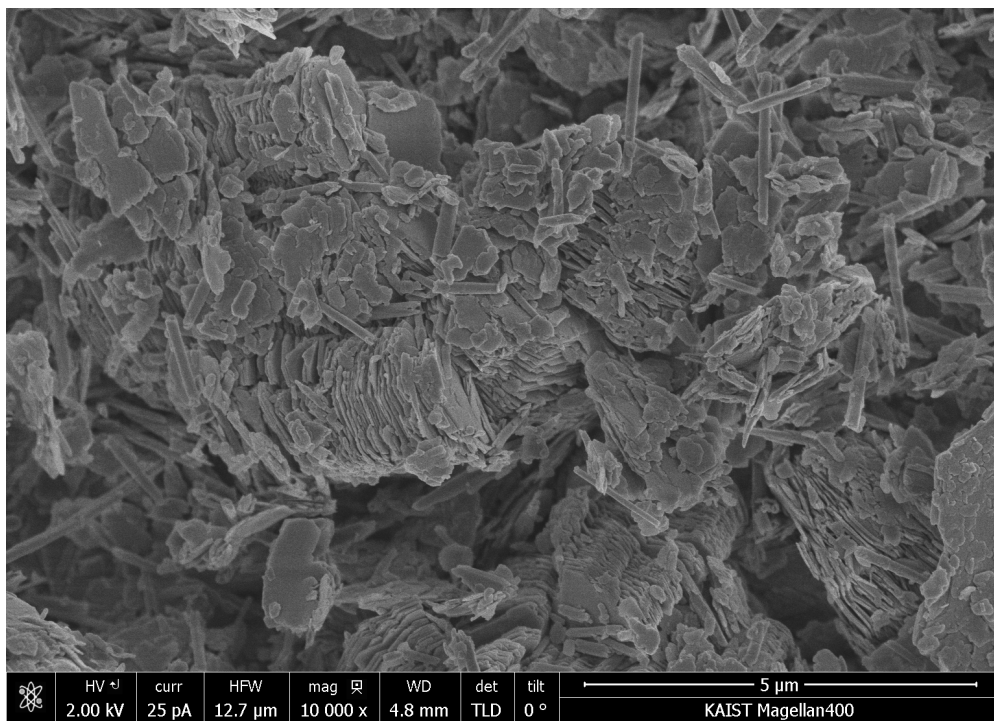


그림 2. Kaolinite SEM 사진.

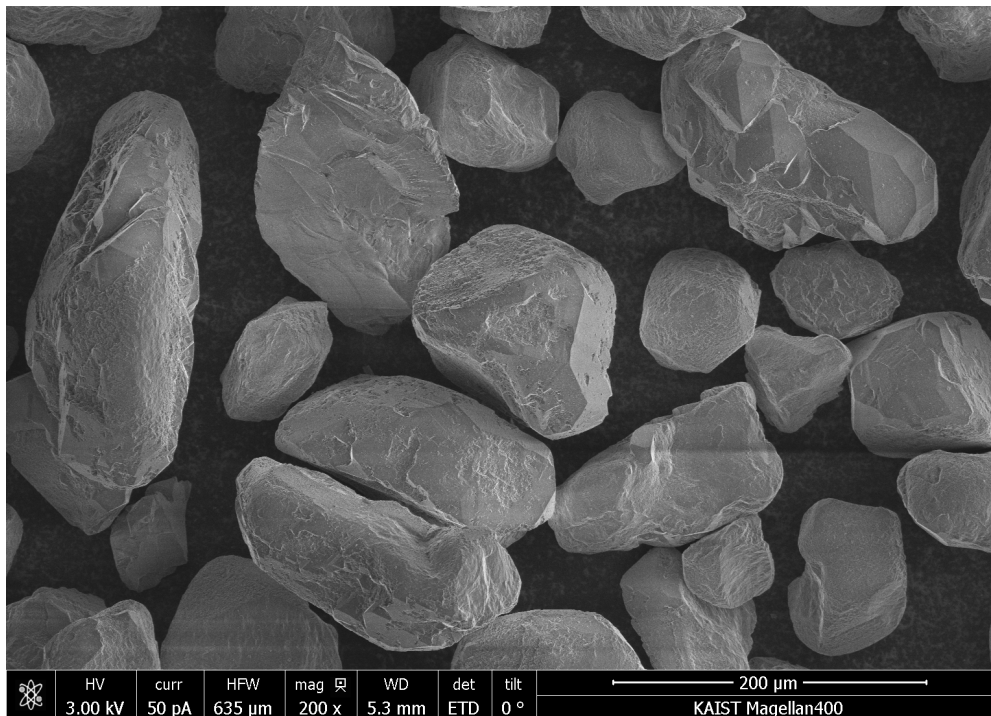


그림 3. Silica sand SEM 사진.

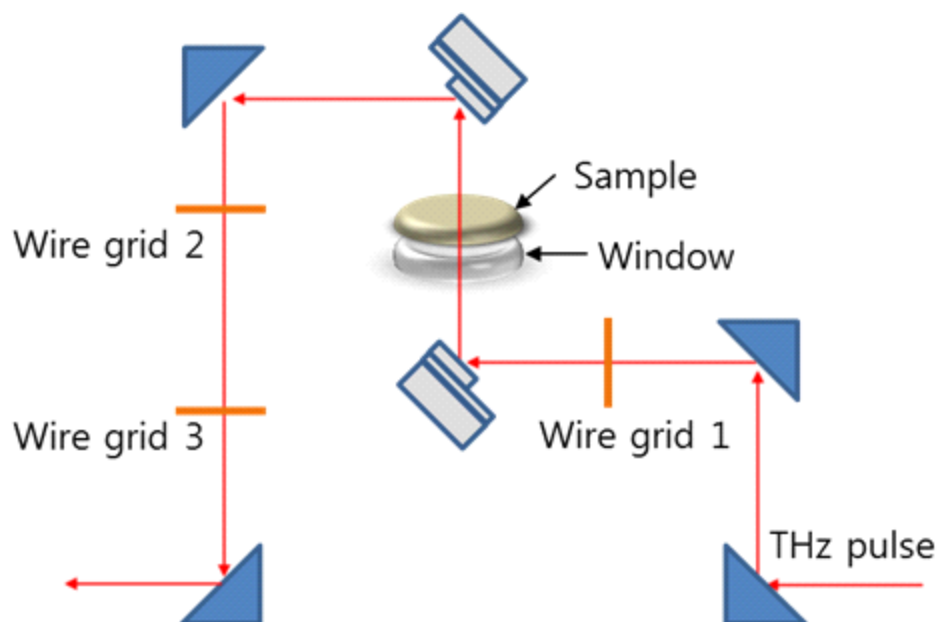


그림 4. 상온에서의 TAS7500SP장비를 이용한 투과실험 개요도.

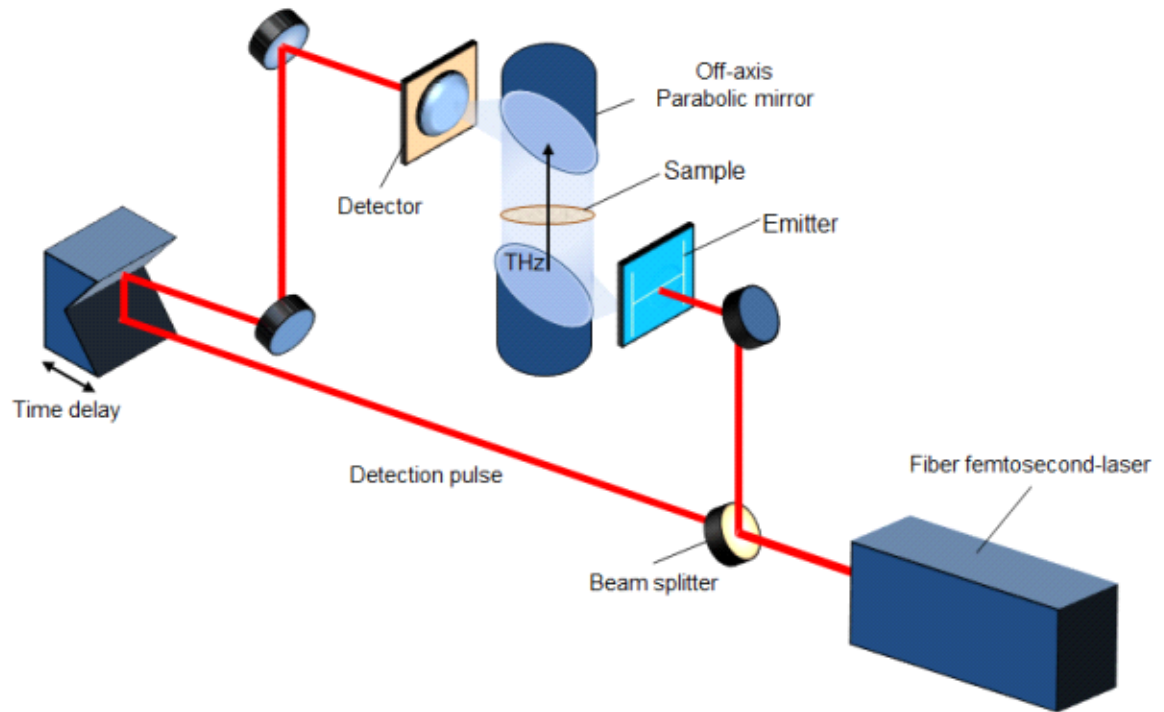


그림 5. TAS7500SP의 THz 파 측정 개요도



그림 6. TAS7500SP 장비 사진
(사진:Advantest)

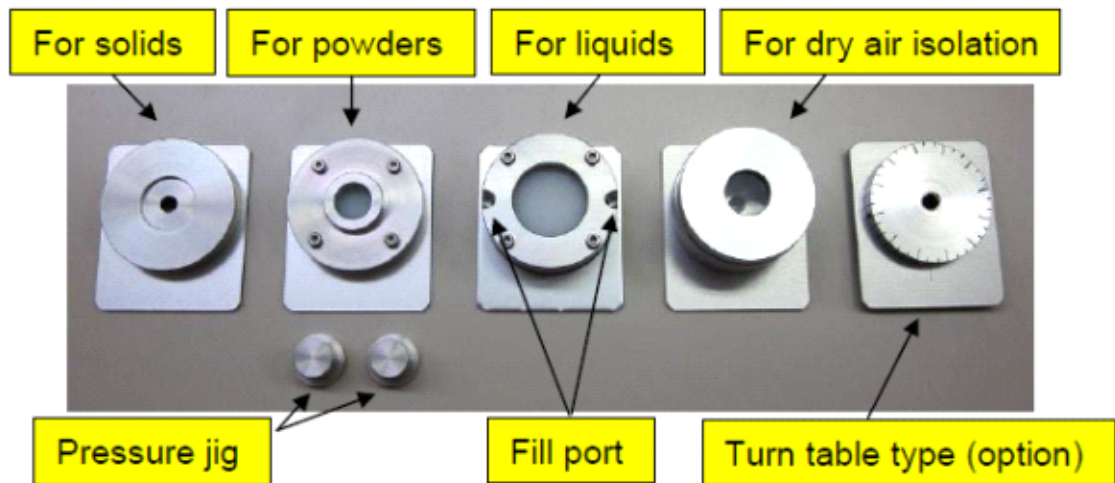


그림 7. TAS7500SP 장비에 사용할 수 있는 샘플 홀더.

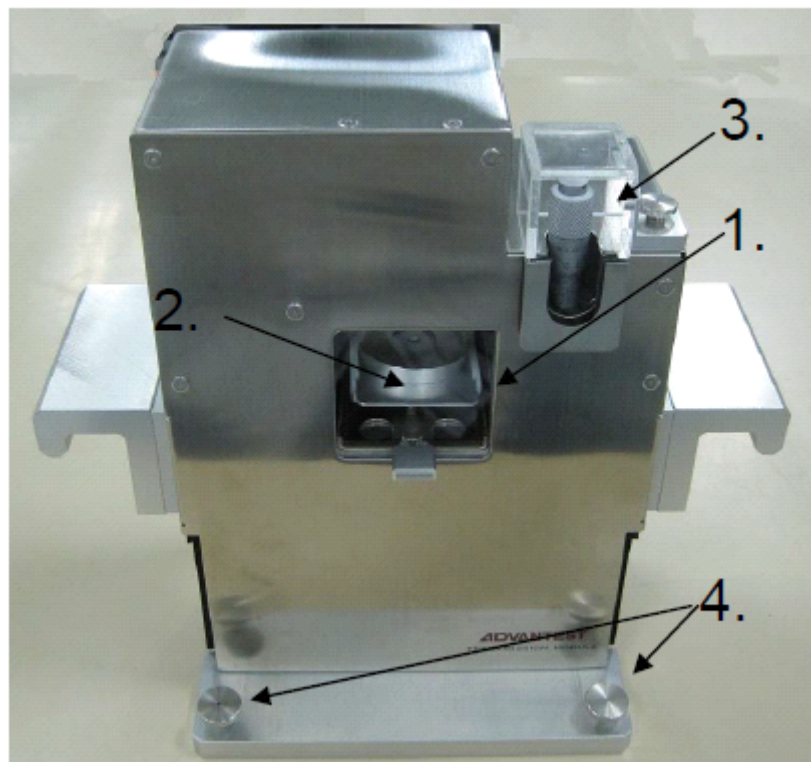


그림 8. 투과율을 측정할 수 있는 모듈. (1: 샘플홀더가 놓이는 공간, 2: 샘플홀더, 3: 샘플홀더위치의 높낮이를 조절할 수 있는 마이크로 미터, 4: 설치 나사)



그림 9. 디텍팅된 THz wave 분석기와 컴퓨터장치 구성 사진 (사진: Advantest).

(1-2) 실험결과

표 3. 사질토와 점토에서의 두께 및 함수비에 따른 THz 레이저 투과율

		Transmittance (%)									
Soil		Silica sand (사질토)					Kaolinite (점토)				
Water content (%)		0			12	27	0			29	37
Thickness (mm)		0.5	1.5	2	1	1	1.5	1.6	1.7	1	1
Frequency (THz)	0.2~0.4	100	100	98	9	1	74	77	60	5	0
	0.4~0.6	90	81	70	2	0	58	55	46	1	0
	0.6~0.8	76	42	29	0	0	39	40	35	0	0
	0.8~1.0	50	13	5	0	0	29	27	26	0	0

- 그림 10에서와 같이 건조 상태에서 시료의 두께가 두꺼울수록 투과된 레이저의 도착시간이 길어짐. 또한 두께가 두꺼울수록 투과율은 낮게 나왔음. 0 THz ~ 약 0.7 THz의 진동수 영역에서 Silica sand가 Kaolinite clay보다 투과율에 높게 나왔으며 약 0.7 THz의 진동수 이후로는 Kaolinite clay가 Silica sand보다 투과가 더 잘되는 것으로 나왔음. 이러한 투과율의 결과는 그림 9의 Silica sand와 Kaolinite의 흡수계수가 0.7 THz부근에서 역전되는 현상을 통하여도 예측가능 함. 물질의 고유 성질인 흡수계수는 두께에 관계없이 비슷하게 나와 시료의 성질은 그대로인 것을 알 수 있음.
- 젖은 시료에서는 그림 12에서와 같이 함수비가 높을수록 강도가 낮았으며 투과율이 낮게 나왔음. Silica sand의 경우 함수비가 12%일 때, 0.2 THz에서 투과율이 건조상태에서보다 70%가량 더 낮게 나왔음. Kaolinite clay의 경우 함수비가 29%일 때, 0.2 THz에서 투과율이 건조상태에서보다 70%가량 더 낮게 나왔음. 흡수계수는 함수비에 따라 다르게 나왔으며 함수비가 높을수록 흡수계수가 더욱 높게 나타나 흡수계수를 통하여 투과율이 함수비가 높을수록 낮게 나올 것이라는 예측이 가능.

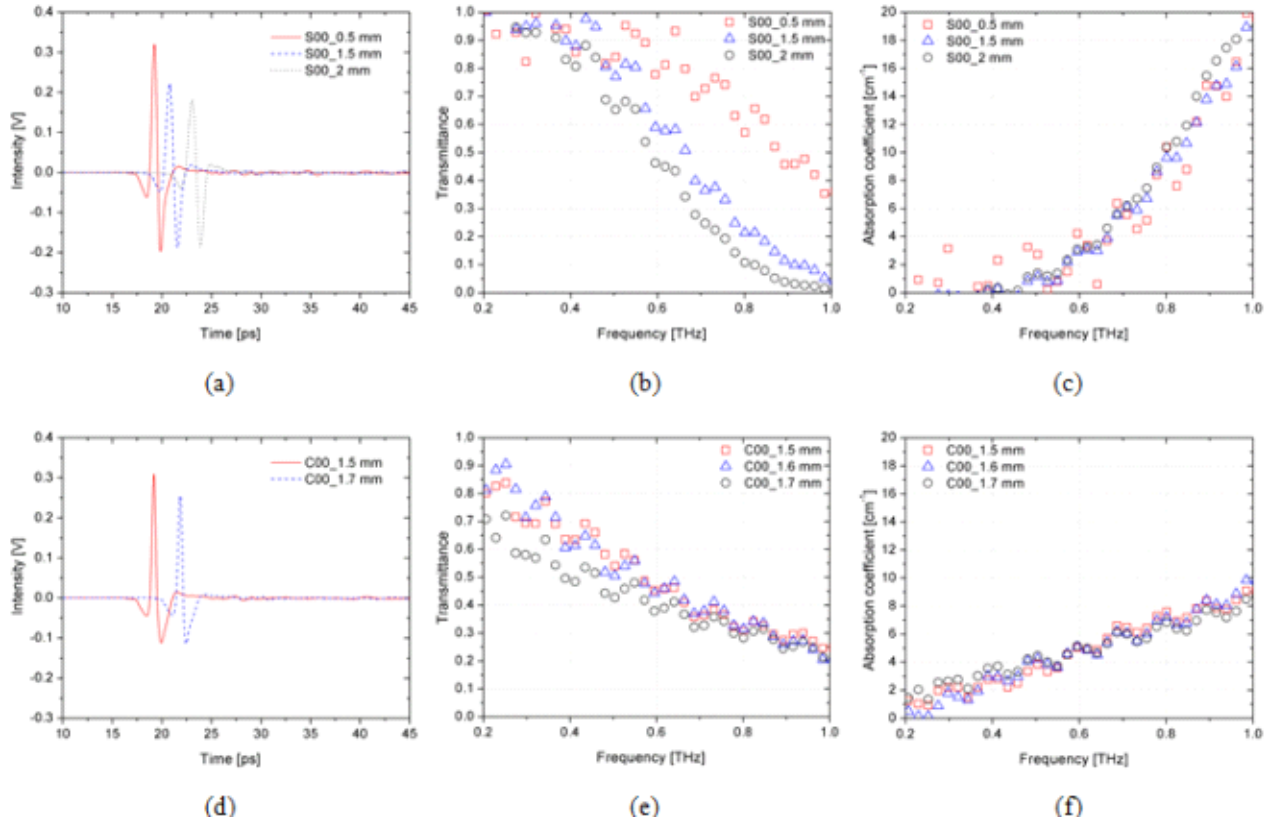


그림 10. Silica sand와 Kaolinite의 두께에 따른 THz 레이저 투과실험 결과그래프 (a),(d)Time-domain 그래프. (b),(e)THz frequency에 따른 투과율 그래프. (c),(f)THz frequency에 따른 흡수계수 그래프.

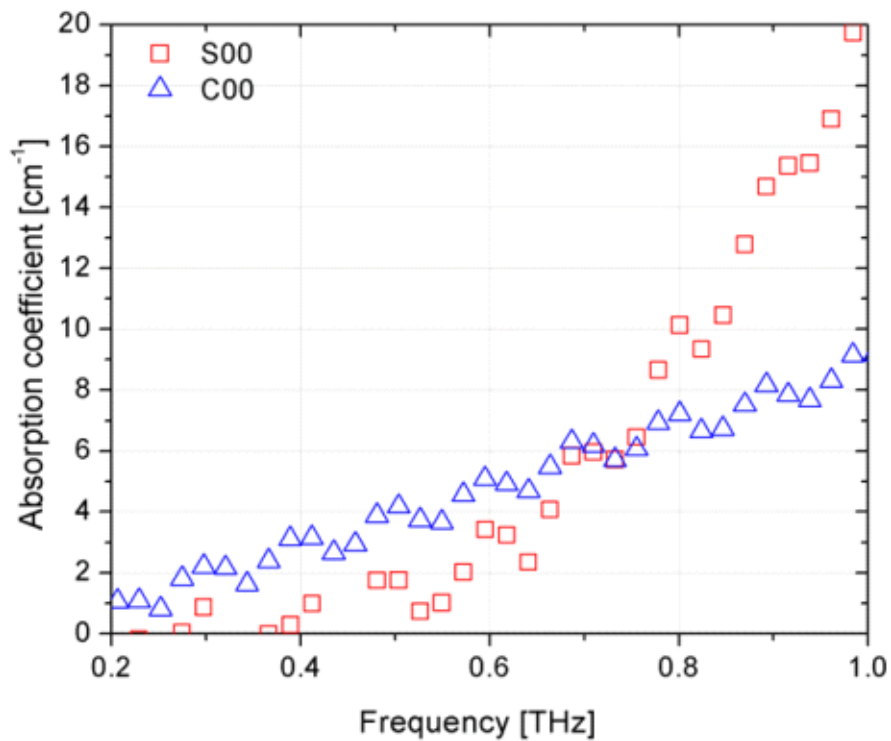


그림 11. 건조상태의 Silica sand와 Kaolinite 샘플에 대한 THz frequency에 따른 흡수계수 그래프.

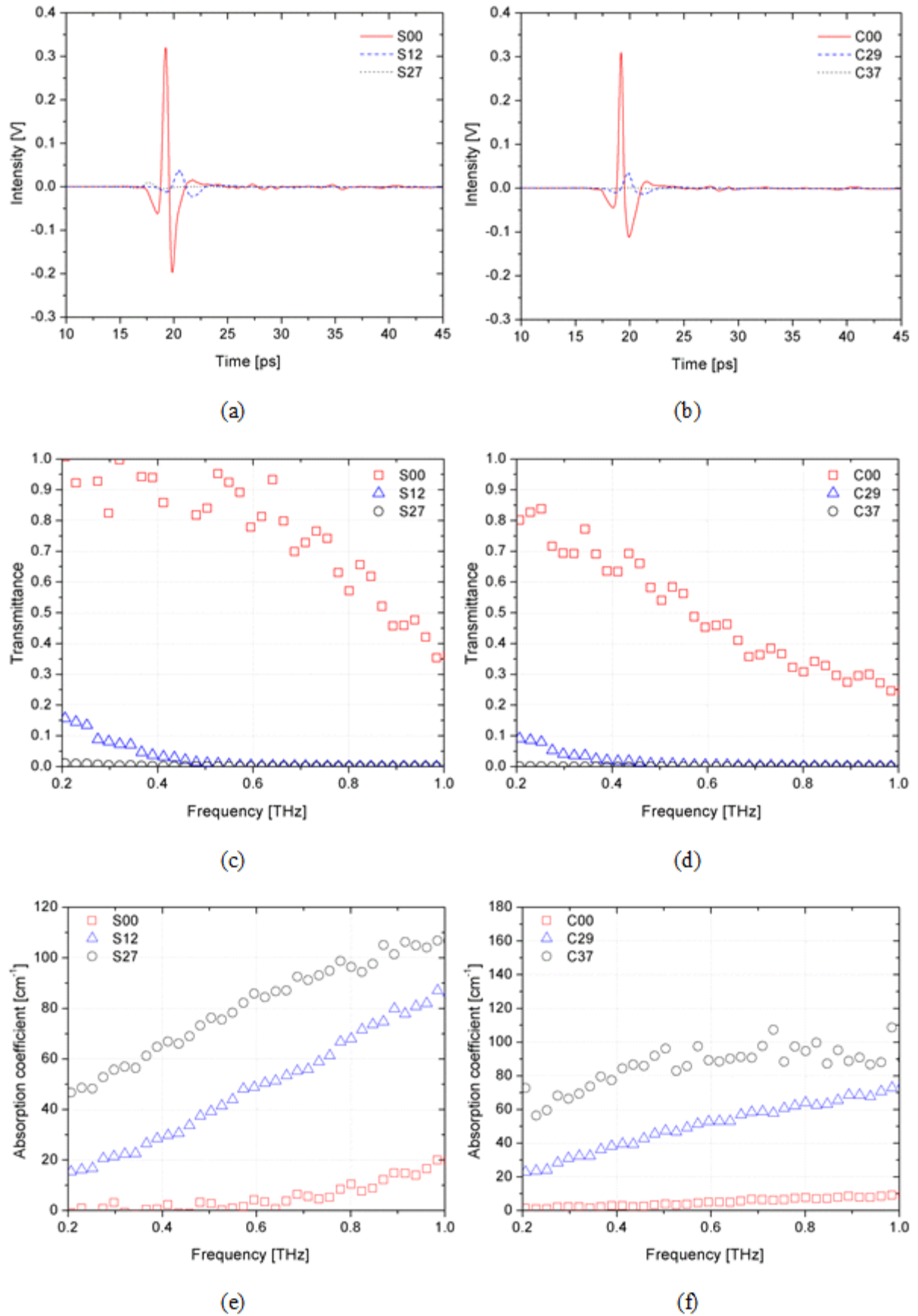


그림 12. Silica sand 시료의 함수비가 각각 0%, 12%, 27% 그리고 Kaolinite 시료의 함수비가 각각 0% 29%, 37%일 때, THz frequency에 따른 투과율 및 흡수계수 그래프.

(2) 동결과정에서 지반시료의 흡수율 변화

(2-1) 샘플시료 및 실험방법

- 샘플시료는 상온실험에서 사용했던 시료와 동일한 시료를 사용하였으며 THz 레이저 투과율 측정시 샘플 및 온도의 조건은 표 3과 같음.
- 샘플홀더의 구성은 그림 14와 같으며 샘플홀더에 시료를 넣은 조립된 샘플홀더는 그림 15, 16과 같음.
- 액체질소를 이용하여 샘플을 동결시킨 후 온도센서를 샘플홀더에 부착하여 온도를 조절하였음. 그림 13과 같은 실험 셋업에서 THz 레이저 투과 실험을 하였음. 레이저를 두 갈래로 나눠서 한 레이저는 에서 THz pulse laser를 발생시킨 후 샘플을 투과(그림 21)하며 다른 레이저 빔은 편광되어 딜레이됨.
- 빛은 그 속성이 전자기 파동으로서 전기장과 자기장이 진동을 하면서 전파되는 것임. 이때 전기장이나 자기장은 서로 직교하면서 진행방향에 수직으로 진동을 하게 되어 횡파의 특성을 갖게 됨. 횡파의 경우에는 한 방향으로 진행하는 파동이더라도 진동방향은 그 진행방향에 수직한 평면상에 놓여 있게 되어 벡터의 성격을 갖게 됨. 이러한 어떤 파동의 진동이 그 평면상의 특정 방향으로 놓이게 되는 것을 편광이라 하고 그때의 진동방향을 편광방향이라 함(그림 23).
- 딜레이된 레이저빔은 ZnTe크리스탈 렌즈에서 fs-THz 펄스 레이저와 오버랩이 되어 중첩되는 부분을 통해 이미지 디텍팅을 함. 이와 같은 분석을 fs-THz Laser 분석 방법이라고 하며 이는 그림 24에 나타나 있음.

표 4. 샘플시료의 측정상태에서의 조건

	표시	온도 (K)	공극률 (n, %)	포화도 (S, %)
Silica Sand	S213.15	213.15	43	56
	S233.15	233.15	43	56
	S253.15	253.15	43	56
	S263.15	263.15	43	56
	S273.15	273.15	43	56
	S283.15	283.15	43	56
Kaolinite	C213.15	213.15	64	100
	C233.15	233.15	64	100
	C253.15	253.15	64	100
	C263.15	263.15	64	100
	C273.15	273.15	64	100
	C283.15	283.15	64	100

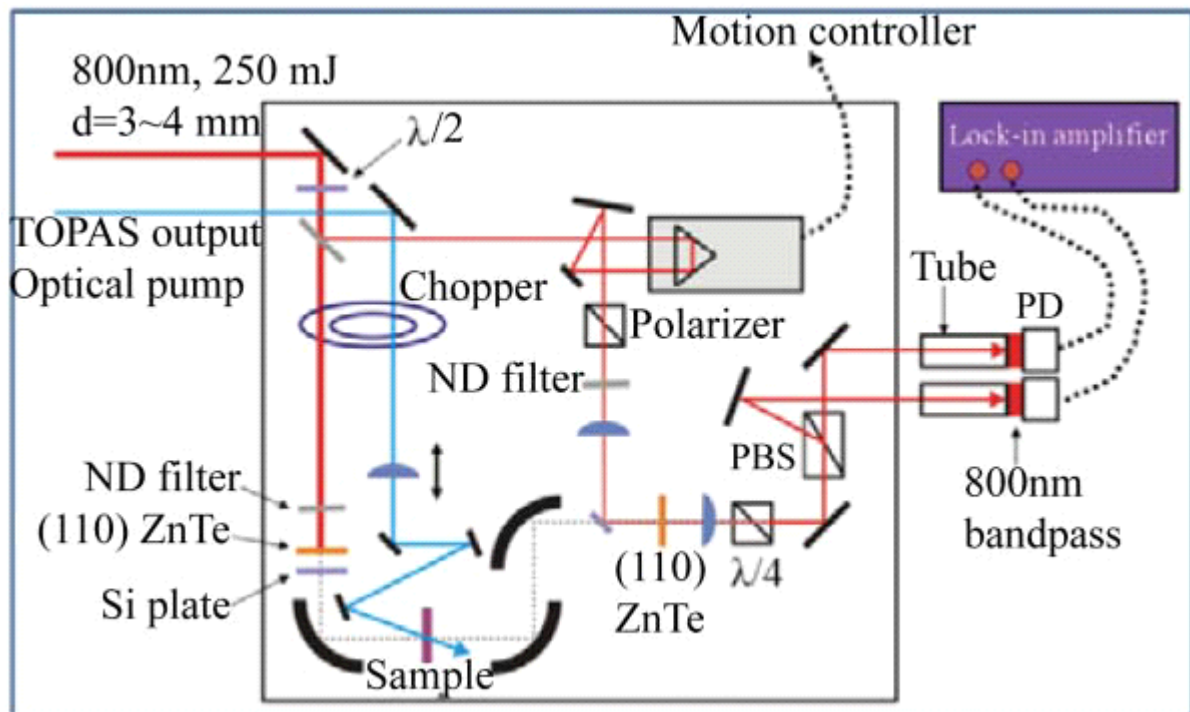


그림 13. THz 동결상태에서의 투과실험 셋업.

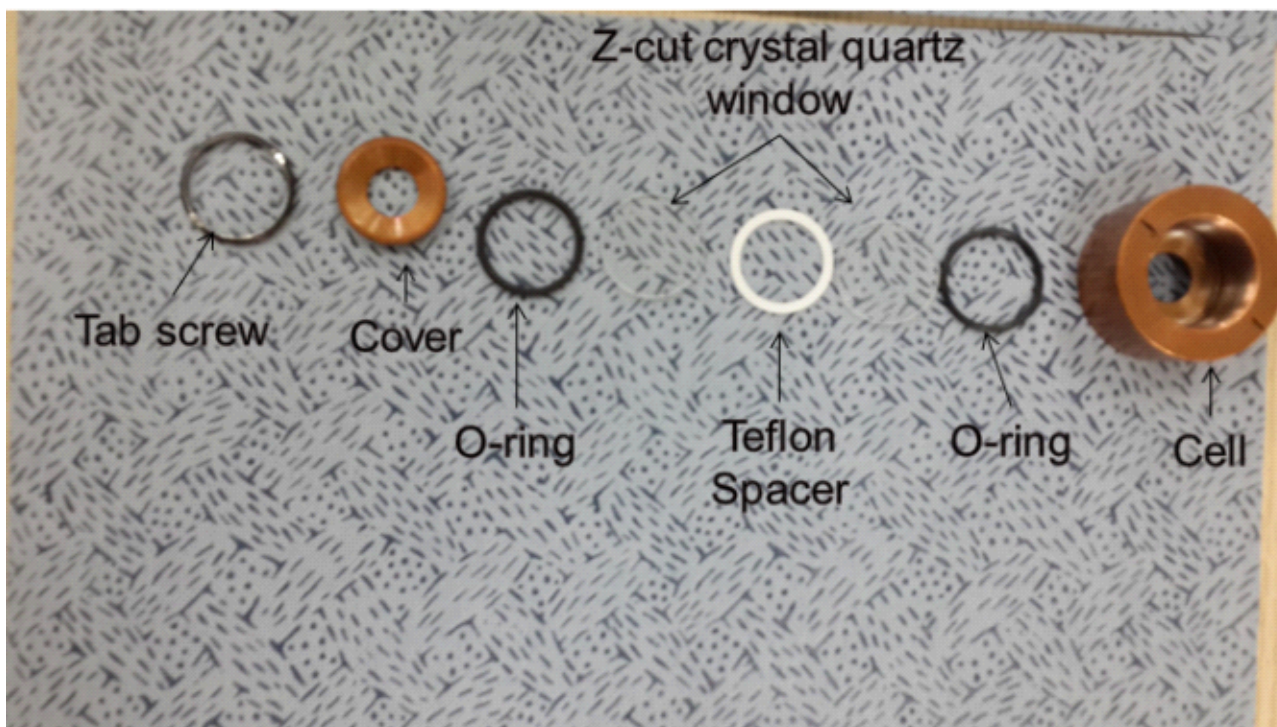


그림 14. 동결 실험용 샘플홀더 구성.

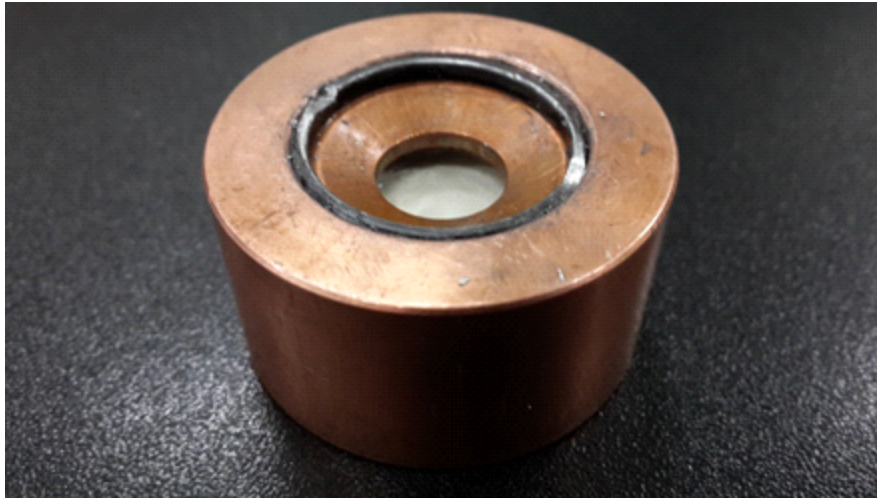


그림 15. 동결실험 샘플홀더 조립상태 (앞).



그림 16. 동결실험 샘플홀더 조립상태 (뒤).

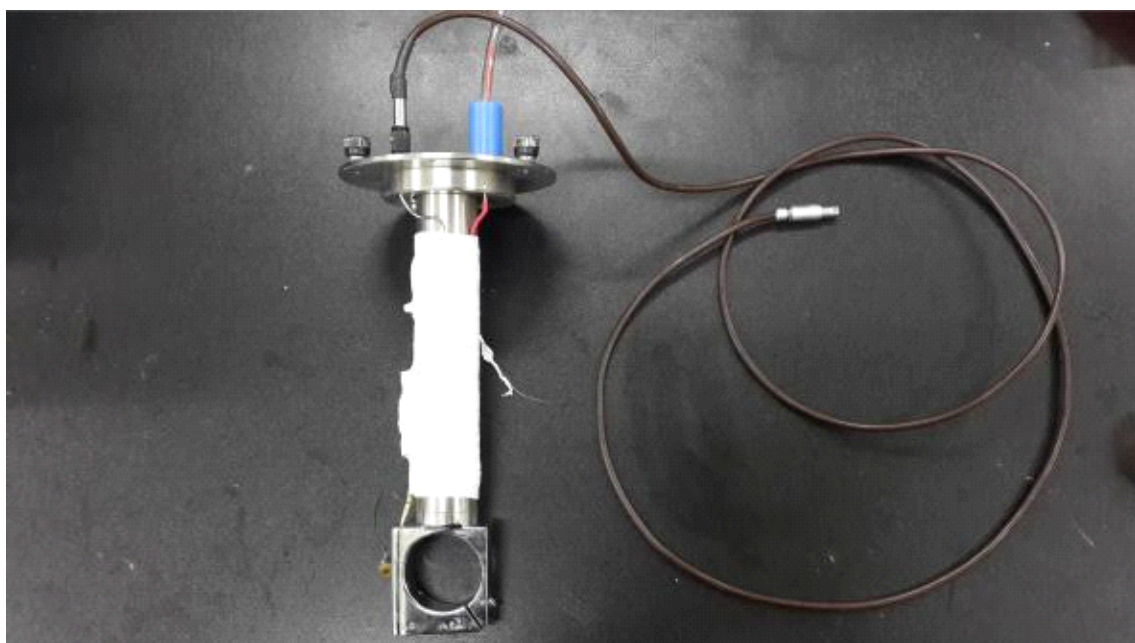


그림 17. 샘플홀더 집.

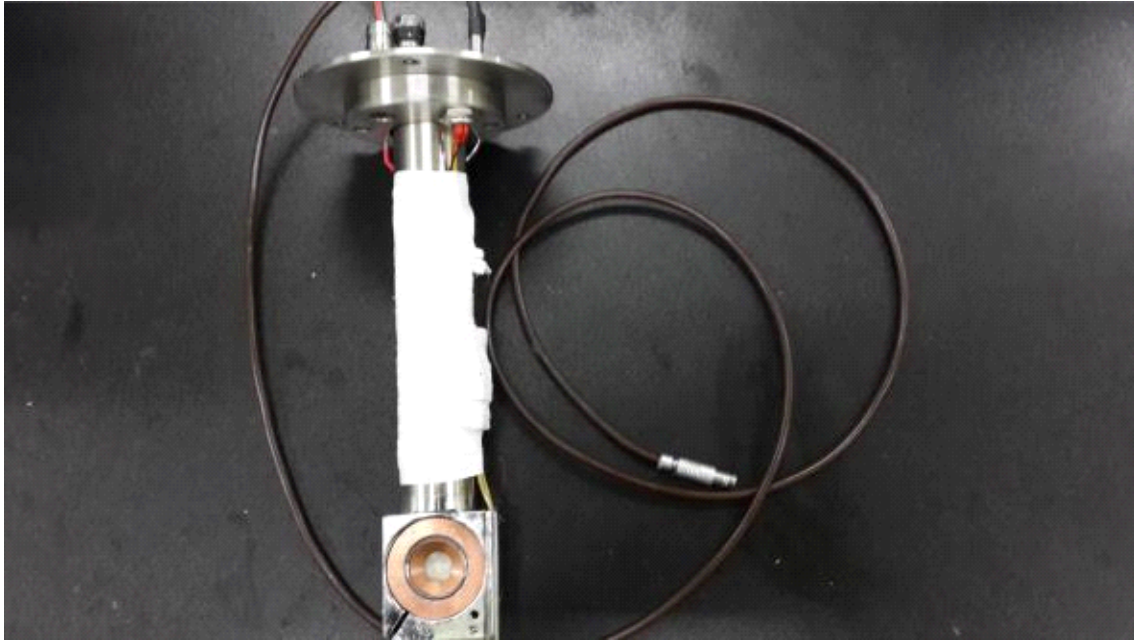


그림 18. 샘플홀더 집에 샘플홀더가 결합된 모습 (앞).

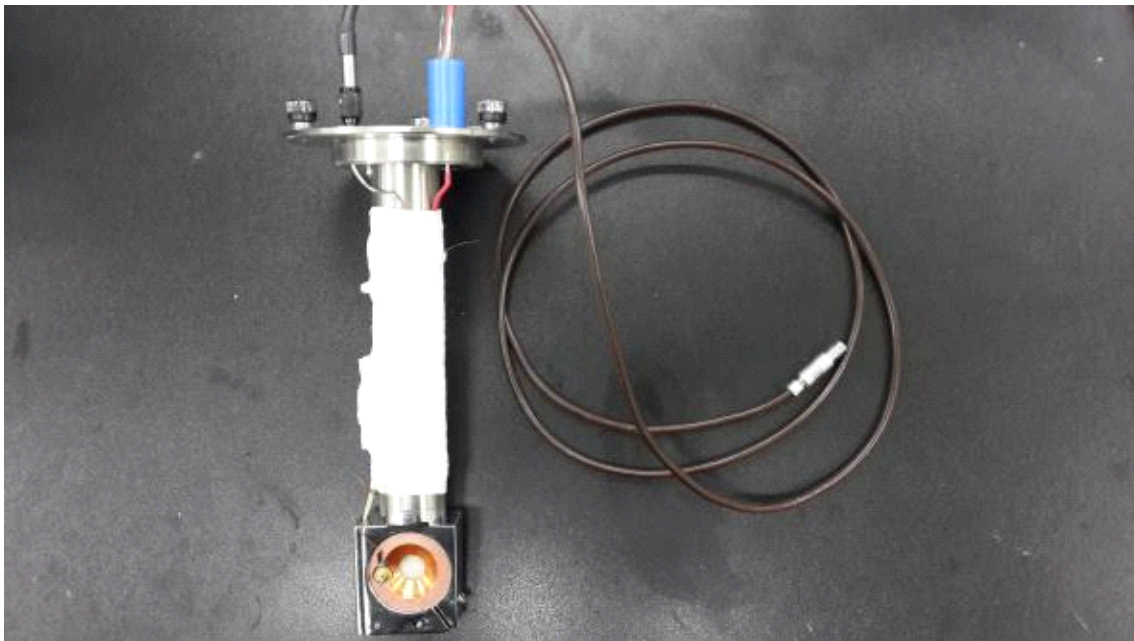


그림 19. 샘플홀더 집에 샘플홀더가 결합되어 온도센서가 샘플홀더에 부착된 모습 (뒤).

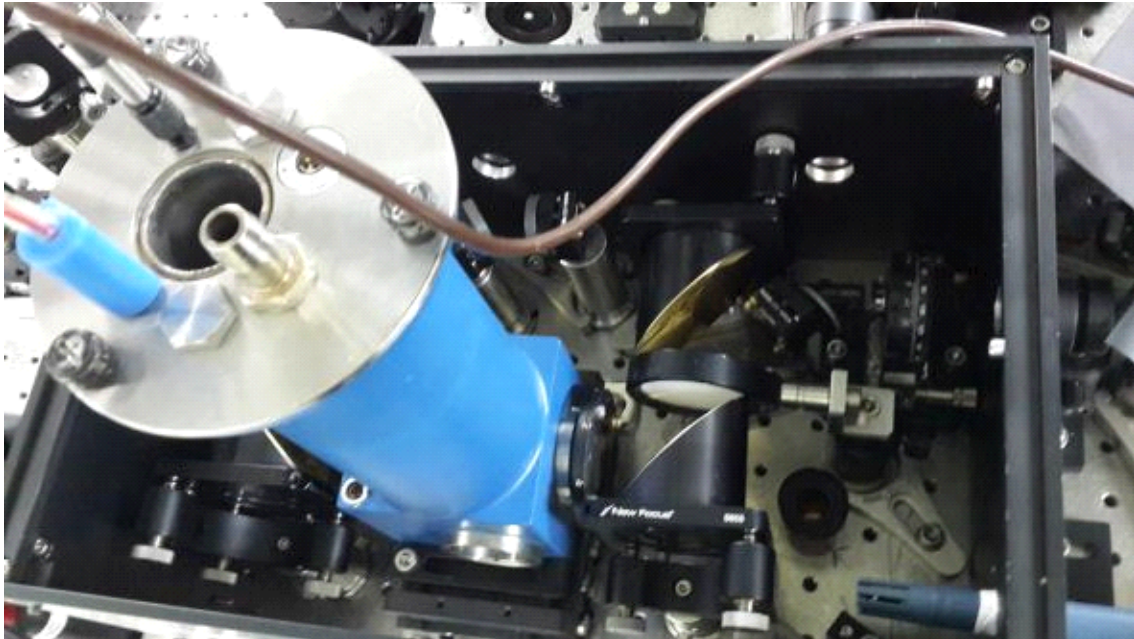


그림 20. 샘플홀더 집이 박스 내부에 있는 스테이지에 결합된 모습.



그림 21. 실험실에서 지반매질의 동결상태에서의 THz laser 투과실험을 하는 모습.

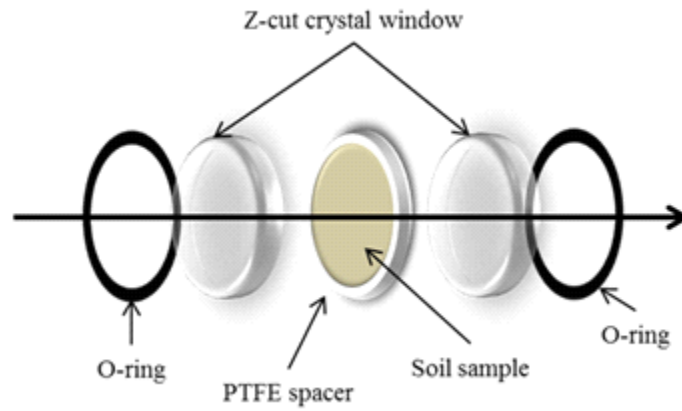


그림 22. 샘플 투과개요도.

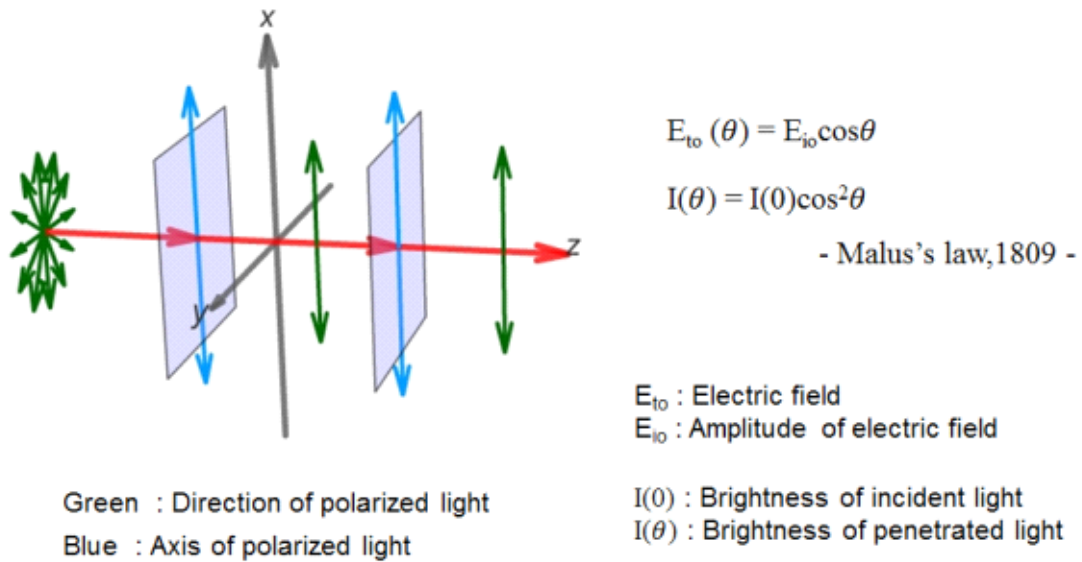


그림 23. 편광의 원리.

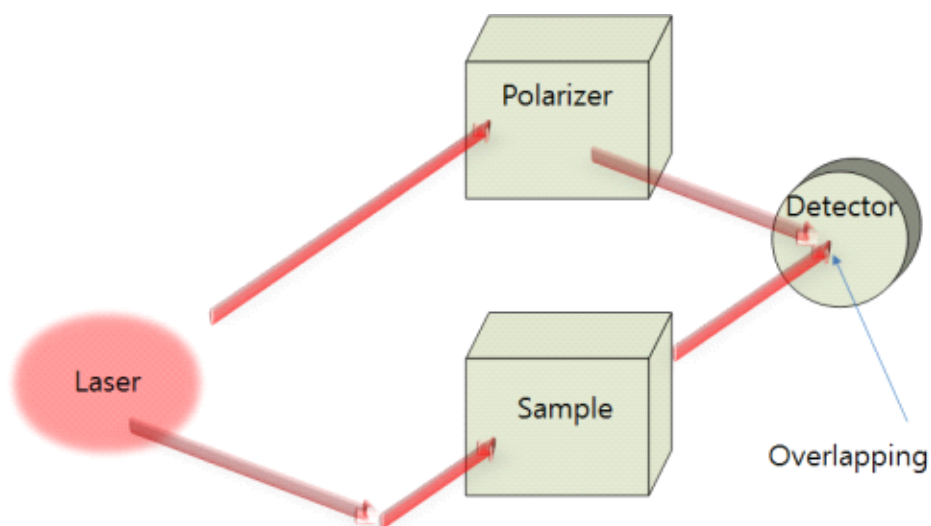


그림 24. Fs-THz Laser Spectroscopy.

(2-2) 실험결과

- 그림 25에서와 같이 순수한 물이 얼음인 상태가 되면 THz 레이저에 대한 투과율이 높아진다. 따라서 흙 안에 물이 있을 때, 동결상태가 되면 THz 레이저에 대한 투과율이 흙과 물

이 있을 때보다 높아짐. 동결상태에서 투과율 상승은 Silica sand에서보다 Kaolinite에서 더욱 더 높게 나타났음. 이 실험결과는 샘플두께가 1mm인 경우임.

- 그림 26을 보면 염도가 높을수록 투과율이 더 작아지는 것을 확인 할 수 있음. 하지만 염도가 투과율에 미치는 영향은 크지 않음. 0.5M의 동결실험결과와 순수한 물의 동결상태에서의 결과와 비교하였을 때 Frequency가 증가함에 따라 이전의 낮은 온도에서의 투과율과의 차이가 점점 증가하는 것을 알 수 있음.
- 흙의 종류와 함수비, 수온, 염도 등의 조건 변화에 따른 환경적 특성에 대한 결과를 보기 위해 0.2 THz - 0.8 THz 구간이 최적구간으로 판단 됨.

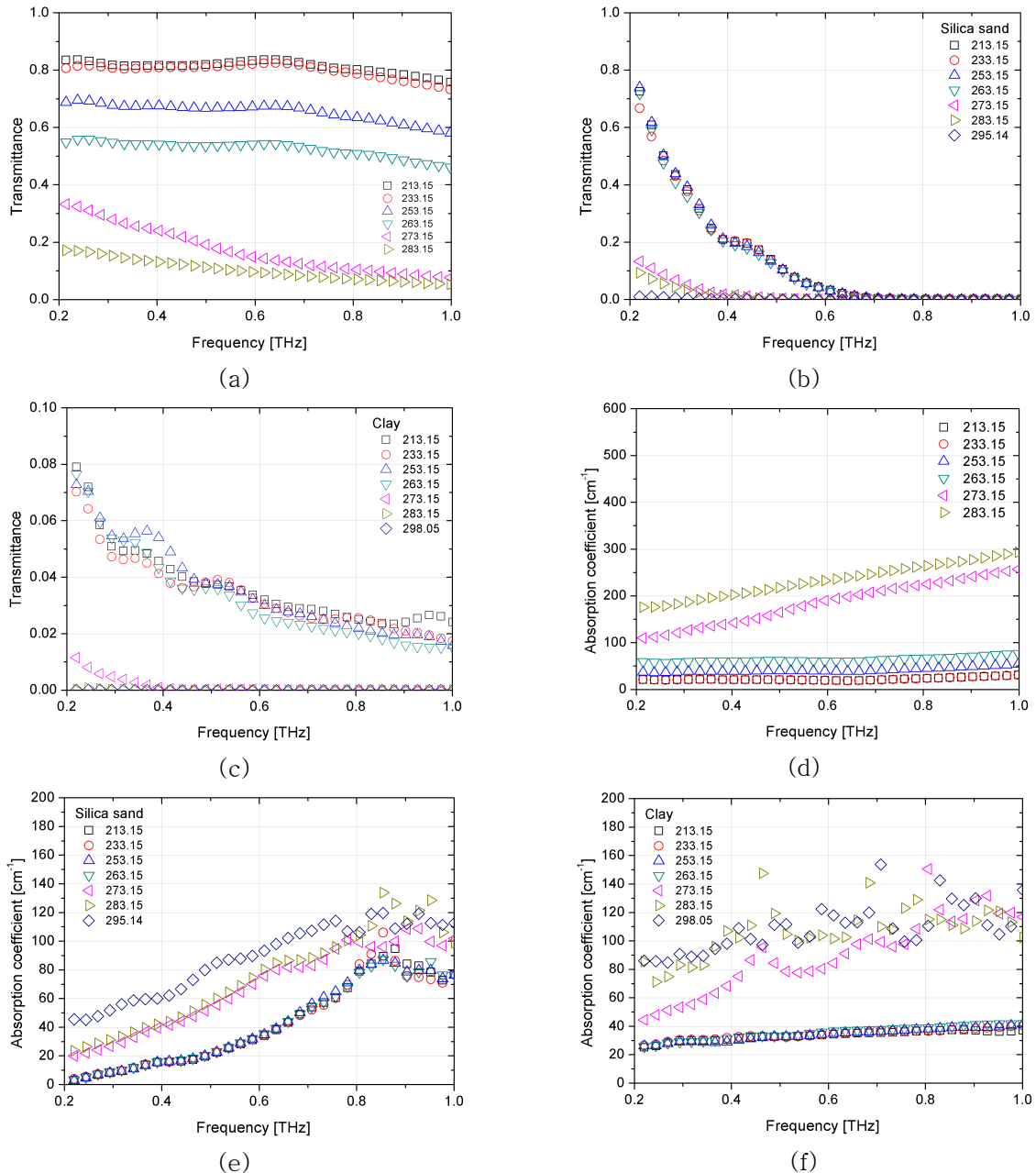


그림 25. 물과 흡시료가 섞인 샘플의 동결상태에서의 THz 레이저 투과실험결과 그래프. (a)순수물에 대한 온도에 따른 투과율 그래프. (b)Silica sand와 물이 섞인 샘플의 온도에 따른 투과율 그래프. (c)Kaolinite와 물이 섞인 샘플의 온도에 따른 투과율 그래프. (d)순수물에 대한 온도에 따른 흡수계수 그래프. (e)Silica sand와 물이 섞인 샘플의 온도에 따른 흡수계수 그래프. (f)Kaolinite와 물이 섞인 샘플의 온도에 따른 흡수계수 그래프.

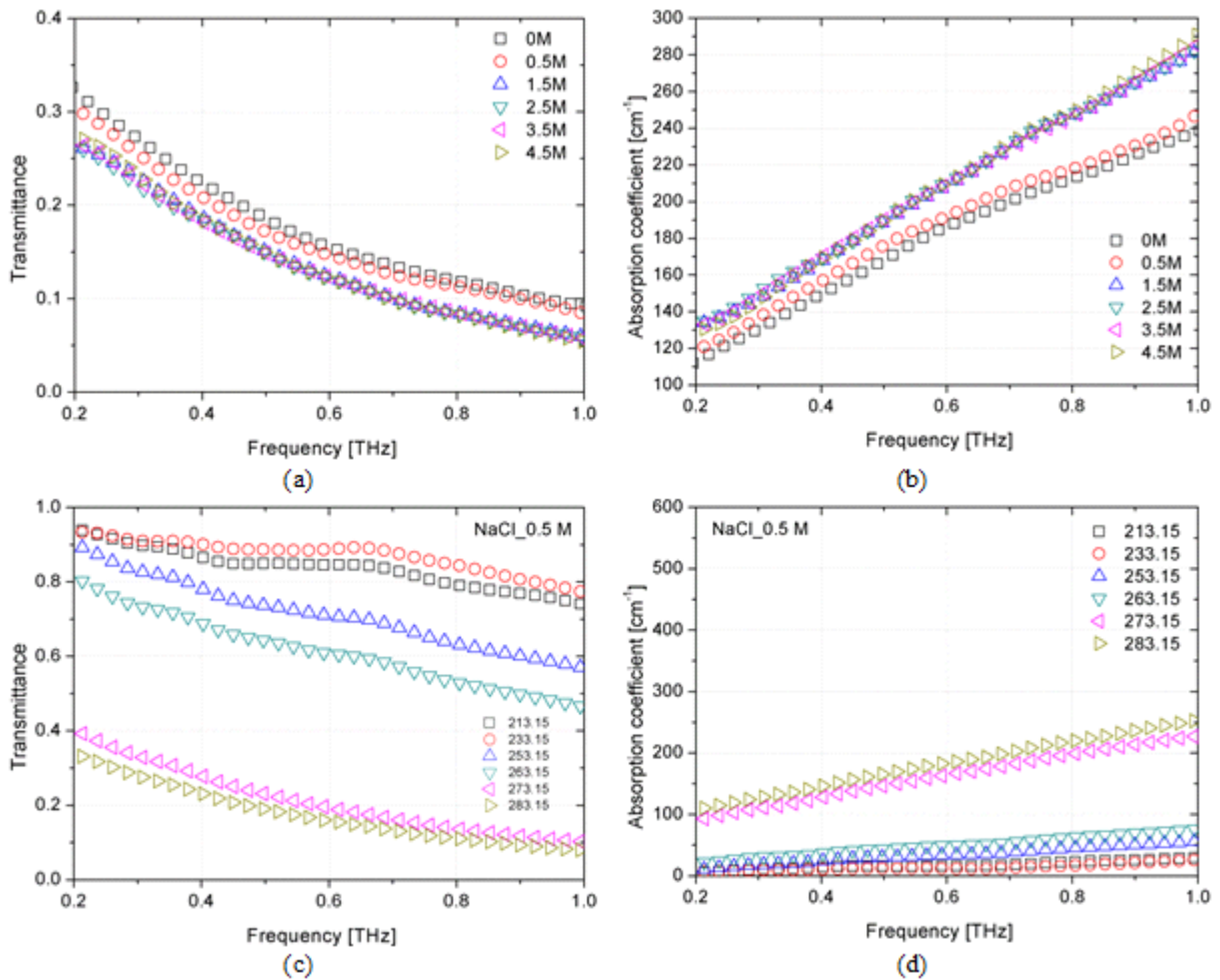


그림 26. 염도와 온도에 따른 투과율 및 흡수계수 그래프. (a)상온에서 염도에 따른 투과율 그래프. (b)상온에서 염도에 따른 흡수계수 그래프. (c)0.5M의 염도에서 온도에 따른 투과율 그래프. (d)0.5M의 염도에서 온도에 따른 흡수계수 그래프.

(3) 모르타르에 따른 THz 반사율을 이용한 숏크리트 압축강도추정 실험

(3-1)샘플시료 및 실험방법

- 실험용 샘플은 가로, 세로, 높이가 5cm×5cm×0.5cm의 직육면체모양으로 제작하였으며, 일반시멘트, 모래 그리고 물이 섞인 샘플을 기본 샘플이라고 하였을 때, 기본샘플과 기본 샘플에 일반 플라이 애쉬가 들어간 샘플 및 기본샘플에 유동화제가 들어간 샘플 총 3가지 종류의 샘플을 표 5에 나와 있는 혼합비로 제작한 뒤 초기 재령일인 1일, 2일, 3일 양생된 샘플에 대해 반사율 측정을 하였음.
- 샘플의 압축강도 실험을 위해서 반사율 측정 시 사용한 샘플에서 높이만 cm로 한 후 동일하게 제작하여 반사율 측정 때와 같은 재령일에서 강도측정을 하였음.
- THz파 반사 실험은 그림 28에 나와 있는 Fico 회사에서 나온 Zomega THz 반사 측정 장비를 이용하였음.

- 모르타르 샘플에 대한 압축강도실험은 그림 29의 Universal test machine(UTM)장비를 이용하여 0.5mm/min의 속도로 압축하였음.

표 5. THz 반사율 측정 샘플 조건

혼합재료	크기	혼합비	재령일		
일반시멘트(C)+ 모래(S)+ 물(W)	5cm×5cm×0.5cm	1:2:0.45	1일	2일	3일
일반시멘트(C)+ 플라이 애쉬(F)+ 모래(S)+ 물(W)	5cm×5cm×0.5cm	0.9:0.1:2:0.45	1일	2일	3일
일반시멘트(C)+ 모래(S)+ 물(W)+ 유동화제(P)	5cm×5cm×0.5cm	1:2:0.45:0.01	1일	2일	3일



(CSW)



(CSWF)



(CSWP)

그림 27. THz파 반사실험에 사용한 모르타르 시료(CSW: 시멘트+ 모래+ 물, CSWF: 시멘트+ 모래+ 물+ 플라이애쉬, CSWP: 시멘트+ 모래+ 물+ 유동화제).

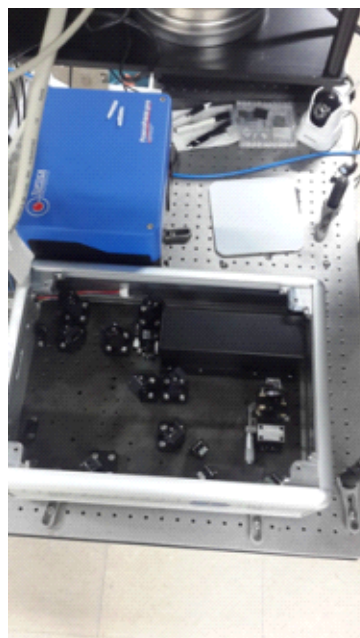


그림 28. Fico 회사의 Zomega THz 반사율 측정장비
(좌: 레이저 이동경로 셋업, 우: 레이저 입사 및 디텍터 장치)

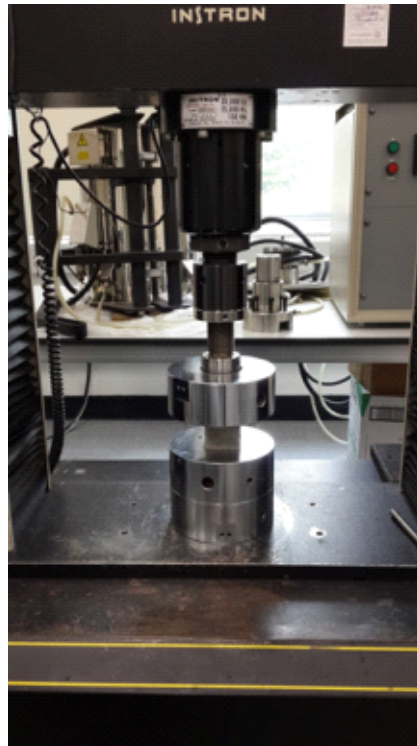


그림 29. Universal test machine(UTM)

(3-2) 실험결과

- 반사된 THz 파의 강도를 통해 얻은 이미지에서 반사된 THz 파의 강도가 클수록 밝게 나왔음(그림 30~39).
- 반사된 THz 파는 울퉁불퉁한 면에서보다 매끄러운 면에서 강도가 더 높게 나왔음 (그림 35 ~ 39).
- 유동화제가 들어간 샘플이 가장 표면이 매끄러웠으며 반사된 THz 파를 통한 이미지가 3가지 샘플종류중에서 가장 선명하게 나왔음 (그림 33, 34).
- 3 가지 타입의 샘플 모두에서 재령일이 클수록 반사된 THz 파를 통한 이미지가 선명하게 나왔음 (그림 31 ~ 34).
- 재령일이 클수록 샘플 강도가 증가 하였으며, 재령 1일 강도에서는 기본 모르타르의 강도가 가장 높았지만 재령 2일 강도에서는 기본 모르타르에서 유동화제가 첨가된 샘플의 강도가 가장 높게 나왔음 (그림 42 ~ 44).

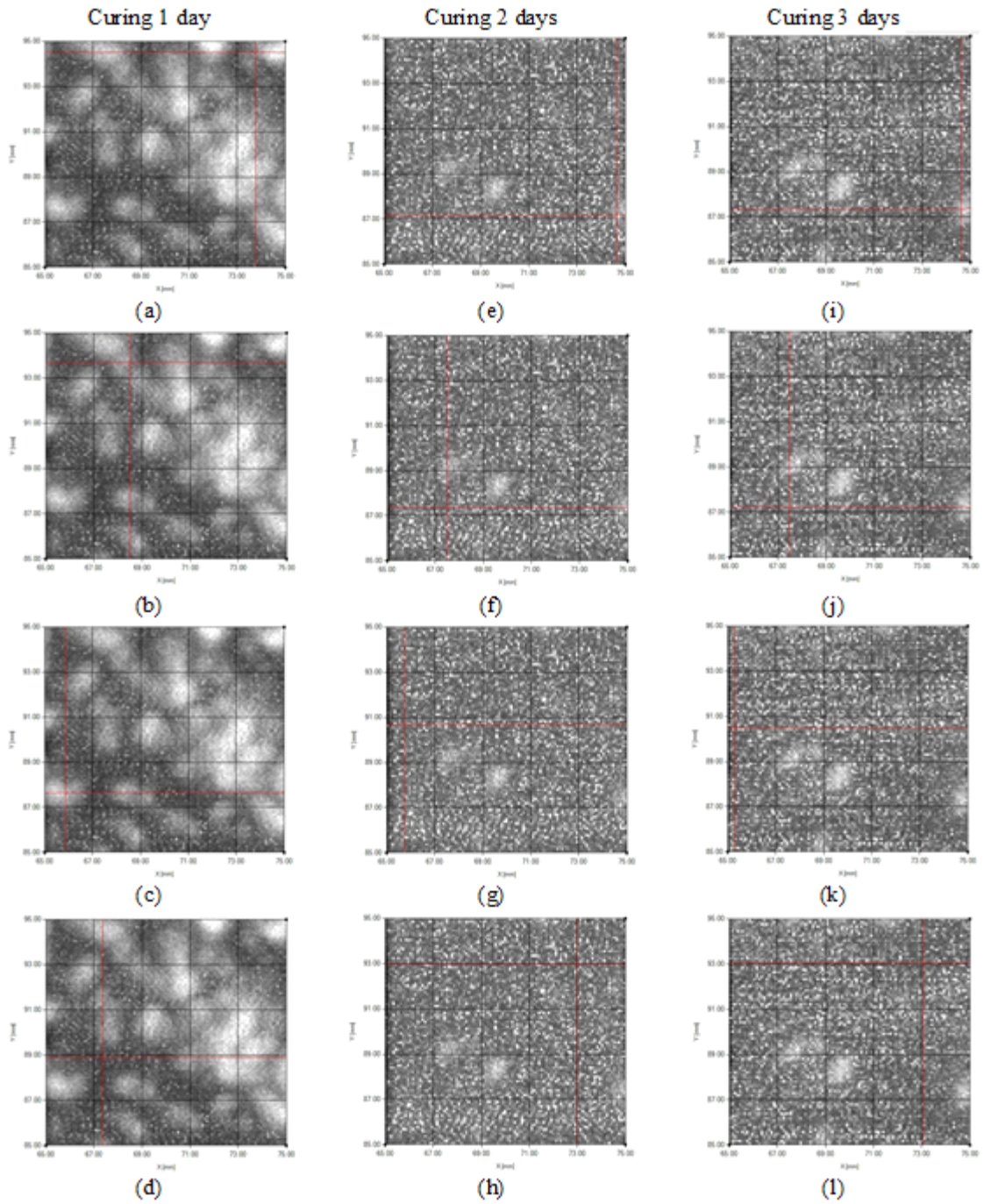


그림 30. 물, 시멘트 그리고 모래로 구성된 샘플의 거친 면에 대한 반사된 THz 파를 통한 이미지.
(첫째 행: Point 1, 둘째 행: Point 2, 셋째 행: Point 3, 넷째 행: Point 4)

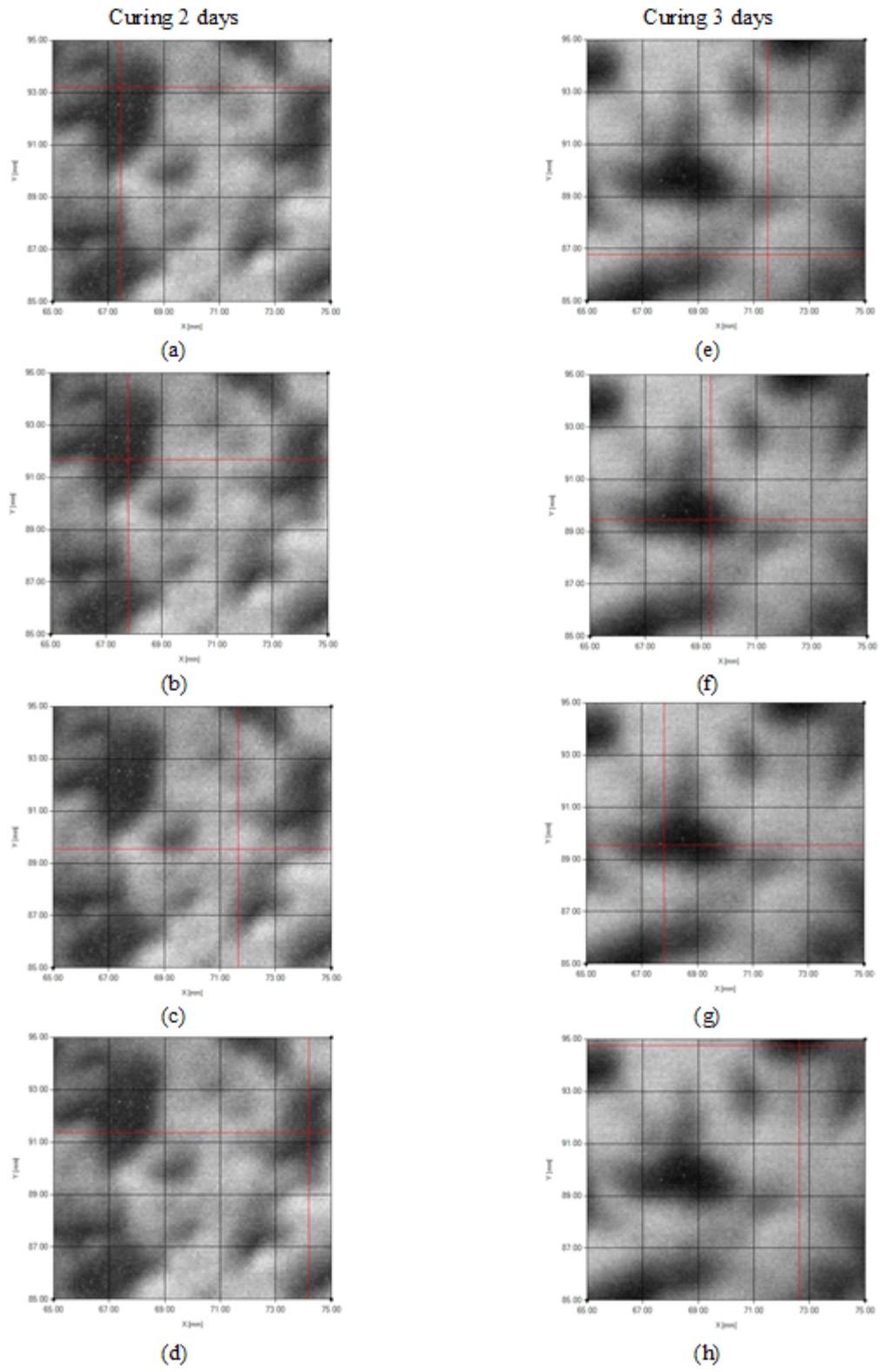


그림 31. 물, 시멘트 그리고 모래로 구성된 샘플의 매끄러운 면에 대한 반사된 THz 파를 통한 이미지.
(첫째 행: Point 1, 둘째 행: Point 2, 셋째 행: Point 3, 넷째 행: Point 4)

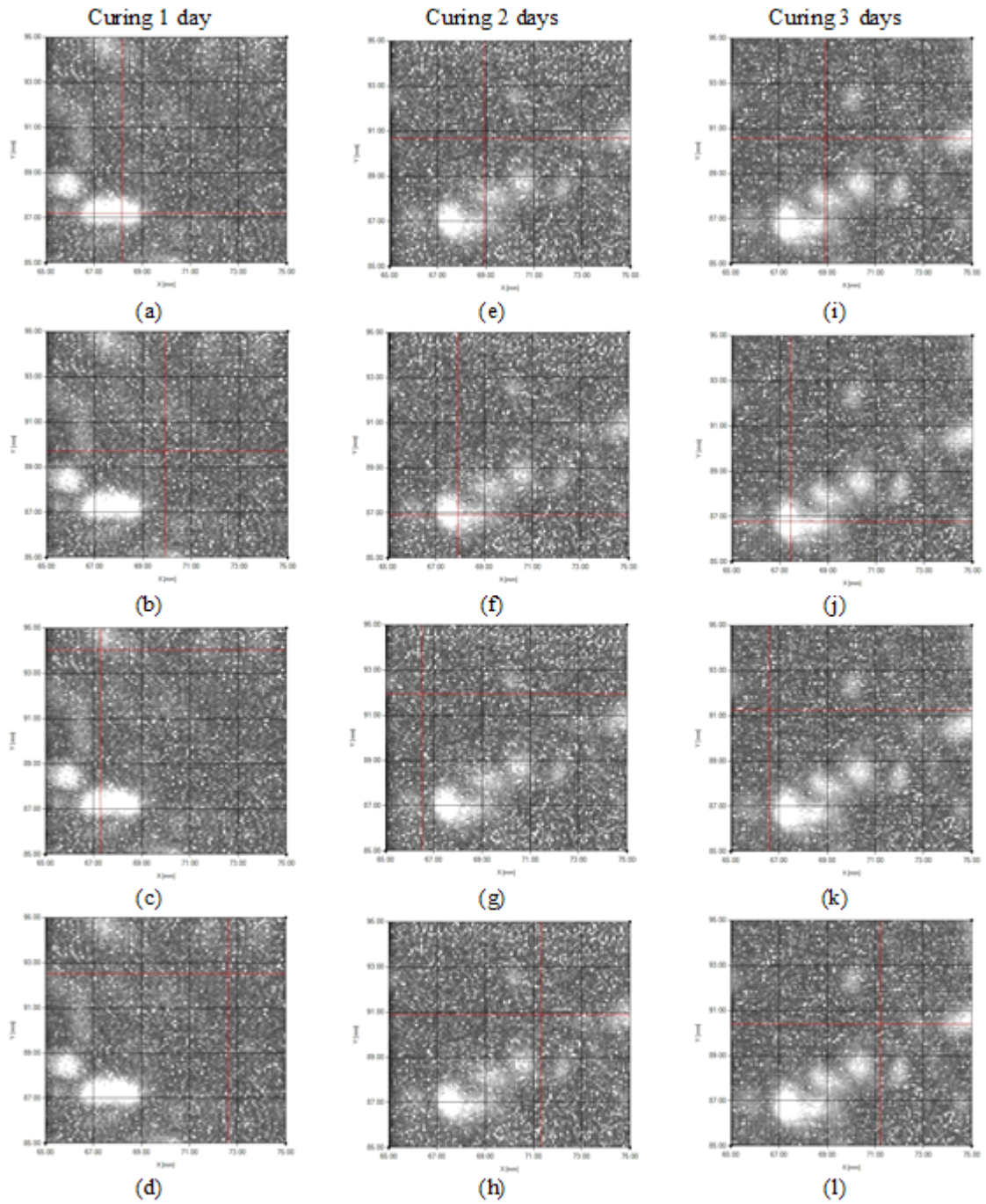


그림 32. 물, 시멘트, 모래 그리고 플라이 애쉬로 구성된 샘플의 거친 면에 대한 반사된 THz 파를 통한 이미지. (첫째 행: Point 1, 둘째 행: Point 2, 셋째 행: Point 3, 넷째 행: Point 4)

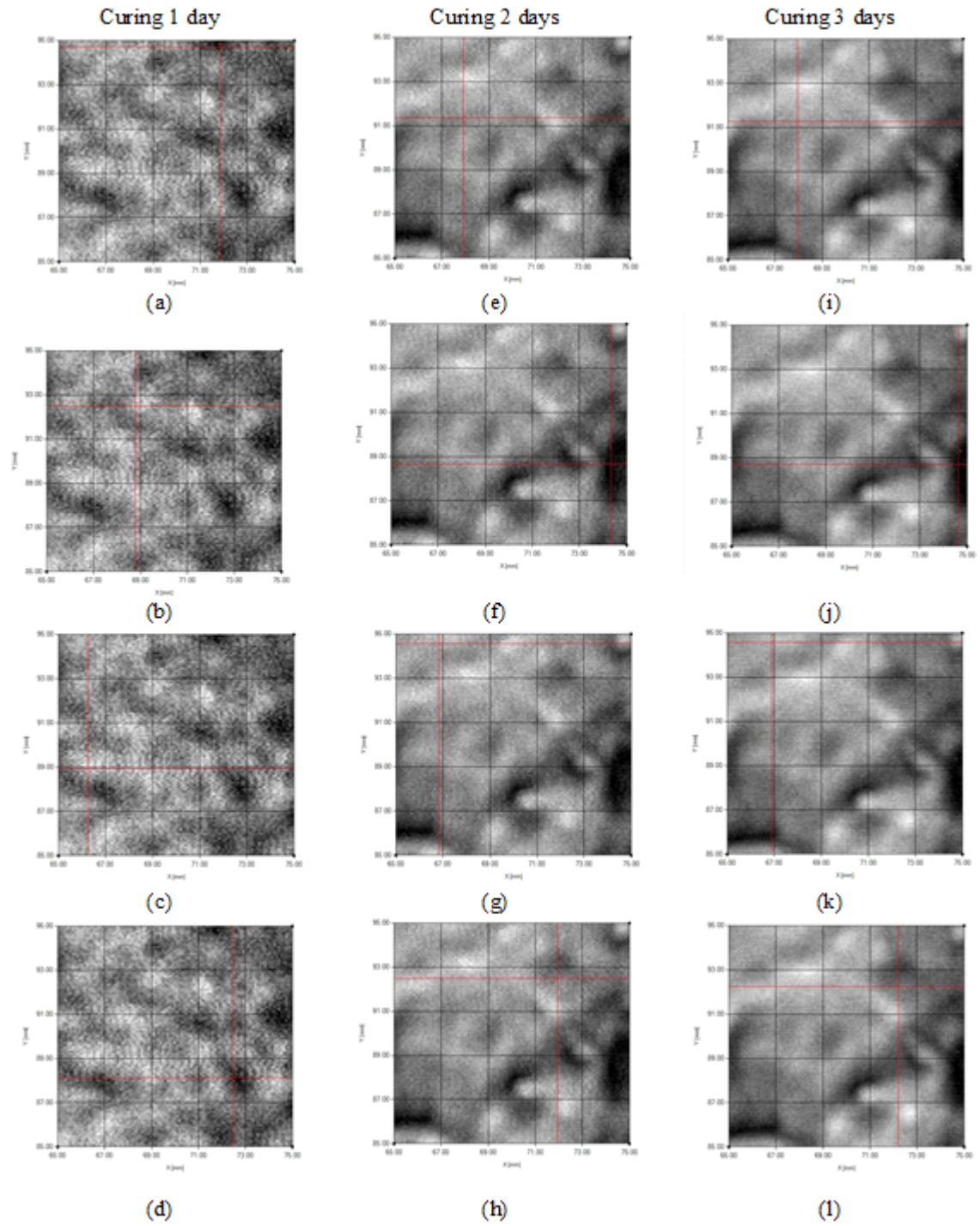


그림 33. 물, 시멘트, 모래 그리고 유동화제로 구성된 샘플의 거친 면에 대한 반사된 THz 파를 통한 이미지. (첫째 행: Point 1, 둘째 행: Point 2, 셋째 행: Point 3, 넷째 행: Point 4)

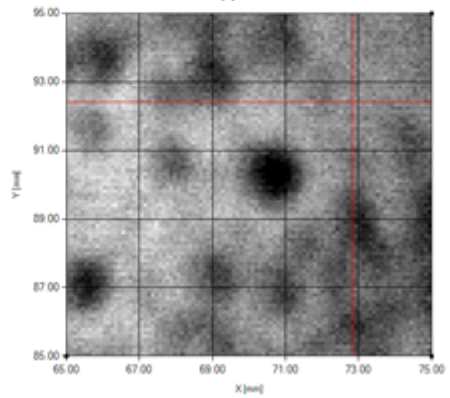
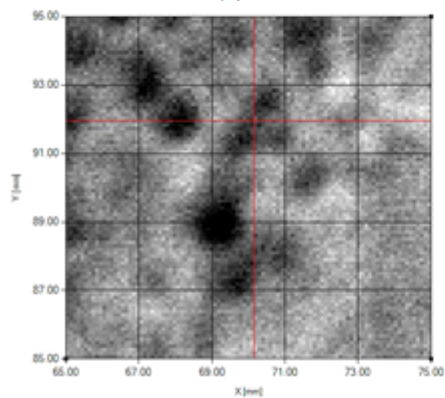
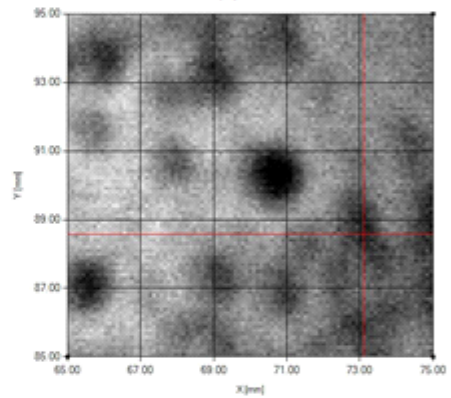
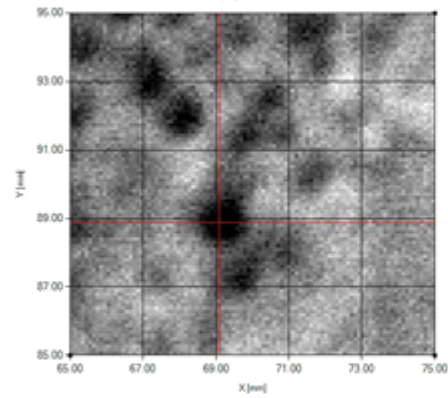
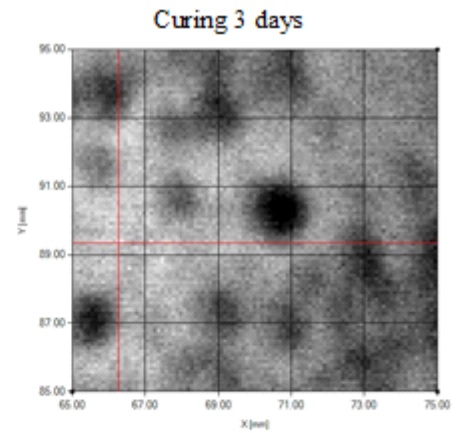
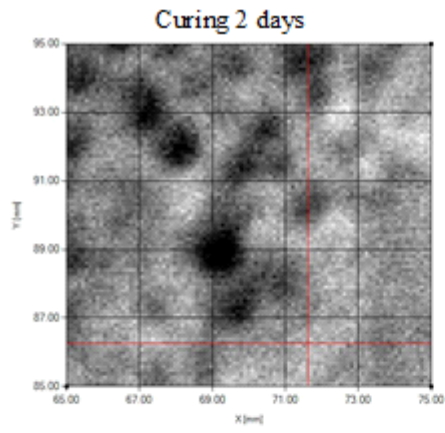


그림 34. 물, 시멘트, 모래 그리고 유동화제로 구성된 샘플의 매끄러운 면에 대한 반사된 THz 파를 통한 이미지. (첫째 행: Point 1, 둘째 행: Point 2, 셋째 행: Point 3)

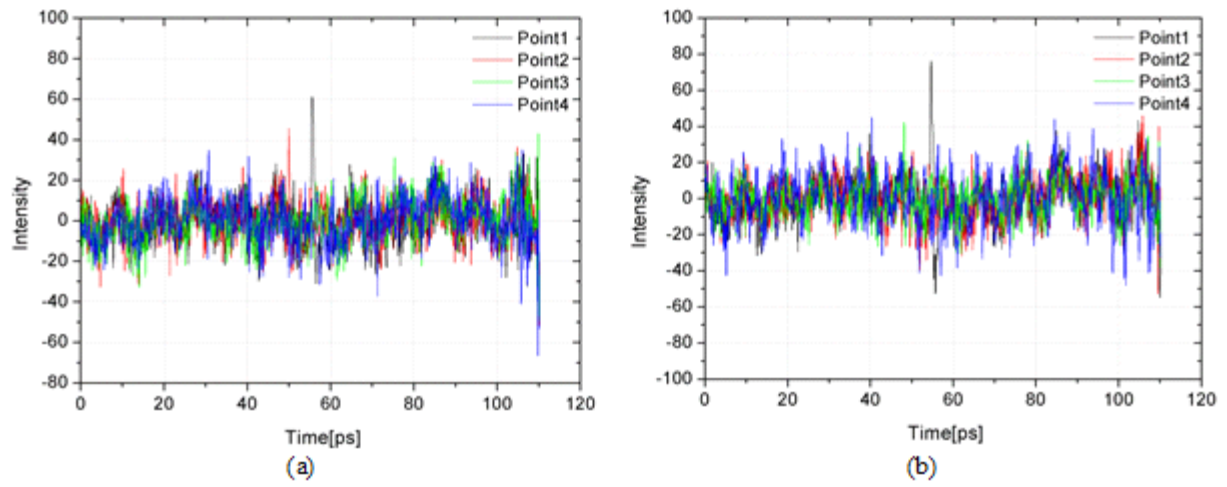


그림 35. 기본 모르타르의 거친 면에 반사된 THz 파의 강도 (a) 재령 2일차, (b) 재령 3일차.

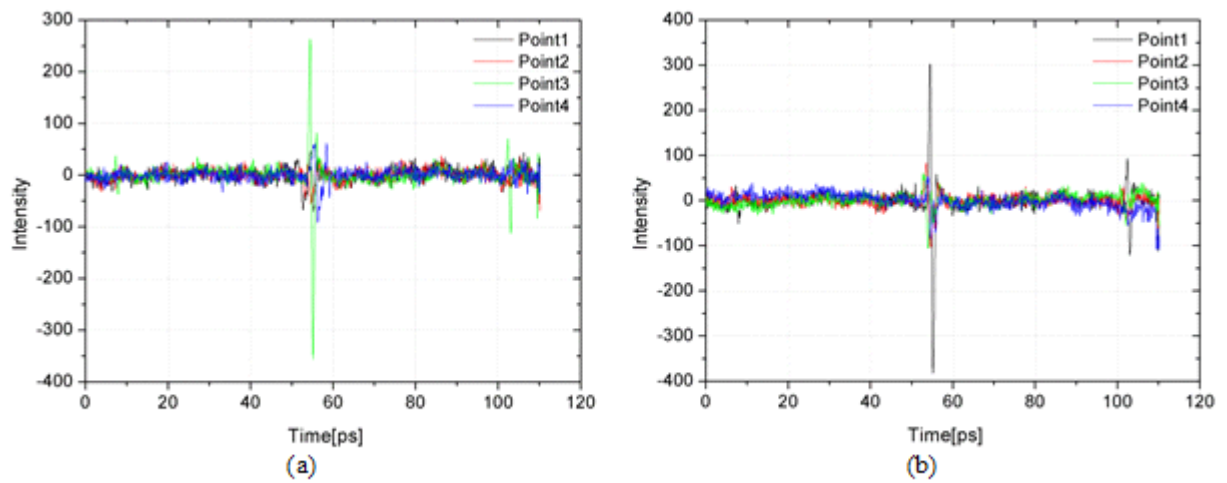


그림 36. 기본 모르타르의 매끄러운 면에 반사된 THz 파의 강도 (a) 재령 2일차, (b) 재령 3일차.

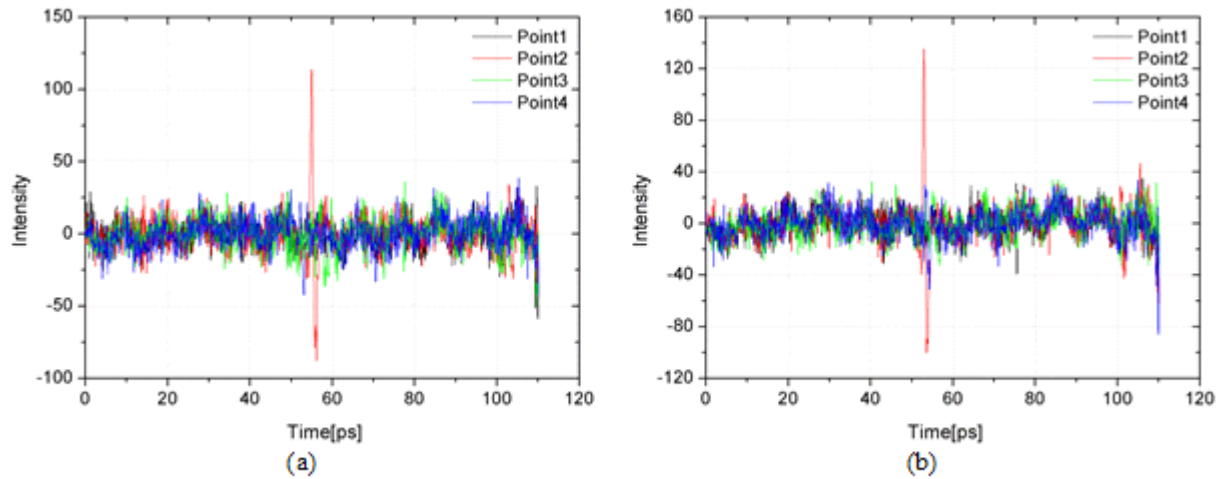


그림 37. 기본 모르타르에 플라이 애쉬가 첨가된 샘플의 거친 면에 반사된 THz 파의 강도
(a) 재령 2일차, (b) 재령 3일차

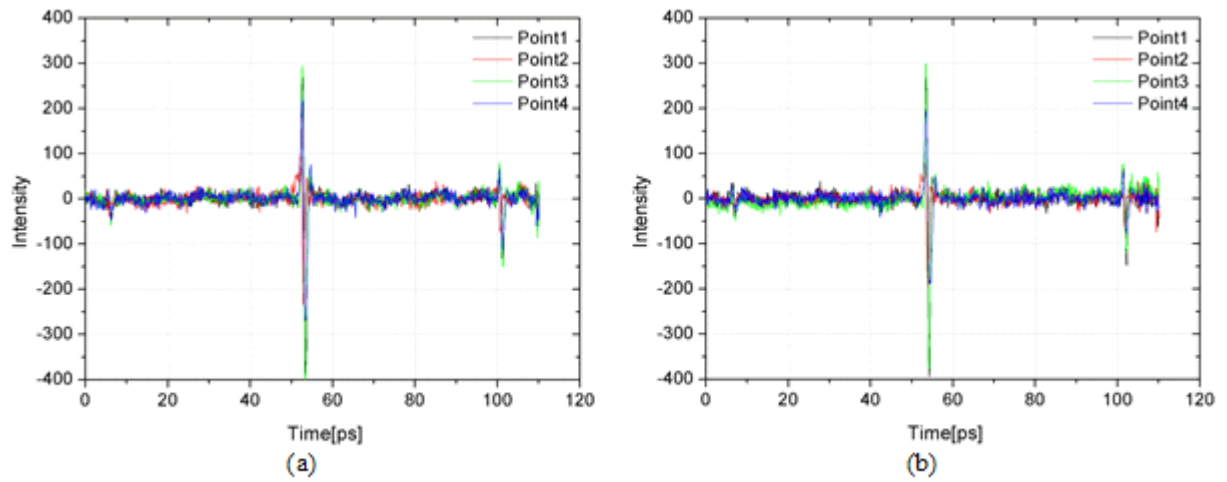


그림 38. 기본 모르타르에 유동화제가 첨가된 샘플의 거친 면에 반사된 THz 파의 강도
(a) 재령 2일차, (b) 재령 3일차

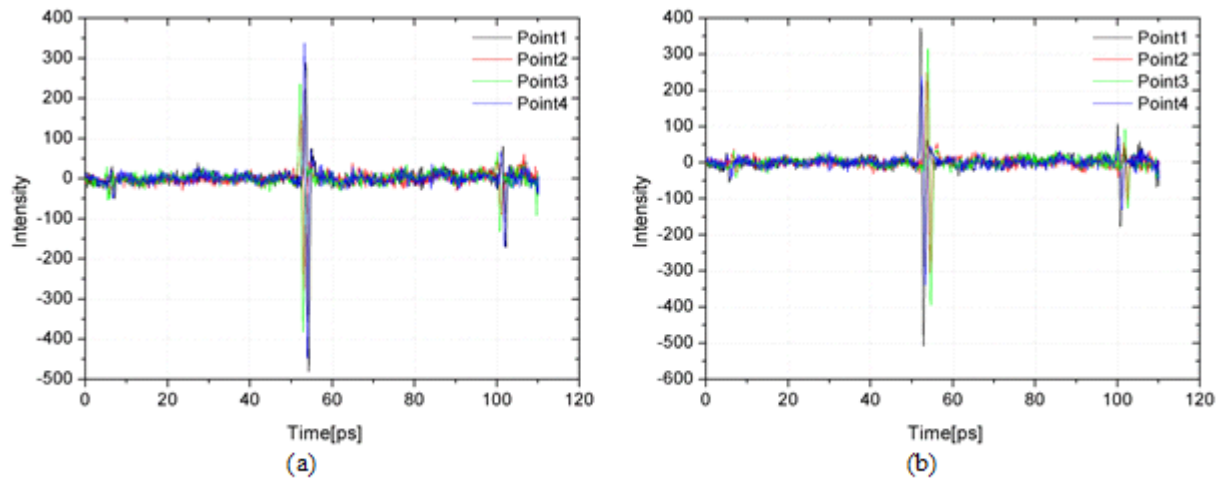
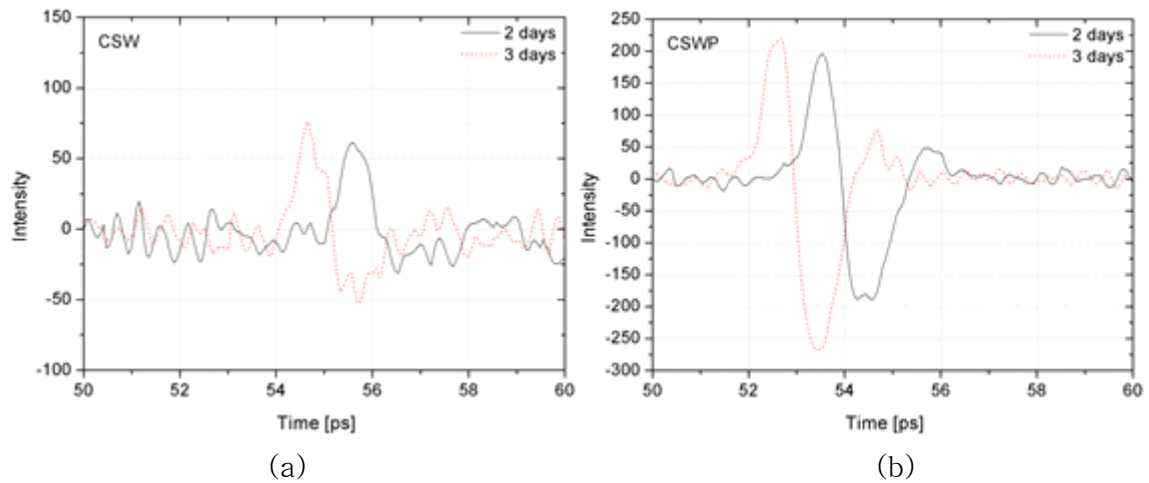
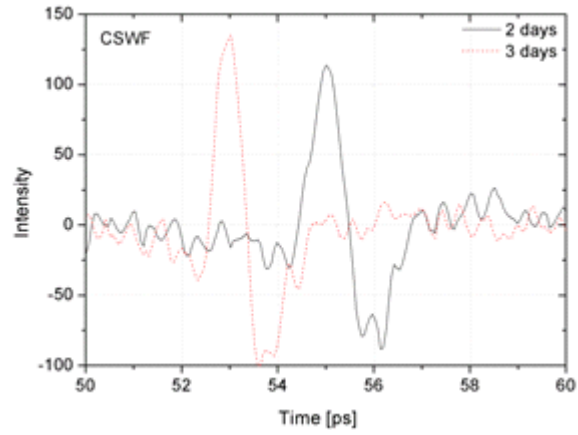


그림 39. 기본 모르타르에 유동화제가 첨가된 샘플의 매끄러운 면에 반사된 THz 파의 강도
(a) 재령 2일차, (b) 재령 3일차





(c)

그림 40. 재령일에 따른 모르타르 샘플의 반사된 THz 파의 강도와 감소 (a) CSW(시멘트+모래+물), (b) CSWP(시멘트+모래+물+유동화제), (c) CSWF(시멘트+모래+물+플라이애쉬).

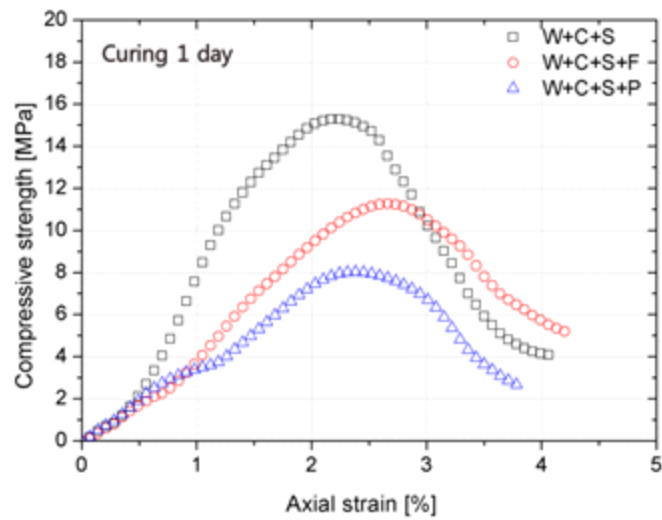


그림 42. 재령 1일 압축강도 그래프.

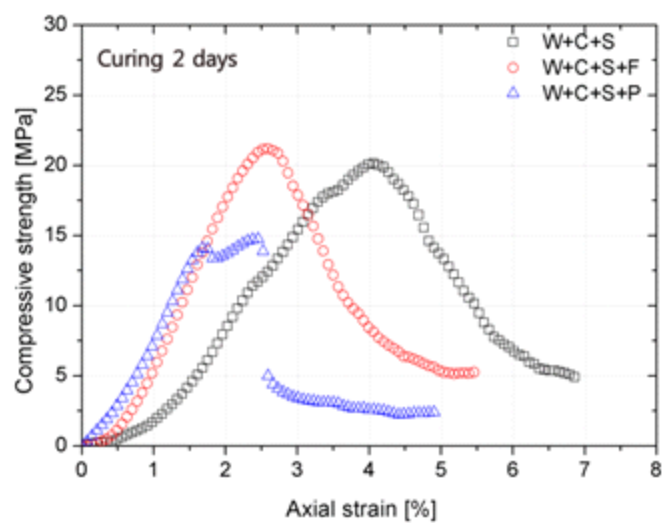


그림 43. 재령 2일 압축강도 그래프.

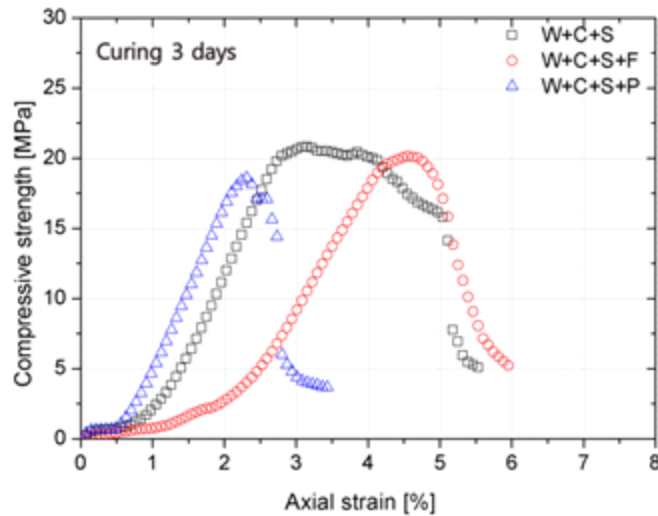


그림 44. 재령 3일 압축강도 그래프.

(4) THz 장비 적정 사양 설정

- THz레이저에 기반한 지반시료의 물리적 특성 연구는 실험실 단위에서 구현되는 측정 기법을 포함하여 실제 현장에서도 측정이 가능한 시스템을 구현하도록 하는데 궁극적인 목표가 있음. 이를 위해서는 외부 진동 및 환경 변화에 민감하지 않은 THz 분석 장비가 요구되며, 이에 적합한 시스템을 구현하기 위해서는 광섬유 레이저에 기반한 THz 레이저 시스템이 가장 적합함. 모든 광신호와 전달이 광섬유를 통해 이루어지기 때문에, 외부 진동 등의 환경 변화에 둔감하고 시스템의 공간 이동성이 뛰어나기 때문에, 현장에서 THz를 이용한 지반 시료의 실시간 분석이나 적용성이 뛰어나 (그림 45).
- THz레이저를 펌핑하기 위한 레이저 시스템은 Er-doped 광섬유 펌프초 레이저를 이용하였음. 980nm의 LD로 펌핑된 Er-doped 펌프초 레이저는 100 fs의 펄스폭을 가지며, 최대 200 mW의 Average power를 갖음. 중심파장은 1530~50nm로 이 파장을 Second harmonic doubling해야 THz레이저를 펌핑할 수 있음. 현존하는 THz 펌핑 방법은 Electric rectification 방법을 주로 쓰는데, 두 개의 금속 안테나 사이에 강한 레이저를 입사시키게 되면, 입사된 레이저에 의해서 정류된 전자기적 펄스가 재발진하게 되며, 이 때 발진되는 전자기적 펄스가 THz 펄스임.
- 아래 그림 46은 광섬유 펌프초 레이저에 기반한 THz emitter 및 detector의 사진임. 광섬유를 통해서 전달된 펌프초 펄스 레이저가 검은색 모듈화된 장치로 입사하게 되면, 내부에 구성된 THz발생 시스템에 의해서 0.1~3 THz에 주파수에 해당되는 THz펄스가 발진되게 됨. 이때 발진되는 THz파의 반복률은 펌프초 광섬유 레이저의 반복률과 동일한 100 MHz를 갖고 있음. 발진된 THz의 끝단에는 THz파를 집속할 수 있는 렌즈 시스템이 설계되어 있으며, 시편의 크기, 레이저의 집속 정도를 원하는데로 조절할 수 있음. THz파가 샘플을 투과 또는 반사하게 되면, 이 THz파를 검출할 수 있는 검출부도 마찬가지로 모듈화 되어 있으며, 이 역시 렌즈 시스템을 갖추고 있어, 원하는 FOV(field of view)를 설정할 수 있음.

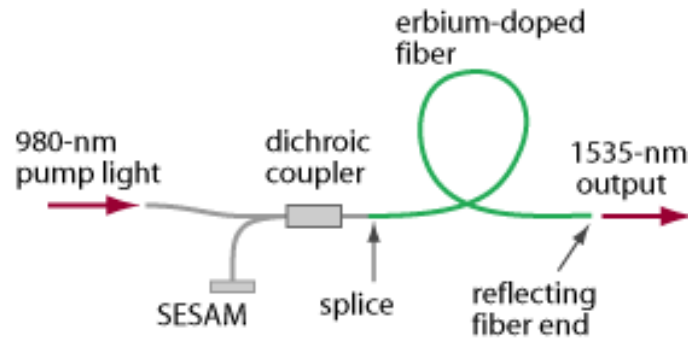


그림 45. 광섬유에 기반한 Er-doped 펄초 레이저 시스템의 개략도, 980 nm의 펌핑 LD를 사용하여, 광섬유를 펌핑하면, 편광상태에 따라서 자연적으로 펄스 레이저로 발진하게 된다.



그림 46. 광섬유 펄초 레이저 시스템에 기반한 THz 발생기 및 검출기, 모듈화로 이루어져 있기 때문에, 포터블하고, 원하는 측정 대상에 쉽게 접목할 수 있는 장점이 있다.

(4-1) 0.1 - 3THz 중 최적 대역폭 설정

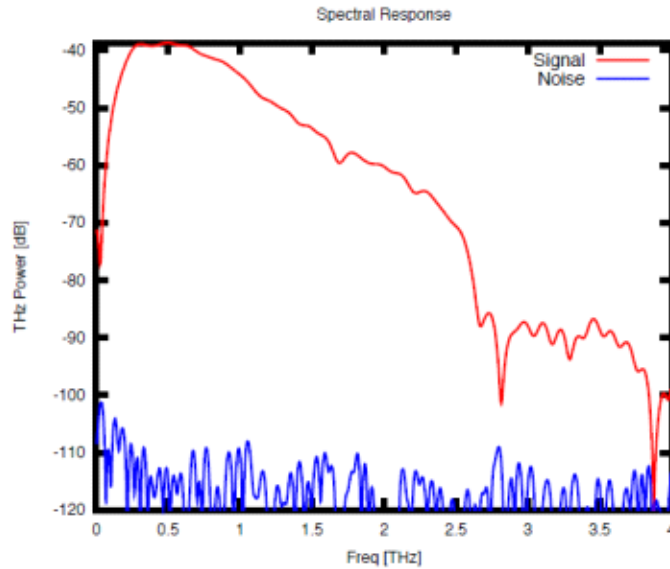


그림 47. 주파수에 따른 레이저 파워 측정.

- 레이저 기반 영상화 장치 구축을 위한 THz 레이저 광원을 발생시키고 발생된 레이저 광원의 주파수 스펙트럼을 측정함으로써, 발생된 레이저를 이용한 분광실험이 가능한 주파수 영역대를 설정함.
- 지반내부에서 일어나는 물질 조성비율의 차이 및 수분 함량에 따라서 각기 다른 흡수 스펙트럼을 가지며, 이를 이용하면, 조성을 분석하거나 비율을 분광학적으로 측정하는 것이 가능함.
- 최적 대역 폭을 설정목적은 아래와 같음.
 - 지반 매질 내부의 레이저 이미징 시스템을 통해 Layer당 흙의 종류에 따른 분광학적 흡수 및 반사 광을 분석하여 분광학적 조성 측정연구에 활용
 - 지반 매질 내부의 흙의 종류별 상대적 함수비를 영상자료를 통해 시각적으로 바로 확인 가능 하기 위함.
 - 가능한 넓은 스펙트럼을 구현할수록 더 많은 분광학적 정보를 획득할 수 있음.
- 기존에는 THz 영역의 레이저를 이용한 지반 물질 분석 연구가 이루어지지 않았음. 따라서 현존하는 THz 레이저 기술 수준에 거의 근접하는 넓은 스펙트럼을 확보하여, 지반 물질의 조성 비율 분광기술에 활용하고자 함.

(4-2) 펄스레이저 용량 설정

- 충분한 광량을 가지는 THz 레이저를 개발함으로써, 두꺼운 지반 시료를 충분히 투과할 만한 광량을 가지는 THz 레이저 광원을 구성하는데 목표를 두고 있음.

- 지반 시료의 조성 비율 및 두께에 따른 흡수율 분석을 위해서는 충분히 큰 광량을 가지는 THz 레이저 시스템을 개발함으로써, 다양한 시료의 조성 분석이 가능해 짐.
- 펄스레이저 용량 설정 목적은 아래와 같음.
 - 지반 매질 내부의 레이저 이미징 시스템을 통해 내부 조성 물질의 변화 및 흡수율, 등을 분석하기 위해 충분한 광량의 THz레이저 시스템을 구축하는데 목적이 있음.
 - 반사된 THz 빔의 분광학적 분석을 하기에 충분한 광량 또는 광감도를 가지는 분석 장치를 개발함으로써 지반 시료의 물리적 특성을 평가하고자 함.
 - 가능한 넓은 스펙트럼을 구현할수록 더 많은 분광학적 정보를 획득할 수 있음.
- THz 레이저 연구에 있어, 정확한 레이저 파워는 제시되고 있지 않지만, 레이저를 측정하는 측정 장치의 Signal to Noise ratio를 통해서 대략 50dB 이상의 S/N값을 가지는 것으로 알려져 있음. 현존하는 THz 레이저 기술 수준에 거의 근접하거나 조금 더 향상된 60dB수준의 광 감도율을 갖는 것으로 판단됨.

(4-3) 테라헤르츠 레이저 소스 및 디텍터 장비 구축

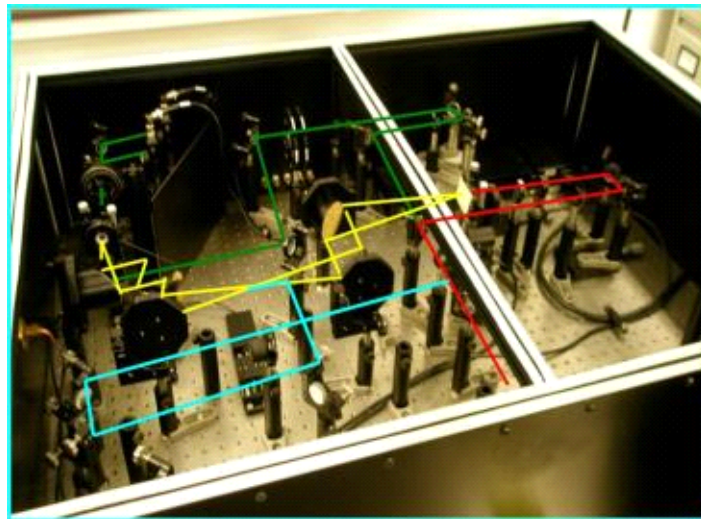


그림 48. 테라헤르츠 경로 및 디텍터 장비 테스트.

- 지반 시료 측정을 위한 THz 발생-측정 장치를 구현하고자 0.1~3THz의 주파수 대역을 갖는 THz 레이저를 발생시키는 장치를 구현하고 이를 측정할 수 있는 측정 장치 구현 하였습니다.
- 테라헤르츠 레이저 소스 및 디텍터 장비 구축의 목적은 아래와 같음.
 - 지반 매질 내부의 레이저 이미징 시스템을 구축하기 위한 THz발생 장치와 측정 장치를 제작하고자 함.
 - 해당 THz레이저 발생 및 측정장치를 개발하기 위해서 가시광선 영역의 극초단 광섬유 레이저를 이용하고, 이를 검증하고자 함.

- 비선형 광물질에 IR 극초단 펄스 레이저를 주입하면, 전기적 정류 현상에 의해서 THz레이저가 발진되며, 이를 측정하기 위해서 반대로 THz 펄스에 의한 비선형 광물질의 굴절률 변화를 IR 극초단 펄스를 감지하는 기술이 주로 사용됨.
- 기존에 연구되어온 THz 발생 및 측정 기술을 적용하여, 극초단 펄스레이저와 비선형 광물질을 이용한 THz 발생 및 측정 장치를 동일하게 구현함.
- 현존하는 THz레이저 광원 발생 기술에 가장 일반적인 생성 방법이며, 가장 환경적으로 안정적으로 동작하는 것으로 알려져 있음.

(4-4) 광물질표본을 이용한 측정 시스템 검증

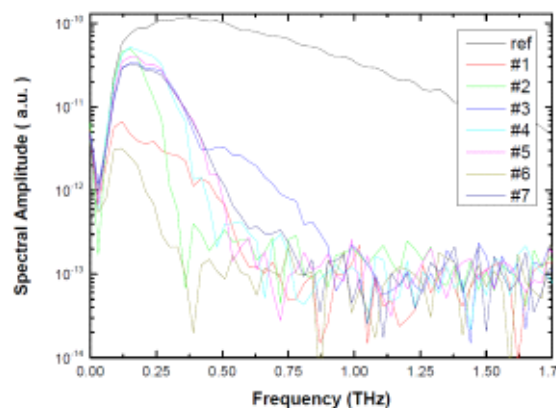


그림 49. 광물질에 따른 주파수영역대 Amplitude 검증.

- 여러 가지 광물질 지반시료를 이용하여 THz 레이저의 투과 특성의 차이를 평가하기 위한 기초적인 실험을 수행.
- 여러 가지 다른 지반시료의 투과특성을 테스트함으로써, THz레이저를 이용한 지반시료의 분광학적 분석방법의 가능성을 검토.
- 광물질 표본을 이용한 측정 시스템의 검증의 목적은 아래와 같음.
 - THz 레이저의 지반시료 투과 특성을 분광학적으로 분석함으로써, 서로 다른 조성비를 가지는 지반 시료의 투과 특성을 비교하고자 함.
 - 각기 다른 조성비를 가지는 물질의 투과 스펙트럼 및 비행시간을 측정함으로써 THz 레이저를 이용한 지반시료의 물리적 분석 방법의 가능성을 검토해보고자 함.
- 아직까지 THz 레이저를 이용한 지반시료의 물리적 특성이나 분광학적 분석 또는 굴절률, 흡수율, 반사계수 등과 같은 다양한 물리적 수치가 정량화 되어 있지 않음.
- 처음으로 여러 조성비를 갖는 지반시료의 물리적 특성을 측정하고 이를 정량화 함으로써, 복합 조성이나 함수율에 따른 다양한 지반시료의 물리적 특성을 평가 할 수 있는 측정 기법을 개발 할 수 있을 것으로 보임.

(5) THz pulse laser 장비구축

Fico사의 Zomega 제품을 이용하여 terahertz time-domain system 기반 THz pulse laser 장비를 구축하였음. Pump-probe method를 이용하여 발생시킨 레이저빔을 delay시켜 detector에서 convolution을 통하여 wave 형상을 얻는 방식임.

Menlo systems의 레이저 발생장치(표 6, 그림 50)를 통해 femtosecond 레이저를 THz 박스(그림 51, 52)안으로 조사시킨 후 beam splitter를 이용하여 pump beam과 probe 빔으로 나눠 줌. Pump beam은 측정대상을 거치기 때문에 probe beam보다 큰 에너지를 가지고 있음. pump beam은 emitter안에서 Antenna를 통해 THz pulse로 바뀌고 THz pulse laser가 스테이지 위에 놓인 sample에 조사됨. 스테이지는 x 축, y축으로 동일 평면상에서 좌우로 이동 가능하며(그림 53) receiver의 위치에 따라 투과 또는 반사 실험을 할 수 있음.

sample에서 반사되거나 투과되는 THz pulse laser는 Receiver로 들어가서 detector에서 probe beam과 만나게 됨. 그림 54와 같은 레이저 경로로 투과 실험이 가능함.

투과거리는 현재 레이저의 용량에 의해서 제한됨. 또한 Broadband를 가지는 펄스레이저가 아닌 단주기 레이저를 사용할 경우 레이저의 파워를 100배 이상 증가시킬 수 있음. 따라서, 적용되는 대상에 따라서 0.2-0.8THz 이내의 한 주파수를 설정하여 단주기 THz 레이저를 소스로 사용할 경우, 10cm 이상의 투과도 가능할 것으로 예상됨. 이는 후속 연구로 추진할 계획임.

표 6. 레이저 발생 장비 사양

Specification	C-Fiber 780
Center Wavelength	780nm $\pm$ 10 nm
Average Power	>100 mW
Pulse Energy	>1.0 nJ
Pulse Width	<100 fs (<70 fs with FEMTOSCALE)
Repetition Rate	100 MHz (50-250 MHz with VARIO)
Repetition Rate Intensity	<1 ppm over 20 hours at constant temperature
Timing Jitter	<2 fs [rms, 10 kHz.. 10 MHz]
Output Port	free space
Auxiliary Output Port	free space, 1560 nm, >250 mW
Additional Fiber-Coupled Seed Port	1 (up to 4 with MULTIBRANCH)
Polarization	linear, s-polarized
Beam Height	75 mm



그림 50. 레이저 발생 장비.

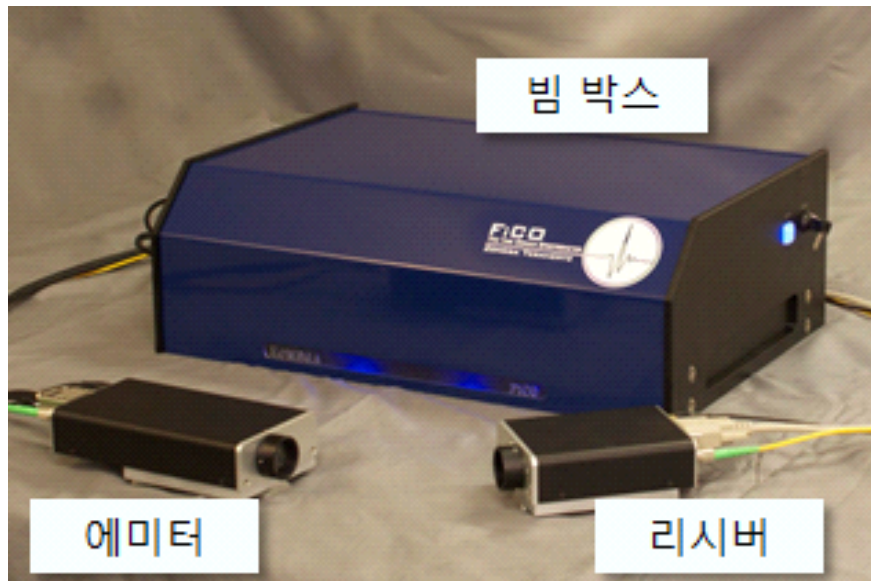


그림 51. 빔박스, 에미터 그리고 리시버.

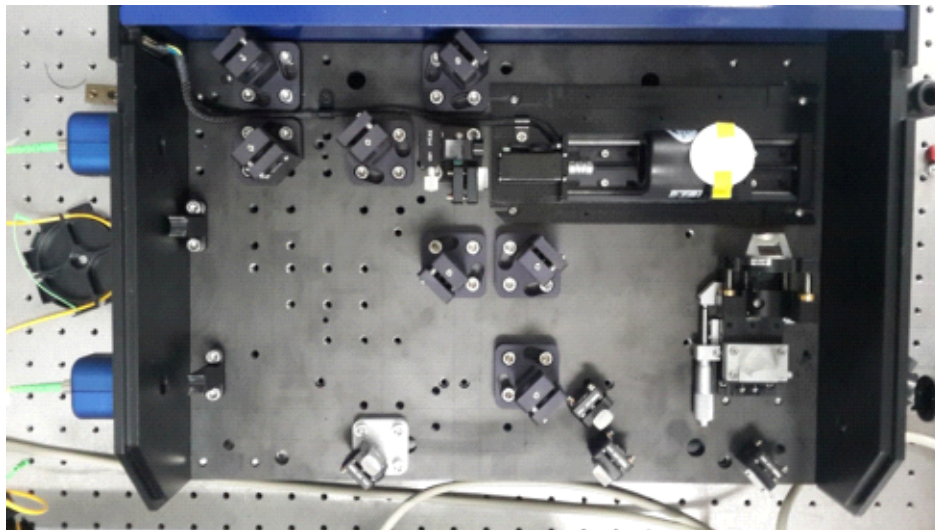


그림 52. Pump-probe beam 경로 및 time delay 셋업 박스.

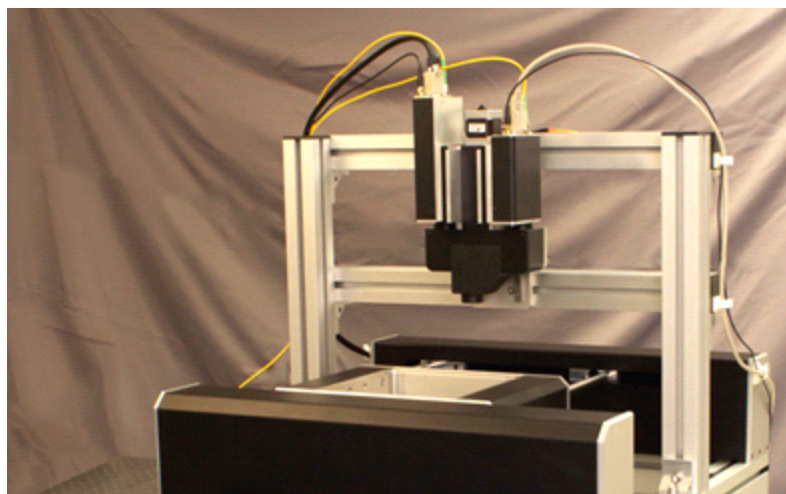


그림 53. 무빙 스테이지.

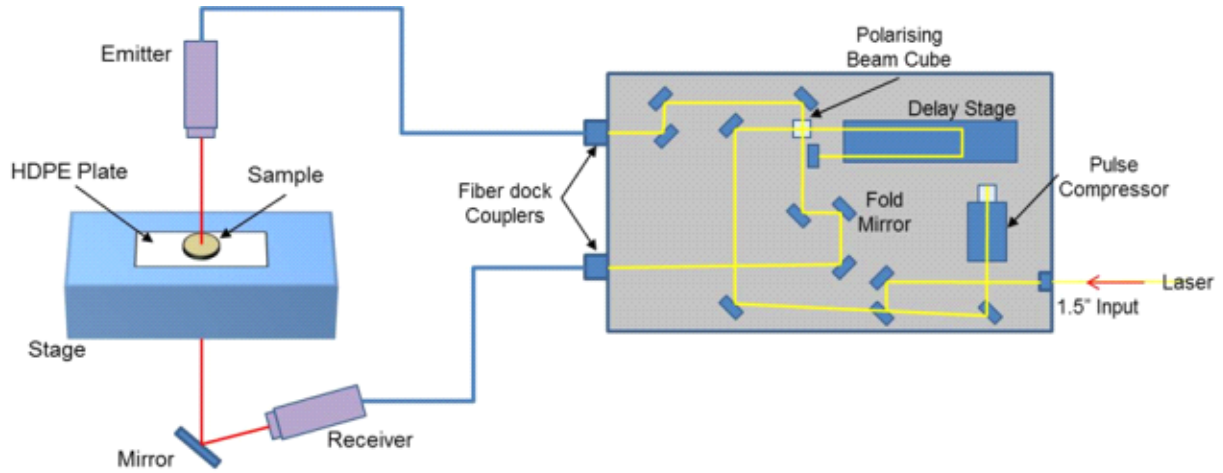


그림 54. THz 투과실험셋업 모식도.

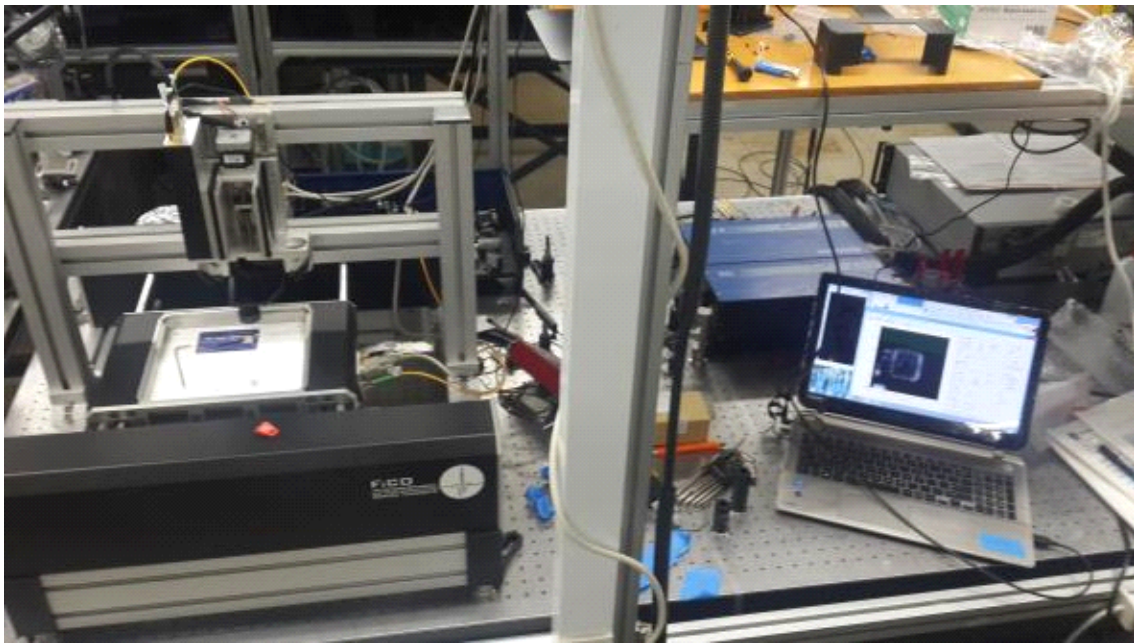


그림 55. 구축된 THz 장비 테스트.

(6) 2차원 자동화 스테이지 구축

- Fico 사의 x축, y축으로 이동 가능한 2차원 스테이지를 "Terahertz Analysis and Control(TAC)" 소프트웨어를 통해 좌표값 입력을 통해 원하는 곳으로 레이저가 조사되도록 스테이지를 움직일 수 있음.
- THz 레이저를 이용한 지반 시료의 2차원 공간상에서의 특성 분포 영상화가 가능한 THz 레이저 장착이 가능한 고속 XY 이송 시스템 구축
- 여러 가지 다른 지반시료의 투과특성 또는 반사/흡수 특성을 2차원 공간상에서 영상화함으로써, THz레이저를 이용한 지반 시료의 분광학적 분석방법의 공간 분해능을 정의하고, 정밀 영상화 가능성을 검토하기 위함.
- 2차원 자동화 스테이지 구축의 목적은 아래와 같음.

-
- THz 레이저의 지반시료 투과 또는 반사 특성을 2차원 공간상에서 분광학적으로 분석하기 위한 2차원 이송 시스템을 구축하고, 이를 THz 레이저 시스템과 연동되어, 1D 측정 기술을 2D 측정 기술로 확장하는데 있음.
 - THz 레이저의 분광 기술을 이용하여, THz 파장별로 충족될 수 있는 공간 분해능을 직접 테스트 함으로써, 향후 THz 이미징 시스템을 활용한 지반 시료 분석의 활용 가능성 및 현장 수행 가능성을 타진하기 위함.
 - 아직까지 THz 레이저를 이용한 영상화 구현 기술이 많이 활용되지 않고 있으며, 1-D 측정 기술에 기반한 THz laser 분석 기술이 대다수를 차지하고 있음. THz기반 영상화 기술을 구현하기 위해서는 2차원 공간 이송 기술 구현 및 이를 THz레이저 시스템과 연동 가능한 시스템 구축이 필요함.
 - 1-D 측정 기술을 2-D 이미징 공간 기반 측정 기술로 확장하기 위해서 100 mm 이상의 대영역에서 측정 및 정밀 위치 제어가 가능한 이송시스템을 구축하고 이를 THz 펄스 레이저 분석 장비와 연동되어, 고속으로 이미징 영상화가 가능한 2차원 자동화 스테이지를 구축하는데 있음.

(7) 자동화 스테이지 제어 시스템 구축

- TAC소프트웨어를 통하여 스캔 면적과 해상도를 설정하고 스캔속도를 설정하게 되면 설정된 스텝 크기에 맞게 스테이지가 이송이면서 각 위치에서의 THz laser 물성 측정을 수행하게 됨. 이 때 각 위치에서의 정밀도를 향상하기 위해서, 측정된 데이터의 평균을 취하거나, 이송 스텝 크기를 줄여가면서 최적의 이미징 분해능을 구현할 수 있다. THz 레이저의 파장 크기는 100~300 μm 수준이므로, Rayleigh 원리에 따르면, 최적 분해능은 수십 μm 에서 수백 μm 정도로 예상할 수 있으며, 이때 이송 속도, 이송 스텝 크기, 측정 횟수 등을 조절함으로써, 원하는 이미징 분해능을 구현할 수 있음. 측정 분해능을 향상시킬 경우, 측정 시간이 오래 걸리는 단점이 발생할 수 있는데, 대영역의 샘플을 측정하는데 있어, 두 조건의 상관관계를 고려하여, 각 파라미터를 조절할 수 있게 시스템이 구현되어 있음. (그림 56, 57)
-

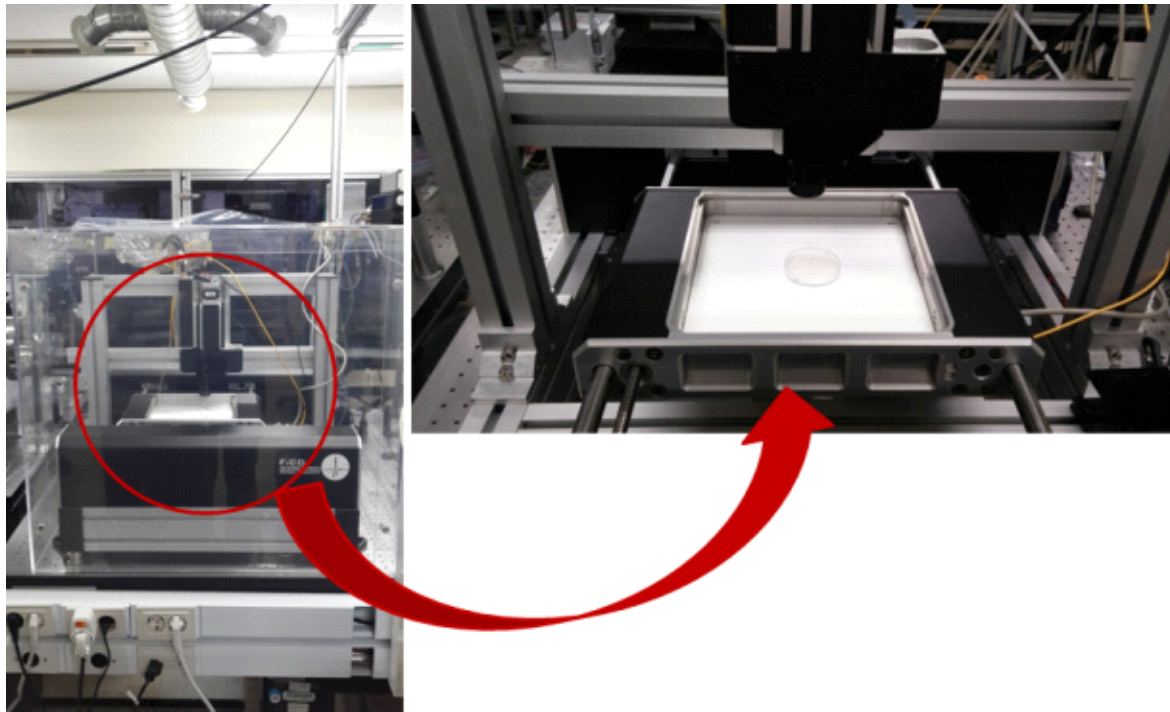


그림 56. 스테이지를 이용한 투과 실험.

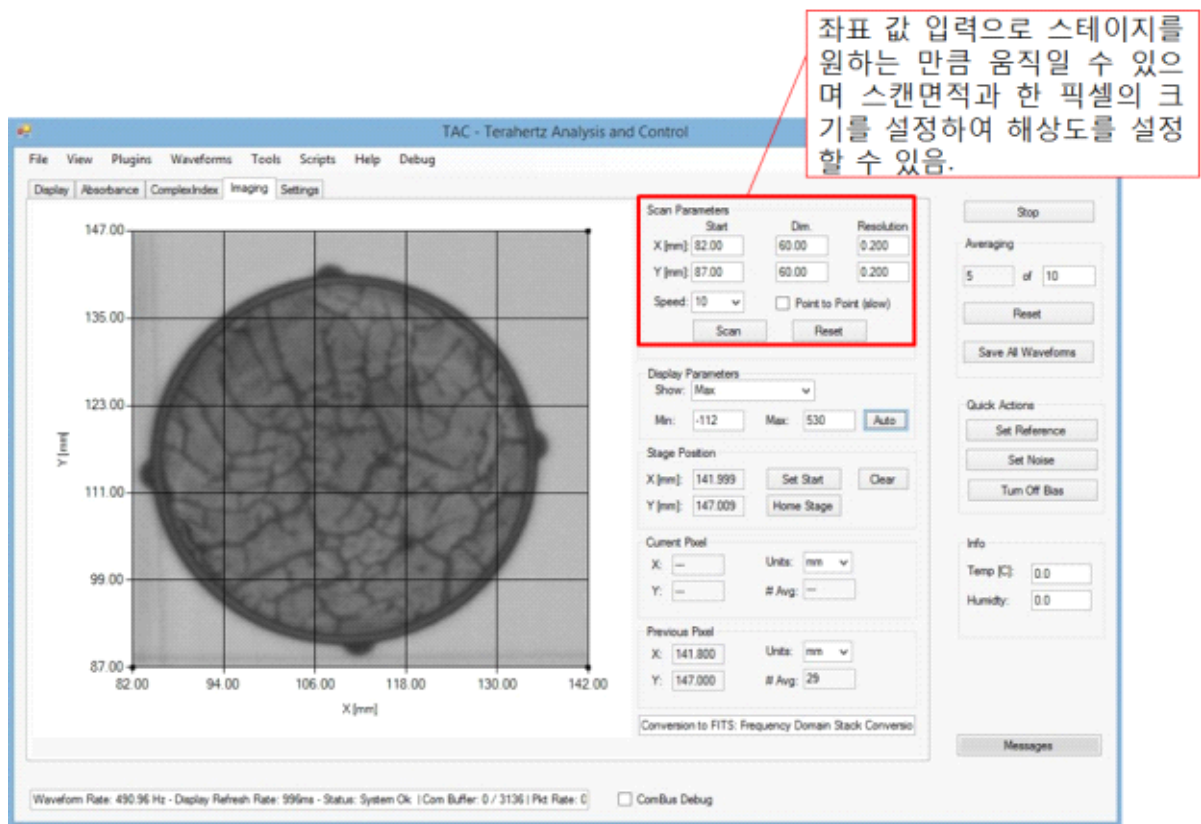


그림 57. 소프트웨어를 이용하여 자동화 스테이지 제어를 통해 지반매질샘플의 균열을 스캔함.

(8) 획득데이터 FFT처리 코드 개발

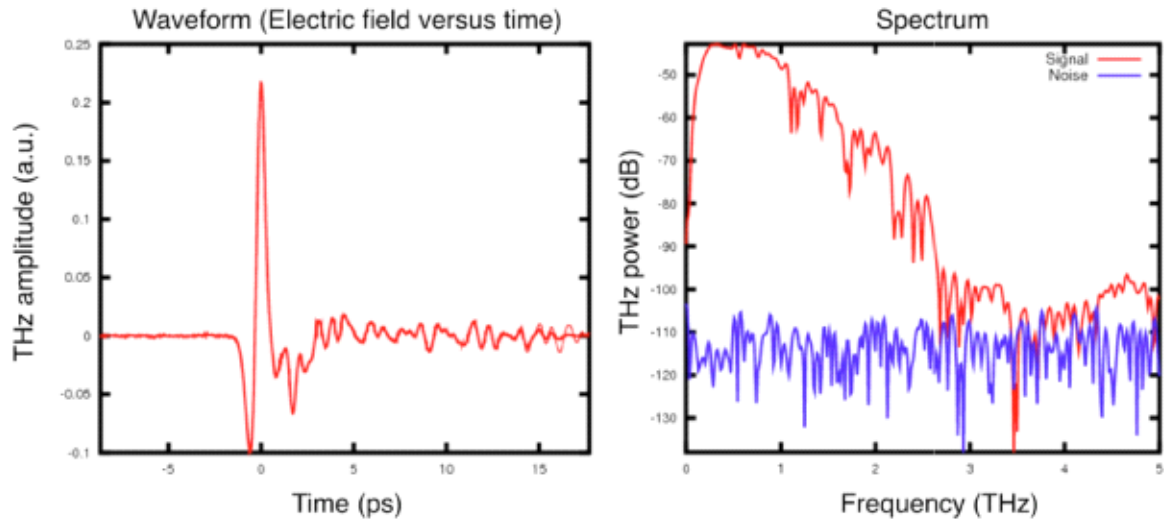


그림 58. Balanced detection원리를 적용한 THz 레이저 측정결과 및 이를 FFT기법을 통해 분석된 주파수 별 분석 스펙트럼.

- 지반시료를 투과 또는 반사된 THz 레이저를 측정하기 위해서는 Balanced detector를 기반으로 하는 복굴절 변화를 감지하여 측정하게 되며, 이때, IR 펄스 레이저와 투과된 THz 레이저 사이의 Time delay를 조절하여, THz 레이저의 진폭을 측정하는 pump-probe 원리를 사용하게 됨. 이 원리를 이용하여 측정된 THz 레이저 펄스는 Time domain 상에서 얻어지는 데이터이므로, 각 THz 주파수 별 특성을 분석하기 위한 스펙트럼을 구하기 위해서는 Time domain data를 Spectral domain으로 변환해야 함. 이를 위해서 매우 잘 알려진 FFT기법을 통해서 데이터를 spectral domain으로 변환하게 됨. 시간 분해능은 THz 레이저를 발진하고, 검출하는데 이용되는 IR 펄스 레이저의 펄스 폭(100 fs)에 의해서 기본적으로 결정되고, 주파수 분해능은 전체 Time delay 구간(약 수십 ps)에 해당하는 약 50 GHz 수준으로 결정됨. 측정 시간을 길게 하거나 추가적인 Zero-padding을 통해서 또는 Noise filtering을 통해서 주파수 스펙트럼의 정밀도를 향상시킬 수 있으나, 수십 GHz의 주파수 분해능은 THz 레이저 대비 1/100 수준이므로 지반 시료의 THz 레이저 주파수별 특성을 분석하기에 충분한 분해능이라 판단됨.

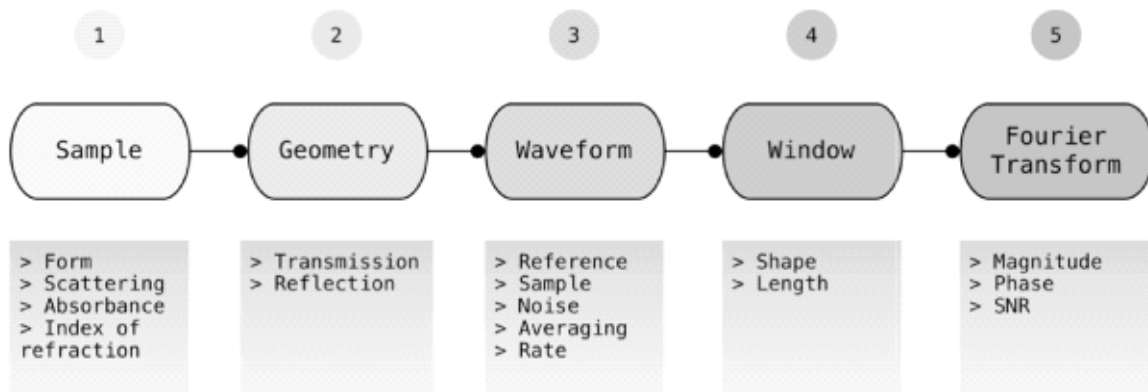


그림 59. 획득 THz 레이저 투과/흡수 특성 데이터 주파수별 분석을 위한 FFT 프로세스.

- 위 그림 59는 시간 영역에서 획득된 THz 펄스 레이저 데이터를 주파수 영역에서 분석하기 위한 알고리즘을 개략적으로 나타낸 것으로써, 시간영역에서 얻은 THz laser 파형 (waveform)을 적절한 시간 영역 및 반복 측정을 통해서 안정적으로 획득하고, 획득된 데

이터의 노이즈 필터링 또는 windowing을 통해서 불필요한 데이터를 배제한 뒤, FFT 알고리즘을 통해서 주파수 영역에서의 스펙트럼을 얻게 됨. 이 때, THz laser의 투과 스펙트럼의 Magnitude 및 위상정보를 동시에 획득할 수 있어, 각 시료별 위상 지연 데이터를 활용하여, 추가적인 시료별 특성 분석을 수행할 수 있음.

(9) 주파수별 영상화 소프트웨어 개발

- 앞서 구현된 THz 레이저와 연동된 2차원 이송 스테이지를 통해서 얻은 2차원 영역에서의 THz 레이저 투과 데이터를 이용하여, 각 주파수 별, 공간 정보를 별도로 추출할 수 있는 계산 알고리즘을 구현하였음. 2차원 공간상에서 THz레이저로 각 위치마다 Time domain THz pulse 측정 결과를 저장하고, 각 위치마다 측정된 THz펄스를 FFT 기법을 통해서 주파수 영역으로 변환함. 각각 변환된 주파수 정보별로 통합하여, 2차원 공간 상에서 영상화를 구현하면, 각각의 특정 THz 주파수에 따른 특이한 THz 투과특성을 관찰할 수 있음. 특정 물질들은 특정 THz 주파수에서 높은 흡수율 또는 투과율을 나타낼 수 있으므로, 각 주파수별 영상화를 구현하면, 2차원 공간상에서 특정 물질의 분포 또는 함유량을 관찰할 수 있고, 2차원 영상 기법을 통해서 기존의 1차원 측정 기술보다 더 정확하게 각각의 성분별 분포 또는 특정 환경변화, 시간 변화에 따른 물리적/화학적 변화를 관찰할 수 있음.

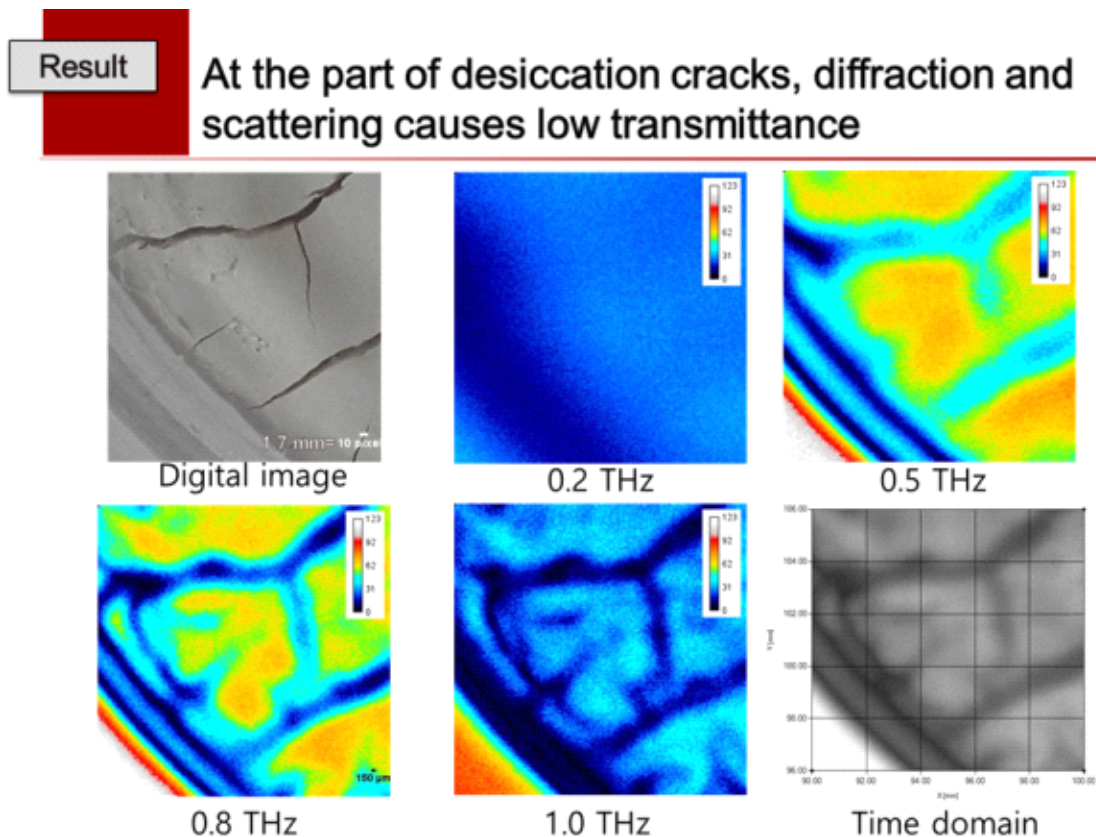


그림 60. Time domain THz펄스를 FFT 분석기법으로 주파수 영역으로 변환한 뒤, 이를 주파수별로 영상화한 데이터.

- 위 그림 60은 THz 펄스 레이저의 2차원 영상화를 통한 주파수별 영상 데이터로써, 약 10 mm x 10 mm 공간에서 마이크로미터 급의 분해능의 2차원 주파수 분석 영상이 성공적으

로 구현되었음을 확인할 수 있음. 측정된 시료는 카올리나이트 흙 샘플로서, average time 은 10회이며, 최대 약 50 μm 수준까지도 공간상에서 Intensity변화를 관찰할 수 있는 것으로 보임. 이를 활용하면, 다양한 지반 시료뿐만 아니라, 건설 및 토양 시료의 외부 환경에 의한 물리적 또는 기계적 특성변화를 관찰하기 위한 새로운 수단으로 활용 가능할 것으로 기대됨.

(10) 건조균열 이미지 영상화

- 지구온난화로 인한 이상기후로 가뭄이 곳곳에서 일어나고 있으며 이에 따른 건조 균열이 토양에서 일어나고 있음. 이에 따라 건조 균열을 THz 이미지를 통해 관찰하였음.

(10-1) 샘플시료 및 실험방법

- 실험을 위해 카올리나이트 흙을 사용하였고 플라스틱 살레위에 직경 5 cm, 두께는 약 1 mm로 스펙클라를 이용하여 샘플을 만들었음. 샘플의 초기 함수비는 50% 임 (표 7). 실험 셋업은 포항공대에서 구축한 장비를 사용하였으며, Emitter 내부의 안테나를 이용한 THz 발생장치를 통해 THz-pulse laser를 샘플에 조사하여 투과된 THz pulse laser의 강도를 이용하여 이미지화하였음.

표 7. 실험 조건

지반매질 종류	Kaolinite clay
직경	5 cm
두께	~1 mm
초기 함수비	50%
측정 시간	초기/ 1.5시간 후/ 9시간 후
스캔 이미지 크기	60 mm $\times$ 60 mm
픽셀크기	0.2 mm $\times$ 0.2 mm
총 픽셀 수	90000
한 픽셀당 스캔 소요 시간/ 총 픽셀 스캔 시간	~0.06 초/ ~1.5 시간

(10-2) 실험 결과

- 테라헤르츠 펄스 레이저를 이용하여 투과실험을 한 결과 테라헤르츠 진동수별로 투과한 펄스 레이저의 강도가 테라헤르츠 진동수에 따라 달랐으며(그림 61) 시간이 지남에 따라 투과한 펄스 레이저의 강도가 증가하였음. 이는, 이미지의 선명도와 이어졌음. 따라서 시간이 많이 경과 될수록 선명한 이미지를 얻을 수 있었음. 그 이유는 테라헤르츠 흡수를 잘 하는 물을 머금은 샘플이 시간이 지남에 따라 건조되면서 물의 양이 적어졌기 때문에 투과파의 강도가 시간에 따라 증가해서 임. 함수비 50%인 샘플의 초기상태에서와 1.5시간이 지난 후 그리고 9시간이 지난 후 모두 같은 부분에서의 gray value를 분석한 결과 0.5 THz 부근에서 건조균열의 뚜렷한 이미지를 얻을 수 있는 것으로 확인되었음(그림 62). 또한 그림 63을 보면 테라헤르츠 투과이미지로서는 초기상태와 1.5시간이 지난 후를 구분하기 힘들지만 같은 부분에서의 투과된 테라헤르츠 펄스 레이저의 강도를 비교해보면 초기

상태는 79.5였지만 1.5시간이 지난 후에는 84.6으로 5.1증가한 것을 확인하였음(그림 63).

- 좀 더 건조균열을 자세히 관찰하기위해 하나의 픽셀크기가 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 이고 전체 이미지 크기가 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 로 테라헤르츠 펄스 레이저로 스캔한 결과, 균열부분에서의 회절 현상으로 인해 투과된 테라헤르츠 펄스 레이저의 강도가 상대적으로 감소한 것을 확인 할 수 있었음(그림 60, 64).

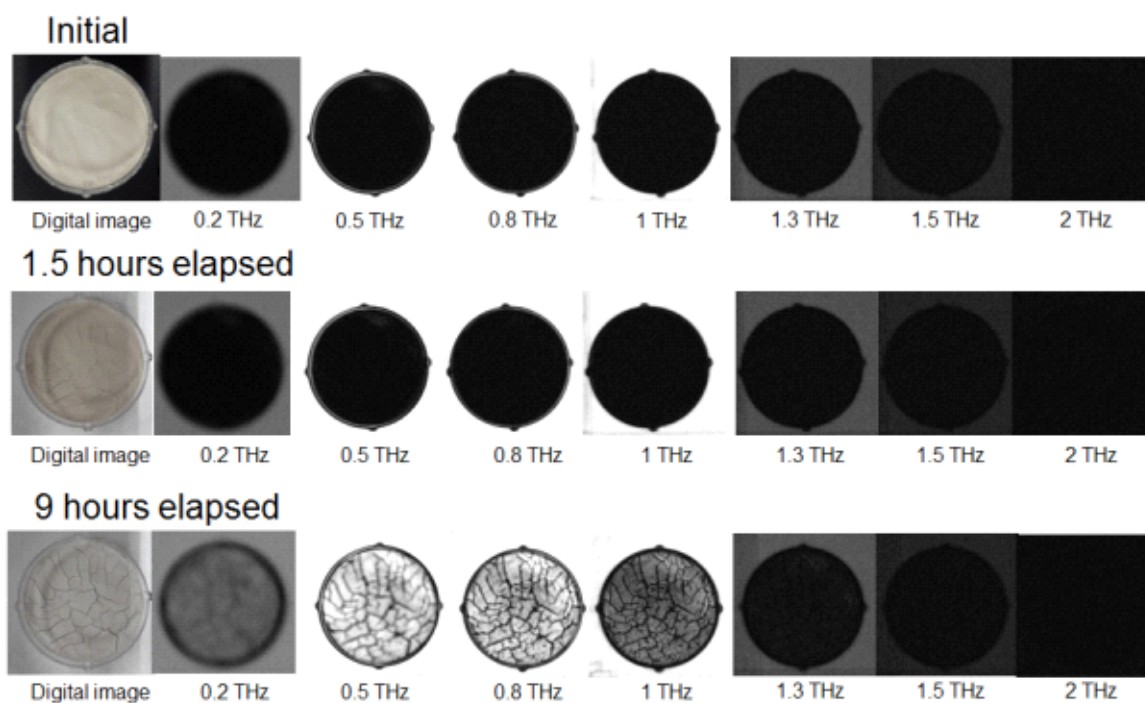


그림 61. 시간에 따른 샘플에 대한 테라헤르츠 영역별 투과 이미지.

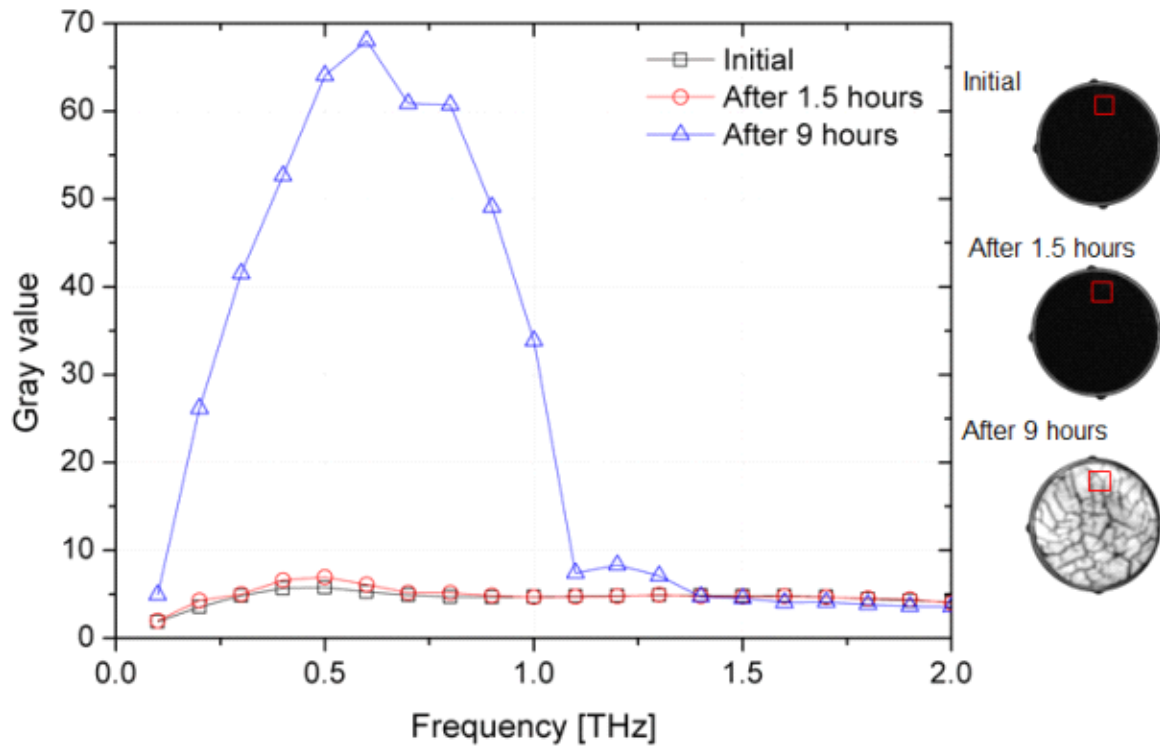


그림 62. 투과한 테라헤르츠 펄스 레이저의 진동수에 따른 측정 시간에 대한 그레이 밸류.

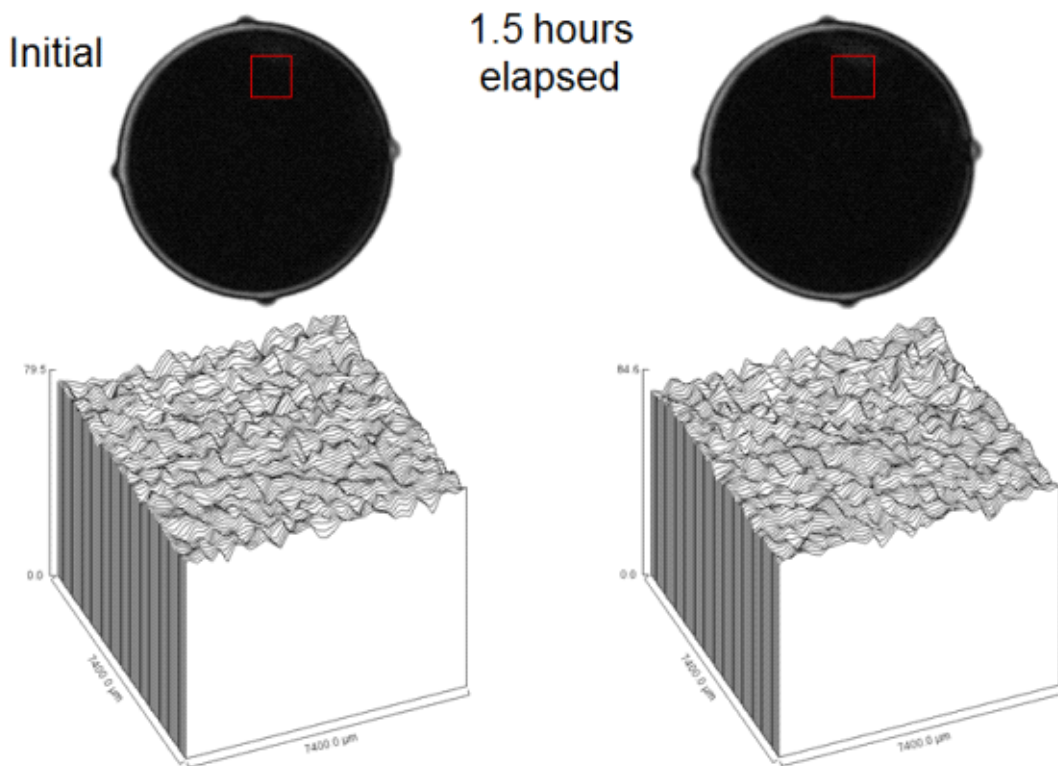


그림 63. 시간의 경과에 따른 0.5 THz에서의 샘플 이미지.

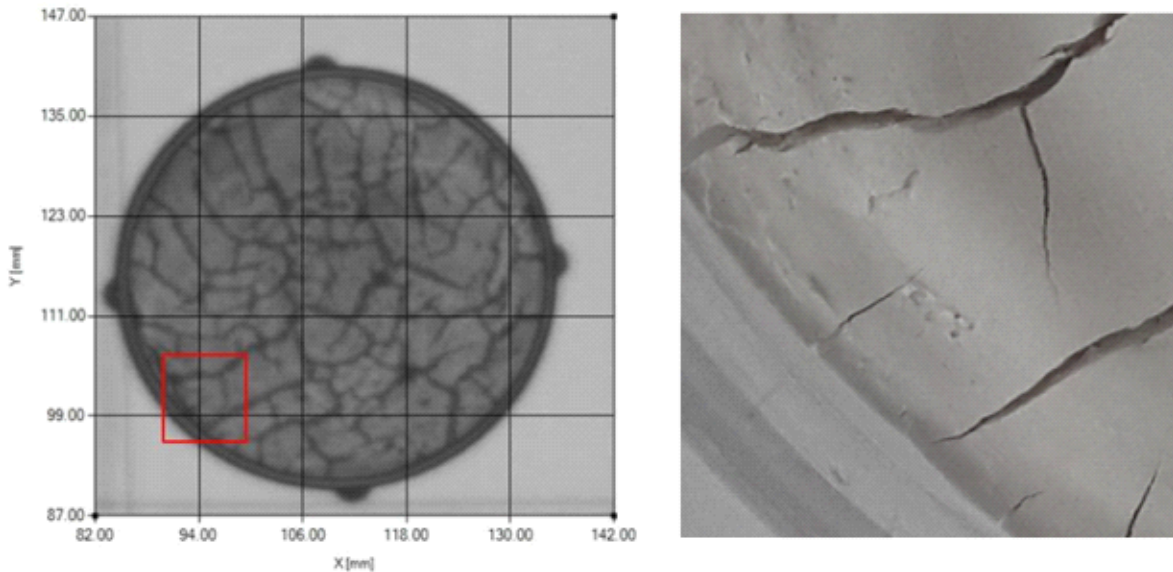


그림 64. 테두리 영역만큼의 자세한 균열 이미지.

2. 관련 분야 기여도

지반매질의 함수비를 건조과정을 거치지 않고 한번에 바로 개략적인 함수비값을 추정해낼 수 있는 지반매질의 함수비 측정 장비를 제작할 수 있음.

지반매질 내부의 물리적 변화를 관찰하고 연구하려는 연구자들에게 유용하게 사용될 것임.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

- 지반매질에서의 모래 실트 흙의 구분과 수분량이 상대적으로 얼마나 많고 적은지 알 수 있는 기본 바탕 자료로 활용 가능함.
- 동토에서 또는 남극의 빙하가 얼마만큼 온도가 내려가있는지 등을 알 수 있는 지표로서 활용가능함.
- 기존 이미지 구축장비를 앞으로 3D 영상화를 할 수 있도록 발전시켜 나갈 계획임.
- 지반 매질 시료를 이용한 실내 실험시, 시료 내부 구조적 배열 상태를 확인 할 때 사용가능.
- 지반 내부에서의 현상(미생물활동, 동결융해, 균열 생성, 파괴 등)의 진행상태를 눈으로 확인하고자 할 때 사용가능.
- 지반 내부의 물리적 변화의 이해를 높임.
- 건설산업에서 현장조사시 지반에 대한 분석을 할 때 사용.
- 타 건설 재료 및 공학 재료에서의 내부 구조 시각화 및 분석때 사용이 가능.
- 후속 연구를 통한 지반 매질 내부의 물리적 변화를 관찰할 수 있는 3D 레이저 영상화 시스템을 구축할 수 있음.
- 후속연구를 통한 본 지반과 유사환경에서의 장비/장치 모델 또는 제품화 하기 위한 시제품을 제작하여 시험 성능을 검증 할 수 있으며 신뢰성을 평가 할 수 있음. 이에 따른 검증과 신뢰성을 바탕으로 실제 현장에서 사용가능한 기술로 발전시킬 수 있을 것으로 기대 됨.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1990년에 Hu 등이 electrooptic sampling 방법을 이용하여 THz를 감지하는 기술을 개발하였음.

1995년에 Trane 등이 온도에 따른 THz 영역에서의 물의 molecular dynamics를 reflection의 분석 기술을 이용하여 분석하였음.

2010년 Nagai 등이 낸 논문에 따르면 LiNbO3와 같은 비선형 크리스탈 또는 공기의 photoionization을 이용한 높은 파워의 THz 발생기를 이용하여 물 분자의 비선형 현상에 대한 연구를 하였음.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

일반 등급

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
-	-	-	-	-	-	-	-	-

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

안전관리비로 레이저 보안경 구입

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	국외논문	Observations of pore-scale growth patterns of carbon dioxide	한국과학기술원	주관	Geochemistry, Geophysics, Geosystems	2.923	2015.03.26	중복사사	SCI/인용 2회
2	국외논문	Frequency comb transferred by surface plasmon resonance	포항공과대학교	공동	Nature Communications	11.329	2016.02.22	중복사사	SCI
3	국외논문	Active tailoring of nanoantenna plasmonic fields using few-cycle laser	포항공과대학교	공동	Physical Review A	2.765	2016.06.27	중복사사	SCI/인용 1회

		pulses							
4	국외논문	Hydromechanical responses of coal powders by CO ₂ adsorption	한국과학기술원	주관	Environmental Geotechnics		2016.04.04	중복사사	
5	국외학회발표	Effect of CO ₂ Adsorption on Mechanical Stiffness and Strength of Coal Powders	한국과학기술원	주관	The Twenty-Seventh KKHTCNN Symposium on Civil Engineering		2014.11.11	단독사사	
6	국외학회발표	Responses of Terahertz Laser Reflectance Caused by Water Content Reduction during Shotcrete Curing	한국과학기술원	주관	The Twenty-Eighth KKHTCNN Symposium on Civil Engineering	-	2015.11.16	중복사사	-
7	국외학회발표	Effect of Carbon Dioxide Adsorption on Permeability and Mechanical Strength of Coal Powders	한국과학기술원	주관	15th Pan-American Conference On Soil Mechanics and Geotechnical Engineering		2015.11.16	중복사사	
8	국외학회발표	Seismic Monitoring of Microbial Plugging for Microbial Enhanced Oil Recovery	한국과학기술원	주관	15th Pan-American Conference On Soil Mechanics and Geotechnical Engineering		2015.11.16	중복사사	
9	국외학회발표	Lightfast optical current in dielectric by plasmonically induced local field	포항공과대학교	공동	Proceedings of SPIE	0.2	2014.12.29	중복사사	
10	국외학회발표	Attosecond nanoplasmonic imaging with photoemission electron	포항공과대학교	공동	ATTO2015		2015. 7. 6	중복사사	

		microscopy							
11	국내 학회 발표	포화도에 따른 테라헤르츠 펄스 레이저의 흡수율에 관한 실험적 연구	한국과학기술원	주관	KGS Spring National Conference 2016		2016.03.17	단독사사	
12	국내 학회 발표	하이드레이트 부존층에성 감압법 적용시 세립자 이동 변화에 대한 실험적 연구	한국과학기술원	주관	KGS Spring National Conference 2016		2016.03.17	단독사사	
13	특허출원	테라헤르츠 펄스 레이저를 이용한 구조물의 수분 측정장비	한국과학기술원	주관	대한민국		2015. 09.10		
14	특허출원	테라헤르츠 펄스 레이저를 이용한 시추공 매질의 수분 측정장비	한국과학기술원	주관	대한민국		2015.10.02		
15	기타(시제품)	마이크로미터급 해상도의 레이저기반 영상화 장비	한국과학기술원	주관	대한민국		2015.2		

제11장. 기타 사항

없음

제12장. 참고 문헌

- Hu, B., Zhang, X. C., Auston, D., and Smith, P. 1990. Free-space radiation from electro-optic crystals. Applied Physics Letters 56: 506-508.
- Trane, L., Jacobsen, R. H., Uhd Jepsen, P., Keiding S. R. 1995. THz reflection spectroscopy of liquid water. Chemical Physics Letters 240; 330-333.
- Nagai, M. and Tanaka, K. 2010. THz nonlinearity of water observed with intense THz pulses. Presented at 2010 Conference (QELS), San Jose, CA, PP. 1-2.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.