

보안 과제(), 일반 과제() / 공개(), 비공개()발간등록번호()

국토교통기술사업화지원사업 제3차 연도 최종보고서

R&D / 20TBIP-C144286-03

암반사면 스마트 유지관리를 위한 얼라이브 록볼트 시스템 개발

최종보고서

2021. 01. 08.

주관연구기관 / (주)스마트지오텍

공동연구기관 / (주)동명기술공단종합건축사사무소

공동연구기관 / (주)나다건설

국 토 교 통 부
(전문기관) 국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

‘암반사면 스마트 유지관리를 위한 얼라이브 록볼트 시스템 개발’(연구개발 기간 : 2018.04.01.
~ 2020.12.31) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2021.01.08.

주관연구기관명 : (주)스마트지오텍

김 용 진

공동연구기관명 : (주)동명기술공단종합건축사사무소

신 희 정 (인)

공동연구기관명 : (주)나다건설

김 현 택 (인)

주관연구기관책임자: 김 용 성

공동연구기관책임자: 엄 영 호

공동연구기관책임자: 정 순 용

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20TBIP-C144286-03	해당 단계 연구 기간	2018.04.01.~ 2020.12.31	단계구분	(3)/(3)
연구사업명	중사업명				
	세부사업명	국토교통기술사업화지원사업			
연구과제명	대과제명	암반사면 스마트 유지관리를 위한 얼라이브 록볼트 시스템 개발			
	세부과제명	(주관) 스마트 얼라이브 록볼트 시스템 개발 (공동) 얼라이브 록볼트 시스템 현장시험 및 유지관리 매뉴얼 개발 (공동) 얼라이브 록볼트 시스템의 실증시험 모니터링 연구			
연구책임자	김용성	해당단계 참여연구원 수	총: 26명 내부: 26명 외부: 0명	해당단계 연구비	정부: 1,050,000천원 민간: 707,000천원 정부외: 0천원 상대국: 0천원 계: 1,757,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 26명 내부: 26명 외부: 26명	총 연구비	정부: 1,750,000천원 민간: 1,174,500천원 정부외: 0천원 상대국: 0천원 계: 2,924,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)스마트지오텍 / 연구개발팀 (주)동명기술공단종합건축사사무소 / 부설연구소 (주)나다건설 / 기술연구소			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	
-------------------------	--

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술 요약 정보	소프트웨어	화 합 물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정 보	실 물
등록· 기탁 번호	ISSN:2287-9528 ISSN:1598-0820	10-2040807 10-2155529 10-1917320	5건 등록	-	-	c-2018-029186 c-2019-028376 c-2019-028375 c-2020-050482	-	-	-	-	-

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)

보고서 면수

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 연구의 목적 - 암반사면 스마트 유지관리를 위한 얼라이브 록볼트 시스템 개발 ○ 연구 내용 - 스마트 얼라이브 록볼트 시스템 개발 ▪ 얼라이브 록볼트 센서 개발 ▪ 록볼트 성능 실험 연구 ▪ 암반사면 붕괴 예경보를 위한 붕괴예측 알고리즘 개발 - 사물인터넷 전용 End Device & Gateway 성능개선 ▪ Energy harvesting system 적용한 방수방진 Case 설계도면 ▪ H/W 회로도, PCB Artwork 파일, Embedded S/W ▪ 시스템신뢰성(MTBF) 외부환경 -35°C~70°C에서 내구성 1년 ▪ H/W, S/W 기능추가 및 성능 개선 ▪ IP65 수준의 방진방수 Case 제작 및 설계도면 확보 ▪ KC인증 ▪ 시스템 시공 절차 마련 및 표준화 - 신기술 및 사업화 관련 연구 ▪ 신기술 선행기술 조사보고서 작성 ▪ 신기술 범위에 대한 성능시험 및 자체평가 - 록볼트 시스템 현장시험 및 수치해석 ▪ 록볼트 계측시스템 선행기술조사 ▪ 얼라이브 록볼트 현장시험 시공 ▪ 록볼트 시스템 현장시험과의 비교를 위한 수치해석(개별요소, 유한요소) ▪ 록볼트 특허 등록 및 디자인 등록 진행 - 현장 계측 및 모니터링 연구 ▪ 현장 실증시험 테스트 베드 확보 및 유지관리 ▪ 현장실증시험 및 모니터링을 통한 품질 안정성 검증				
연구개발성과	○ 국내 논문 게재 2편 ○ 특허 출원 4건, 특허등록 3건, 디자인등록 2건, S/W 등록 4건 ○ 고용창출 : 13명 ○ 얼라이브 록볼트 센서 개발 ○ 사물인터넷 전용 End Device & Gateway 개발, 독립형 Gateway 개발 ○ 비즈니스 모델 수립 : 보고서 ○ 옥외동작 온도 : -40°C~80°C 시험성적서 ○ 수치해석 보고서, 신기술 선행기술 조사보고서, 센서규격서, 시공절차서 ○ 신기술 1건, 혁신제품 1건 ○ KC 인증서 2건 ○ 매출 : 18건 540,673천원 ○ IP45, IP65 시험성적서				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 특허를 통한 기술 보호 및 홍보 및 영업에 활용하여 매출 증대 기대 ○ 공인인증기관 시험성적서 확보를 통한 옥외 동작 가능한 제품 이미지 제고 ○ 신기술 획득을 통한 우선 구매 요건 충족 및 우수조달 물품 등록 추진 기반 마련 ○ IoT 시스템을 타 분야 유지관리 시스템에 적용하여 시장 확대 및 매출 증대 기대 ○ 고용창출 및 재난안전 관련분야 전문인력 양성				
국문핵심어 (5개 이내)	록볼트	암반사면	모니터링	스마트 유지관리	사물인터넷

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	5
가. 연구 개발 필요성	5
나. 연구 개발의 목적 및 범위	6
2. 연구수행내용 및 성과	7
가. 연구수행 내용	7
나. 연구개발 성과	75
다. 연구 결과	86
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	88
가. 목표	88
나. 목표 달성여부	89
다. 목표 미달성 원인 및 차후대책	92
4. 연구개발성과의 활용 계획	93
가. 기 사업화 실적	93
나. 2021년 사업화 예상액	93
다. 중·장기적 성과활용 계획	93
참고문헌	94

<별첨> 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구 개발 필요성

- 최근 10년간 여름철 자연재난 인명피해 중 산사태 등 사면 붕괴로 인한 피해가 41%를 차지하고 있으며, 우면산 산사태(2011년)로 58명의 인명 피해와 3,768억원의 재산피해를 초래하는 등 지반 붕괴로 인한 피해가 심각한 실정임.
- 기존의 사면 붕괴 예측 시스템들은 가격이 비싸고, 설치 및 유지관리가 어려운 문제가 있으며, 다양한 센서와 네트워크를 채용하여 시스템 구조가 복잡하고 관리자가 예측된 자료를 바탕으로 1차 분석한 후 경보를 발령하는 느린 위기대응체계도 비효율적임.
- 지방자치단체에서 운용중인 급경사지 예측 시스템은 GPS센서, 광섬유센서, 함수비센서, 간극수압계, 강수량계 등 많은 센서를 복합적으로 설치하고 각각의 센싱된 값을 바탕으로 붕괴위험을 판단하기 때문에 분석에 시간이 오래 걸리고 정확하게 예·경보하는데 문제가 있으며 활용할 수 있는 분야도 급경사지로 제한적인 경우가 대부분임.
- 기존의 센서네트워크는 센서노드가 거리가 짧고, 결국에는 사용망에 연결되어 사용하여 통신과금이 발생하는 문제가 있으며, 네트워크 구조가 복잡하고 설치비 및 유지보수 비용이 많이 발생하는 문제가 있음.
- 이 연구에서는 사물인터넷 전용 시스템은 LoRa 모듈을 사용하여 저속 장거리 통신에 효율적이며, 비용이 저렴하고 가자망을 구축하여 통신비용 절감효과가 큰 선진형 시스템을 채용하고자 함.
- 현재 현업 분야에서는 사면거동 및 붕괴를 예측하는데 이용되는 센서의 80% 이상을 외산제품을 사용하여 지속적으로 고가의 비용을 지출할 뿐 아니라 해당 기술의 원천기술을 확보하지 못한 상태로서 저비용 고효율의 스마트 센서의 국내 개발이 시급한 실정임.
- 정리해보면, 반복되는 사면붕괴 및 건설 공사장 붕괴와 같은 사면 붕괴 재해로부터 국민이 체감할 수 있는 안심사회를 구현하기 위해 사면 붕괴 위험을 사전에 감지하고 신속 정확한 판단으로 경보를 발령할 수 있는 효율적이며 비교적 저렴한 사면 붕괴 경보시스템 개발이 사회로부터 시급히 요청되고 있음.

나. 연구 개발의 목적 및 범위

- 본 연구의 목적은 암반사면 스마트 유지관리를 위한 얼라이브 록볼트 시스템을 개발하고자 하는 것으로 연구의 범위는 다음과 같음.
- 스마트 얼라이브 록볼트 시스템 개발
 - 록볼트 센서의 성능 실험 연구
 - 센서가 설치 된 록볼트 재료에 따른 성능시험
 - 센서 규격서 작성
 - 암반사면 붕괴 예경보를 위한 붕괴예측 알고리즘 개발
 - 사면붕괴 모사 실험을 통한 지반 거동에 따른 변위 계측 및 성능확인
- 사물인터넷 전용 End Device & Gateway 성능개선
 - H/W, S/W 기능추가 및 성능 개선
 - IP65 수준의 방진방수 Case 제작 및 설계도면 확보
 - 시스템신뢰성(MTBF) 외부환경 -40° C~80° C에서 내구성 1년
- 시공 및 현장 적용에 관한 연구
 - 시스템 시공 절차 마련 및 표준화
- 신기술 및 사업화 관련 연구
 - 신기술 선행기술 조사보고서 작성
 - 신기술 범위에 대한 성능시험 및 자체평가
- 록볼트 시스템 수치해석 및 실내모형시험
 - 록볼트 시스템 현장시험과의 비교를 위한 수치해석(개별요소, 유한요소)
 - 록볼트 계측시스템 성능평가를 위한 실내모형시험

2. 연구수행 내용 및 성과

가. 연구수행 내용

(1) 얼라이브 록볼트 시스템 개발

(가) 얼라이브 록볼트 시스템 개요

- 얼라이브 록볼트 시스템은 얼라이브 록볼트, IoT EndDevice, IoT Gateway, IoT Server로 구성됨.
- 사면에 설치되는 GFRP 변위센서를 활용하여 사면의 변형을 계측하고, 설정된 알고리즘에 따라 변위속도 기준치 도달하면 경보를 발생하여 관리자에게 알려주는 사면붕괴 예측 시스템 기술임(표 2.1, 표 2.2, 그림 2.1 참조).
- 사면의 변형을 관리자가 실시간으로 확인할 수 있고, 사면의 변형 발생 시 관리자에게 전조 정보를 제공하여 스마트 사면 관리가 가능하도록 하는 기술임.

표 2.1 GFRP 록볼트 규격서

품 명	사용자재	인장강도	극한하중	단위중량
GFRP 센서	GFRP (D25mm)	850 Mpa 이상	35.0 ton/본	0.97 kg/m

표 2.2 제품 제조 공정표

공정	작업 내용	해당 작업
가공	Con' Cap, Head 가공	밀링, 선반
접착	GFRP근에 Straingauge 접착	EB-2로 접착
1차조립	Con' Cap에 Connector조립	공구 조립
결선	Straingage와 Connector를 Wire로 연결	납땜 결선
코팅	Straingage를 코팅	M-coat A로 코팅
1차 보호	보호 Tape 및 Rubber, 절연 Tape으로 보호	테이핑 작업
2차조립	Housing을 Pipe에 조립	공구 조립
2차 보호	열수축으로 Pipe를 보호	드라이기로 수축
확인	Indicator로 이상유무 확인	출력 확인

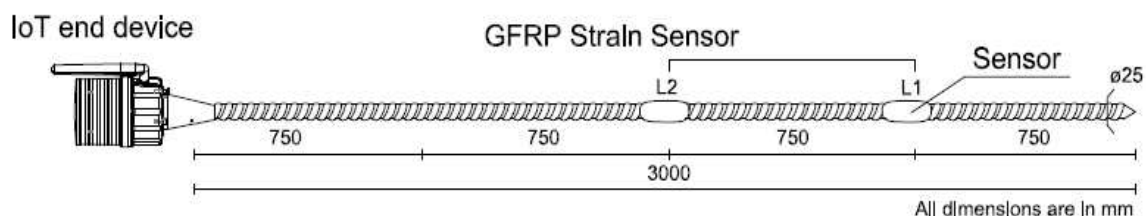


그림 2.1 GFRP 록볼트 변위센서 설계도면

(나) IoT EndDevice

- IoT EndDevice는 스마트센서와 방수커넥터를 이용하여 연결되며, 스마트센서의 스트레인게이지 신호를 수집하여 분석하고 LoRa통신모듈을 이용하여 전송하며 붕괴예측 알고리즘에 의해 사면의 붕괴위험을 판단함(표 2.3. 표 2.4 참조).
- 전원은 태양광시스템을 사용하여 자가충전이 가능하며, Rechargeable Battery는 리튬인산철 (LiFePO4)를 탑재하여 배터리폭발 등의 안정성을 지향하였으며, 방수방진 Case를 자체 설계하여 옥외 설치 및 운영에 문제가 없도록 적용함.
- 안테나는 3dBi LoRa 전용 방수 안테나를 채용하였으며, OTA(Over The Air)를 구현하여 원격에서 S/W를 업데이트할 수 있는 기능을 추가하여 유지보수를 위해 시간 및 비용을 절감할 수 있게 함.

표 2.3 시스템 사양

품 명	시스템 사양
 Main B'd	▪ MPU: STM32F071 MPU / 32 bit 48MHz ARM Cortex-M0 CPU/128KB FLASH/16KB SRAM ▪ Strain gauge bridge ADC: ADS1234 / 24bit ADC /4channel differential input / 80sps ▪ 로라(LoRa)통신칩: 900MHz LoRa Transceiver (SX1276) / Sensitivity: -148dBm /Rx current: 9.9mA / Frequency : 920.9 ~ 923.3Mhz, 13 channels / Data Rate:0.3kps-5.5kps/Range:1km(LOS, 25mW) ▪ 무선자가망선택: Time-slotted Event Driven System(TEDS) Topology / Mesh topology of repeaters & gateway ▪ 태양광충전시스템: 2차전지 (6400mAh, 리튬인산철)/ 2.9V이하 Low battery detect ▪ Operation Temperature : -30 ~ 85° C ▪ Max Current : 30~40mA(Tx) ▪ Dimension : 95(D) x 135(H) ▪ Antenna connection : SMA connector
 IoT EndDevice	

○ 주요 기능

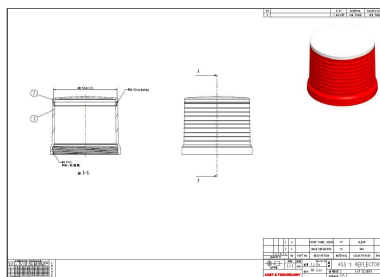
- Console(UART)을 이용한 local setting
- 무선 명령어를 이용한 원격 세팅
- Warning/Alarm의 threshold값 수정 (센서1,2 독립적)
- Link Test Mode/Normal Mode 진입

- 원격 리셋
- Sleep period 조정 및 주기 보고 시간 조정
- Burst Mode Reading
- Clock download
- Deep Sleep moder 구현을 통한 Energy Saving

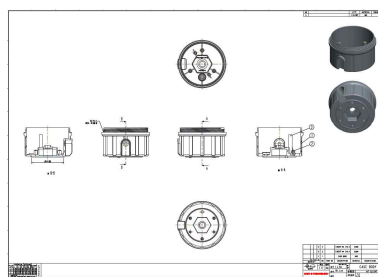
표 2.4 IoT End Device 제조 공정표

공정	작업 내용	해당 작업
PBC	Bare PCB 제작	PCB제작 및 test
SMD	자삽 및 Soldering	부품 자삽 및 SMD
F/W DL	F/W(Firmware) download	JIG 사용 F/W 다운로드
IoT EndDevice	Case Batterypack 조립	Case Battery pack 에 PCB, Bettery, 태양광 패널 조립 및 케이블 체결
	Case Body 조립	Case Body 에 안테나 및 방수커넥터 체결
	Case 조립	Case Head, Case Body. Case Battery pack, 고무링 조립
GFRP 센서와 조립	센서봉, IoT 센서노드, 실리콘 방수패드 결합	이탈방지 나사를 이용하여 IoT EndDevice 와 GFRP 센서 사이에 실리콘 방수 패드를 넣어서 체결 후 Power ON
TEST	시스템 TEST	동작 TEST 및 통신 연동 TEST

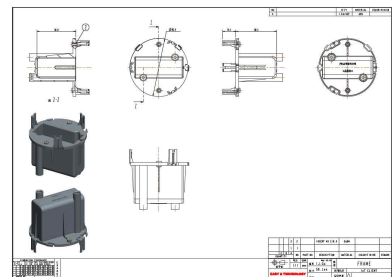
- 개발성과물: System H/W, S/W, 회도로, Artwork 파일, Case 설계도면, 표준화된 제작 및 조립 공정, IP45 시험성적서, 온도시험성적서(-35℃ ~70℃), KC인증, 자체통신테스트, S/W 등록증, 조달청 제품등록(SCS-100) 완료(그림 2.2, 그림 2.3, 그림 2.4 참조)



(a) Case-Head(Reflector)

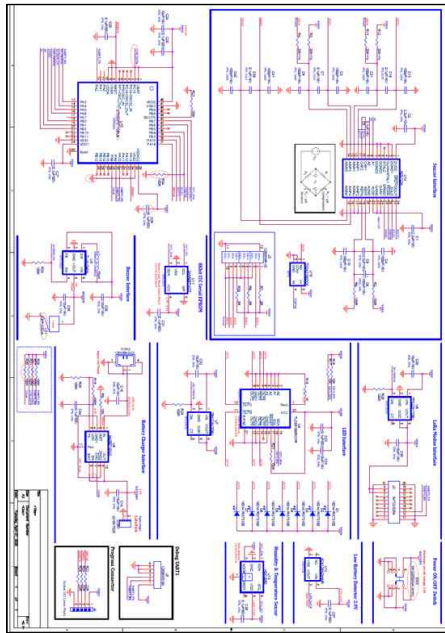


(b) Case-Body

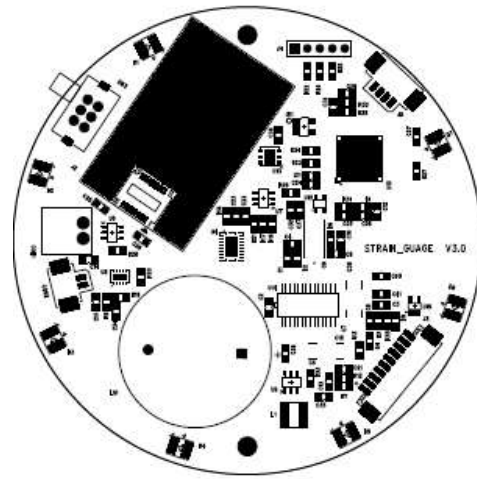


(c) Case-Batterypack

그림 2.2 방수방진 Case 설계도면



(a) Main B'd 회로도



(b) Artwork File

그림 2.3 Main B' d 회로도 및 Artwork File

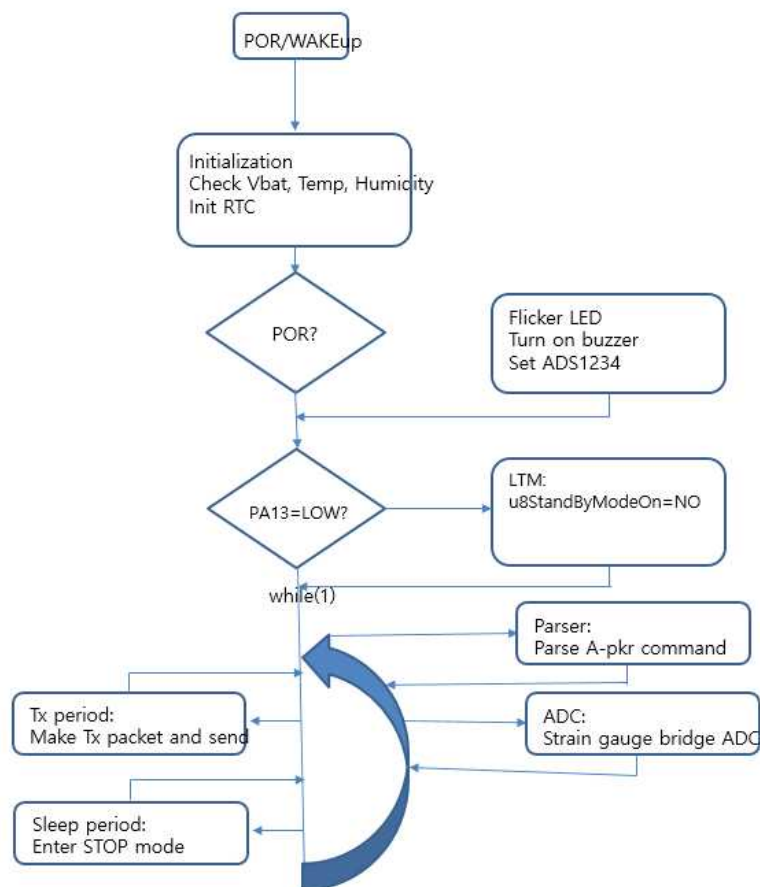


그림 2.4 S/W flowchart (IoT EndDevice)

(다) IoT Gateway

- 게이트웨이는 IoT EndDevice와 LoRa 통신모듈을 이용해 서로 통신하며 통신 Coverage는 약 2Km 정도이고, 무선통신 규약에 의거 적정한 주파수로 통신함(표 2.5 참조).
- 게이트웨이는 인터넷에 연결된 서버까지 통신을 연결해주는 장치로서 유무선 Lan, LTE 등의 인터페이스를 제공하는데 상전원이 있는 곳에 설치되어야 하며 자가진단 기능, 망 리프레쉬 기능을 지원함.

표 2.5 게이트웨이 시스템 사양

게이트웨이	시스템 사양
	▪ CPU : ARM 32-bit Cortex-M4 cpu(120MHX) ▪ Memory : 1MB FLASH, 128KB RAM ▪ Local Mesh Network (Up to 4 LoRa Mesh Modules) ▪ Wireless Backhaul Uplink(1 FSK Mesh Module) ▪ Wired Uplink(Ethernet:1 10/100 LAN, Console UART port can be used for uplink) ▪ Console Port : TTL level UART @ 115200 baud ▪ Power : Input AC 100V~240V 0.5A, Output DC 5V 2A

(라) 독립형(Standalone Type) IoT Gateway

- 기존의 IoT Gateway는 상전원이 있는 곳에 설치해야 했으나 시스템의 상전원이 필요없는 독립형 IoT Gateway를 개발하였으며 전원은 태양광시스템으로 발전하고 대용량 배터리를 이용하여 문제를 해결하였음(표 2.6 참조).

표 2.6 게이트웨이 시스템 사양

Standalone Type IoT 게이트웨이	시스템 사양
	▪ Interface : LAN 1 Port ▪ 900MHz LoRa 무선 통신 ▪ DC Input Voltage : +5Vdc ▪ Operating Temperature : -40 ~ 80° C ▪ Maximum current : 1A ▪ 태양광시스템 : 40W 솔라패널, 2차전지: 1kWh, 리튬 인산철 ▪ 최대 소비 전력: 8W (LTE router 7W) ▪ Antenna connection : SMA connector

○ 주요 기능

- 20W 솔라 패널에 의한 자가 발전(Stand alone type)
- 게이트웨이 및 LET 라우터 내장 합체
- 900MHz 로라(LoRa) 통신 모듈 내장
- 900MHz 엔드 디바이스들과 1: N 통신 가능
- Mesh, TDMA 등 다양한 무선 Topology 지원
- TCP/IP 방식으로 서버와 통신
- Deep Sleep moder 구현을 통한 Energy Saving

(마) IoT Program

① 웹기반 모니터링 프로그램 개발

- 윈도우즈 기반의 Web Monitoring Program 기능을 탑재하고 직관적인 GUI 구현이 가능하며 현장의 Needs를 반영한 기능 및 관리자모드 기능을 추가함(표 2.7, 그림 2.5 참조).

표 2.7 Dell PowerEdge T440 시스템 사양

Dell PowerEdge T440	시스템 사양
	- Dell PowerEdge T440. ▪ intel Xeon Bronze 3106 8Core 11MB Cache ▪ 16GB PC4-2400T Registered DIMM ▪ 1TB SATA 7.2k LFF 핫플러그 HDD x 2ea ▪ 750W FS Plat Ht Plg Pwr Supply Redundant (2ea) ▪ PERC H730p 컨트롤러, 2GB NV 캐시 ▪ Slim DVD Writer ▪ OS:리눅스 ▪ UPB 1000VA 포함 ▪ warranty : 3 years

○ 주요 기능

- DB 설계 및 Data backup 기능 개발
- S/W 원격업데이트 기능 구현
- SMS 환경 설정 기능 구현
- Gateway ↔ server ↔ 스마트폰 연동

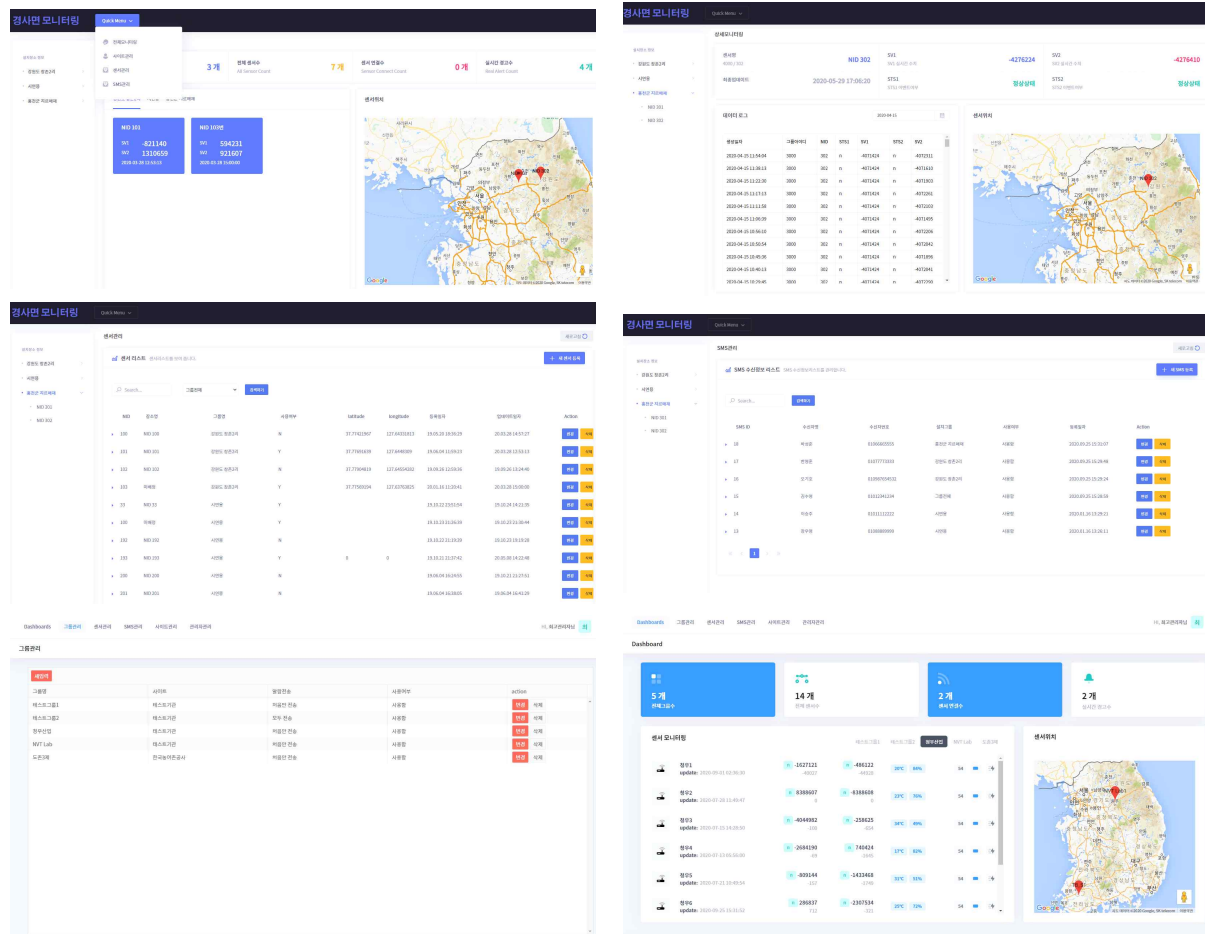


그림 2.5 웹기반 모니터링 프로그램

(2) 사면 붕괴 모사 실험을 통한 록볼트 센서의 성능 검증

(가) GFRP 록볼트 계측을 통한 사면 거동 분석

- 록볼트 센서의 성능을 검증하기 위해서는 실제 암반사면에 록볼트 센서를 타설 후 붕괴 실험을 통해 검증하는 것이 타당하나 실제 암반사면을 붕괴시킬 수 있는 현장을 찾기에는 무리가 있어 본 연구에서는 터널 현장에서 반출한 버럭이 쌓여진 현장에서 센서 검증용 사면 붕괴 실험을 수행함.
- 암반 버럭을 성토하여 모형사면을 축조하고 록볼트 센서를 매설한 후 절토 굴착하여 사면을 붕괴시키는 실험을 수행하였으며 사면의 굴착 깊이와 간격은 수치시물레이션을 통해 검토하고 실험대형 현장모형실험에서는 그 결과를 반영하여 실험 방법을 설계함.
- 모형사면 축조작업에는 백호우를 사용하였고 버켓에 의한 다짐 축조 후 기울기는 56° , 천단부 높이 8.0m로 사면을 조성하였음(그림 2.6).

- 굴착 깊이 및 구간은 실험 Case 별 동일한 조건을 적용하였으며, 굴착에 따른 사면의 거동 계측을 위해 굴착구간별 대기시간을 부여하였음.
- 록볼트 센서의 설치 위치는 천단부 시점으로부터 1.5m 이격된 위치에 설치하였으며, 각 센서 간 수평간격은 약 1.5m로 계획 설치하였음(그림 2.7).



그림 2.6 Construction of model slope

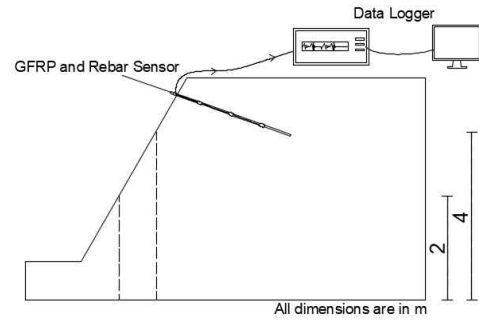


그림 2.7 Cross section view of model slope

- 록볼트 변위센서의 주재료는 각각 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic)와 나사철근형 록볼트임(표 2.8 참조).
- GFRP 재료는 몸체와 보강재를 포함하는 유기 및 무기 비금속 복합체로 구성된 플라스틱 베이스 복합 재료로서 전기 절연성과 접착성이 우수하고, 기계적 강도 및 내열성도 우수하며, 가소성 및 성형 수축이 적고, 경량이며, 시공이 간편함.
- 나사철근형 록볼트는 시중에서 판매하는 록볼트를 구입하여 활용하였음.

표 2.8 Product specification

Part No.	KCMT SS25	Name	GFRP Soil Type RockBolt
Item	Unit	Standard Specification	
Breaking Load	mm	25	
Tensile strength	Mpa	850	
Shear strength	Mpa	150	
Glass content	%	75	
Dia, Top(Da)	mm	25.0±0.5	
Dia, Top(Db)	mm	22.6±0.5	

- 센서의 부착 작업은 외경 25mm, 길이 3,000mm의 록볼트를 1/4 등분하여 재료표면에 길이 100mm, 폭 10mm 정도의 직사각형 영역을 센서 부착을 위해 매끄럽게 연마한 후, 센서를 직선으로 설치하고 절연 테이프로 권선을 반복하여 센서 보호, 방수 및 절연이 되도록 부착하였음.
- 록볼트 센서의 외부는 사면에 매설 시 센서의 와이어와 케이블의 파단을 막기 위하여 센서 부착 후 코팅제로 처리하였음(그림 2.8~그림 2.10 참조).



그림 2.8 GFRP strain sensor



그림 2.9 Steel bar strain sensor

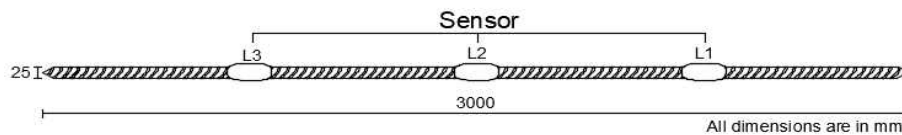


그림 2.10 Schematic diagram of strain sensor

- 본 연구에서는 총 6개의 변위타입 센서를 실험에 적용하였으며(GFRP, 나사철근형 록볼트 각 3개), 각 장치의 변위-변형률 응답을 검정하였음.
- 오른쪽 끝에서 1/4길이에 고정단으로 하고, 자유단에 하중을 가하여 변위를 측정하는 방식의 캔틸레버보 조건과 같은 검정방법을 사용하였으며, 하중 부여에 의해 발생하는 변형과 응답변형률을 측정하였음.
- 그림 2.11과 그림 2.12는 각각의 검정결과를 도식화하여 나타낸 것으로 검정결과와 추세선은 선형에 근접하는 것으로 나타났으며, 추후 현장 계측 값의 효율적 활용을 위하여 Eqs. (1), Eqs. (2)와 같이 1차함수로 표현하였음.

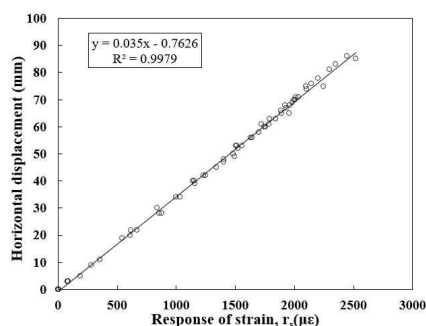


그림 2.11 Calibration of strain sensor (F1)

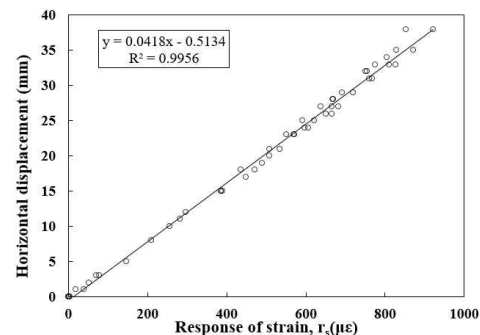


그림 2.12 Calibration of strain sensor (S1)

$$y = 0.0350x - 0.7626 (R^2 = 0.9979) \quad (1)$$

$$y = 0.0418x - 0.5134 (R^2 = 0.9956) \quad (2)$$

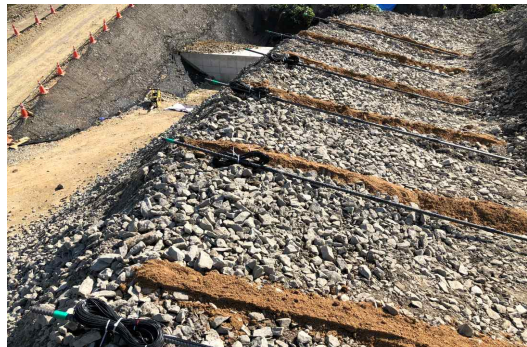
- 본 검정결과 록볼트의 응답 변형률이 6개 모두 다소 상이함이 확인되었는데, 록볼트의 재료 차이에 따른 변형계수의 상이성 및 주재료가 되는 GFRP 및 나사철근의 불균질성 및 센서의 접합오차에 기인한 것으로 사료되나 하중부가에 따른 록볼트 자유단의 변형에 따른 응답변형률이 비교적 명확하게 판별되어, 지반 변형거동의 분석에 적용이 가능할 것으로 판단됨.
- 센서의 설치는 제체 상단에서 1.5m 깊이로 버력을 파내고, GFRP 센서를 상부면에서 1.5m 간격으로 좌우측으로 등거리 배치하였음(그림 2.13).



(a) Step 1



(b) Step 2



(c) Step 3



(d) Step 4

그림 2.13 Sensor drilled into the model slope

- 약 20mm 두께로 모래를 쌓고 그 위에 록볼트 센서를 설치한 후, 물과 시멘트 1:3의 모르타르 혼합물을 록볼트 센서 주위를 타설하여 실제 록볼트 타설 조건과 유사하도록 조성하였으며, 주변을 사석으로 시멘트 주변을 고르게 덮은 후 성토하였음.
- 센서로부터의 데이터는 상단부 데이터 케이블 통하여 Data logger에 연결하여 계측데이터를 자동으로 기록하도록 설치하였음(그림 2.14, 그림 2.15 참조).

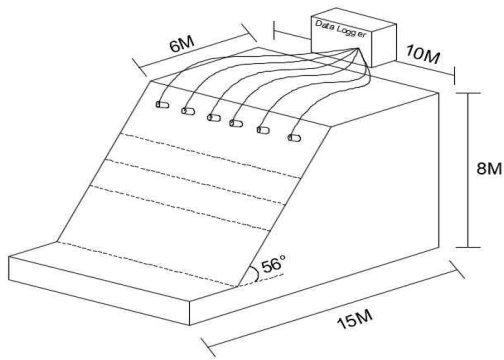


그림 2.14 Schematic view of sensor installment



그림 2.15 Data logging system

- 슛크리트 공법은 토사 또는 풍화된 암반 비탈면에 풍화 및 유실 등의 진행성 작용을 막기 위해 시멘트 혼합 재료를 뿜어 붙여 표면의 강도를 증가 시키는 방법이나 본 실험에서 버력 성토체를 암반사면에 좀 더 가깝게 모사하기 위해 사면에 슛크리트 공법을 적용하였음(그림 2.16, 그림 2.17 참조).



그림 2.16 Shotcrete spraying



그림 2.17 End of shotcrete spray

- 사면붕괴 실험은 그림 2.18, 그림 2.19와 같이 사면선단부로부터 단계적으로 굴착하여 모형사면의 붕괴거동을 관찰하였으며, 굴착작업은 백호우를 이용하여 절토면이 수직이 되도록 Case 1 (3.0m 굴착)과 Case 2(4.0m 굴착)까지의 2단계로 수행하였음.
- 초기 굴착으로 2.0m를 굴착하였으나 계측된 데이터가 미미하여 본 연구의 분석 대상에서는 제외하였음.

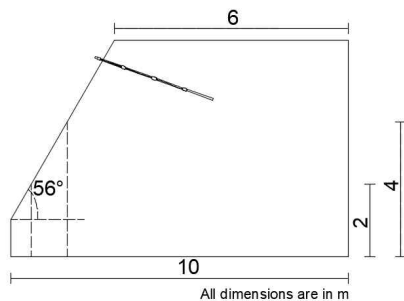


그림 2.18 Cross section showing stepwise excavation process



그림 2.19 Excavating model slope

- 그림 2.20과 그림 2.21은 8m 높이의 숯크립를 타설한 사면에서 굴착 깊이가 각각 3m (Case 1-1)와 4m(Case 1-2)인 모형사면의 굴착 전경을 나타냄.



그림 2.20 Excavating model slope
(Case 1-1)



그림 2.21 Excavating model slope
(Case 1-2)

- 그림 2.22, 그림 2.23은 8m 높이의 숯크리트를 타설하지 않은 사면(test 2)에서 굴착 깊이가 각각 3m(Case 1)와 4m(Case 2)인 모형사면의 굴착 전경을 나타냄.



그림 2.22 Excavating model slope
(Case 2-1)



그림 2.23 Excavating model slope
(Case 2-2)

- 그림 2.24~그림 2.27은 Case 1과 Case 2의 실험 조건별 시간 경과에 따른 변위 분포를 나타냄.
- 숯크리트 공법을 사용한 실험결과는 Case 1로 표시하였으며 그림 2.24의 Case 1-1의 경우 굴착 후 8분 정도에 GFRP는 약 3mm~203.1mm정도의 변위가 발생하였고, 그림 2.26에서 나사철근형 록볼트는 약 1.2mm~42mm정도로 나타났는데, 이는 초기의 낮은 변형 단계에서 GFRP가 나사철근형 록볼트에 비해 감도가 좋은 것으로 판단할 수 있음.
- 굴착시작 후인 약 11분에 모든 록볼트 센서에서 변위가 지속적으로 유지하고 있어 붕괴에 이르지 않는 것으로 나타났는데, 약 12분간 계측 후 변위가 더 이상 발생하지 않는 것을 확인하고 30분간 대기 후 2단계 굴착을 진행하였음.
- 그림 2.24~그림 2.27의 계측결과에서 사면의 변형은 붕괴 전조 구간, 가속 구간, 급가속 구간을 거친 후 붕괴에 이르는 것으로 나타남.

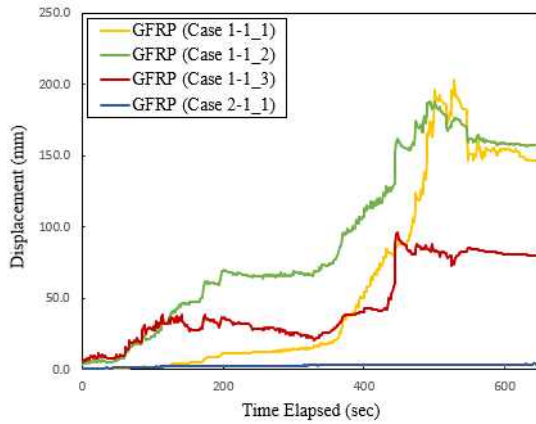


그림 2.24 All GFRP displacement data during 3.0 m height excavation

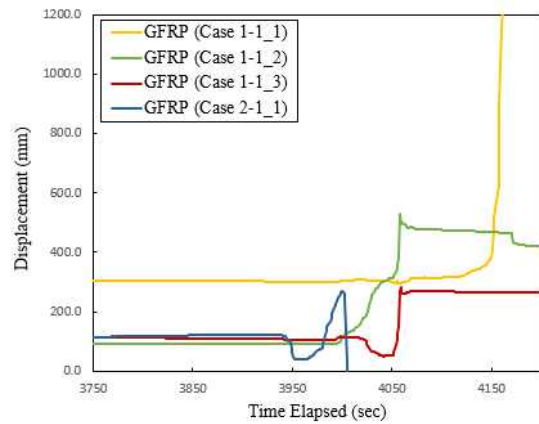


그림 2.25 All GFRP displacement data during 4.0 m height excavation

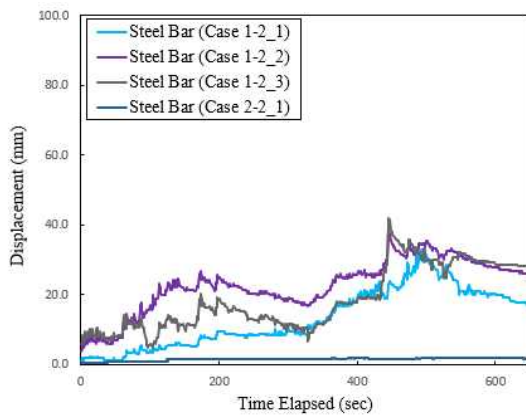


그림 2.26 All steel bar displacement data during 3.0 m height excavation

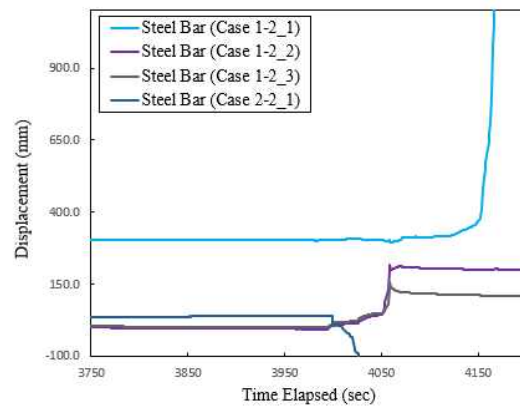


그림 2.27 All steel bar displacement data during 4.0 m height excavation

- 그림 2.25에서 Case 1-2의 실험 시작 후 5분경 GFRP(Case 1-2_2) 센서와 GFRP(Case 1-2_3) 센서는 각각 530.3mm와 313.7mm의 변위를 기록 하였으며, GFRP(Case 1-2_1) 센서는 숏크리트에 GFRP가 부착되어 숏크리트 파괴 시 함께 거동에 따른 급격한 변화로 판단되어 본 연구의 분석에서는 제외함.
- 그림 2.27에서 나사철근형 록볼트 2번과 3번 센서는 각각 210.7mm와 140.5mm의 변위가 발생 하고, 약 1.5분후 나사철근형 록볼트 1번 센서가 310mm의 변위를 나타낸 후 급가속적으로 증가하여 좌측사면 붕괴가 시작하였고 이어서 약 8분 후 전체 사면붕괴가 발생함.
- 숏크리트를 타설하지 않은 경우(Case 2-1) GFRP와 록볼트는 숏크리트 사면(Case 1)에 비해 매우 작은 변위를 나타냈는데 GFRP는 시작부터 1차 굴착이 끝날 때까지 약 3.60mm, 나사철근형 록볼트는 1.97mm 변위가 발생함.
- 4m 굴착한 Case 2-2의 경우 GFRP는 262.1mm, 나사철근형 록볼트는 38.1mm 변위가 발생하여 Case 1-2의 경우와 비슷한 변위 값을 나타냄.
- 현장실험 계측결과, GFRP 센서의 경우 나사철근 록볼트 센서 보다 변위 감도가 높은 것으로 나타나 암반사면 예·경보시스템 구축에 유리할 것으로 사료됨.

(나) 수치해석에 의한 GFRP 록볼트의 적용성 검토

① 유한요소해석 (ABAQUS)

㉔ 해석모델 개요

- 본 연구에서는 개별요소 해석법과 시공과정, 굴착단계별 해석이 가능한 범용 유한요소해석 (General-purpose FEM Program) 프로그램인 ABAQUS ver.6.14를 사용해 탄소성 해석을 수행하였으며 이를 통해 변위센서의 변형, 사면 파괴 거동에 대해 계측 및 검토하였음.
- 해당 프로그램은 지반거동의 재현을 위한 Clay Plasticity, Drucker-Prager, Mohr-Coulomb 등의 여러 탄소성 구성방정식 모델을 제공 및 시공단계 재현이 가능함.
- 숏크리트의 두께는 사면에 비해서 상당히 얇기 때문에 연속되는 격자망을 적용하는 방법은 조밀한 격자망 생성에 불가피하며, 많은 해석시간을 요구하는데 이를 극복하기 위해서 숏크리트는 원지반 및 사면과 별도로 격자망을 가지게 모델을 형성하였으며, 숏크리트와 지반영역 간 경계면에 Tie Constraint에 의해 경계면에서 절점이 일체적으로 거동될 수 있도록 하며, 해석모델의 효율성을 제고하고자 하였음.
- 변위센서는 축력만 받는 부재로 고려하여, 표층 숏크리트와 사면 상단쪽에 매입되어 상호작용할 수 있게 Embedded Constraint를 적용하였다. 이로 인해 변위센서의 강성을 숏크리트 및 사면에 분산 적용이 가능하고, 변위센서의 변형 및 부재력을 평가할 수 있음.
- 해석모델에서 지반에 적용되는 요소는 3차원 정방형 고체요소이며, 숏크리트 영역도 고체요소를 사용하였으며, 변위센서에는 3차원 트러스 요소로 설정 후 사용하였음.
- 해석 편의상 횡방향 변위는 완전 구속을 가정하여 3차원 모델을 사용하였으며 원지반의 하단 및 측부 변위 구속되는 상태로 초기지중응력해석을 수행하였고, 시공단계가 진행됨에 따라서 사면층의 횡방향 및 우측 경계면으로 변위 구속조건이 활성화되게 하였음.
- 그림 2.28은 해석에 입력된 주요 기하제원 및 모형사면 개념도를 나타내는데 지반의 경우에는 탄소성 모델을 적용한 것과 다르게 강재 및 GFRP형 변위센서의 재료모델은 선형모델을 적용하였음.

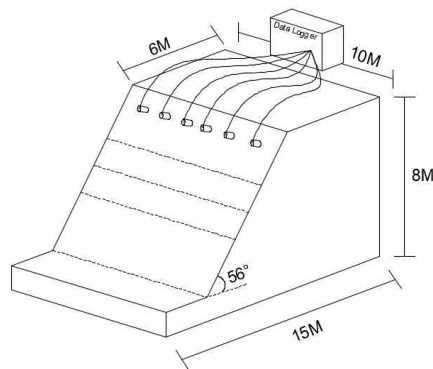


Fig. 2.28 Schematic view of installation positions of sensors

- 변위센서가 지반에 비해서 큰 강성을 갖고 사면의 최종적인 붕괴형상 고려 시 변위센서가 소성영역에 다다르지 않았을 것으로 판단되므로 변위센서의 선형모델 적용은 타당성을 가짐.
- 본 연구에서 다루는 변위센서의 주재료는 각각 GFRP와 강재인데, GFRP는 가소성 및 성형 수축이 적으며, 경량이고, 시공이 간편한 장점을 가지며, 강재는 나사 철근형태로 시중에서 판매되는 규격품의 재원을 참고하였음.

㉔ 시공단계 정의

- 본 연구에서 다루는 사면은 원지반 위에 버력을 적층하여 생성되었으며, 사면 생성 중에 무긴장 상태의 변위센서를 매설하고 최종적으로 슛크리트를 경사면에 살포하여 생성된 것으로 사면 시공과정을 총 10단계로 구분하고 해석모델에 적용하였음.

㉕ 요소격자망 및 경계조건

- 슛크리트의 요소는 사각뿔과 사면체 형상을 조합한 뒤 육면체 중심으로 요소를 생성하는 하이브리드 요소망 (육면체 중심)으로 생성하였고 록볼트는 휨 거동이 무시된 요소로 Embedded truss 적용하였으며 록볼트는 사면생성 후에 슛크리트와 함께 설치되는 것으로 해석모델을 구현하였음.
- 해석모델에서 지반에 적용된 요소는 3차원 육면체 중심의 하이브리드 요소이며, 슛크리트 영역 또한 3차원 육면체 중심의 하이브리드 요소이 사용되었고 록볼트는 1D Embedded truss 요소를 사용하였음.
- 해석 편의상 횡방향(중간 주응력 방향)으로의 변위는 완전 구속을 가정하여 3차원 모델을 사용하였으며 원지반의 하단 및 측부에 변위 구속 상태로써 초기응력해석이 수행되었고, 시공단계가 진행됨에 따라서 사면층의 횡방향 및 우측 경계면으로 변위 구속조건이 활성화되게 하였음.

㉖ 구성방정식 및 입력변수

- 표 2.9에 제시된 바와 같이, 사면모델의 물성은 2가지로 나누어 정의하였으며 해석모델의 수렴성을 개선하고자 점착력을 소량 증가시켜 적용하였고, 슛크리트와 록볼트의 변형 및 강도는 표 2.10에 제시된 탄성계수로 적용하였음.

표 2.9 Basic constitutive equations and major input variables

Classification	Constitutive model	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν	ϕ (°)	c (kPa)
In-situ soil	LE+MC	20	100	0.2	40	300
Slope	LE+MC_H	20	100		35	6

표 2.10 Constitutive equations and input variables of shotcrete liner and sensor

Classification	Constitutive model	E(GPa)	ν	γ (kN/m ³)
Shotcrete liner	LE	15	0.2	23
Rock bolt (GFRP)*	LE	3	0.0	21
Rock bolt (Steel)	LE	210	0.0	78

* 직경 25mm GFRP에 대한 단위길이당 무게를 통해 역산. 직경이 증가됨에 따라 단위 길이당 무게는 증가하는 경향을 가지며, 일반적으로 GFRP의 단위중량은 강재의 1/4 수준으로 평가함.

㉮ 지반영역 응력해석

- 수치해석을 통해 시공단계에 의한 원지반 및 사면의 응력·변형에 대해 검토하였으며 사면 적층과정에서 사면 하단부에 응력이 집중되는 것을 관찰할 수 있음.
- 해당 영역에서 소성변형이 처음으로 나타나고, 굴착 진행에 따라 사면활동면을 형성하며 전체적인 파괴상태에 이르게 됨을 확인할 수 있음.
- 사면 적층과정 동안 사면 하단부에서 응력집중이 발생하였으며, 이로 인해 소성변형이 발생되기 시작하였으며 쏫크리트 및 변위센서 설치로 인해 지반에 작용되는 구속압이 다소 증가되긴 하였으나, 지반 하단부의 소성 진행으로 인한 강도 저하는 여전히 존재함.
- 이후 굴착이 진행됨에 따라 지반이 받던 구속압이 점차 제거됨에 따라 원지반과 사면 내측부의 팽창이 발생되어 변형이 크게 발생하고 소성영역도 확장되었으며 굴착이 진행됨에 따라 소성은 굴착면을 중심으로 확장되고 있으며, 굴착면 뒷방향으로 점차 활동면을 형성하였음.
- 해석모델이 연속체 가정을 지속적으로 유지하고 있기 때문에, 이로 인해 선형탄성 재료로 가정한 쏫크리트 층에서 상대적으로 큰 응력이 발생되고 있는데, 이 때 쏫크리트 층에서 발생된 von Mises 응력 크기가 1MPa 이하이므로, 쏫크리트 층에 대한 선형탄성 재료 가정은 타당함을 확인할 수 있음.
- 이는 일반적인 압축강도를 갖는 콘크리트의 압축강도가 21MPa 크기임을 감안하면, 대략적인 인장강도는 2 MPa 수준으로 평가할 수 있기 때문임.

㉮ 수치해석 모델링

- 현장에서 수행한 모형실험과 동일한 단면으로 3차원 모델링을 하였으며 해석모델은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였고 구성요소는 원지반과 성토는 Solid, 록볼트는 Embedded Truss 요소를 사용하였음.
- 시공단계는 (1단계) 원지반 → (2단계) 1단 성토 → (3단계) 2단 성토 → (4단계) 3단 성토 → (5단계) 6단 성토 → (7단계) 6단 성토 → (8단계) 변위센서 시공 → (9단계) 쏫크리트 시공 → (10단계) 3m 절취 → (11단계) 4m 절취 순으로 하였음.

② 개별요소해석 (3DEC)

㉓ 해석모델 개요

- 본 연구에서는 터널공사 현장에서 버력을 반출한 뒤 사면을 구성하여 사면에 설치된 변위센서의 사면굴착에 따른 거동을 파악하기 위해 3차원 불연속체 해석프로그램 3DEC를 사용하였음.
- 3DEC 프로그램은 파쇄대, 절리, 암반에 존재하는 단층 등의 불연속면 특성을 효과적으로 묘사할 수 있으며, 지반의 응력·변형이 암반 블록간의 불연속면의 거동에 지배 받는 조건에 효과적으로 적용할 수 있음.

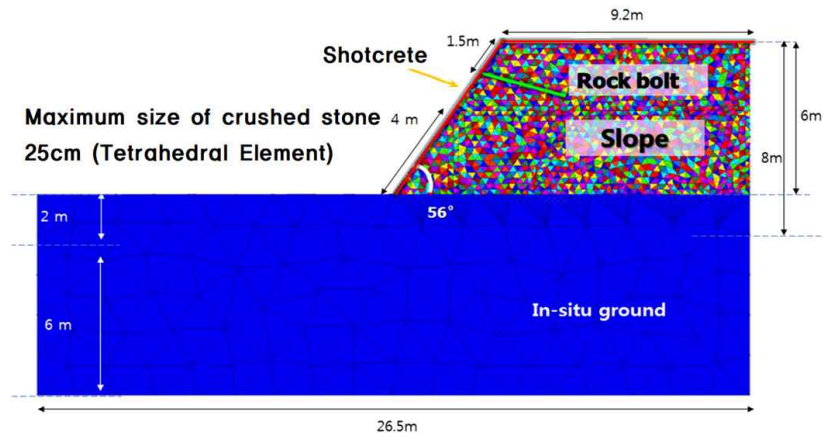


그림 2.29 Slope model for numerical analysis

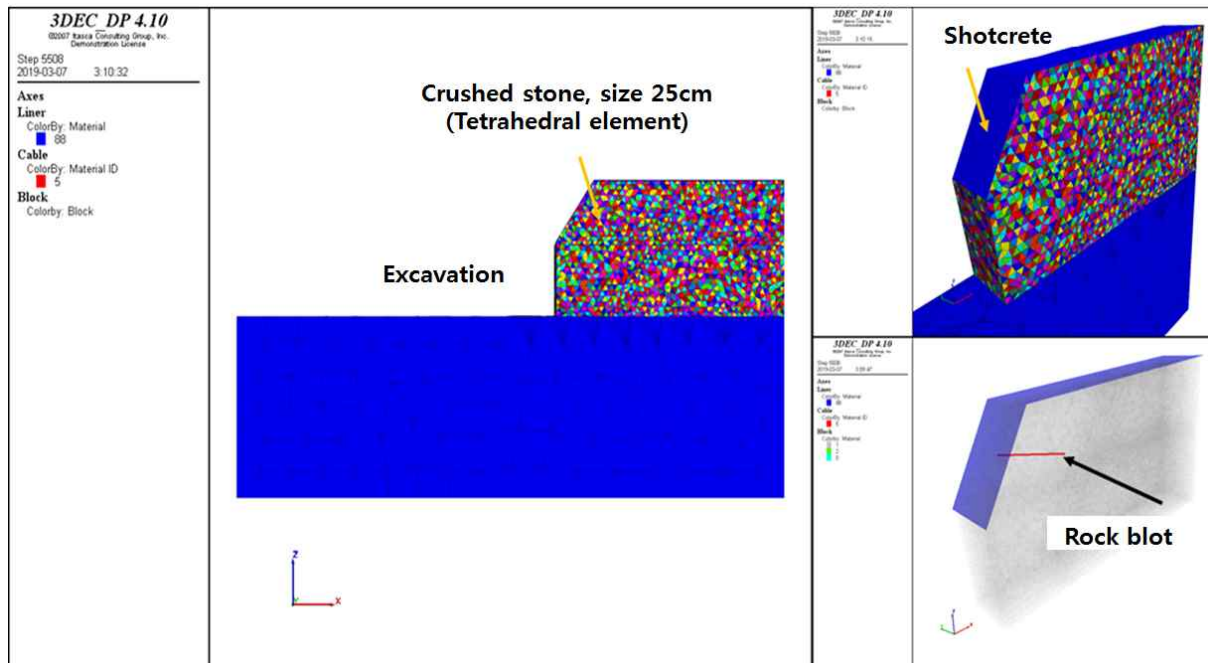


그림 2.30 Details of crushed stone, shotcrete and displacement sensor

- 불연속면의 특성을 고려할 수 있는 개별요소법은 구조체를 각각의 블록으로 설정하여 모델링하는 특징이 있고, 불연속면의 접촉특성을 고려하기 위해서 전단, 인장물성치 및 접촉면의 강성등을 사용하며 운동방정식을 수치적분하기 위해서 명시적 유한차분법을 사용함.
- 그림 2.29와 그림 2.30은 해석에 사용된 모델을 나타낸 것으로서 사면의 버력은 사면체의 개별 블록으로 모델링하고 하부지반은 연속체로 구성하였으며 슛크리트는 라이너요소로, 변위센서는 케이블요소를 이용하여 모델링하였음.

㉞ 해석물성치

- 본 연구에는 표 2.11과 같이 암석버력 간 접촉물성치를 적용하였으며 표 2.12는 슛크리트 라이너 및 변위센서에 대한 입력변수를 나타내고 있음.

표 2.11 Contact material properties between rock mass

Property	Values
Friction Angle (°)	40
Cohesion (kPa)	0
Normal Stiffness (Mpa/m)	1,000
Shear Stiffness (Mpa/m)	100
Remarks	Analysis was done by different shear stiffness

표 2.12 Properties of shotcrete and sensor

Property	Values		
	Shotcrete	Rebar Strain Sensor	GFRP Strain Sensor
Stain Coefficient E (MPa)	15,000	-	
Poission' s Ratio ν	0.2	-	
Thickness (cm)	10	-	
Normal Stiffness (MPa/m)	1,000	9,380	
Shear Stiffness (MPa/m)	1,000	1.0825	
Cross Section Area (m^2 , D_{25})		0.000491	
Modulus of Deformation E (MPa)		210,000	40,000
Unit Weight γ_t (kN/m ³)		78	21

- 본 연구에서는 표 2.13과 같이 원지반에 버력이 성토되는 조건을 고려하여 사면모델의 물성치를 두 가지로 나누어 정의하였는데 원지반에서의 점착력은 실제 존재하지 않거나, 또는 매우 낮은 값일 것으로 추정되어 버력 간 맞물림이 존재하여 0.3MPa의 점착력 값을 적용하였음.

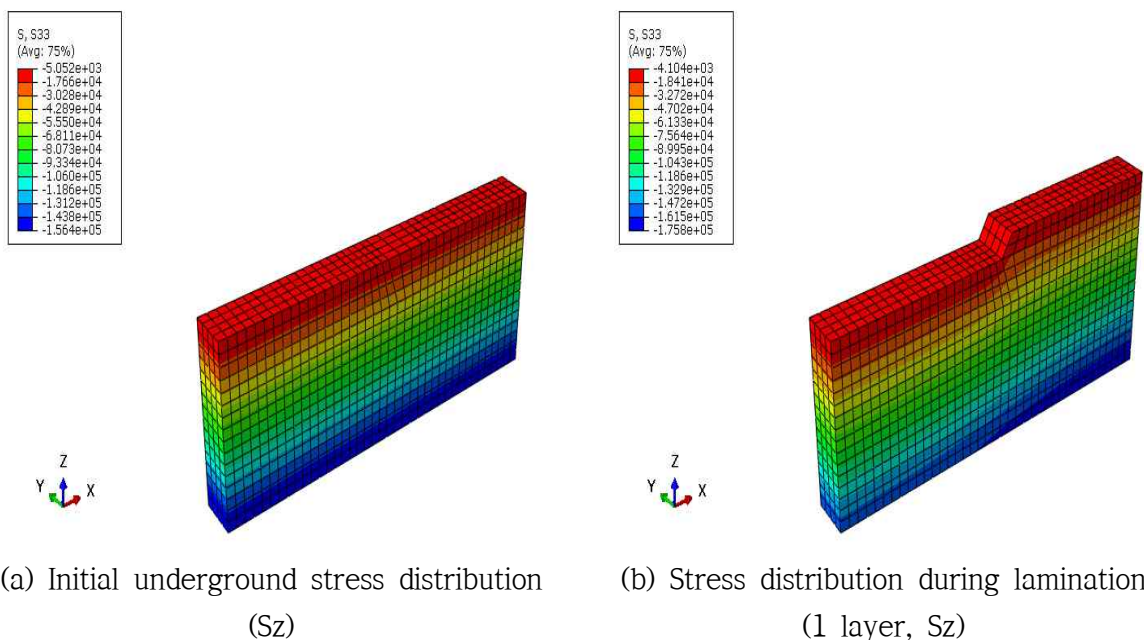
표 2.13 Material properties of rock mass and substructure

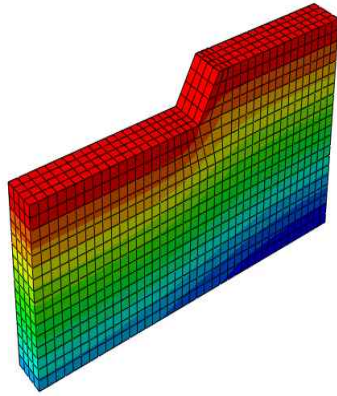
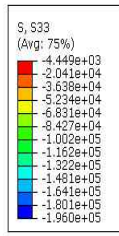
Classification	Unit Weight γ t (kN/m ³)	Cohesion (MPa)	Internal Friction Angle ϕ (°)	Modulus of Deformation E (MPa)	Poisson's Ratio ν	Remarks
Rock Mass	20	0	35	200	0.25	MC
Sub Ground	19	0.3	40	100	0.28	MC

③ 수치해석 결과

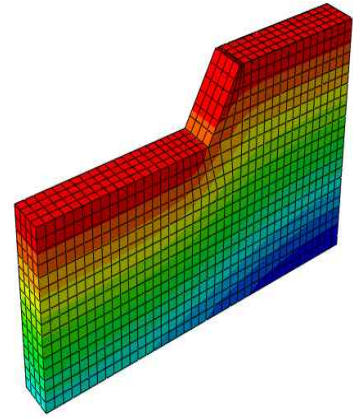
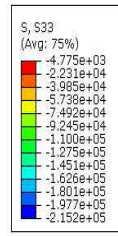
㉓ 유한요소해석 결과

- 그림 2.31은 수치해석을 통한 시공단계에 따른 사면 및 원지반의 응력 및 변형 분포를 나타내는데, 사면 적층과정에서의 응력이 사면 하단부에 집중됨을 관찰할 수 있음.
- 해당 영역에서의 소성변형이 처음 발생하고 굴착과정이 진행됨에 따라서 사면활동면을 형성하면서 전체적인 파괴상태에 이르게 됨을 확인할 수 있고 지반영역의 탄성계수가 낮은 이유로 사면 표층 슛크리트에 상대적 큰 응력이 관찰됨.

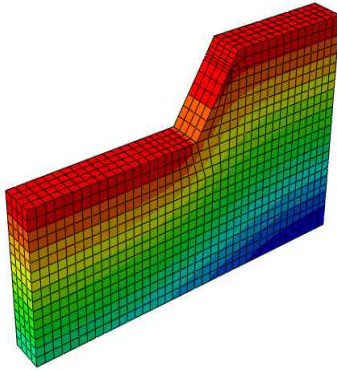
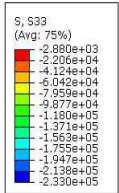




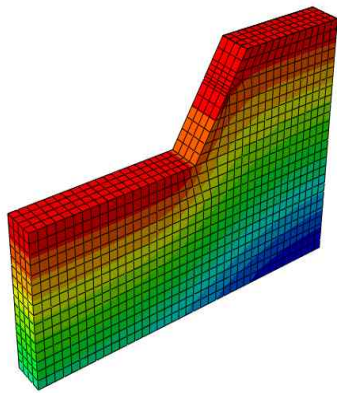
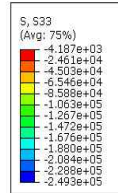
(c) Stress distribution during lamination
(2 layer, S_z)



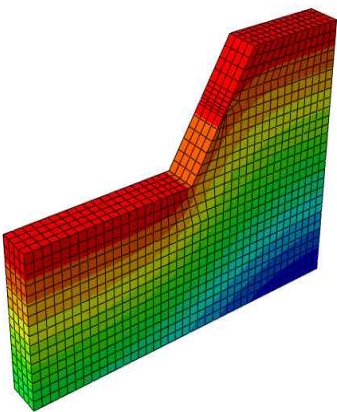
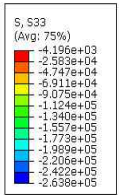
(d) Stress distribution during lamination
(3 layer, S_z)



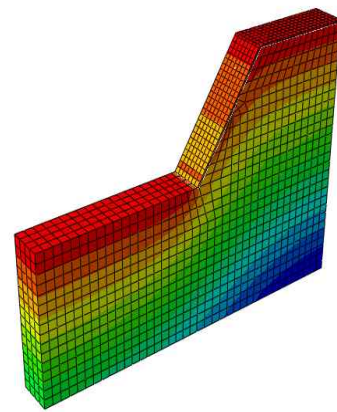
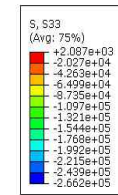
(e) Stress distribution during lamination
(4 layer, S_z)



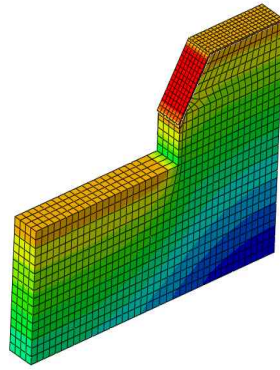
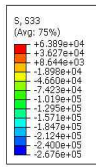
(f) Stress distribution during lamination
(5 layer, S_z)



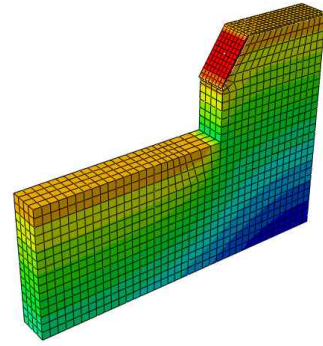
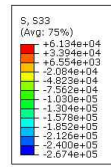
(g) Stress distribution after lamination
(6 layer, S_z)



(e) Installation of shotcrete and sensor (S_z)



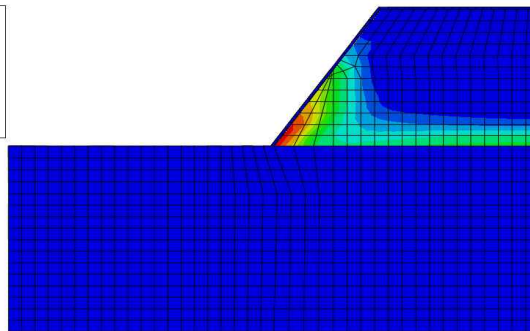
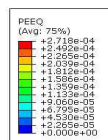
(f) Slope cutting (3m, Sz)



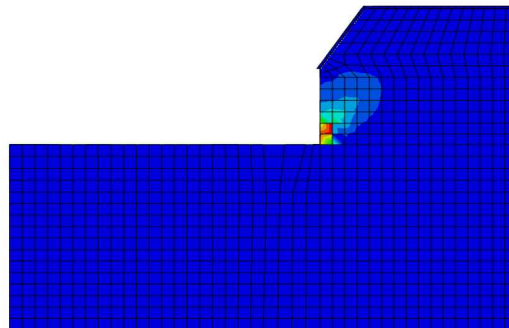
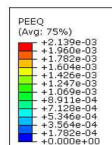
(g) Slope cutting (4m, Sz)

그림 2.31 Material properties of rock mass and substructure

- 흙에 적용되는 MC 파괴기준은 지반의 응력상태가 인장에 다가갈수록 소성에 이르기 쉽고 사면 표층에서의 작용되는 구속압의 크기가 작은 이유로, 해당 영역에 탄성한계에 해당하는 전단강도는 해당 영역에 비해서 상당히 낮게 됨.
- 사면 하단부 굴착에 의한 요소가 제거로 노출된 표면은 요소 제거에 따라 증가 인장력을 받게 되는데, 요소 제거 이전 구속하중을 받던 상태로 굴착으로 인한 인장응력을 받게 됨에 따라 사면 하단부는 다른 영역에 비해서 MC 파괴기준을 초과한 응력상태에 이르게 되어 굴착에 따른 최대 증가 소성변형률이 노출면 중심으로 발생하고, 이는 그림 2.32와 같이 굴착이 진행됨에 따라서 증가하게 됨.



(a) Plastic deformation distribution after additive layer

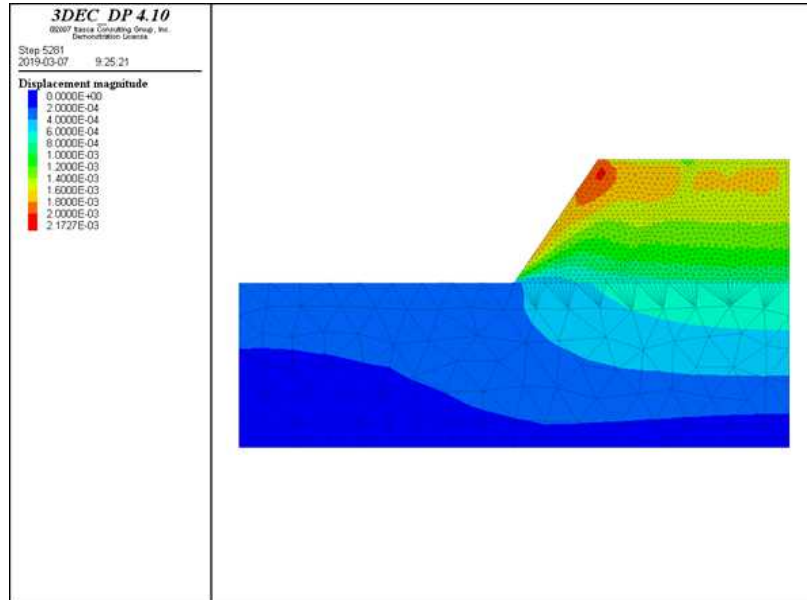


(b) Plastic strain rate distribution after slope cutting

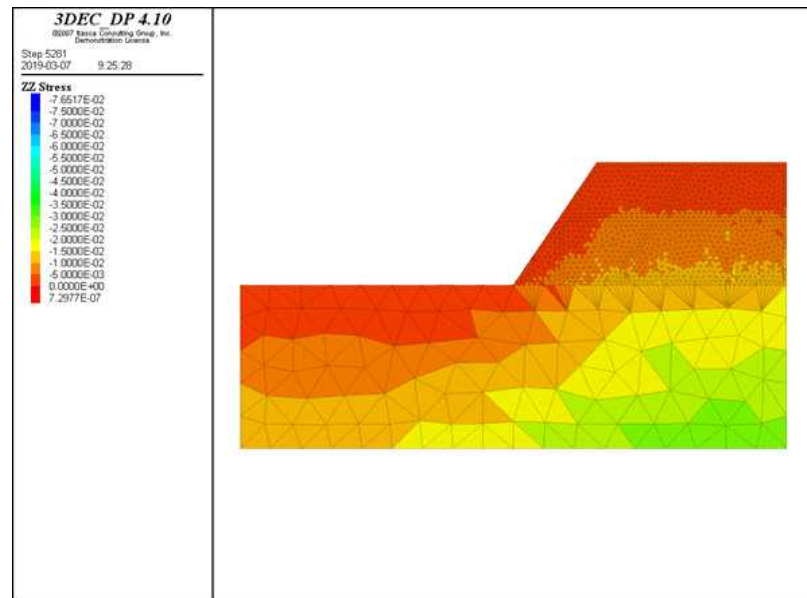
그림 2.32 Plastic strain rate distribution

㉠ 개별요소해석 결과

- 그림 2.33은 사면굴착 전 발생한 지반변위 변위를 나타내는데 초기 사면 형성 단계에서 변위 센서 매설 및 숏크리트를 타설하였을 때 지반의 탄성계수가 낮음으로 인해 사면 굴착 전 사면 상단부에서 변위가 관찰됨.



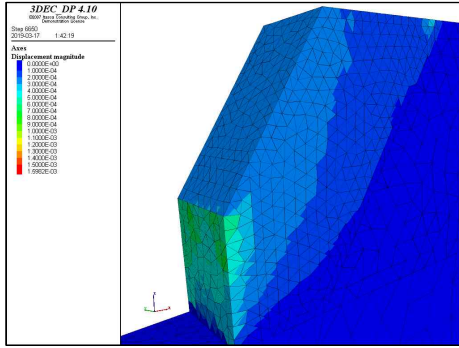
(a) Ground displacement before slope cutting



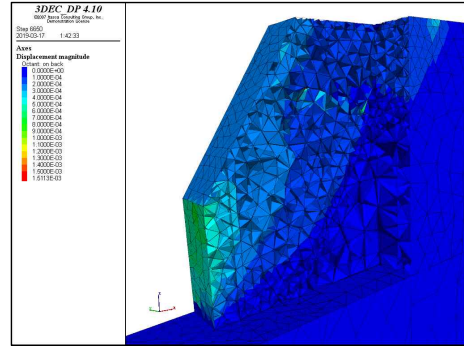
(b) Ground stress before slope cutting

그림 2.33 Ground displacement and stress distribution before slope cutting

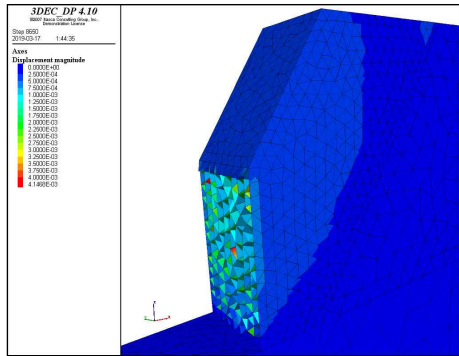
- 그림 2.34는 나사철근형 변위센서 설치사면의 굴착 후 나타난 지반변위 분포경향을 보여주고 있는데 굴착 후 사면 전면부와 변위센서 매설 구역에 비교적 큰 변위가 관찰되었음.



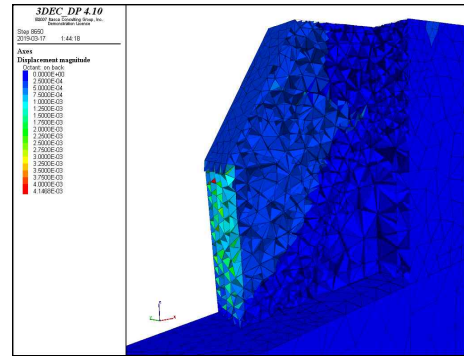
(a) Initial underground stress distribution
(Sz)



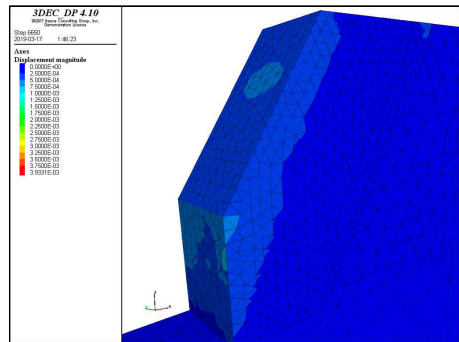
(b) Stress distribution during lamination
(1 layer, Sz)



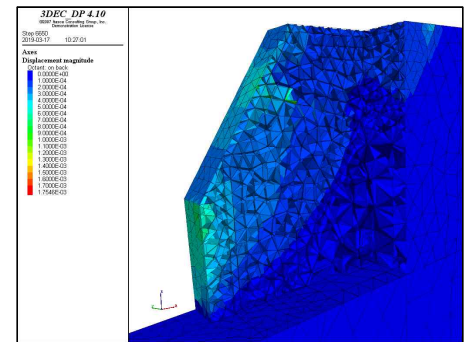
(c) Stress distribution during lamination
(2 layer, Sz)



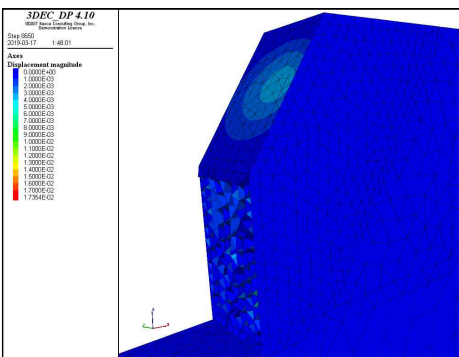
(d) Stress distribution during lamination
(3 layer, Sz)



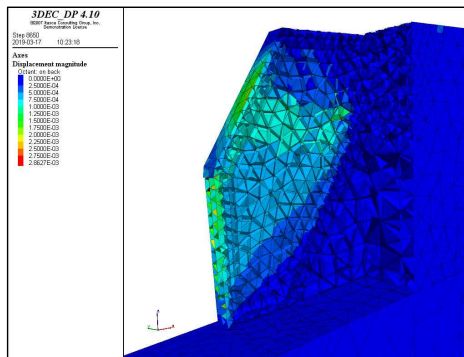
(e) Stress distribution during lamination
(4 layer, Sz)



(f) Stress distribution during lamination
(5 layer, Sz)



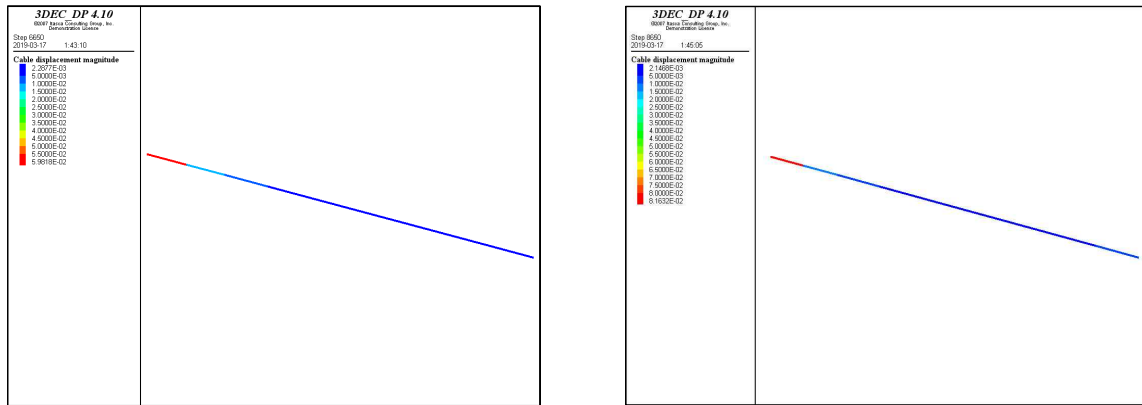
(g) Stress distribution after lamination
(6 layer, Sz)



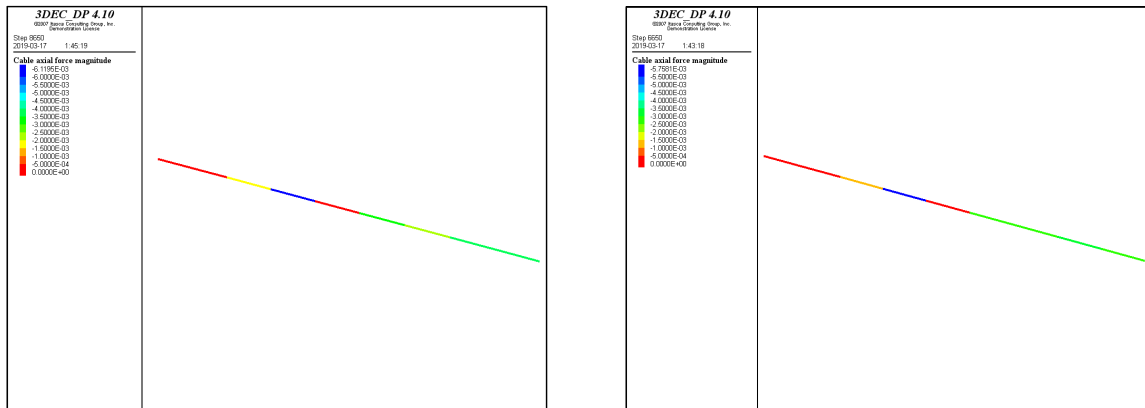
(e) Installation of shotcrete and sensor (Sz)

그림 2.34 Material properties of rock mass and substructure

- 그림 2.35는 나사철근형 변위센서 설치사면의 굴착 후 발생한 변위센서의 변위 및 축력 분포 경향을 나타내는데, 유한요소해석의 결과 3차원 해석모델과 사면 붕괴 모사 실험간 다소 상이한 사면의 거동 형태가 관찰되며, 이는 지반 탄성계수, 강도정수의 변화와 사면 성토과정 및 굴착 시공단계의 변화에 기인하는 것으로 사료됨.
- 그림 2.36은 GFRP형 변위센서 설치사면의 굴착 후 발생한 변위 및 축력 분포를 나타내는데, 사면 굴착 후 변위센서에 나타난 변위값과 축력값의 경우 슛크리트가 타설된 영역부터 그 크기가 급격히 증가하지만 사면에 관입된 방향에 연하여 점차 감소되는 것을 알 수 있음.



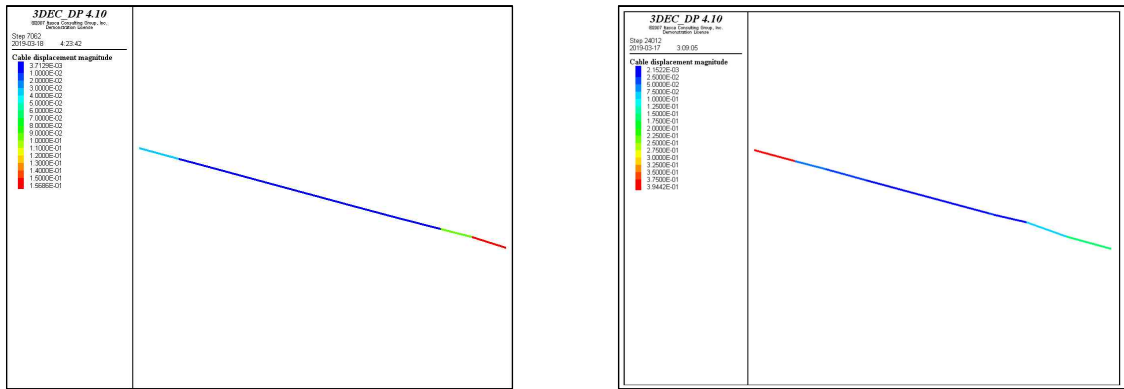
(a) Distribution of displacement



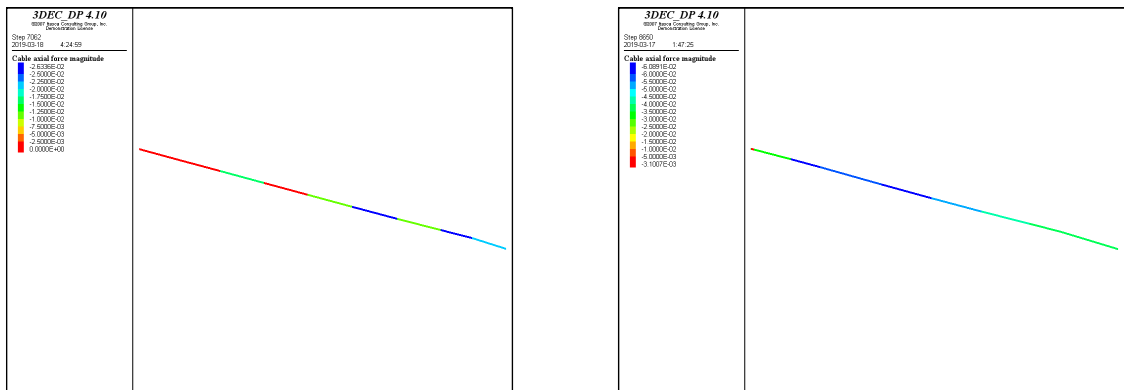
(b) Distribution of axial force

그림 2.35 Distribution of displacement and axial force (steel sensor)

- 현장실험 결과, 높이 3m 굴착시 GFRP형 변위센서에서 최대변위값 203.0mm, 나사철근형 변위센서에서는 42.0mm, 높이 4m 굴착시 GFRP형 변위센서에서 217.0mm, 나사철근형 변위센서에서 170.0mm로 모든 계측값에서 변위값이 급격히 증가 후 붕괴되는 경향을 볼 수 있어 암반사면 붕괴 예측 시 나사철근형 변위센서 및 GFRP형 변위센서를 적용 할 수 있을 것으로 사료됨.



(a) Distribution of displacement



(b) Distribution of axial force

그림 2.36 Distribution of displacement and axial force (GFRP sensor)

- 개별요소해석의 결과는 실제 현장에서 측정한 변위센서의 변위값과 비슷한 경향을 나타내었는데 변위 감지 성능은 동일한 조건에서 나사철근형 변위센서보다 GFRP형 변위센서가 높은 것으로 판단되며 GFRP형 변위센서가 나사철근형 변위센서보다 시공성 및 유지관리성 측면에서 사면 예·경보시스템 구축 시 유리 할 것으로 판단됨.

(3) GFRP 변위센서의 전단거동 특성

(가) 실험재료 및 방법

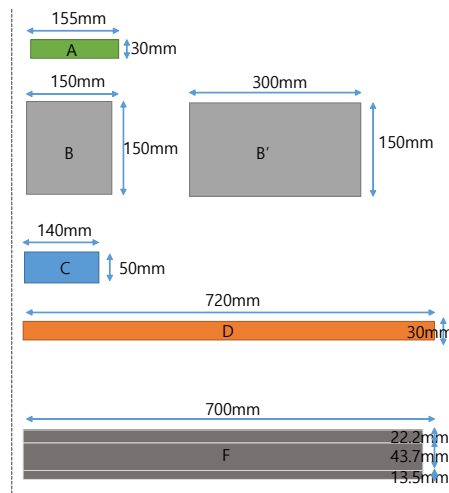
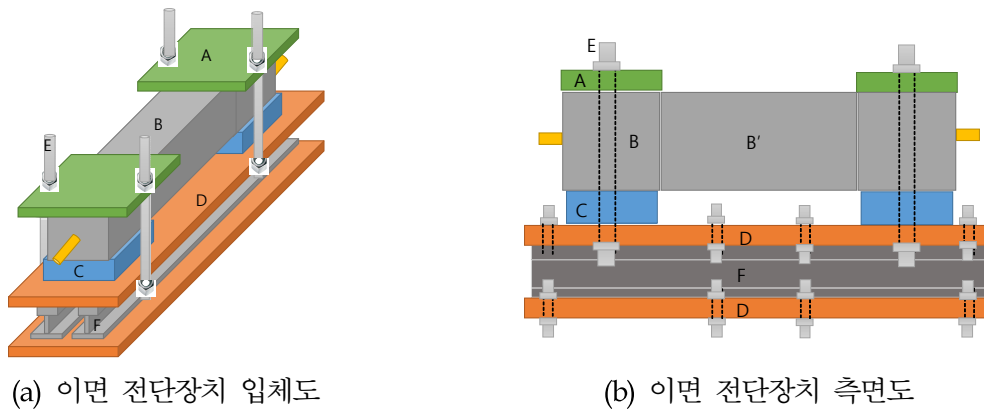
- 본 연구에서는 변형률계와 GFRP 록볼트를 이용하여 사면붕괴를 모니터링하기 위한 센서를 제작하였으며, 그 성능을 평가하기 위해 이면 전단시험을 수행하였음.
- 전단변위에 따른 GFRP 변위센서와 나사철근형 변위센서에서 측정되는 변형률을 분석하였고 변위센서가 암반에 그라우트로 충전된 조건을 모사하기 위하여 시멘트 페이스트와 모래로

충진된 조건을 비교하였음.

- 변형률계를 보호하기 위하여 GFRP 변위센서를 열수축튜브로 코팅하였으며, 코팅하지 않은 경우와 비교하였음.

① 전단시험 장치

- 본 연구에서는 GFRP 변위센서의 전단을 위해 그림 2.37과 같이 이면 전단장치를 제작하였으며 이면 전단시험 장치는 A~F까지 크게 6개의 부품으로 구성됨.



(c) 이면 전단장치 구성요소

그림 2.37 전단장치

- 전단시험 장치는 500kN의 하중에 버틸 수 있도록 제작하였는데, 구성요소 중 철판 A는 콘크리트 블록(B)을 고정하여 전단하중 재하시 휨이 발생하지 않도록 하는 역할을 하며 A는 강봉(E)을 이용하여 하부판(D)에 고정됨.
- 철판 C는 전단에 의해 변위가 발생할 수 있도록 콘크리트 블록을 D로부터 일정 간격 띄워 주는 역할을 하고, F는 I-beam로서 전단하중에 의해 D가 변형되지 않도록 하는 역할을 하며, 콘크리트

블록(B)을 제외한 전단시험 장치의 모든 구성요소는 스테인레스 스틸로 제작되었음.

② GFRP

- 본 연구에서는 GFRP 록볼트를 이용하여 GFRP 변위센서를 제작하였으며 GFRP 록볼트의 직경은 25mm, 인장강도는 850MPa, 전단강도는 150MPa이며, 유리함유량은 75%임.

③ 변형률계

- 본 연구에서는 변형률 측정을 위하여 그림 2.38과 같은 변형률계를 얼라이브 록볼트에 설치하였으며, 변형률계의 gage length는 5mm, gage factor는 2.11, gage resistance는 118.5, strain limit는 5%임.

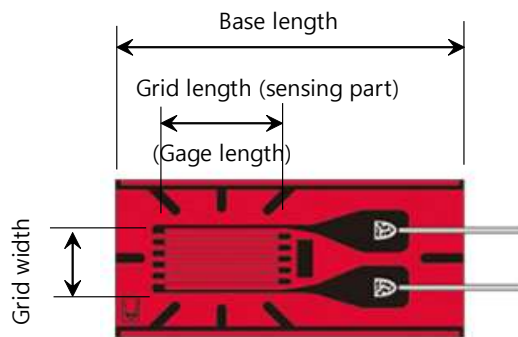
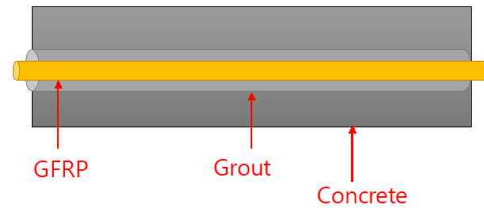


그림 2.38 변형률계

(나) GFRP 변위센서 설치

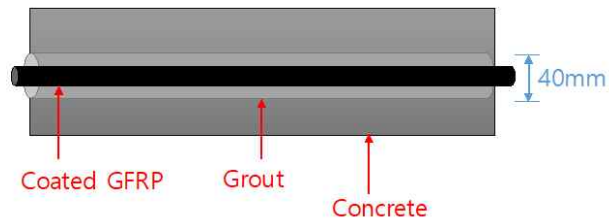
- 본 연구에서는 그림 2.39와 같이 4종류의 GFRP 변위센서에 대한 연구를 진행하였으며 GFRP 변위센서가 암반에 시멘트 그라우트로 충전된 것을 모사하기 위하여 그림 39(a)와 같이 콘크리트 블록에 시멘트 그라우트로 충전하여 GFRP 변위센서를 셋팅시켰음.
- 암반에 흠으로 충전된 GFRP 변위센서를 모사하기 위하여 그림 2.39(b)와 같이 콘크리트 블록에 GFRP 변위센서를 삽입한 후 모래를 충전하고 변형률계와 선을 보호하기 위하여 열수축튜브로 코팅된 GFRP 변위센서도 제작하였으며, 이를 각각 그림 2.39(c)와 그림 2.39(d)와 같이 콘크리트에 시멘트 그라우트와 모래로 충전하였음.
- GFRP 변위센서가 콘크리트 블록에 각각 시멘트 그라우트와 흠으로 충전된 경우와 코팅된 GFRP 변위센서가 콘크리트 블록에 시멘트 그라우트와 흠으로 충전된 경우에 대해 이번 전단시험을 수행하였음.
- 전단하중은 그림 2.40과 같이 일축압축시험기를 이용하여 아래에서 위로 올라가는 방향으로 가해지며, 그림 2.41과 같이 인위적으로 설정된 전단면에서 전단이 발생하도록 0.5mm/min의 속도로 가해짐.
- 실험에 사용된 일축압축시험기가 가할 수 있는 최대 하중은 1500kN이지만, 실험의 안전상

변형률계의 선이 끊어져 변형률을 계측할 수 없을 때 까지만 실험을 진행하였음.

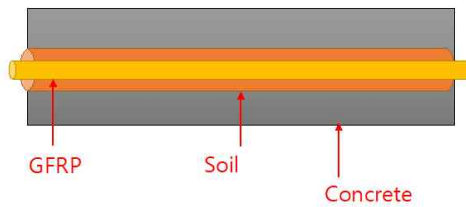


(a) 콘크리트 블록에 시멘트 그라우트로 충전된 GFRP 변위센서

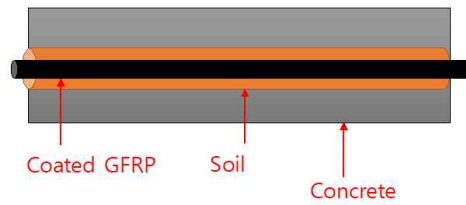
Case 1: coated GFRP+ grout



(b) 콘크리트 블록에 시멘트 그라우트로 충전되고 코팅된 GFRP 변위센서



(c) 콘크리트 블록에 흙으로 충전된 GFRP 변위센서



(d) 콘크리트 블록에 흙으로 충전된 코팅된 GFRP 변위센서

그림 2.39 성능 평가용 GFRP 변위센서



그림 2.40 전단시험 전경



그림 2.41 콘크리트 블록 전단면

- 전단하중은 일축압축시험장치에 설치된 로드셀로 측정하였으며, 로드셀로 측정되는 하중과 변형률계로 측정되는 변형률은 데이터로거를 이용하여 수집하였고 측정 데이터는 데이터로거를 이용하여 초당 1회씩 수집하였으며, 실험 종료 후 PC에 저장하였음.

(다) 실험결과

① 그라우트로 충전된 코팅된 GFRP 변위센서

- GFRP 변위센서가 그라우트를 이용하여 암반에 부착된 경우, 그라우트와 GFRP 변위센서와의 직접적인 접촉으로 인해 암반 변위 발생 시 변형률계와 변형률계의 선이 손상될 수 있는데 본 연구에서는 이에 대한 영향을 최소화하고 변형률계와 변형률계의 선을 보호하기 위하여 변형률계가 설치된 GFRP 변위센서를 열수축튜브로 코팅하였으며, 코팅된 록볼트 센서는 콘크리트 블록에 설치한 후 시멘트 그라우트로 충전하였음.
- 그라우트로 충전되고 코팅된 변위센서에 대해 이번 전단시험을 수행하고, 그 결과를 그라우트로 충전되고 코팅되지 않은 얼라이브 록볼트에 대한 실험 결과와 비교하였음.
- GFRP 변위센서의 두부, 선단부, 중간부 1, 중간부 2에서 측정한 전단변형률을 그림 2.42에 나타내었는데, 그림 2.42를 보면 두부와 선단부에서 측정된 전단변형률이 거의 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있음.

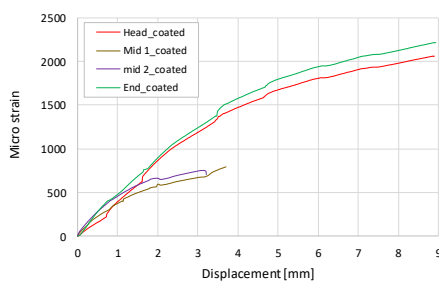


그림 2.42 변형률 vs. 전단변위

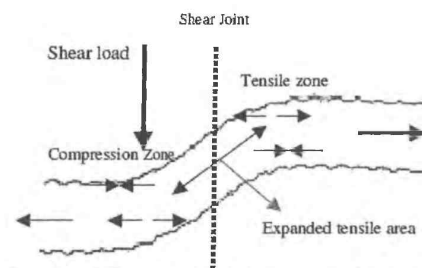


그림 2.43 전단변형과 파괴 (Jalalifar et al., 2005)

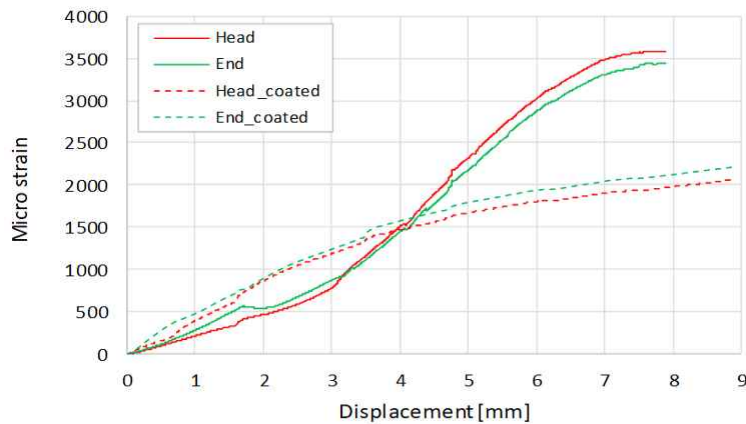
- 변형률은 전단변위가 약 3mm일때까지 선형적으로 증가하며 이 때 약 1200×10^{-6} 을 나타내다가 완만하게 증가하며, 전단변위가 약 9mm일 때 변형률계 선이 끊어졌는데 이때의 변형률은

약 2000×10^{-6} 임.

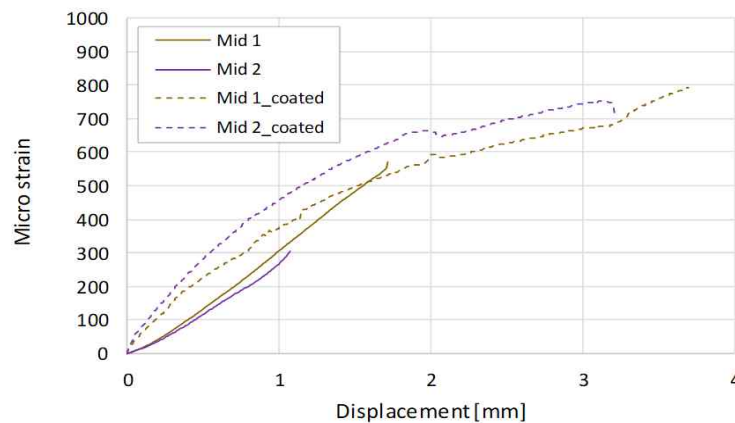
- 그림 2.42 나타난 바와 같이 중간부 1과 중간부 2에서 측정된 전단변위에 따른 변형률이 서로 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 중간부 1의 경우, 변형률계 선의 손상으로 인해 전단변위 3.7mm까지 측정되었으며, 이때의 변형률은 약 790×10^{-6} 로 나타남.
- 중간부 2의 경우, 전단변위 3.2mm까지 측정되었으며, 이때의 변형률은 약 740×10^{-6} 이다. 중간부에서 측정된 결과와 두부 및 선단부에서 측정된 결과를 비교해보면, 전단변위 약 1mm까지는 유사한 경향을 나타내나 이후 중간부의 전단변위에 따른 변형률 값이 더 작은 것을 볼 수 있는데, 이는 그림 2.43에 나타난 바와 같이 중간부는 압축을 받기 때문에 인장변형이 생기는 두부 및 선단부보다 변형률이 적게 측정된 것으로 사료됨.
- 중간부 1과 2에 설치된 변형률계 선은 전단변위 3.5mm 이후에 끊어졌는데, 이는 두부와 선단부에 설치된 것보다 더 빠르며 이는 GFRP 변위센서의 중간부가 전단방향(수직방향)으로 변위가 발생하는 부분이기 때문으로 사료됨.

② 코팅 유무에 따른 변형률-전단변위 비교

- 열수축튜브로 코팅되지 않은 GFRP 변위센서의 전단변위에 따른 변형률을 열수축튜브로 코팅된 GFRP 변위센서에 대한 실험 결과와 비교하였으며 두부와 선단부에서의 전단변위에 따른 변형률 측정 결과를 그림 2.44(a)에 나타내었음.



(a) 코팅 유무에 따른 변형률 vs. 전단변위 (두부, 선단부)



(b) 코팅 유무에 따른 변형률 vs. 전단변위 (중간부 1, 중간부 2)

그림 244 코팅 유무에 따른 변형률 vs. 전단변위

- 열수축튜브로 코팅된 엘라이브 록볼트의 경우, 최대 측정된 전단변위는 약 9mm로 최대 측정된 전단변위가 8mm인 코팅되지 않은 GFRP 변위센서보다 1mm 더 측정할 수 있었음.
- GFRP 변위센서를 시멘트로 그라우트하면 변형률계와 변형률계 선도 함께 그라우트 되는데 GFRP 변위센서에 변형이 생길 시 손상되기 쉬우나, 열수축튜브로 코팅을 하면 시멘트 그라우트와 변형률계 및 변형률계 선과의 직접적인 접촉을 막아주어 비교적 손상을 지연시킬 수 있음.
- 코팅된 GFRP 변위센서와 코팅되지 않은 GFRP 변위센서의 전단변위에 따른 변형률을 보면, 전단변위 1.5mm일때의 변형률은 약 500×10^{-6} 로 비슷하게 나타났으나 전단변위 2mm이후부터 4mm까지는 코팅된 GFRP 변위센서의 변형률이 더 크게 나타나 더 민감한 반응을 보임.
- 코팅된 GFRP 변위센서의 전단변위에 따른 변형률은 전단변위 4mm이후에는 코팅되지 않은 GFRP 변위센서보다 작게 나타났는데, 초기에는 시멘트 그라우트의 부착력(bonding strength)으로 인해 적게 변형률이 적게 측정되나 이후 전단부 그라우트의 손상과 함께 코팅되지 않은 GFRP 변위센서에서 측정되는 변형률은 증가함.

- 반면, 코팅한 GFRP 변위센서의 전단변위에 따른 변형률은 완만하게 증가하는데, 이는 코팅을 하면 시멘트 그라우트와 록볼트 돌기와의 마찰력 또는 부착력이 줄어들어 전단변위는 증가하나 상대적으로 록볼트의 인장변형은 크지 않기 때문으로 사료됨.
- 열수축튜브로 코팅되지 않은 GFRP 변위센서와 코팅된 GFRP 변위센서의 중간부 1과 중간부 2에서 측정한 전단변위에 따른 변형률을 그림 2.44(b)에 나타내었음.
- 코팅되지 않은 GFRP 변위센서의 결과를 보면, 중간부 1과 중간부 2의 변형률은 각각 전단변위 1mm와 1.7mm까지 측정되었는데 이는 코팅된 록볼트의 중간부 1과 중간부 2의 변형률이 각각 전단변위 3.7mm와 3.2mm까지 측정된 것보다 2mm보다 짧아 열수축튜브가 변형률계와 변형률계 선을 손상으로부터 보호해 주었기 때문으로 사료됨.
- 열수축튜브로 코팅된 GFRP 변위센서의 중간부 1과 중간부 2에서 측정된 전단변위에 따른 변형률이 코팅되지 않은 GFRP 변위센서의 중간부 1과 중간부 2에서 측정된 전단변위에 따른 변형률보다 작게 나타났음.
- 록볼트의 리브와 마디는 주변 그라우트와의 마찰력을 증가시키는데 중요한 역할을 하는데 (Almusallam et al, 1996), 열수축튜브가 이러한 역할을 감소시킬 수 있음.
- GFRP 변위센서와 그라우트와의 직접적인 접촉에 영향을 줄 수 있는데, GFRP 변위센서와 그라우트간의 부착력에 영향을 주었을 것으로 사료됨.

③ 흙으로 충전된 GFRP 변위센서

- 일반적으로 록볼트는 암반 속에 시멘트 그라우트로 부착되지만 본 연구에서는 록볼트 변위센서의 계측 성능 평가를 위해 암반 속에 흙으로 충전된 경우와 그라우트로 충전된 경우와 비교하였음.
- 사용된 흙은 규사 6호사로 0.42mm~0.22mm의 입자크기로 조성되며 흙으로 충전된 록볼트 변위센서에 대해 이면 전단시험을 수행하였음.
- GFRP 변위센서를 시멘트 그라우트로 충전한 경우와 흙으로 충전한 경우에 대해 전단변위에 따른 변형률 측정 결과를 비교하였으며, 두부와 선단부에서의 변형률에 따른 전단변위 측정 결과를 그림 2.45에 나타내었음.

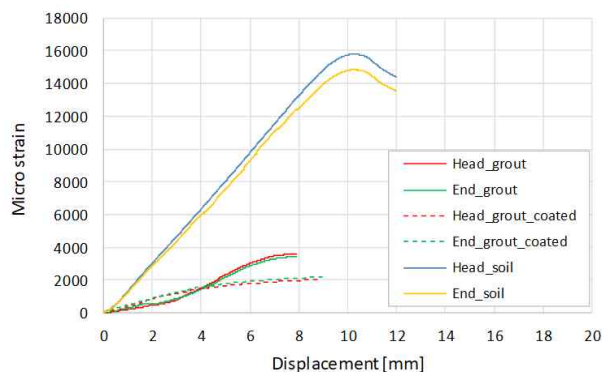


그림 2.45 변형률 vs. 전단변위 (두부, 선단부)

- GFRP 변위센서가 흙으로 충전된 경우, GFRP 변위센서가 시멘트 그라우트로 충전된 경우보다 전단변위에 따른 변형률이 더욱 민감하게 변화하는 것으로 나타났다.
- 흙으로 충전된 GFRP 변위센서의 경우, 전단변위 4mm일때의 변형률은 6000×10^{-6} 이지만, 시멘트 그라우트로 충전된 GFRP 변위센서의 경우, 전단변위 4mm일때의 변형률은 2000×10^{-6} 이하로 약 3배 정도 차이가 발생하였음.
- 더욱이, 흙으로 충전된 GFRP 변위센서의 경우, 전단변위가 10mm일 때까지 변형률 측정이 가능하였지만, 그라우트로 충전된 GFRP 변위센서의 경우, 8mm~9mm까지 변형률 측정이 가능하였는데, 이는 GFRP 변위센서와 시멘트 그라우트간의 마찰력이 GFRP 변위센서와 흙과의 마찰력보다 더 크기 때문으로 사료됨.
- 일반적인 GFRP 록볼트와 시멘트 그라우트간의 마찰계수는 0.7이며(Mesbah et al., 2017), GFRP 록볼트와 흙과의 마찰계수는 0.3~0.5인데(Frost and Han, 1999), 록볼트와 그라우트간의 마찰계수의 증가 그리고 록볼트와 시멘트 그라우트간의 화학반응에 의해 발생하는 부착력은 전단하중에 대한 록볼트의 저항력을 증가시키며(Cosenza et al., 1997; Yu et al., 2019), 이러한 이유로 흙에 설치된 GFRP 변위센서의 반응이 전단변위에 대해 더 민감하게 나타나는 것으로 사료됨.

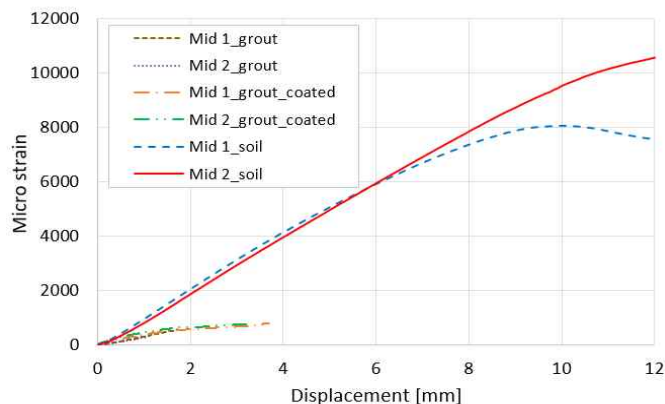


그림 246 변형률 vs. 전단변위 (중간부 1, 중간부 2)

- 중간부 1과 중간부 2에서의 변형률에 따른 전단변위 측정 결과를 그림 2.46에 나타내었는데, GFRP 변위센서가 흙으로 충전된 경우, 시멘트 그라우트로 충전된 경우 보다 전단변위에 따른 변형률이 더욱 민감하게 나타나는 것을 볼 수 있음.
- 이와 같은 경향은 GFRP 변위센서를 시멘트 그라우트와 흙으로 충전된 경우의 두부와 선단부에서 측정한 결과에서도 동일하게 나타남.
- GFRP 변위센서가 흙으로 충전된 경우의 전단변위에 따른 변형률은 전단변위 2mm일 때 약 2000×10^{-6} 인데, 이는 시멘트 그라우트로 충전된 경우, 전단변위 2mm일 때 변형률이 650×10^{-6} 인 것보다 약 3배정도 큼.
- GFRP 변위센서를 흙으로 충전했을 경우, 전단변위 10mm까지 변형률을 계측할 수 있으나,

GFRP 변위센서를 시멘트 그라우트로 충전한 경우, 코팅된 GFRP 변위센서는 전단변위 3.5mm, 코팅되지 않은 GFRP 변위센서는 전단변위 약 1.7mm까지 변형률 계측이 가능함.

④ 코팅 유무에 따른 변형률-전단변위 비교

- 그림 2.47에 나타난 바와 같이 열수축튜브로 코팅된 GFRP 변위센서를 흙으로 충전한 경우에 대해 전단변위에 따른 두부 및 선단부에서의 변형률 측정 결과를 코팅되지 않은 GFRP 변위센서를 흙으로 충전한 경우에 대해 실험한 결과와 비교하였음.

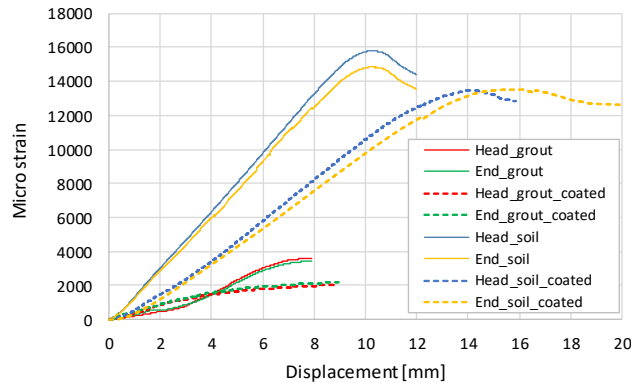


그림 2.47 충전 방법 및 코팅 유무에 따른 변형률 vs. 전단변위 (두부, 선단부)

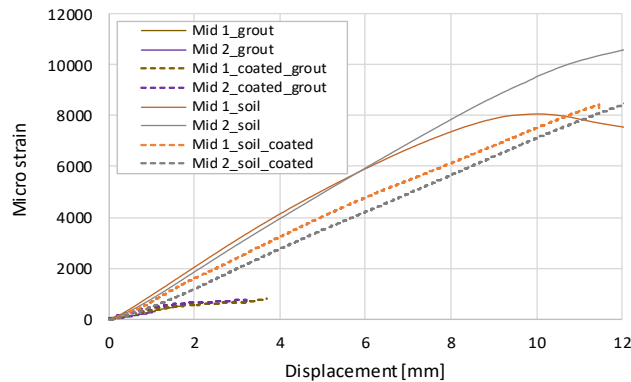


그림 2.48 충전 방법 및 코팅 유무에 따른 변형률 vs. 전단변위 (중간부)

- 코팅된 GFRP 변위센서를 흙으로 충전된 한 경우, 코팅하지 않은 GFRP 변위센서에 비해 전단변위에 따른 변형률이 작게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 전단변위 8mm일 때 코팅된 GFRP 변위센서를 흙으로 충전한 경우의 변형률은 약 8000×10^{-6} 으로 코팅되지 않은 경우 (13000×10^{-6})보다 약 1.6배 작음.
- 열수축튜브로 코팅한 경우(흙으로 충전된 GFRP 변위센서), 전단변위 13mm~15mm까지 변형률을 측정할 수 있었는데 이는 전단변위 9mm까지 변형률을 측정할 수 있었던 코팅되지 않은 경우 (흙으로 충전된 GFRP 변위센서)보다 더 긴 값으로 이는 열수축튜브가 변형률계를 보호하였기 때문으로 사료됨.

- 열수축튜브로 코팅한 효과는 그라우트로 충전된 GFRP 변위센서의 경우에서도 나타났으며, 코팅된 GFRP 변위센서를 흙으로 충전하여도 전단변위에 따른 변형률계의 민감도는 시멘트 그라우트로 충전한 경우보다 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있음.
- 중간부에서 측정된 전단변위에 따른 변형률 관계를 그림 2.48에 나타내었으며, 두부 및 선단부 측정 결과와 마찬가지로 코팅된 GFRP 변위센서를 흙으로 충전된 한 경우, 코팅하지 않은 GFRP 변위센서에 비해 전단변위에 따른 변형률이 작게 나타나는 것을 볼 수 있음.
- 전단변위 6mm일 때 GFRP 변위센서를 흙으로 충전한 경우의 변형률은 약 4200×10^{-6} (중간부 1)과 4800×10^{-6} (중간부 2)으로 코팅되지 않은 경우(6000×10^{-6})의 약 70%~80% 수준인데 이는 열수축튜브가 록볼트-흙 간의 마찰력을 감소시켰기 때문으로 사료됨.
- 열수축튜브로 코팅한 경우(흙으로 충전된 GFRP 변위센서), 전단변위 11mm~12mm까지 변형률이 선형적으로 증가하였는데, 이는 코팅되지 않은 경우(흙으로 충전된 GFRP 변위센서)의 중간부 1과 중간부 2에서 변형률이 각각 전단변위 6mm와 10mm까지 선형으로 증가한 것보다 더 좋은 계측 성능임.
- 코팅된 GFRP 변위센서를 흙으로 충전하여도 전단변위에 따른 변형률계의 민감도는 시멘트 그라우트로 충전한 경우보다 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있음.

(마) 소결

- GFRP 변위센서의 전단변위에 따른 변형률은 두부와 선단부에서 계측된 변형률이 서로 유사하였고, 중간부 1과 중간부 2에서 계측된 변형률이 유사하였으나, 두부와 선단부에서 계측된 변형률이 중간부에서 계측된 변형률보다 동일 전단변위에 대해 더 크게 나타났는데, 이는 두부와 선단부는 인장이 발생하고 중간부는 압축에 영향을 받기 때문으로 사료됨.
- GFRP 변위센서를 콘크리트 블록에 흙으로 충전 시 시멘트 그라우트로 충전한 경우보다 전단변위에 따른 더 큰 변형률 변화 특성을 보였으며, 흙으로 충전된 코팅된 GFRP 변위센서의 경우, 코팅되지 않은 GFRP 변위센서보다 전단변위에 따른 변형률이 덜 민감하게 나타났으나, 더 큰 전단변위에서도 변형률을 계측할 수 있었는데, 이는 열수축튜브가 변형률계를 보호하는데 유효하게 작용하고 있기 때문인 것으로 판단됨.
- 코팅된 GFRP 변위센서를 흙으로 충전 시 전단변위에 대한 민감도도 우수하고 큰 전단변형에 대해 변형률을 측정할 수 있어 암반사면 모니터링을 하는데 유용하게 적용될 수 있으나 시공성 측면에서 시멘트 그라우트로 충전하는 방법도 적용 가능할 것으로 판단됨.
- 열수축튜브로 코팅된 GFRP 변위센서를 시멘트 그라우트로 충전한 경우, 코팅하지 않은 경우보다 전단변위에 따른 변형률이 덜 민감하게 반응하였으나, GFRP 록볼트에 변형이 발생할 시 그라우트와 함께 변위센서가 손상되는 현상이 감소하여 좀 더 큰 전단변위까지 계측할 수 있는 것으로 판단됨.

(4) 얼라이브 록볼트 시스템의 현장 성능 검증

(가) 얼라이브 록볼트 제작

- 본 연구에서는 GFRP 변위센서의 성능을 검증하기 위해 강원도 횡성군에 위치한 암반사면에 변위센서를 설치한 후 사면붕괴 실험을 수행하였으며, 변위센서의 주재료는 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastic) 록볼트를 사용하였음(그림 2.49 참조).
- 외경 25mm, 길이 2,000mm의 록볼트를 1/4 등분하여 재료표면에 길이 100mm, 폭 10mm 정도의 직사각형 영역에 센서 부착을 위하여 매끄럽게 연마한 후, 록볼트 1/2, 1/4 지점에 센서를 직선으로 설치하고 절연 테이프로 권선을 반복하여 센서 보호, 방수 및 절연이 되도록 부착하였음(표 2.14, 그림 2.50 참조).
- 록볼트 센서의 외부는 사면 매설 시 센서의 와이어와 케이블의 파단을 막기 위하여 센서 부착 후 코팅제로 처리하였음(그림 2.51 참조).

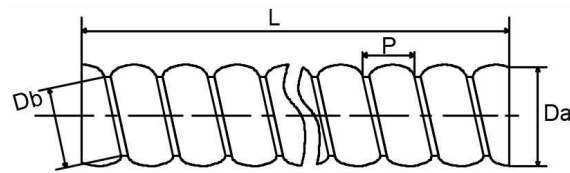


그림 2.49 GFRP RockBolt

표 2.14 Product specification

Item	Unit	Standard Specification
Breaking Load	mm	25
Tensile strength	Mpa	850
Shear strength	Mpa	150
Glass content	%	75
Dia, Top(Da)	mm	25.0 ± 0.5
Dia, Top(Db)	mm	22.6 ± 0.5

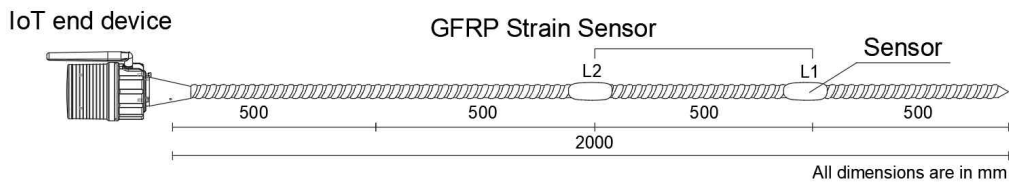


그림 2.50 Schematic diagram of strain sensor



그림 2.51 GFRP strain sensor

(나) 센서의 검정

- 본 연구에서는 GFRP 록볼트 변위타입 센서를 제작하였으며, 각 장치의 변위-변형률 응답을 검정하였는데 오른쪽 끝에서 1/4길이의 위치를 고정단으로 하고, 자유단에 하중을 가하여 변위를 측정하는 방식으로 캔틸레버보 조건과 같은 검정방법을 사용하였으며, 하중 부여에 의해 발생하는 변형과 응답변형률을 측정하였음(그림 2.52).



그림 2.52 Sensor displacement measuring

- 그림 2.53과 그림 2.54는 각각의 검정결과를 도식화하여 나타낸 것으로 S1은 센서의 1/4 지점, S2는 센서의 1/2 지점에서의 Strain센서의 검정결과임.

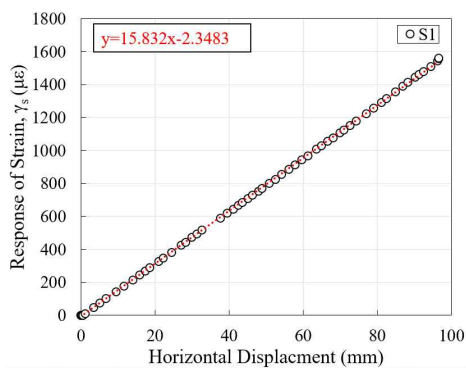


그림 2.53 Calibration of strain sensor (F1)

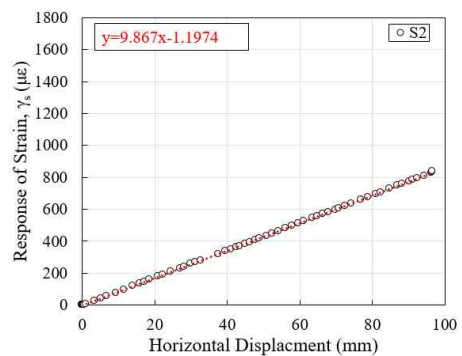


그림 2.54 Calibration of strain sensor (S1)

- 검정결과와 추세선은 현장 계측 값의 효율적 활용을 위하여 Eqs. (3), Eqs. (4)와 같이 1차함수로 표현하였으며 하중부가에 따른 록볼트 자유단의 변형에 따른 응답변형률이 비교적 명확하게 판별되어, 지반 변형거동의 분석에 적용이 가능할 것으로 판단됨.

$$y = 15.832x - 2.3483 \quad (3)$$

$$y = 9.867x - 1.1974 \quad (4)$$

(다) 발파실험 사면 조성

- 암반사면에서 록볼트 센서의 성능을 검증하기 위해 강원도 횡성군 횡성읍 학곡리에 위치한 암반사면에 천공 후 록볼트 센서 설치 후 붕괴 실험을 수행하였음(그림 2.55 참조).
- 본 연구에서의 암반사면은 높이 8.0m 경사는 $55^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 로 전체적인 풍화도는 보통풍화(M.W)가 우세하며, 상부비탈면은 수평으로 완만한 형상으로 실험발파 사면 조성을 위해 장약위치 0.5m, 센서 설치 위치 3.6m, 4.2m, 5.1m 높이에 천공을 실시하였음(그림 2.56 참조).



그림 2.55 Construction of model slope



그림 2.56 Cross section view of model slope

(라) 얼라이브 록볼트 설치

- 그림 2.74와 같이 센서 설치 위치 3.6m, 4.2m, 5.1m 높이에 IoT Client가 장착된 GFRP Strain Sensor와 통신케이블이 연결 가능한 GFRP Strain Sensor를 수직간격 0.9m, 0.6m, 수평간격 0.6m로 설치하였음(그림 2.75 참조).



그림 2.57 얼라이브록볼트, 통신케이블 연결

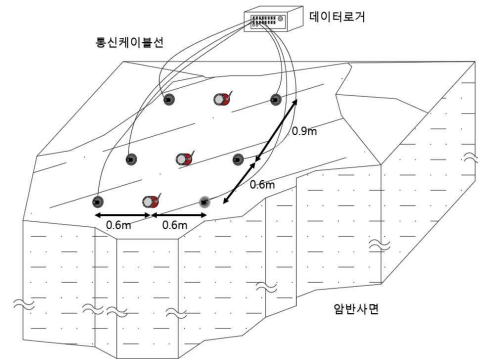


그림 2.58 암반사면 모형

- 그림 2.59와 같이 1㎡당 시멘트 880kg, 물 730 l 의 비율로 시멘트밀크를 제작하였으며 소성수축 및 침전현상 방지를 위해 팽창제를 시멘트 중량의 1% 첨가한 뒤 센서가 설치된 위치에 시멘트 밀크를 주입하였음(그림 2.60 참조).



그림 2.59 시멘트밀크 제작



그림 2.60 시멘트밀크 주입

- 그림 2.61은 시멘트 밀크 시공 후 암반사면에 설치된 센서 전경을 나타냄.



그림 2.61 GFRP 변위센서 설치 전경

- 그림 2.62와 같이 사면 붕괴시 센서로부터의 데이터는 상단부 데이터 케이블 통하여 Data logger에 연결하여 계측데이터를 수집하는 방법과 그림 2.63과 같이 IoT Client와 Lora통신망을 통해 Gateway로 계측데이터를 자동으로 수집하는 방법을 비교·분석하였음.



그림 2.62 Data logging system



그림 2.63 Gateway

(마) 암반사면 붕괴실험

- 본 연구에서는 그림 2.64와 같이 지반에서 50cm 높이에 천공 및 장약 후 암반사면 안쪽에서 발파하여 암반사면의 붕괴거동을 관찰하였으며 발파는 같은 천공 위치에서 총 3번 나눠서 발파하였고 각 발파마다 30분 동안 데이터 수집을 하였음.

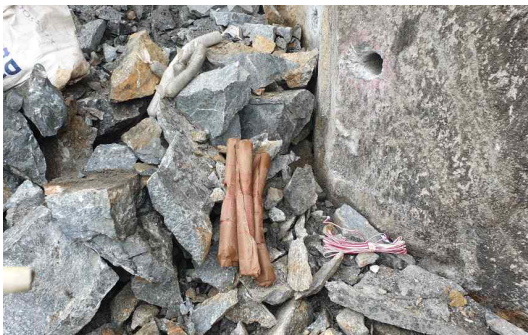


그림 2.64 다이너마이트 장약

- 그림 2.65는 첫 번째 발파 시 센서 설치 우측 암반사면이 발파의 영향으로 무너지는 것을 보여주며, 그림 2.66은 두 번째 발파 전경으로 이 때 변위센서가 설치 된 맨 하단부에 암석이 무너지면서 일부 GFRP 변위센서의 케이블선이 끊어짐.
- 그림 2.67은 세 번째 발파 전경으로 좌측 암반사면이 무너지면서 센서가 설치된 사면 좌측으로 커다란 크랙이 발생하였고 발파의 충격으로 의해 두 번째 가운데 IoT Client가 떨어져서 파손 되었으며 그림 2.68은 발파실험 후 전경을 나타냄.



그림 2.65 첫 번째 발파 실험



그림 2.66 두 번째 발파 실험



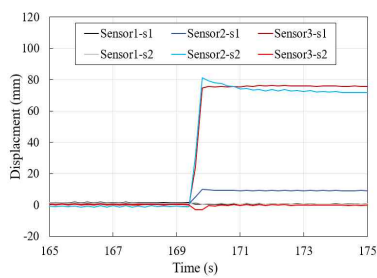
그림 2.67 세 번째 발파 실험



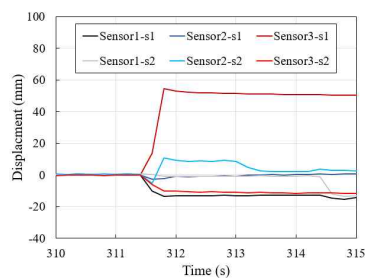
그림 2.68 발파실험 후 전경

(바) 실험 결과 및 고찰

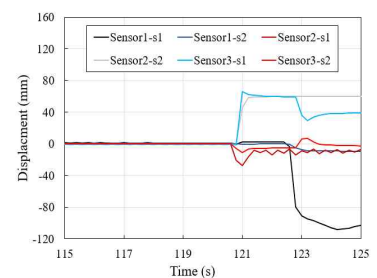
- 그림 2.69는 데이터로거를 통해 얻은 발파 실험에서의 시간 경과에 따른 변위를 나타내며, 표 2.15는 데이터로거를 통해 얻은 발파 실험에서의 시간 경과에 따른 변위값을 나타냄.
- 표 2.15에서 첫 번째 발파 이후 변위값은 Sensor1 s1, s2는 모두 -1mm로 나타났으며, Sensor2 s1, s2는 +4.23mm, +82.27mm, Sensor3 s1, s2는 +41.61mm, -3.04mm의 변위가 발생하였음.



(a) 첫 번째 발파



(b) 두 번째 발파



(c) 세 번째 발파

그림 2.69 사면붕괴 실험 결과

표 2.15 데이터로거를 통해 얻은 변위값 데이터

분류		3차 발파 전 변위			3차 발파 후 변위			발파전후 변위 차		
		sensor1	sensor2	sensor3	sensor1	sensor2	sensor3	sensor1	sensor2	sensor3
1차 발파	s1	+2.46	+0.07	+0.93	-91.09	-27.62	66.22	-93.55	-27.69	+65.29
	s2	+0.02	-0.57	-4.77	-8.80	+59.04	+6.07	-8.82	+59.61	+10.84
2차 발파	s1	0	+0.84	+0.05	-10	1.40	54.56	-10.0	+0.56	+54.51
	s2	+0.19	-5.07	-0.05	-0.58	10.92	-10.07	-0.77	+15.99	-10.02
3차 발파	s1	+2.46	+0.07	+0.93	-91.09	-27.62	66.22	-93.55	-27.69	+65.29
	s2	+0.02	-0.57	-4.77	-8.80	+59.04	+6.07	-8.82	+59.61	+10.84

- 발파 이후 계측 후 변위가 더 이상 발생하지 않는 것을 확인하고 30분간 대기 후 두 번째 발파를 실시하였으며. 두 번째 발파, 세 번째 발파시 Sensor값의 변위값을 0점으로 제로셋 시킨 후 변위를 관측하였음.
- 두 번째 발파 이후 변위값을 보면 Sensor1 s1, s2는 -10.0mm, -0.77mm, Sensor2 s1, s2는 +0.56mm, +15.99mm, Sensor3 s1, s2는 +54.51mm, -10.02mm의 변위가 발생하였으며, 세 번째 발파 이후 변위값은 Sensor1 s1, s2는 -93.55mm, -8.82mm, Sensor2 s1, s2는 -27.69mm, +59.61mm, Sensor3 s1, s2는 +65.29mm, +10.84mm의 변위가 발생하였음.
- 두 번째 발파, 세 번째 발파 시 GFRP 록볼트의 변위 방향은 첫 번째 발파 시와 동일한 방향으로 변위가 발생했다는 것을 확인할 수 있었음.
- 그림 2.70 및 표 2.16은 IoT Client를 통해 얻은 암반사면 발파 실험에서의 시간 경과에 따른 변위를 나타내며, 첫 번째 발파 이후 변위값은 Sensor1 s1, s2는 +14.1mm, -44.13mm 변위가 발생하였으며, Sensor2 s1, s2는 +27.56mm, -6.98mm의 변위가 발생하였음.
- 센서 고장 및 오작동에 대한 보수 방안을 추가적으로 검토하겠음

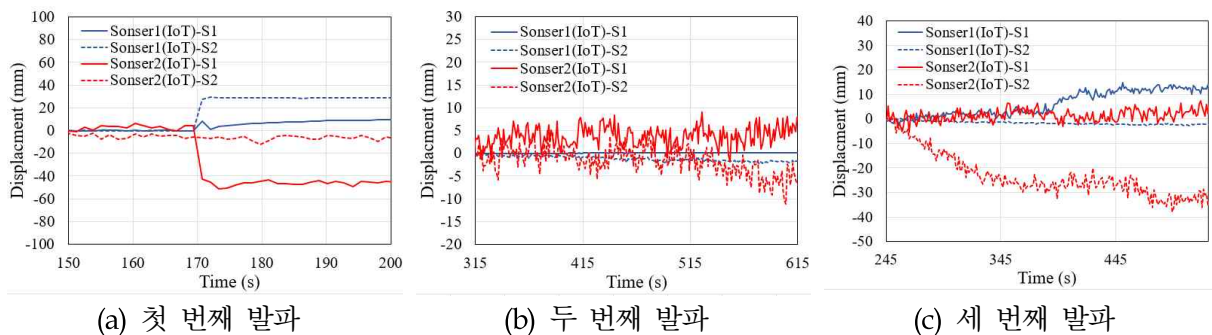


그림 2.70 사면붕괴 실험 결과

표 2.16 IoT Client를 통해 얻은 변위값 데이터

분류		발파 전 변위		발파 후 변위		발파전후 변위 차	
		senser1	senser2	senser1	senser2	senser1	senser2
1차 발파	s1	0.0	0.0	+14.1	-44.13	+14.1	-44.13
	s2	0.24	-2.52	+27.8	-9.5	+27.56	-6.98
2차 발파	s1	0.0	0.0	+0.1	+7.11	+0.1	+7.11
	s2	0.1	+0.1	-2.12	-7.09	-2.22	-7.19
3차 발파	s1	0.0	0.0	+13.4	+7.01	+13.4	+7.01
	s2	0.14	+0.13	-2.43	-32.28	-2.57	-32.41

- 두 번째 발파 이후 변위값을 보면 Sensor1 s1, s2는 +0.1mm, -2.22mm, Sensor2 s1, s2는 +7.11mm, -7.19mm의 변위가 발생하였다. 세 번째 발파 이후 변위값은 Sensor1 s1, s2는 +13.4mm, -2.57mm, Sensor2 s1, s2는 +7.01mm, -32.41mm의 변위가 발생하였음.
- 데이터로거를 통한 데이터와 얼라이브 록볼트 시스템을 통한 데이터가 값의 스케일링에 따라 차이가 있지만 대략적으로 유사한 패턴의 그래프를 그리는 것을 알 수 있으며, 이는 본 시스템이 암반사면 거동 및 전조정보 전달이 가능한 계측 시스템임을 확인하였음.

(사) 소결

- 통신케이블을 통해 얻은 변위값을 보면 첫 번째 발파 시 Sensor1~Sensor3까지 s1, s2의 변위값은 -1.00mm, -1.00mm/+4.23mm, +8.27mm/+41.61mm, -3.04mm, 두 번째 발파 시 -10.0mm, -0.77mm/+0.56mm, +15.99mm/+54.51mm, -10.02mm, 세 번째 발파 시 -93.55mm, -8.82mm/-27.69mm, +59.61mm/+65.29mm, +10.84mm로 나타났음.
- IoT Client를 통해 얻은 변위값을 보면 첫 번째 발파 시 Sensor1~Sensor3까지 s1, s2의 변위값은 +14.1mm, +27.56mm/-44.13mm, -6.98mm, 두 번째 발파 시 +0.1mm, -2.22mm/ +7.11mm, -7.19mm, 세 번째 발파 시 +13.4mm, -2.57mm/+7.01mm, -32.41mm를 기록함.
- 발파 시험 결과, GFRP 변위센서로 무선 계측이 가능하였으며, 실시간으로 변위를 감지하여 모니터링이 가능한 것으로 나타나 암반사면 예·경보 시스템 구축이 가능한 것으로 확인됨.

(5) 수치해석을 이용한 얼라이브 록볼트 시스템의 성능 평가

(가) 실험방법 및 계측 데이터

- 모델사면은 높이 8.0m, 경사는 55° ~75° 로 전체적인 풍화도는 보통풍화(M.W)가 우세하고,

상부비탈면은 수평으로 완만한 형상이며 발파실험을 위해 장약 위치 0.5m, 센서 설치 위치 3.6m, 4.2m, 5.1m 높이에 천공을 실시함(그림 2.71 참조).

- 센서 설치 위치 3.6m, 4.2m, 5.1m 높이에 IoT Client가 장착된 GFRP 변위센서와 통신케이블이 연결된 GFRP 변위센서를 수직간격 0.9m, 0.6m, 수평간격 0.6m로 설치함(그림 2.72 참조).

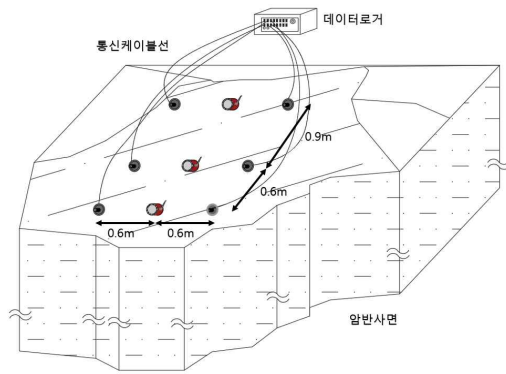


그림 2.71 암반비탈면 모형



그림 2.72 암반비탈면 전경

(나) 현장발파시험 수치해석

① 경계조건 및 해석모델

- 대상구조물에 비하여 주변 매질 영역이 상대적으로 더 큰 경우, 이들 상호간에 미치는 영향을 고려하기 위해서, MIDAS GTS NX의 점성경계는 경계에 일정한 각도를 갖는 물질파를 흡수할 수 있는 경계조건이므로 해석하려는 구간의 하나의 요소가 무한대 방향으로 퍼져나가는 응력파의 외부영역 거동을 잘 묘사할 수 있음.
- 따라서 대상 구조물 및 주변 지반 모델링시 MIDAS GTS NX에서 지원하는 경계조건인 점성경계를 적용하여 발파하중의 소산 영향을 고려하였음.

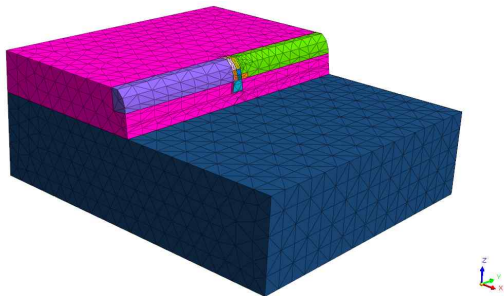


그림 2.73 해석모델

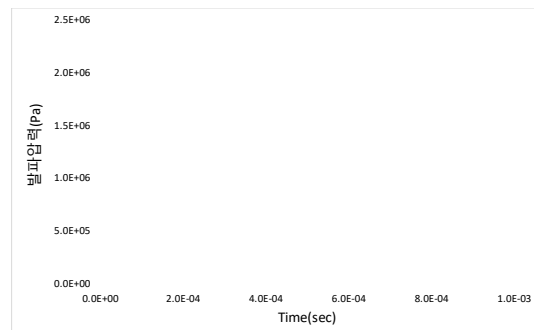
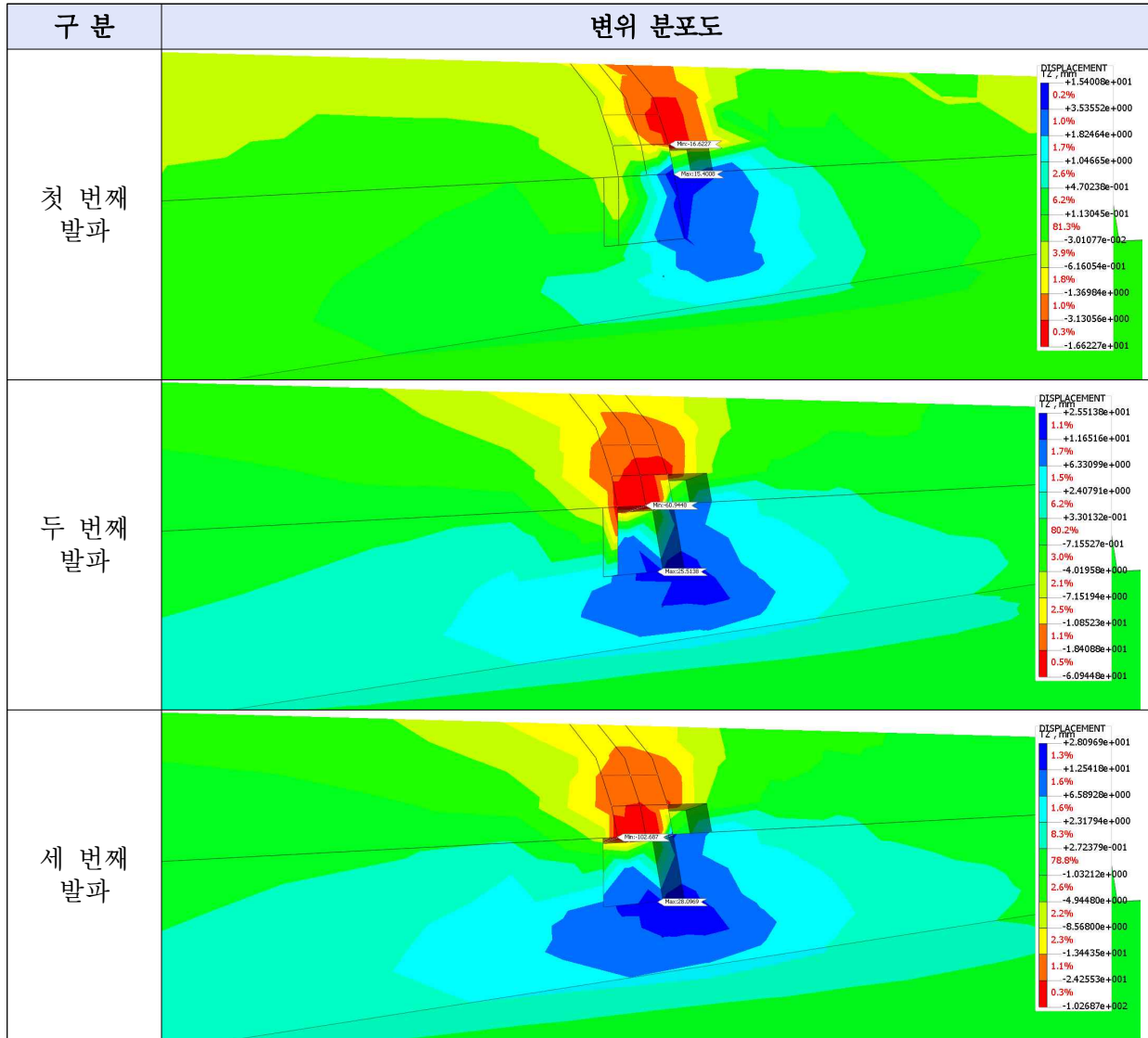


그림 2.74 발파하중

② 해석결과

㉦ 변위 분포도

표 2.17 발파에 따른 변위분포도



㉧ 변위 시간이력 결과

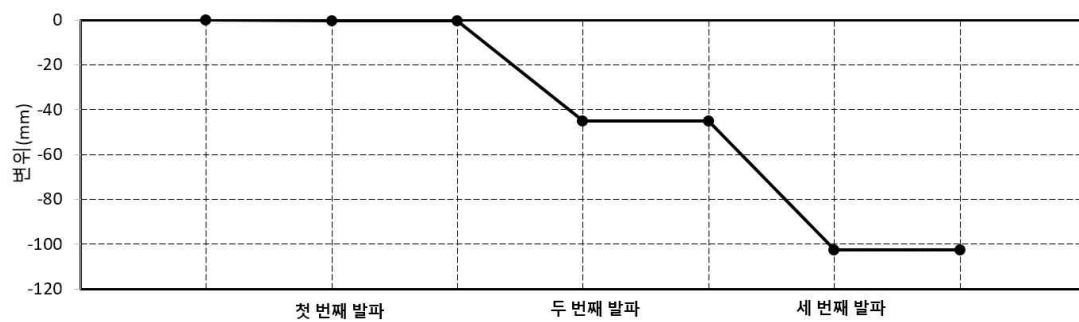


그림 2.75 발파하중

- 첫 번째 발파에서의 변위가 약 16mm, 두 번째 발파에서의 변위가 약 61mm, 세 번째 발파에서의 변위가 약 102mm로 나타났으며 현장발파시험을 통한 계측 결과와 잘 부합하는 것으로 판단됨(표 2.17, 표 2.18, 그림 2.75 참조).

표 2.18 IoT Client를 통해 얻은 변위값 데이터

분류		3차 발파 전 변위			3차 발파 후 변위			비고		
		sensor1	sensor2	sensor3	sensor1	sensor2	sensor3	sensor1	sensor2	sensor3
1차 발파	s1	+2.46	+0.07	+0.93	-91.09	-27.62	66.22	-93.55	-27.69	+65.29
	s2	+0.02	-0.57	-4.77	-8.80	+59.04	+6.07	-8.82	+59.61	+10.84
2차 발파	s1	0	+0.84	+0.05	-10	1.40	54.56	-10.0	+0.56	+54.51
	s2	+0.19	-5.07	-0.05	-0.58	10.92	-10.07	-0.77	+15.99	-10.02
3차 발파	s1	+2.46	+0.07	+0.93	-91.09	-27.62	66.22	-93.55	-27.69	+65.29
	s2	+0.02	-0.57	-4.77	-8.80	+59.04	+6.07	-8.82	+59.61	+10.84

(라) Parameter 해석

① Parameter 해석에 따른 영향 검토

- 본발파에 영향을 미치는 인자 및 변수를 분석하기 위한 해석을 수행하였으며, 지반의 탄성계수, 점착력, 내부마찰각, 단위중량을 원지반 물성치를 기준으로 10%씩 감소시켜 각 Case 별로 해석을 수행하여 발파속도에 미치는 영향을 비교·분석하였음.
- 매개변수는 동탄성계수, 내부마찰각, 점착력, 단위중량을 표 2.19에 나타낸 바와 같이 총 24 Case로 구분하여 수치해석을 수행하였음.

표 2.19 매개변수 설정

구 분	원지반	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
동 탄 성 계 수(MPa)	7600	6840	6080	5320	4560	3800	3040
구 분	원지반	Case 7	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12
내 부 마 찰 각 (°)	34	31	27	24	20	17	14
구 분	원지반	Case 13	Case 14	Case 15	Case 16	Case 17	Case 18
점 착 력 (k P a)	300	270	240	210	180	150	120
구 분	원지반	Case 19	Case 20	Case 21	Case 22	Case 23	Case 24
단 위 중 량(kN/m ³)	23	21	18	16	14	12	10

② 동탄성계수 변화에 따른 발파해석 결과

㉓ 진동속도 분포도

표 2.20 진동속도 분포도 (Case 1~3)

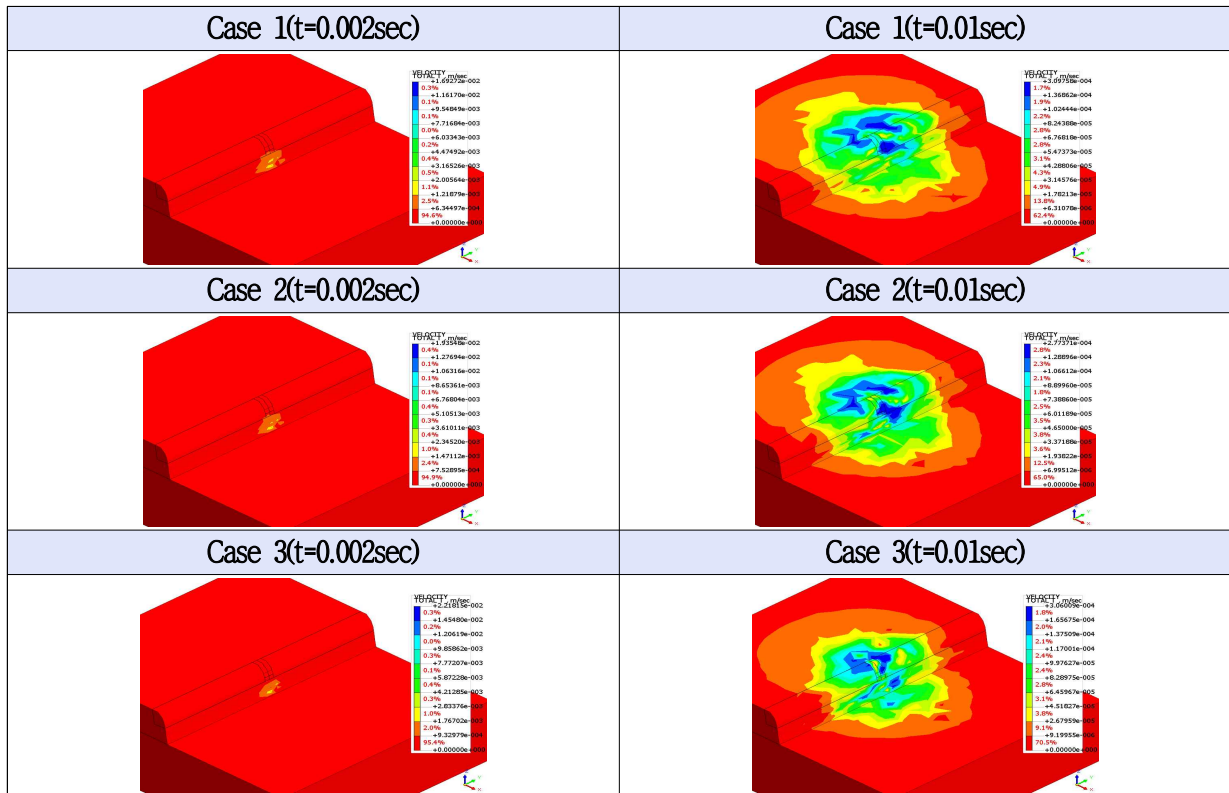
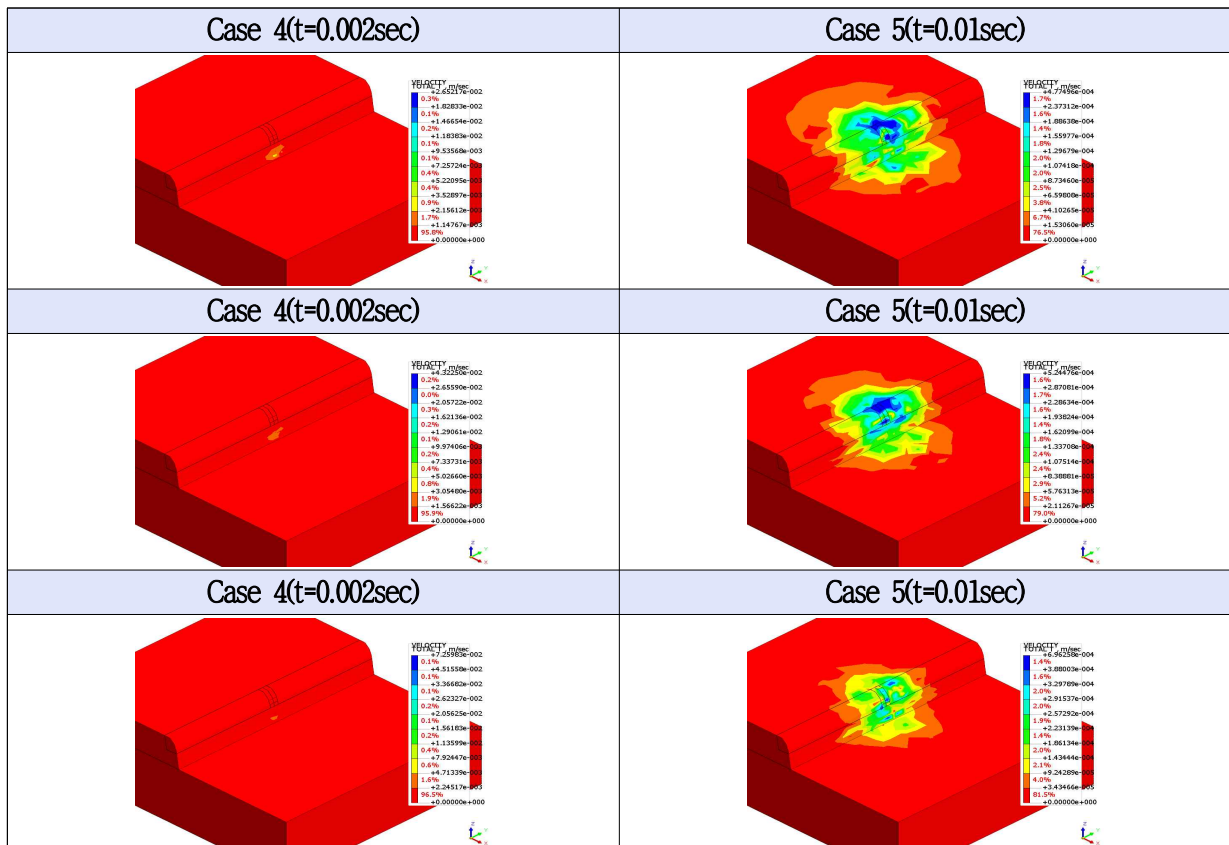


표 2.21 진동속도 분포도 (Case 4~6)



㉞ 속도시간이력 결과

표 2.22 속도시간이력 결과 (Case 1~6)

Case 1	Case 2
Case 3	Case 4
Case 5	Case 6

㉞ 내부마찰각 변화에 따른 발파해석 결과

㉞ 진동속도 분포도

표 2.23 진동속도 분포도 (Case 7~9)

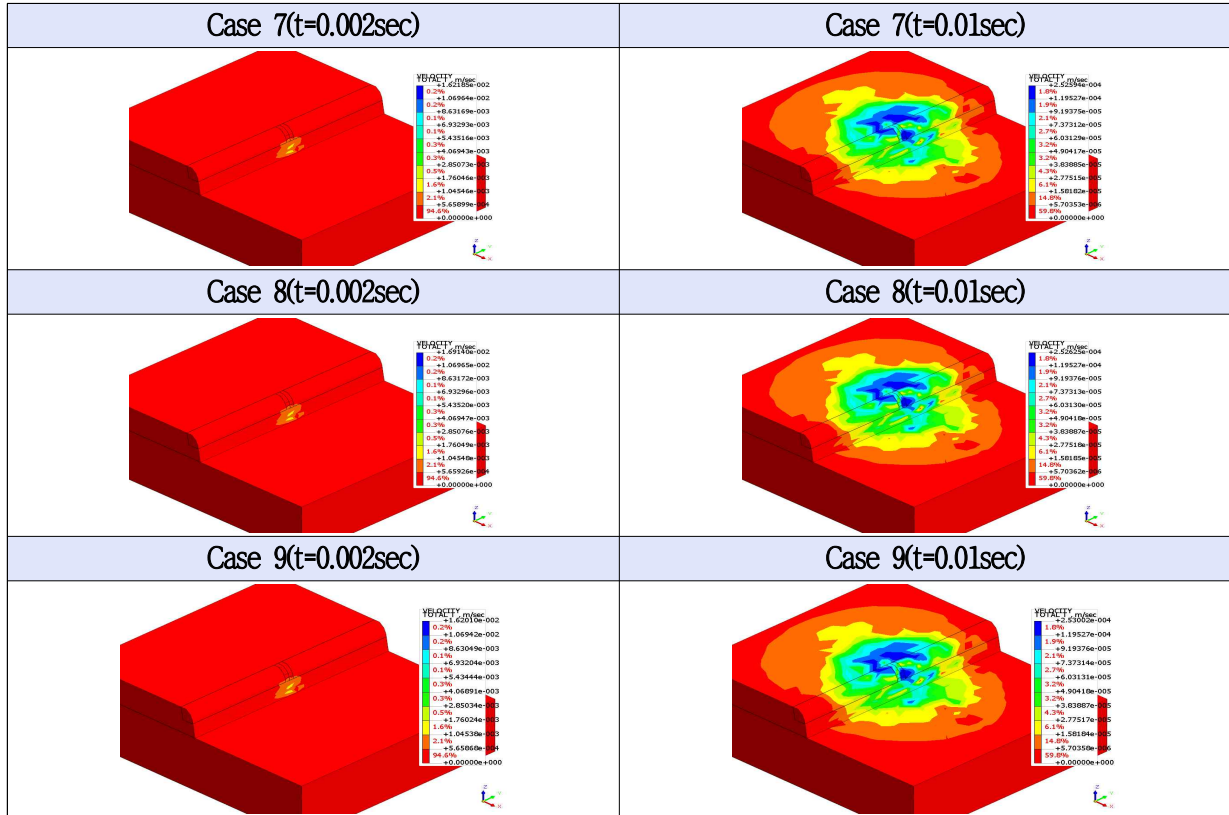
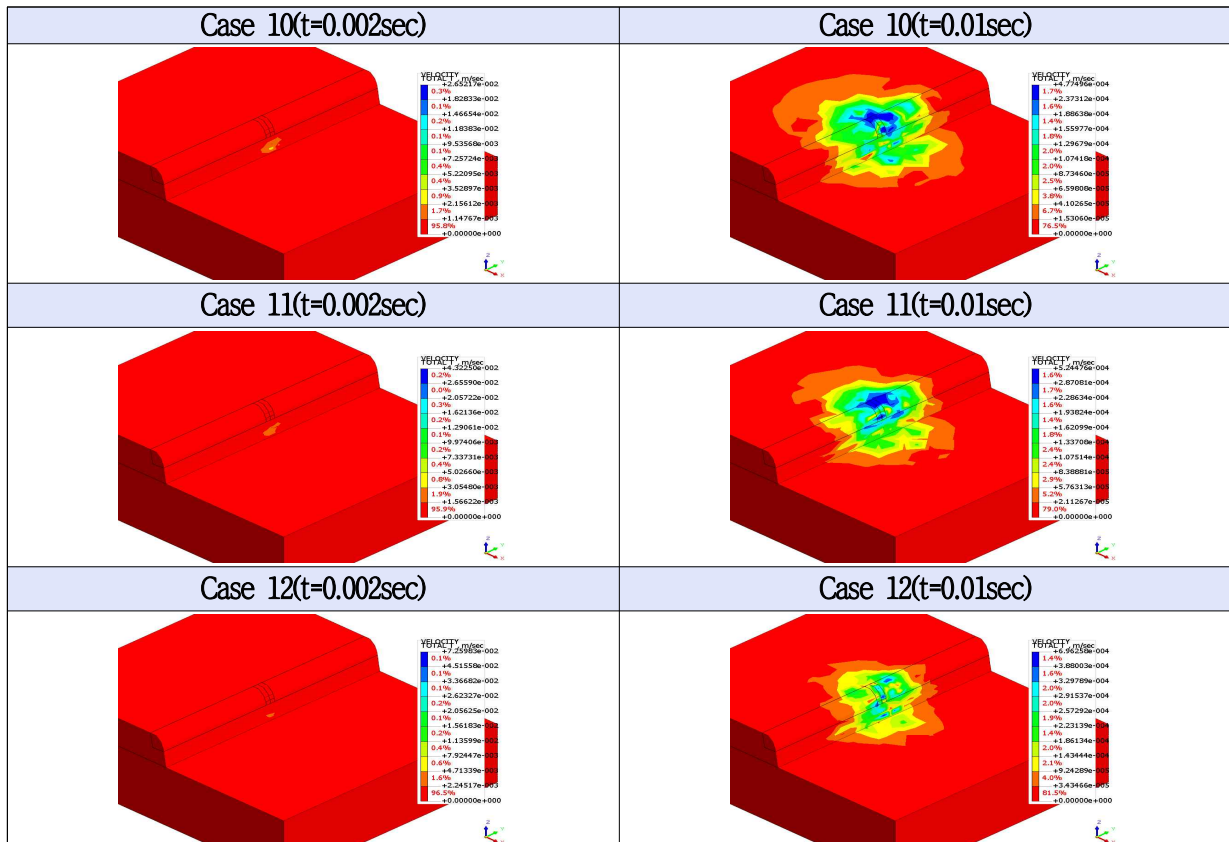


표 2.24 진동속도 분포도 (Case 10~12)



㉞ 속도시간이력 결과

표 2.25 속도시간이력 결과 (Case 7~12)

Case 7	Case 8
Case 9	Case 10
Case 11	Case 12

㉟ 점착력 변화에 따른 발파해석 결과

㊱ 진동속도 분포도

표 2.26 진동속도 분포도 (Case 13~15)

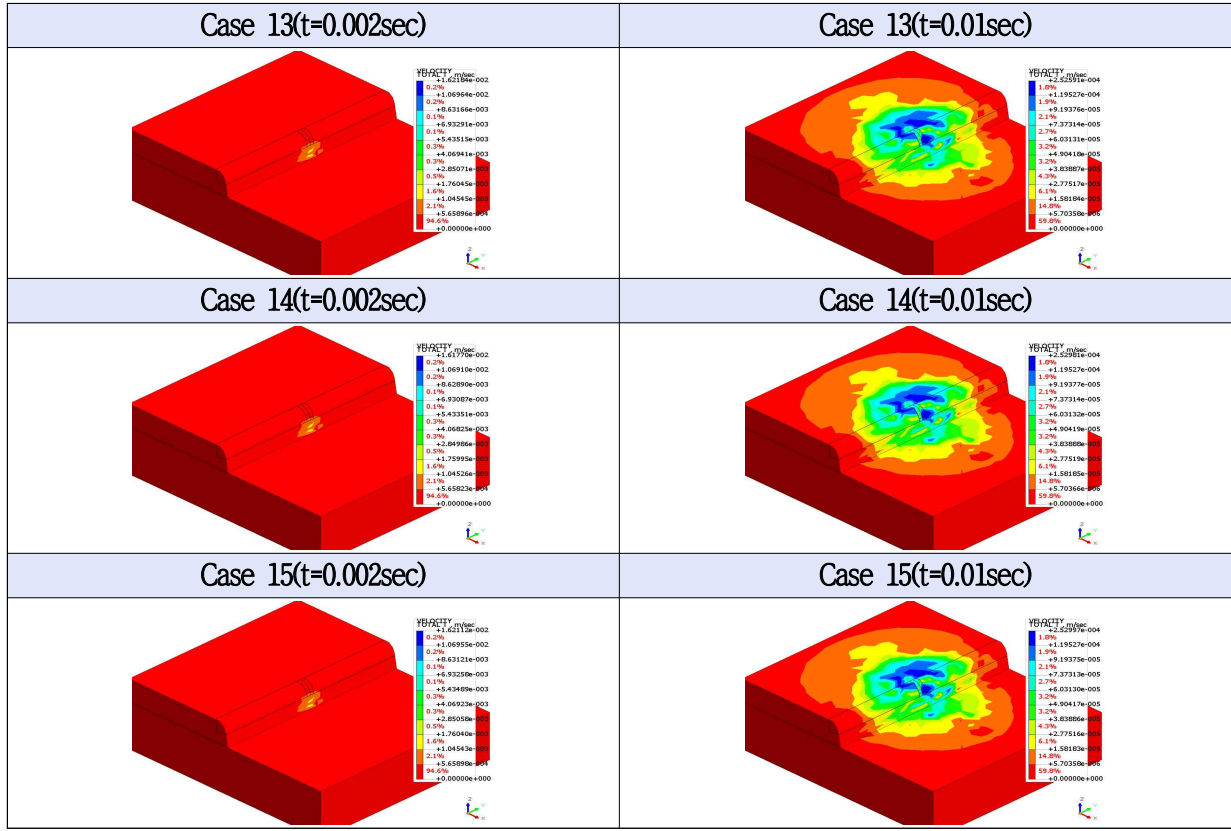
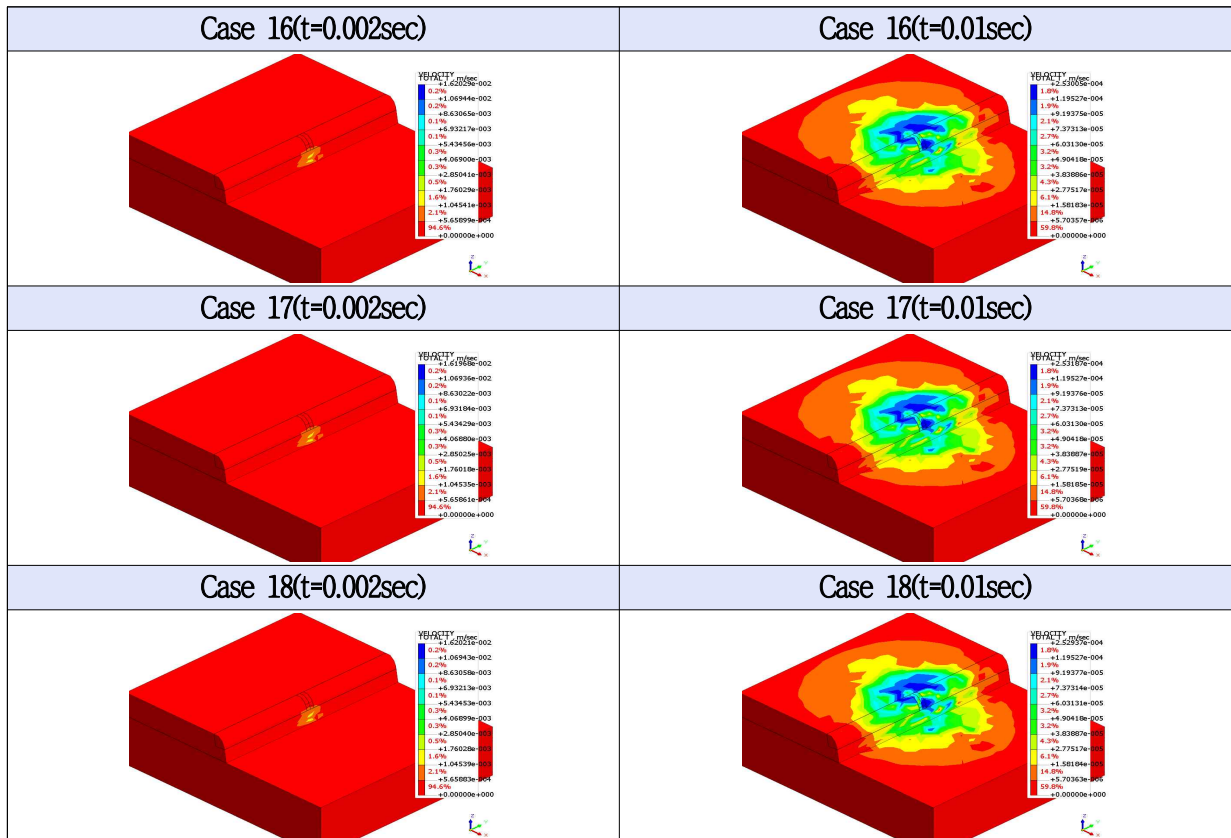
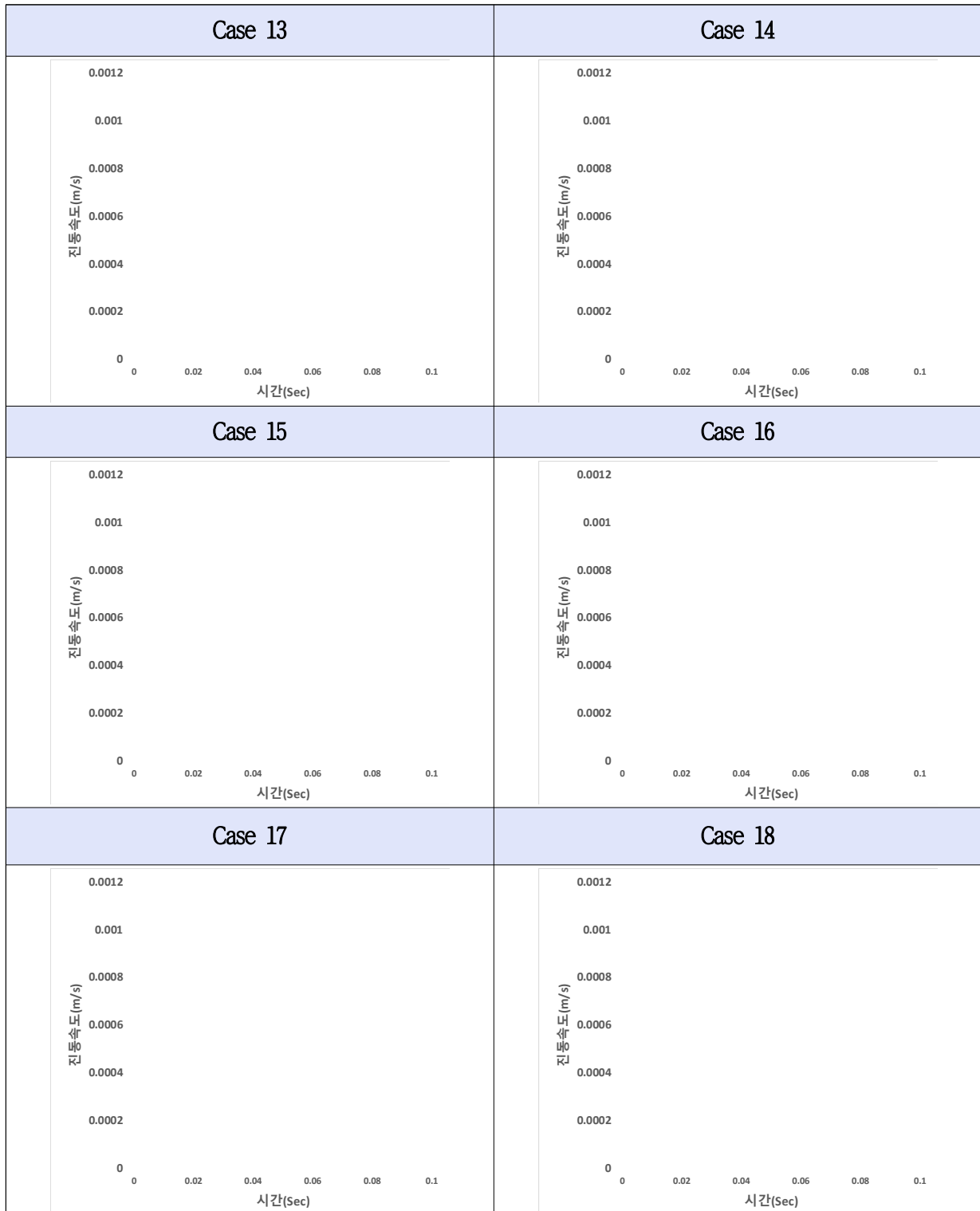


표 2.27 진동속도 분포도 (Case 16~18)



㉞ 속도시간이력 결과

표 2.28 속도시간이력 결과 (Case 13~18)



㉟ 단위중량 변화에 따른 발파해석 결과

㊱ 진동속도 분포도

표 2.29 진동속도 분포도 (Case 19~21)

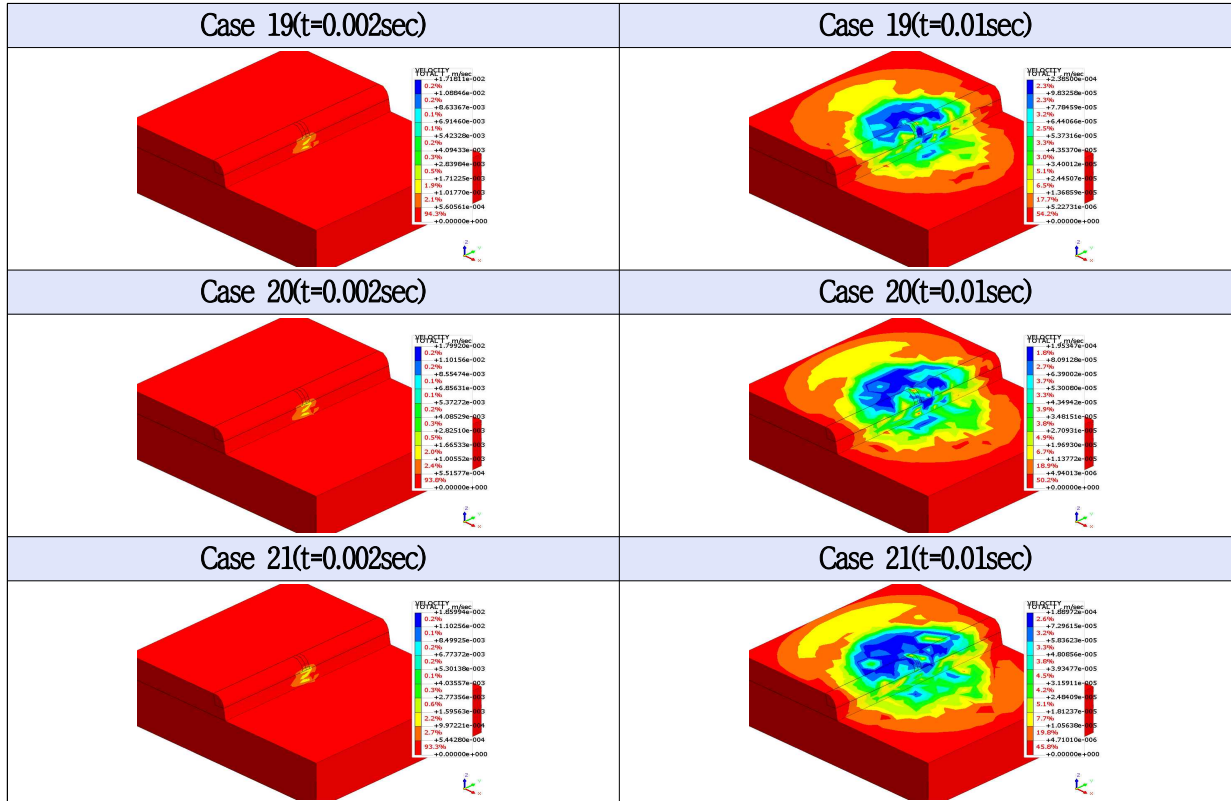
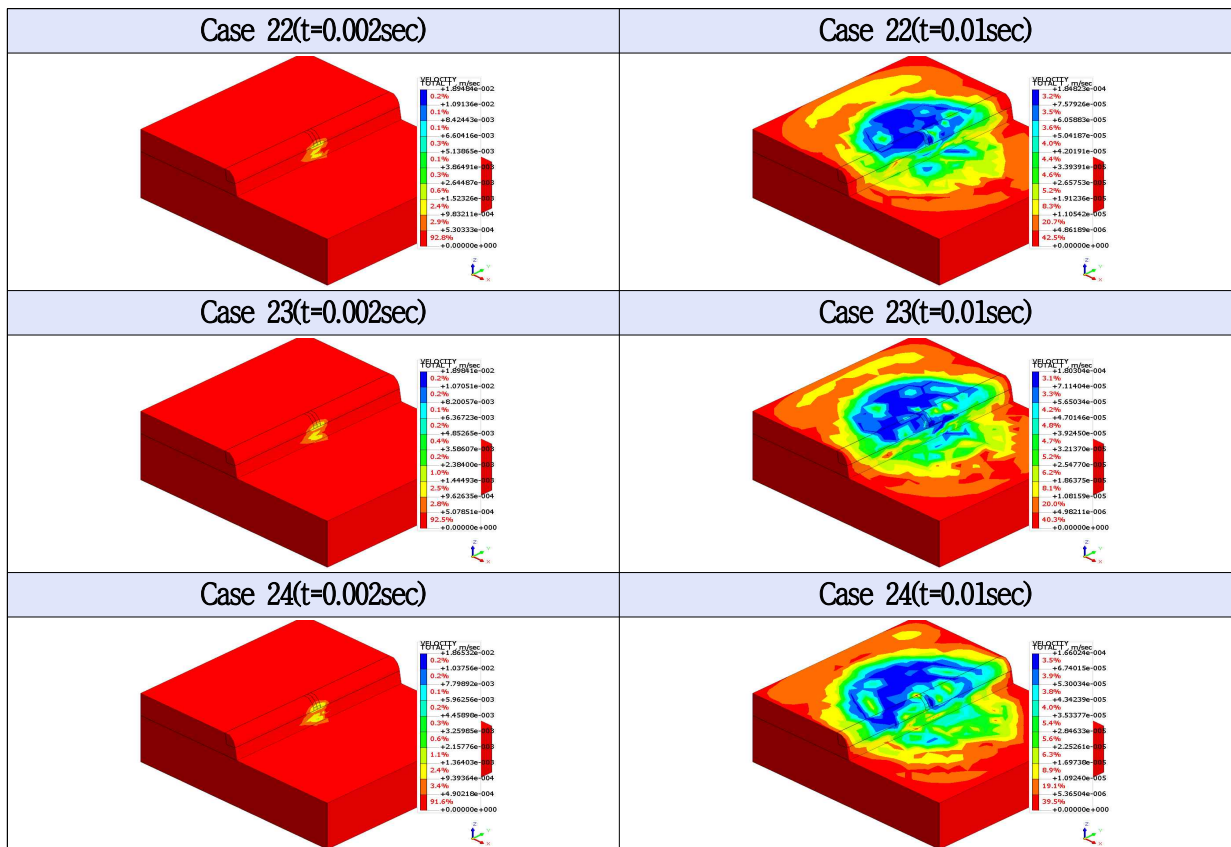


표 2.30 진동속도 분포도 (Case 22~24)



㉞ 속도시간이력 결과

표 2.31 속도시간이력 결과 (Case 19~24)

Case 19	Case 20
Case 21	Case 22
Case 23	Case 24

⑦ 최대 진동 속도 결과

표 2.32 Case별 최대 진동 속도 결과

구 분	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
동탄성계수 변경	0.001041	0.001079	0.001081	0.001206	0.001230	0.001377
구 분	Case 7	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12
내부마찰각 변경	0.000973	0.000974	0.000974	0.000971	0.000971	0.000971
구 분	Case 13	Case 14	Case 15	Case 16	Case 17	Case 18
점착력 변경	0.000972	0.000972	0.000973	0.000971	0.000973	0.000973
구 분	Case 19	Case 20	Case 21	Case 22	Case 23	Case 24
단위중량 변경	0.001007	0.001111	0.001207	0.001280	0.001300	0.001480

⑧ 결과 분석

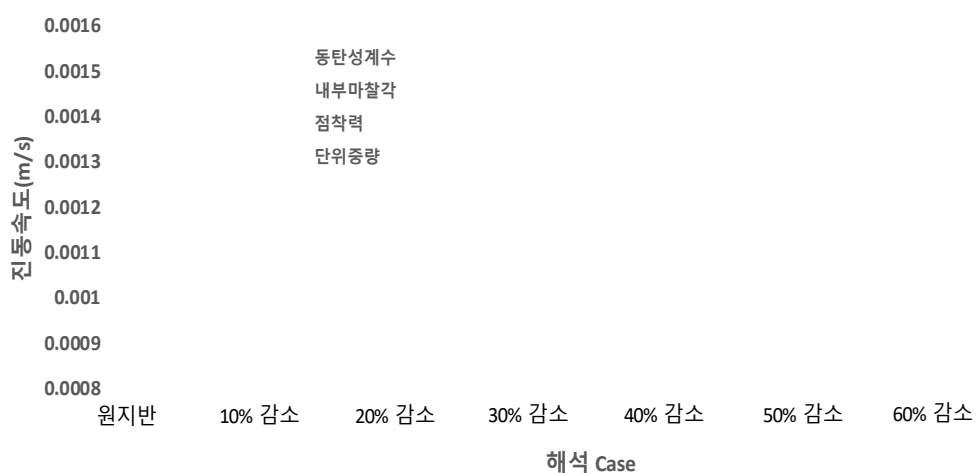


그림 2.76 진동속도 결과분석

- 표 2.20~표 2.32와 그림 2.76에서 볼 수 있듯이 동탄성계수 변화에 따른 진동속도 분석 결과, 동탄성계수가 감소할수록 진동속도는 증가하는 경향을 나타냈으며 동탄성계수가 60% 감소 시에는 진동속도가 원지반 대비 약 42%가 증가하는 경향을 보임.
- 또한, 내부마찰각과 점착력의 변화에 따른 진동속도 분석 결과, 내부마찰각과 점착력이 감소 하더라도 진동속도는 크게 변하지 않는 경향을 보임.
- 단위중량 변화에 따른 진동속도 분석 결과, 단위중량이 감소할수록 진동속도가 증가하는 경향을 나타내며, 단위중량이 60% 감소 시에는 진동속도가 원지반 대비 약 52%가 증가하는 경향을 보임.

(마) 소결

- 3차원 유한요소 모델을 작성하여 수치해석을 실시한 결과, 첫 번째 발파에서 센서위치의 최대 변위는 약 16mm, 두 번째 발파에서에서 센서위치의 최대변위는 약 61mm, 세 번째 발파에서 센서위치의 최대 변위는 약 102mm로 나타났으며 통신 케이블을 통해 얻은 변위 계측결과와 잘 부합하는 것으로 나타남.
- 동탄성계수에 대한 매개변수 해석 결과, 동탄성계수가 점차 감소할수록 진동속도는 증가하는 경향을 나타내는 것으로 보이며, 동탄성계수가 60% 감소시에는 진동속도가 0.001377m/sec로 나타나며 원지반과 비교하였을 때 진동속도가 약 42% 증가하는 경향을 보임.
- 단위중량에 대한 매개변수 해석 결과, 단위중량이 점차 감소할수록 진동속도는 증가하는 경향을 나타내며, 단위중량이 60% 감소시에는 진동속도가 0.001480m/sec로 나타나고 원지반과 비교하였을 때 진동속도가 약 52% 증가하는 경향을 보이며 단위중량의 변화가 발파 후 매질의 진동속도에 영향을 가장 크게 미치는 매개변수인 것으로 판단됨.
- 점착력과 내부마찰각에 대한 매개변수 해석 결과, 점착력과 내부마찰각의 인자들을 점차 감소시키더라도 진동속도가 원지반의 진동속도와 차이가 크게 나지 않는 것으로 나타났기 때문에 점착력과 내부마찰각이 진동속도에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단됨.

(6) 얼라이브 록볼트 시스템의 관리 기준

(가) 사면 변형의 관리기준의 현황 분석

① 국내의 사면 변형의 관리 기준

- 사면 변형의 관리기준에 관해서는 많은 보고가 있으나 그 설정값 및 조치 내용을 살펴보면 비교적 근사한 범위로 제시되고 있는데, 사면 변형의 관리기준은 대부분 변위속도를 이용한 방법이며 여러 기관의 값을 표 2.33~표2.36과 같이 정리하였음.

표 2.33 사면의 유지관리 계측 관리기준 (국내도로)

대응구분 계기구분 과 계측기		점검 · 주의 또는 관측강화	대책의 검토	경계 · 응급대책	엄중경계 · 일시대피
신 축 계	지표면의 변위속도	5mm이상/ 10일	5~50mm/5일	10 μ 100mm 이상/10일	1mm이상/ 일
지중신축계					
광 파 계					
삽입형 지중경사계	활동면 부근의 변위속도	1mm이상/ 10일	5~50mm/5일		

표 2.34 상시 계측시스템 결과에 대한 운용 (국토교통부)

구분 종류	점검위주 /관측강화	대책검토	경계 / 응급 대책	엄중경계 / 일시대피
지반 변위 감지 센서류	> 100mm 변위 발생(월)	5~50mm 변위발생(5일간)	10~100mm 변위발생(1일간)	> 100mm 변위발생(1일간)
강우계	시우량 30mm 이상시 집중관리			

표 2.35 낙석계측시스템 운영매뉴얼의 관리기준치 (국립공원관리공단)

구분	단계	변위량(경사)	조치
변위계 (경사계)	관심 단계	평상시	- 정기 · 수시점검 (계속관찰)
	주의 단계	- 변위 5mm미만 발생 시 (2Deg 미만)	- 현장점검, 모니터링 강화 (계속관찰, 낙석탈락 검토)
	경계 단계	5mm이상 변위 (2deg 이상 경사 발생 시)	- 정밀조사, 대책방안검토 (계속관찰, 낙석탈락 검토)
	심각 단계	10mm이상 변위 (3deg 이상 경사 발생 시)	일시통제, 응급대책 마련

표 2.36 지표면변위 관리기준(급경사지 상시계측관리 센서 및 계측장비설치 · 운영 가이드라인(국민안전처, 2012))

항목	관리기준	
변위	주의(1개 이상 해당 시)	최근 24시간 이내 10~20mm 이상의 지표면 및 지중변위 발생 최근 5일 25mm 이상의 지표면 및 지중변위 발생
	심각(1개 이상 해당 시)	최근 24시간 이내 20~50mm 최근 15일 누적변위량이50mm 이상 초과 발생
	경보(1개 이상 해당 시)	최근 1시간 이내 10mm 이상 지표/지중변위 발생 최근 6시간 이내 30mm 이상 지표/지중변위 발생 최근 24시간 이내 50mm 이상의 지표/지중변위 발생

- 유병선 (2006)은 계측자료의 분석을 통해 실시간으로 위험상황을 확인하여 보강시기, 붕괴 시간 및 대피여유시간 등을 예측할 수 있는 실시간 자동 유지관리 기준치 산정에 관해 수학적 및 통계적 해석기법을 이용하여 변위속도 관리기준치를 표 2.37과 같이 제안하였음.

표 2.37 실시간 사면붕괴 위험경보 체계를 위한 변위속도 관리기준치 (유병선, 2006)

구분	변위속도 (mm/day)	관리방법
1단계	13.82	안정
2단계	18.60	경고
3단계	56.38	보강
4단계	94.15	대비

② 국외의 지표변위의 관리기준

- 변위각에 대한 관리기준치는 운영주체에서 구조물의 내적 및 외적 조건 변동을 고려하여 매년 변경할 수 있는데, 사면 보강용 구조물의 경우 $1/250 \sim 1/500 (0.115 \sim 0.229 \text{deg})$ 범위에서 관리하는 하는게 적절한 것으로 판단됨.
- 암반 사면의 경우 매우 작은 움직임도 위험한 경우가 많기 때문에 계측에 대한 높은 정도가 요구되는데, 구조물 각 변위 한계(Bjerrum 1963)에서 균열을 허용할 수 없는 한계 $0.002H (H : \text{심도기준})$ 의 80%를 관리기준($0.0016H$)으로 선정하였으나 암반의 거동 특성을 고려하여 미세한 변위가 인지되는 경우에도 계속 변위가 진행되는 경우는 세심한 주의를 기울여야 하며 정확한 원인을 파악하기 위하여 정밀 진단이 요함(그림 2.77 참조).

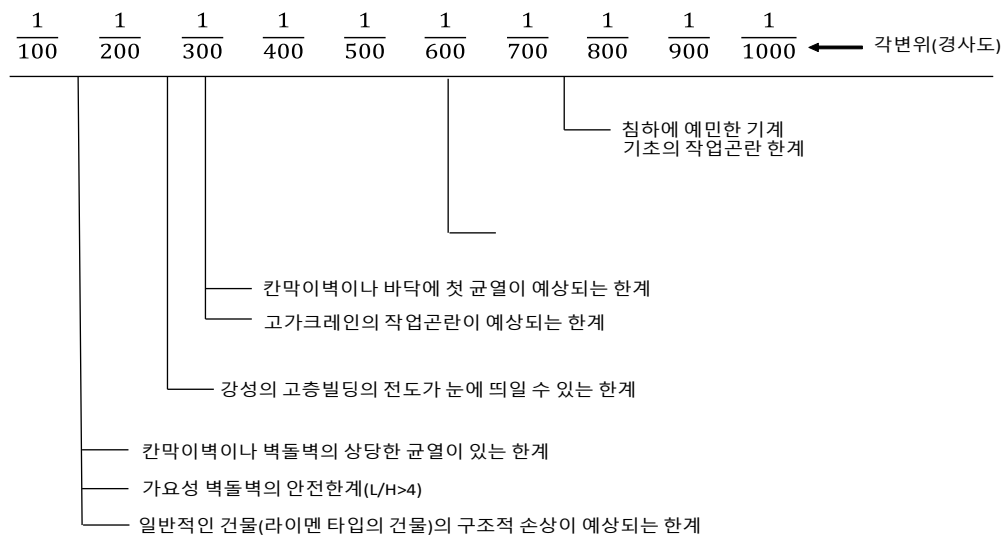


그림 2.77 구조물로 보강된 사면의 구조물에 대한 각변위 한계(Bjerrum, 1963)

- 일본 고속도로조사회(1988)에서 제시한 지표변위 속도 관리기준은 신축계와 광과측거의로부터 구한 변위속도를 대상으로 한 것으로, 경계레벨의 관리기준치는 10~100mm/일, 대피레벨의 관리기준치는 100mm이상/일로 규정함(표 2.38 참조).

표 2.38 일본 고속도로조사회에 의한 관리기준치 (a) 사면파괴 변동 측정 기준(최소치)

구분	관리기준치	비고
사면파괴 변동 측정 기준(최소치)		
신축계		
광과측거		
대피레벨		
경계레벨		
일반 건물		
가요성 벽돌벽		
칸막이벽		

표 2.39 일본 고속도로조사회에 의한 관리기준치 (b) 시공 단계의 관리기준치

대응구분 계기구분과 계측기		점검·주의 또는 관측강화	대책의 검토	경계· 응급대책	엄중경계 및 일시대피
신축계	지표면의 변위 속도	5mm이상/10일	5~50mm/5일	10~100mm/ 일	100mm이상/ 일
지중신축계					
광파측거의					
삼입형 지중경사계	활동면 부근의 변위속도	1mm이상/10일	5~50/5일		
지반경사계	누적치	100 μ 이상	1000~5000 μ		

표 2.40 일본 고속도로조사회에 의한 관리기준치 (c) 유지관리 단계의 관리기준치

대응구분 계기구분과 계측기		점검·주의 또는 관측강화	대책의 검토	경계· 응급대책	엄중경계 및 일시대피
신축계	지표면의 변위 속도	10mm이상/30일	5~50mm /5일	10~100mm/ 일	100mm이상/ 일
지중신축계					
광파측거의					
삼입형 지중경사계	활동면 부근의 변위속도	1mm이상/10일	5~50/5일		
지반경사계	누적치	10~50초/10일			

- 일본 대부분의 기관에서 사용하는 지표변위 속도 관리기준치는 이 값들과 거의 같은 범위인데 이들 기준치는 대부분 산사태의 관리를 위해 제시된 것임(사면안정소위원회, 1996).
- 일본 산사태학회에 의하면 사면의 인장균열 또는 단애(급경사면, scarp)를 가로질러 설치된 지표면 신축계(extensometer)로부터 측정된 데이터를 분석하면 사면붕괴 예측이 가능하며 측정된 변위속도가 2~4mm/hour를 초과하면 대피령이 내려지며(Japan landslide Society, 1996), 이 수치를 일단위로 환산하면 고속도로조사회에서 제시한 대피레벨의 관리기준치와 거의 같음(표 2.41~표 2.43 참조).

표 2.41 사면 유지관리 단계별 관리기준치(일본 사면안정소위원회, 1996)

대응구분 계기구분과 계측기		점검·주의 또는 관측강화	대책의 검토	경계·응급대책	엄중경계 · 일시대피
신 축 계	지표면의 변위속도	5mm이상/ 10일	5~50mm/5일	10~100mm/일	100mm이상/일
지중신축계					
광파측거의					
삼입형 지중경사계	활동면 부근의 변위속도	1mm이상/ 10일	5~50mm/5일		

표 2.42 각 레벨별 지표면 변위속도 관리기준치

구분	지 표 면 변위속도	대응
통상레벨	100mm이상/30일 (3.3mm/day)	점점 유주의, 관측강화, 통상의 시공, 시공관리 체제
주의레벨	5~50mm/5일 (1~10mm/day)	대책공 검토, 관리·계측의 강화, 계측빈도 증가, 주변 조사, 관리기준치
경계레벨	10~100mm/1일 (10~100mm/day)	경계, 응급대책, 시공 중단, 관찰·계측 강화, 계측빈도 증가, 주변조사, 대책공의 재고 시공
대피레벨	100mm이상/1일 (100mm이상/day)	엄중경계, 일시대피, 시공 중지, 통행 정지

표 2.43 각 대응별 지표면 변위값, 경사계 경사도의 관리기준치

구분 (5일누적 1일변위)		지표면 변위값	경사계 경사도	대응
		관리 기준값 (누적변위 50mm)	관리 기준값 (누적경사 30°)	
1차	5일	≤80%(40mm)	≤80%(24°)	안전
	1일	≤60%(6mm)		
2차	5일	80~100%(40~50mm)	80~100%(24~30°)	주의
	1일	60~100%(6~10mm)		
3차	5일	100~120%(50~60mm)	100~120%(30~36°)	경계
	1일	100<(10mm)		

- Martin (1993)은 6개 사례 연구의 변형 데이터 및 파괴 메커니즘에 대한 조사와 문헌 검토를 기반으로 암반사면의 시간 의존적 거동을 설명하는 모델을 개발하였으며, 모델은 변형의 세단계 I: 암석의 초기 반응, II: 변위의 경화, III: 점진적인 파괴로 구분하였음(표 2.44 참조).

표 2.44 암반사면 활동의 변위 기준값 (Martin, 1993)

구분	임계값	거동 설명
I	0.1mm/day (0.004mm/h)	초기 암석의 반응
II	0.2~2mm/day (0.008~0.08mm/h)	변위 경화 (strain hardening)
III	10~100mm/day 또는 100 이상 (0.4~4.1mm/h)	점진적인 파괴

- 표 2.45에서 볼 수 있듯이 국내의 변위속도에 관한 관리기준치들은 일본의 유지관리기준치와 유사하였으며 그 외에 관리기준치들 또한 일본의 관리기준치 값 범위에 모두 포함되는 것을 알 수 있음.

표 2.45 국내외 사면의 유지관리의 변위속도에 관한 관리기준치 비교 (mm/day)

구분		I	II	III	IV
국내	유병선 (2006)	13.82 (안정)	18.60 (경고)	56.38 (보강)	94.15 (대비)
	국립공원관리공단 (낙석 통합관리시스템)	1 미만 (안전)	1 이상 (주의)	10 이상 (경계)	100 이상 (심각)
	국토교통부 (사면 계측시스템)	3.3 미만 (점검)	1-10 (대책검토)	10-100 (경계/응급)	100 이상 (엄중경계/일시 대피)
국외	일본 고속도로조사회	1 이상 (관측 강화)	1-10 (대책검토)	10-100 (경계/응급)	100 이상 (엄중경계/일시 대피)
	일본 사면안정소위원회	1 이상 (관측 강화)	1-10 (대책검토)	10-100 (경계/응급)	100 이상 (엄중경계/일시 대피)
	Martin (1993)	0.1 (초기 반응)	0.2-2 (변위 경화)	10-100 또는 100 이상 (점진적 파괴)	

(나) 엘라이브 록볼트 시스템의 관리기준 설정

- 우리나라 깎기사면의 79%가 암반사면임을 감안해 다항식모델을 중심으로 수년간의 현장 예·경보 실측사례를 통한 변위 관리치를 권장내지는 참고자료로 사용가능 하지만 국내 실정에 적합한 관리치를 선정하기 위해 더 많은 DB(database)를 구축해야할 것으로 판단됨.
- 국내외의 변위속도에 관한 관리기준치들의 비교 검토를 바탕으로 본 시스템의 유지관리를 위한 관리기준치는 국내외 모든 기준치 범위를 포함하는 일본의 사면안정 관리기준치를 인용하는 것이 적절할 것으로 판단되어 표 2.46과 같이 제시하였음.

표 2.46 엘라이브락볼트 시스템의 관리기준치에 따른 단계별 대응 시나리오

구분		점검·주의 또는 관측강화	대책의 검토	경계·응급 대책	엄중경계 · 일시대피
엘라이브 록볼트 시스템	지표면의 변위속도	5mm이상/ 10일	5~50mm/ 5일	10~100mm/일	100mm이상/ 일
	활동면 부근의 변위속도	1mm이상/ 10일	5~50mm/ 5일		

(7) Test-bed 구축 및 운영

- 엘라이브 록볼트 시스템의 개발 및 검증은 시제품 개발, 실내시험, 암반 붕괴 시험 등의 과정을 거쳐 이루어 졌으나 실제 사업화를 위해서는 현장에서 Test-bed 구축을 통해 발생한 문제를 해결하고 시스템에 반영하여 신뢰성을 확보해야 함.
- 본 연구에서는 Test-bed의 구축 및 운영을 통해 레퍼런스 필드에서 발생할 수 있는 다양한 필드 문제점을 재현하고 해결 및 적용해 갈 수 있는 방법을 모색하였음.

(가) 부지 선정

- Test-bed는 강원도 횡성소재 청우산업의 골재채취장으로 2020년 5월부터 현재까지 상시 활용 가능하도록 관리 중에 있음.
- 실제 필드 설치 시 발생할 수 있는 시행착오를 방지하고 유지보수 비용을 절감하며 다양한 실험을 통한 시스템 성능 개선 추진

표 2.47 청우산업

소유주	연락처	상세주소
청우산업	033-344-6401	강원도 횡성군 횡성읍 경강로 학골2길 132

(나) Test-bed 조성



그림 2.78 발파위치천공



그림 2.79 센서 설치



그림 2.80 그라우트 주입



그림 2.81 설치 후 전경

(다) Test-bed 구축을 통한 시공 절차서 마련

표 2.48 시공 절차

시공 전경	시공 절차
	① 1단계 얼라이브 록볼트(스마트센서)와 IoT End Device 조립 - 얼라이브 록볼트(스마트센서)와 IoT End Device 사이에 실리콘 가스켓을 삽입하고 방수케이블로 체결 후 볼트로 고정 - 공장 또는 현장에서 조립 가능하고, 센서 가격이 저렴
	② 2단계 천공작업 - 소형 장비로 천공 실시 - 대형장비를 사용하지 않아 시공시 용이하고, 천공시간이 짧다.
	③ 3단계 얼라이브 록볼트(스마트센서) 삽입 - 얼라이브 록볼트(스마트센서)를 삽입하고, 패양광 패널이 수풀에 가려지는 것을 방지하기 위해 설치 주변지역을 정리 - 얼라이브 록볼트(스마트센서)의 설치인 인력으로 실시함.
	④ 4단계 시멘트 밀크 믹스 및 주입 천공홀에 삽입할 시멘트 밀크를 현장에서 배합 천공홀에 삽입되는 시멘트 밀크의 양이 많지 않기 때문에 소형 믹싱기를 이용하여 배합 및 천공홀에 주입
	⑤ 시공 완료 - 설치 완료 후 IoT End Device 무선 통신 상태 확인

II. 설 치 시 방 서

1. 사용자재 및 기기

가. 본 시설에 사용하는 모든 자재는 국제규격에 준한 시중 최고품을 사용하여야 한다.

2. 부품 및 재료조건

가. 사용되는 모든 부품 및 재료는 시스템에서 요구되는 환경 및 운용조건하에서 고유 기능 및 특성을 만족하여야 한다.

나. 사용되는 모든 부품 및 재료는 고유기능 및 성능을 포함한 제반 전기적, 기계적 특성이 시스템에서 요구되는 내구성을 가져야 한다.

다. 사용되는 모든 부품 및 재료는 취급 또는 동작 중에서 받을 수 있는 온도, 습도, 진동등과 같은 제반 환경제약에 견딜 수 있어야 한다.

라. 사용되는 모든 부품 및 재료는 취급시 또는 동작 중 인체에 유해하거나 장비의 운용에 영향을 미칠 수 있는 유독성 또는 부식성 가스를 발생시키는 재료를 사용해서는 안 된다.

마. 사용되는 모든 부품 및 재료는 고유기능, 성능 및 특성에 있어서 허용오차 범위내의 부품 또는 재료로 대체가 가능하여야 하며, 이때 시스템의 기능 및 성능에 영향을 주지 않아야 한다.

바. 사용되는 모든 부품은 고장으로 인하여 전체 시스템의 동작에 나쁜 영향을 파급시키거나 인접해 있는 다른 부품 또는 장치에 손상을 주는 것이어서는 안 된다.

3. 기기설치

가. 모든 기기설치는 제작자 측에서 제출하여 승인된 도면 및 성능표 시험 DATA 등에 따라 시공하며, 제작자 측의 각 공정에 대한 지시 및 기술적인 책임을 진다.

나. 모든 기기는 설치 시 기기 내에 먼지나 오물로 인한 손상 또는 외부에 손상이 가지 않도록 필요한 조치를 강구하고 공사에 임해야 한다.

다. 무선통신 성공률 제고를 위해 설치위치 기준 반경 1m정도의 풀과 수목을 정리 후 설치한다.

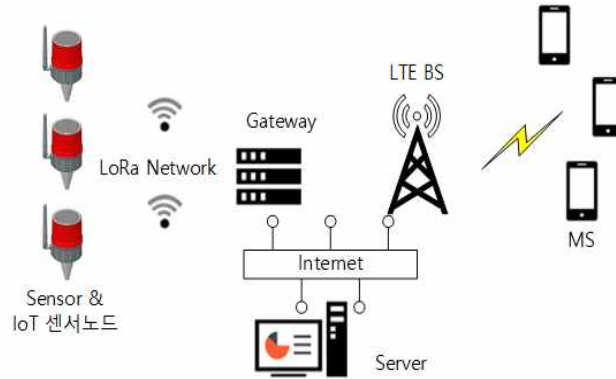
4. 기기조정 및 시험

가. 각종 기기는 설치 후 기기조정 및 시험을 시행하여야 하여 최종 시운전 시에는 공사감독관과 함께 실시 후 시운전 결과를 보고서를 통해 제출하여야 한다.

Ⅲ. 특 별 시 방 서

1. 구성도

가. 스마트 사면 붕괴 예·경보시스템 구성은 다음과 같다.



나. 계약자는 주요납품장비 및 부대장비에 대하여 구성, 통신망 연결 등이 발주기관의 목적 수행에 전혀 지장이 없도록 품질의 신뢰성, 안정성, 시스템 간 호환성 및 연계성을 가지고 장비 일체를 납품·설치하여야 한다.

다. 본 시스템은 지정한 장소에 공급, 설치하여야 하며 설치 중 제반 안전사고 및 납품 과정에서 발생하는 행정적, 기술적 제반비용과 그 문제의 처리는 계약자가 부담한다.

라. 설치시기 및 장소는 본 청과 협의하여 시행하며 개통 및 운용시험을 하여야 한다.

마. 계약자는 본 시스템 시설과 관련하여 납품되는 장비들이 상기 일반 및 특수조건의 기술기준이상의 기능을 수행할 수 있도록 납품장비들을 최적화 하여야 한다.

2. 요구사항

가. 변위 감지 센서부

- 1) 센서부착부위를 포함하여 열수축튜브로 커버링되어야 한다.
- 2) 센서 상부는 IoT 센서노드와 일체형으로 조립가능하고 방수커넥터를 사용해야 한다.
- 3) IoT 센서노드와 결합을 위하여 3point 이상 볼트와 체결돼야 한다.

나. IoT 센서노드

- 1) 설치환경의 제약으로 전원은 태양광시스템을 탑재해야한다.
- 2) 저전력 원거리 무선통신에 적합한 LoRa모뎀을 지원해야 한다.
- 3) 자체 통신 프로토콜을 사용하여 Gateway와 통신해야한다.
- 4) 미소 전압을 검출하기 위해 신호증폭과 노이즈 제거 기능이 H/W로 탑재되어야 한다.
- 5) LoRa 전용 방수안테나를 사용하고 밖으로 돌출되어야 한다.
- 6) 정보 송신 주기는 10분~1시간 사이에서 가변적으로 선택 가능해야 한다.
- 7) 변위 감지 센서부와 방수커넥터로 결합할 수 있어야 한다.
- 8) 방수 방진 기능이 고려된 케이스를 사용하여야 한다.

다. Gateway

- 1) 무선구간은 LoRa 통신을 지원하고, Backbone과 유선 Lan으로 연결되어야 한다.
- 2) 전원은 상전원을 이용하고 케이스는 시건장치로 관리되어야 한다.
- 3) 타 디바이스의 접근이 허용되지 않도록 무선구간에서 자체 통신 프로토콜에 기반하여 통신되어야 한다.

라. 모니터링 시스템 부분

- 1) Web 기반으로 구축하며, 모든 Web Browser에서 원활하게 표출 되어야 한다.
- 2) 수집된 정보를 분석하여, 고정시간, 임의시간의 데이터를 표출하여야 한다.
- 3) 변위 감지 센서부와 IoT 센서노드의 위치 및 현황 (오작동, 전원공급 상태 등) 정보를 실시간을 표출하여야 한다.

3. 도입품목 내역서

가. 스마트 사면 붕괴 예·경보시스템

번호	구 분	세 부 규 격
1	변위감지 센서부	- 센서타입 및 감지방식 : Strain-Guage를 통한 미소전압변화 감지 - 측정단위 : 0.01mV - 형태 및 재질 : Bar Type GFRP 록볼트
2	센서정보 수집 및 전송장치 (IoT 센서노드)	- STM32F051 MPU (ARM core, USB, A/D, D/A, RTC, Low Power 등) - LoRa Mesh module(made by Novis tech) - 24-bit ADC ADS1231, Low Noise (35nVrms) (24bit) - LED Driver IC(TLC59116) - Solar Pannel 전원 관리, Rechargeable Battery(LiFePo4) - LDO (Voltage regulator) - Power on/off Switch, 방수부저, 방수커넥터 - LoRa 전용 방수안테나
3	Gateway	- CPU : ARM 32-bit Cortex-M4 cpu(120MHX) - Memory : 1MB FLASH, 128KB RAM - Local Mesh Network (Up to 4 LoRa Mesh Modules) - Wireless Backhaul Uplink(1 FSK Mesh Module) - Wired Uplink(Ethernet:1 10/100 LAN, Console UART port can be used for uplink) - Console Port : TTL level UART @ 115200 baud - Power : Input AC 100V~240V 0.5A, Output DC 5V 2A

(라) 계측 관리

① 계측 관리 필요성 및 목적

- 암반사면 붕괴사고를 방지하기 위해서는 붕괴위험을 사전에 감지할 수 있는 센서의 계측값을 안정적이며 지속적으로 수집하고 분석하여 정확한 거동을 예측할 수 있어야 하며 이는 상시 계측 관리 시스템 구축이 필요한 이유임.
- 또한 상시 계측 관리 시스템으로 실시간 파악되는 암반사면의 상태변화에 대해 사전대책을 수립하여 위험 요소를 제거함으로써 안전성을 확보할 수 있음.
- 본 과제에서 계측 관리의 목적은 발파를 통한 암반사면 붕괴모사실험 등 다양한 상황에서 지반 거동 및 변위를 계측하고 데이터를 분석하여 붕괴 전조 판단의 근거를 마련하고, 옥외에서 IoT 시스템 운용을 통해 문제점을 발견하고 수정·보완하는데 있음.

② 계측 관리 계획

- 일반적인 계측 관리는 현장 여건 등의 자료조사를 기반으로 계측 항목을 결정하고, 계측 기기의 선정, 계측 위치, 계측 빈도, 센서 고장 및 오작동에 대한 보수 방안, 관리기준 등을 사전에 계획하여야 함.

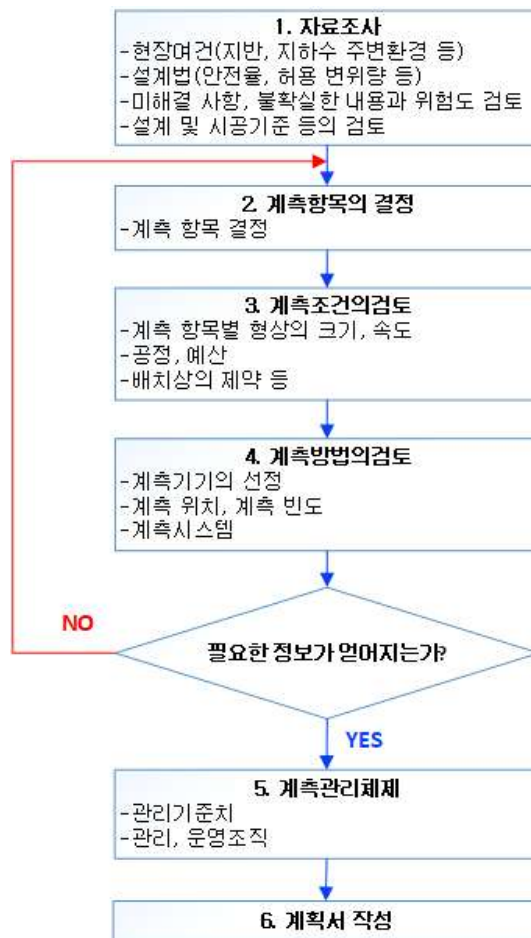


그림 2.82 일반적인 계측관리 계획 수립 절차

표 2.49 계측 관리 계획을 통해 도출한 Test-bed의 계측관리 주요 요소

계측 항목	지중 변위 / 변위속도
계측 기기	스트레인게이지를 이용한 스마트센서와 IoT EndDevice (자체개발)
계측 위치	암반사면(10m x 10m) 중앙에서 반경 1m(Test-bed) 마다 3 by 3 총 9개소
계측 빈도/ 데이터전송 주기	5 sec. - 정상일 때 10분 주기로 데이터 전송, 서버에 저장 - 주위일 때 5분 주기로 데이터 전송, 서버에 저장 - 경고일 때 계속 데이터 전송, 서버에 저장
계측 시스템	IoT EndDevice(자체 개발)
관리 기준치	주위 : 변위속도 $\pm 10\text{mm}/5\text{초}$, 변위량 $\pm 100\text{mm}$ 경고 : 변위속도 $\pm 20\text{mm}/5\text{초}$, 변위량 $\pm 200\text{mm}$

③ Web 기반 모니터링 시스템을 통한 데이터 수집 및 분석

- 사면에 설치된 센서로부터 IoT EndDevice와 Gateway를 거쳐 Data Server의 하드디스크에 저장되는데 계측시스템이 정상적일 때는 10분에 한 번씩 저장됨.
- 그림 2.83은 Test-bed에 설치한 센서들이 계측관리 되고 있는 Web 기반 모니터링 시스템을 나타내며 Web 브라우저를 통해 관리자가 한눈에 알아볼 수 있도록 페이지를 구성하였음.
- 그림 2.83에서 좌상 그림은 Test-bed에 설치된 센서들의 위치, 계측값, 사면 상태, 온도, 습도, 배터리 충전상태 등을 나타내고, 우상 그림은 그룹관리 화면, 좌상 그림은 센서관리 화면으로 데이터이력 관리를 위해 날짜별로 원하는 데이터를 쉽게 검색이 가능하도록 구성하였으며, 아래 그림들은 Test-bed 6번 센서의 2020년 10월 6일에 계측된 데이터를 보여주고 있음.

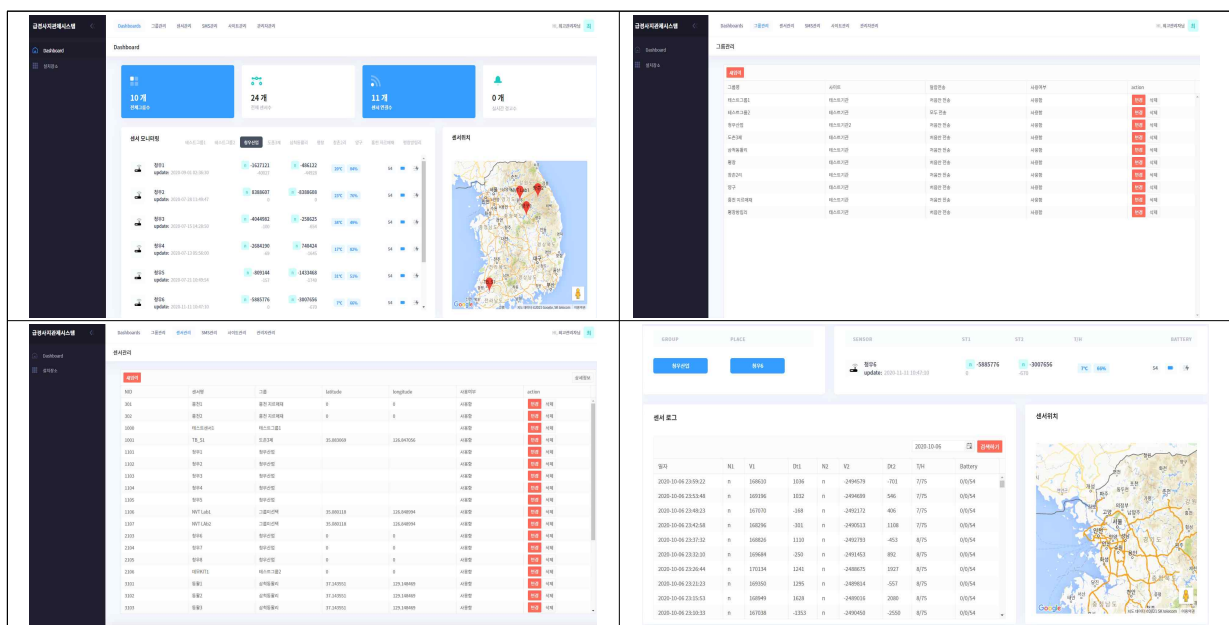


그림 2.83 Web 기반 모니터링 시스템

- Web 기반 모니터링 시스템은 경보 발령 시 SMS 수신처 관리, SMS 문구 작성, 관리자 관리 등의 메뉴가 있고, 계측기준치, 전송주기 변경 등 파라미터 설정 관련 기능을 제공함.
- 현재 데이터는 센서 하나를 기준으로 데이터서버에 14Kbyte가 저장되고 1년에 약 5Mbyte가 필요하며, 이 외에 제어명령 및 가공된 데이터를 포함해도 연 10Mbyte를 넘지 않을 것으로 판단됨.
- 측정 그룹 및 센서 개수를 고려하여 Database용량을 산정할 수 있으며, 적절한 기간마다 데이터를 백업하여 시스템이 원활하게 작동하도록 관리할 수 있음.
- 계측데이터 형식(포맷), IoT EndDvice → Gateway : Payload Data format
- 데이터는 총 22bytes 값으로 구성되며, 디버깅 프로그램에서 로그를 hex 값으로 보면 그림 2.84와 같으며 Gateway에서 Server로 보내지는 Rowdata 샘플도 함께 나타냄.

55 aa <SCP(4)> [PID=106][SID=31][LEN=24][seq=16][Sensor Type=40]<data>[SUM]

data= [type='9'] ['n/w/a'] <val1(4)> <val2(4)> ['n/w/a'] <val1(4)> <val2(4)> [T.v][H.v][B.v]

```
[01:07:05.288]55 AA 00 00 03 E9 6A 1F 18 03 28 39 6E FF 80 00 40 00 00 00 00 61 FF 8C 44 FA 00 0C 44 FA 7C 00 36 BC
[01:08:22.854]55 AA 00 00 03 E9 6A 1F 18 04 28 39 6E FF 80 00 40 00 00 00 00 6E FF 80 00 00 00 00 00 D8 00 36 E6
[01:13:28.880]55 AA 00 00 03 E9 6A 1F 18 05 28 39 6E FF 80 00 40 00 00 00 00 6E FF 80 00 00 00 00 00 D8 00 36 E5
```

Rawdatas:

```
0|novis_uart | [{ Opdatetime: '2020-07-29 02:06:24',
0|novis_uart |   DataValues: '1106,41,40,9,n,-2061301,5837,n,3676415,2298,25,62,0,0,54' }] }
0|novis_uart | {"RtnCode":0,"Version":"1.4.7.0","RtnMsg":"File Save OK","ResposeDatetime":"2020-07-
29T14:06:24.5201748+09:00"}
```

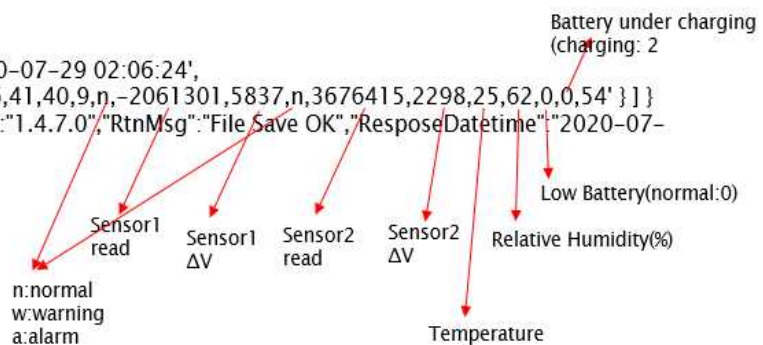


그림 2.84 계측 소스 코드

- 그림 2.85는 상시 계측을 통해 데이터서버에 저장되고 있는 데이터 중 샘플로서 9월 데이터를 나타낸 것이며, Test-bed에서 계측된 암반사면 붕괴모사시험 데이터 중 일부를 분석하여 그림 2.86과 같이 제시하였음.
- 그림 2.86의 Case A는 발파시험 시의 변위 데이터를 도시한 것으로 발파 후 사면이 붕괴되지는 않았지만 그래프 중간부에서 발파 충격으로 변위가 급격히 하강하여 변위가 크게 발생하였음을 볼 수 있음.

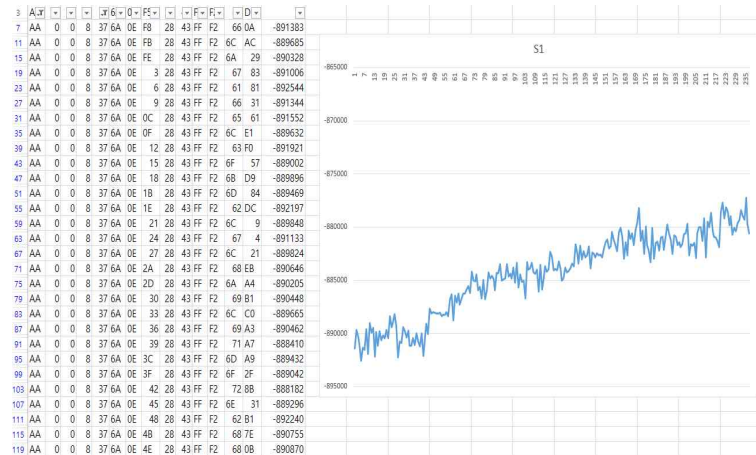


그림 2.87 계측데이터 Case B

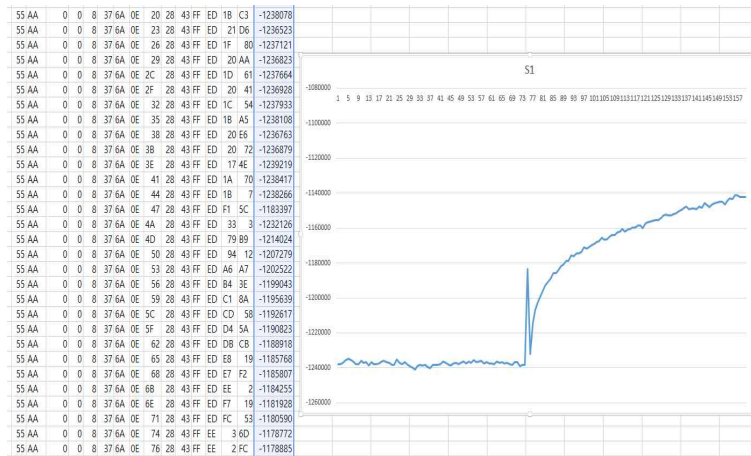


그림 2.88 계측데이터 Case C

- 그림 2.87의 Case B는 발파시험 후 변위가 증가되고 있는데 그래프와 같이 선형으로 천천히 증가하는 붕괴 전조 현상으로 추정됨.
- 그림 2.88의 Case C는 발파 시 변위가 크게 나타난 후 회복되었다가 다시 변위가 천천히 증가하고 있는데 암반에 큰 충격이 발생하여 파쇄로 인한 불연속면이 다수 형성되어 원호파괴 형태의 붕괴로 이어지는 전조의 한 형태로 추정됨.

나. 연구 개발 성과

(1) 논문

2018	2019	2020	합계
2	0	0	2

표 2.50 논문 성과

게재 연도	2018년
논문명	GFRP 록볼트 계측을 통한 사면 거동 분석
저자명	김기환, 임현택, 타망 비백, 장석현, 김용성
학술지명	한국지반신소재학회 논문집 17(4), 2018.12, 11-19(9 pages)
국내외 구분	국내
SCI구분	미해당
등록·기탁번호	DOI: https://doi.org/10.12814/jkgss.2018.17.4.011 ISSN: 2508-2876(Print) ISSN: 2287-9528(Online)

게재 연도	2018년
논문명	영상정보를 활용한 사면 붕괴 토사량 산정 기법
저자명	타망 비백, 임현택, 김기환, 장석현, 김용성
학술지명	한국지반환경공학회 논문집 19(12), 2018.12, 65-72(8 pages)
국내외 구분	국내
SCI구분	미해당
등록·기탁번호	DOI https://doi.org/10.14481/jkges.2018.19.12.65 ISSN: 1598-0820

(2) 고용창출

2018	2019	2020	합계
4	2	7	13

표 2.51 (주)스마트지오텍 고용창출

구 분	성 명	채용일
1	김연희	2018.01.02
2	김기환	2018.01.12
3	장우영	2018.10.01
4	이승주	2018.10.01
5	비백타망	2018.11.16
6	임현택	2019.07.01
7	이희준	2020.05.01
8	김용진	2020.08.01
9	전태진	2020.08.01

4대 사회보험

사업장 가입자 명부

발급번호	20200903778316	발급일시	2020-09-03 15:14	사업장 관리번호	39981010240
구분	국민연금	건강보험	산재보험	고용보험	
사업자등록번호	399-81-01024	399-81-01024	399-81-01024	399-81-01024	
사업장 명칭	주식회사스마트지오텍	주식회사스마트지오텍	주식회사스마트지오텍	주식회사스마트지오텍	

■ 가입 내역(발급일자 현재기준)

1 / 2

연번	주민(외국인)등록번호	성명	자격 취득 일			
			국민연금	건강보험	산재보험	고용보험
1	501116-1*****	전태진	미가입	2020.08.01	2020.08.01	2020.08.01
2	600613-1*****	김용진	미가입	2020.08.01	2020.08.01	2020.08.01
3	681127-1*****	김용성	미가입	2018.04.01	미가입	미가입
4	720919-2*****	김연희	2018.01.02	2018.01.02	미가입	미가입
5	740224-1*****	장우영	2018.10.01	2018.10.01	2018.10.01	2018.10.01
6	740512-1*****	임현택	2019.07.01	2019.07.01	2019.07.01	2019.07.01
7	890924-1*****	이승주	2018.10.01	2018.10.01	2018.10.01	2018.10.01
8	900724-1*****	김경엽	2020.03.01	미가입	2020.03.01	2020.03.01
9	921115-5*****	비백타망	미가입	2018.11.16	2018.11.16	미가입
10	940114-1*****	이희준	2020.05.01	2020.05.01	2020.05.01	2020.05.01
11	940123-5*****	김기환	2018.01.02	2018.01.02	2018.01.02	2018.01.11

표 2.52 (주)동명기술공단종합건축사사무소 고용창출

구분	성명	채용일
1	이동수	2019.09.02
2	임성택	2020.02.18

표 2.53 (주)나다건설 고용창출

구 분	성 명	채용일	사업장 가입자 명부
1 2	이미경 황새봄	2020.01.01 2020.01.01	출력일자 : 2020.01.07 15:01 4대 사회보험 사업장 가입자 명부 출력번호 : 2020010700000001 출력일자 : 2020.01.07 15:00 수령할 페이지수 : 40001/40001 구분 직업명 직종별 직책명 고용형태 사업장소재지 사업장소재지코드 사업장소재지명 사업장소재지코드 사업장소재지명 사업장소재지코드 사업장소재지명 1 2 ■ 7월말 내국인등록인구(단위:명) 구분 출생연월일 성별 연간소득 연간소득 연간소득 연간소득 1 2019.06.01 ~ 2019.06.30 남성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2 2019.06.01 ~ 2019.06.30 여성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 3 2019.06.01 ~ 2019.06.30 남성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 4 2019.06.01 ~ 2019.06.30 여성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 5 2019.06.01 ~ 2019.06.30 남성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 6 2019.06.01 ~ 2019.06.30 여성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 7 2019.06.01 ~ 2019.06.30 남성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 8 2019.06.01 ~ 2019.06.30 여성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 9 2019.06.01 ~ 2019.06.30 남성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 10 2019.06.01 ~ 2019.06.30 여성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 11 2019.06.01 ~ 2019.06.30 남성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 12 2019.06.01 ~ 2019.06.30 여성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 13 2019.06.01 ~ 2019.06.30 남성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 14 2019.06.01 ~ 2019.06.30 여성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 15 2019.06.01 ~ 2019.06.30 남성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 16 2019.06.01 ~ 2019.06.30 여성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 17 2019.06.01 ~ 2019.06.30 남성 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30 2019.06.01 ~ 2019.06.30

(3) 특허출원 및 등록

2018		2019		2020		합계	
출원	등록	출원	등록	출원	등록	출원	등록
1	0	1	1	2	2	4	3

표 2.54 특허출원

구분	발명의 명칭	등록(출원)인	출원일자	출원국	출원번호
1	록볼트 장치	주식회사 스마트지오텍/ 강원대학교 산학협력단	2018.10.19	대한민국	10-2018- 0124911
2	스마트 사면붕괴 경보장치	주식회사 스마트지오텍/ 동명기술공단	2019.03.05	대한민국	10-2019- 0025416
3	터널 선행침하 경보장치	주식회사 스마트지오텍/ 동명기술공단	2020.03.23	대한민국	10-2020- 0035020
4	변위 센서를 구비하는 락볼트 장치 및 시스템	주식회사 스마트지오텍/ 동명기술공단	2020.06.03	대한민국	10-2020- 0066786

표 2.55 특허등록

구분	발명의 명칭	등록(출원)인	등록연도	등록 (출원)국	등록 (출원)번호
1	스마트 사면붕괴 경보장치	주식회사 스마트지오텍/ 동명기술공단	2019	대한민국	10-2040807
2	터널 선행침하 경보장치	주식회사 스마트지오텍/ 동명기술공단	2020	대한민국	10-2155529
3	변위 센서를 구비하는 락볼트 장치 및 시스템	주식회사 스마트지오텍/ 동명기술공단	2020	대한민국	10-1917320



발명의 명칭 Title of the Invention
스마트 사면불괴 경보장치

특허권자 Patentee
등록사할만에 기재

발명자 Inventor
김용성(681127-*****)
서울특별시 송파구 올림픽로 99, 163동 2904호

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention has been registered at the Korean Intellectual Property Office.



2020년 01월 15일

특허청장
COMMISSIONER,
KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

박원주



QR코드로 현재기준
등록사항을 확인하세요



발명의 명칭 Title of the Invention
터널 선행침하 경보장치

특허권자 Patentee
등록사할만에 기재

발명자 Inventor
김용성(681127-*****)
서울특별시 송파구 올림픽로 99, 163동 2904호

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention has been registered at the Korean Intellectual Property Office.



2020년 09월 08일

특허청장
COMMISSIONER,
KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

김용래



QR코드로 현재기준
등록사항을 확인하세요



발명의 명칭 Title of the Invention
변위 센서를 구비하는 랙볼트 장치 및 시스템

특허권자 Patentee
주식회사 스마트지오토크(140111-*****)
강원도 춘천시 신북읍 배후령길 81-10, 210호(바이오토크)

발명자 Inventor
김용성(681127-*****)
서울특별시 송파구 올림픽로 99, 163동 2904호 (잠실동, 잠실역)

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention has been registered at the Korean Intellectual Property Office.



2020년 12월 29일

특허청장
COMMISSIONER,
KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

김용래



QR코드로 현재기준
등록사항을 확인하세요

그림 289 특허증 증빙자료

(4) 디자인등록

2018		2019		2020		합계	
출원	등록	출원	등록	출원	등록	출원	등록
0	0	1	1	1	1	2	2

표 2.56 디자인등록

구분	디자인 대상 물품	등록(출원)인	등록 (출원)국	등록(출원)번호
1	사면붕괴 경보기	(주)스마트지오텍 (주)동명기술공단	대한민국	30-2019-0009752
2	변위측정용 센서	(주)스마트지오텍 (주)동명기술공단	대한민국	30-2020-0016403



그림 2.90 디자인등록증 증빙자료

(5) 소프트웨어

2018		2019		2020		합계	
출원	등록	출원	등록	출원	등록	출원	등록
1	1	2	2	1	1	4	4

표 2.57 소프트웨어 저작권 등록

구분	저작물의 제호 (명칭)	저작물의 종류	저작자성명 (법인명)	등록년월일	등록번호
1	게이트웨이 실행파일 (Gateway Execution File)	컴퓨터 프로그램 저작물/ 시스템 소프트웨어	주식회사 스마트지오텍	2018년 10월 26일	제C-2018- 029186호
2	아이오티 엔드 디바이스 펌웨어 (IoT End Device F/W)	컴퓨터 프로그램 저작물/ 시스템 소프트웨어	주식회사 스마트지오텍	2019년 10월 14일	제C-2019- 028375호
3	아이오티 엔드 디바이스 통신 모듈 펌웨어 (IoT End Device Comm. Module F/W)	컴퓨터 프로그램 저작물/ 시스템 소프트웨어	주식회사 스마트지오텍	2019년 10월 14일	제C-2019- 028376호
4	스탠드얼론 게이트웨이 (Standalone Gateway)	컴퓨터 프로그램 저작물/ 시스템 소프트웨어	주식회사 스마트지오텍	2020년 12월 16일	제C-2020- 050482호



그림 2.91 소프트웨어 증빙자료

(6) 시험성적서

TEST REPORT

시험서 번호 : ECU-2019-009171

신청자 : 0 회사명 : 주식회사 스마트지오택
0 주소 : 강원도 춘천시 강원대학길 1, 강원대학교 KML스타트업 규방빌딩 304호(호자동)
0 대표자명 : 김연희

시험성적서의 용도 : 품질관리용

시험대상품목 : 스마트시멘트포장감지시스템

모델 / 용적 : SCS/-

시험기간 : 2019년 10월 17일 ~ 2019년 10월 17일

시험방법 : KS C IEC 60529 : 2013

시험결과 : 시험결과 참조

시험환경 : 온도 : (25.0 ± 10.0) °C, 습도 : (50 ± 25) % RH, 기압 : (96 ± 10) kPa

비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료영으로 시험한 결과로써 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 성적서의 진위확인용 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code를 확인 가능합니다.
2. 이 성적서는 용보, 선인, 영고 및 소수점 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 원본(제발행 포팅)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/재발본은 결과치 참고용입니다.

신동직 하선호
작성 : 신동직 기술책임자 : 하선호
Tel : 031-679-9555 Tel : 031-679-9557

2019년 10월 28일

KTR 한국화학융합시험연구원
KOREA TESTING & RESEARCH INSTITUTE

위변조 확인용 QR 코드

TEST REPORT

시험서 번호 : ECU-2020-013411

신청자 : 0 회사명 : 주식회사 스마트지오택
0 주소 : 강원도 춘천시 강원대학길 1, 보통관 801호(호자동)
0 대표자명 : 김윤진

시험성적서의 용도 : 품질관리용

시험대상품목 : SCS 센서노드

모델 / 용적 : SCS/-

시험기간 : 2020년 12월 09일 ~ 2020년 12월 14일

시험방법 : KS C IEC 60529 : 2013

시험결과 : 시험결과 참조

시험환경 : 온도 : (25.0 ± 10.0) °C, 습도 : (50 ± 25) % RH, 기압 : (96 ± 10) kPa

비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료영으로 시험한 결과로써 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 성적서의 진위확인용 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code를 확인 가능합니다.
2. 이 성적서는 용보, 선인, 영고 및 소수점 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 원본(제발행 포팅)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/재발본은 결과치 참고용입니다.

* 위 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 및 KOLAS 인증서 효력을 받습니다.

박성준 하선호
작성 : 박성준 기술책임자 : 하선호
Tel : 031-679-9557 Tel : 031-679-9559

2020년 12월 22일

KTR 한국화학융합시험연구원
KOREA TESTING & RESEARCH INSTITUTE

위변조 확인용 QR 코드

그림 2.92 방수방진 (IP45, IP65) 시험성적서

시험성적서 (TEST REPORT)

ktl 한국산업기술시험원 Korea Testing Laboratory

시험서 번호 : 19-067667-01-3 Report No. 페이지 (1/1) (총 9)

1. 의뢰자 (Client)
기명명 (Name) : (주)스마트지오택
주소 (Address) : 강원도 춘천시 강원대학길 1, 농업생명과학대학 1호관 202호
의뢰일자 (Date of Receipt) : 2019. 10. 16.

2. 시험성적서의 용도 (Use of Report) : 자체 결과 제출용

3. 시험대상품목/물질/시료명 (Test Sample)
제품명 (Description) : 스마트시멘트포장 감지시스템
제조사 (Manufacturer) : (주)스마트지오택
모델명 (Model Name) : SCS
제품번호 (Serial Number) : * * *
기타 (Remark) : 자체 결과 제출용

4. 시험기간 (Date of Test) : 2019년 10월 16일 ~ 2019년 10월 31일

5. 시험장소 (Location of Test) :
☒ KTL 고정시험실 (주소 : 경기도 안산시 상록구 태안로 723)
☐ 현장시험

6. 시험규격/방법 (Test Standard/Method) : 의뢰자가 제시한 시험방법

7. 시험결과 (Test Result) : 표 1 참조 (2 페이지)

비고 (Note) : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제출한 시료에 한하며, 법적 및 기타법령에 근거로써 효력을 갖습니다.
2. 이 성적서는 원본(제발행 포팅)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/재발본은 결과치 참고용입니다.
3. 이 성적서는 원본(제발행 포팅)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/재발본은 결과치 참고용입니다.

확인 Affirmation : 작성자 (Tested by) : 김연희 기술책임자 (Technical Manager) : 하선호
성명 (Name) : 김연희 성명 (Name) : 하선호

2019. 11. 06.

한국산업기술시험원
Korea Testing Laboratory

경기도 안산시 상록구 태안로 723 TEL: 031-679-9555 FAX: 031-679-9559 E-MAIL: ktr@ktr.or.kr

TEST REPORT

시험서 번호 : ECU-2020-013412

신청자 : 0 회사명 : 주식회사 스마트지오택
0 주소 : 강원도 춘천시 강원대학길 1, 보통관 801호(호자동)
0 대표자명 : 김윤진

시험성적서의 용도 : 품질관리용

시험대상품목 : SCS 센서노드

모델 / 용적 : SCS/-

시험기간 : 2020년 11월 26일 ~ 2020년 12월 01일

시험방법 : 의뢰자제출시험방법

시험결과 : 시험결과 참조

시험환경 : 온도 : (25.0 ± 10.0) °C, 습도 : (50 ± 25) % RH, 기압 : (96 ± 10) kPa

비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료영으로 시험한 결과로써 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 성적서의 진위확인용 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code를 확인 가능합니다.
2. 이 성적서는 용보, 선인, 영고 및 소수점 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 원본(제발행 포팅)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/재발본은 결과치 참고용입니다.

박성준 하선호
작성 : 박성준 기술책임자 : 하선호
Tel : 031-679-9557 Tel : 031-679-9559

2020년 12월 22일

KTR 한국화학융합시험연구원
KOREA TESTING & RESEARCH INSTITUTE

위변조 확인용 QR 코드

그림 2.93 온도동작테스트 (-35~70, -40~80) 시험성적서

(7) 신기술 및 혁신제품

제 51-079호

신 기술 인 증 서

기술명 : 농업 수리시설용 토사 및 암반사면 붕괴예측을 위한 변위센서 부착 봉형 계측기술

기관명 : (주)스마트지오텍

대표자 : 김연희

소재지 : 강원도 춘천시 강원대학길 1, 강원대학교 KNU 스타트업 큐브 별관 304호(효자동)

인증번호 : 51-079

유효기간 : 2020년 5월 29일부터 2022년 5월 28일까지

위 기술을 「농림식품과학기술 육성법」 제12조의2에 따른 신기술로 인증합니다.

2020년 5월 29일

농림축산식품부장관

업체명	24. ㈜스마트지오텍	
대표자명	김용진	연락처 010-2435-3721 yskim2@kangwon.ac.kr
소재지	강원도 춘천시 신북읍 배후정길 61-10, 210호(마이오음합관)	
지정기관	농림축산식품부	
혁신명 (품명)	산사태 방지 스마트 붕괴경보 시스템(스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템)	
품목 이미지		
혁신개요	· 저중 관입형 변위센서를 통해 사면 변위 감지 및 경보 제공, 지반 변형 정보를 관리자에게 무선통신망으로 전송 · 산사태, 사면 붕괴, 지반 붕괴 등의 피해를 예방하기 위해 저중 관입형 변위센서를 이용해 사면의 변위를 감지하고 변형 발생 시 관리자에게 무선으로 안내하는 시스템	
활용분야 (주요용도)	· 지자체 및 도로공사, 교통공사 등	

그림 2.94 농림식품신기술 인증서 및 혁신제품 확인서

(8) KC인증

4500-AT20-0017-SCS1

방송통신기자재등의 적합등록 필증
Registration of Broadcasting and Communication Equipments

상호 또는 성명 Trade Name or Registrant	주식회사 스마트지오텍
기자재명칭(제품명칭) Equipment Name	스마트사면 붕괴 예경보시스템
기기류호추가기기부호 Equipment code (Additional Equipment code)	IND
기본모델명 Basic Model Number	SCS
패키지모델명 Series Model Number	SCS-150, SCS-200, SCS-100, SCS-300
등록번호 Registration No.	R-R4G1-SCS
제조자/제조국가 Manufacturer/Country of Origin	주식회사 스마트지오텍 / 한국
등록연월일 Date of Registration	2020-12-15
기타 Others	

위 기자재는 「전파법」 제58조제2항에 따라 등록되었음을 증명합니다.
It is verified that foregoing equipment has been registered under the Clause 3, Article 58-2 of Radio Waves Act.

2020년 (Year) 12월 (Month) 15일 (Day)

국립전파연구원장
Director General of National Radio Research Agency

※ 적합등록필증발급대상제품은 반드시 "적합등록필증"을 제품에서 표출하여야 합니다.
필증의 사용소멸로 등록이 취소될 수 있습니다.

verify No.347823025130

BWS-20-EM-1523호

방송통신기자재등(전자파적합성) 시험성적서

1. 발 급 번 호	: BWS-20-EM-1523
2. 연 수 일	: 2020년 11월 27일
3. 시 행 기 간	: 2020년 11월 20일
4. 신청인(상호명)	: 주식회사 스마트지오텍
사업자등록번호	: 300-81-01024
대표자 성명	: 김용진
주 소	: 강원도 춘천시 강원대학길 1, 보문관 801호(효자동)
5. 기자재 명칭 / 모 델 명	: 스마트사면 붕괴 예경보시스템 / SCS
6. 제 조 자 / 제조국가	: 주식회사 스마트지오텍 / 한국
7. 시 행 결 과	: 적합

방송통신기자재등 시험기관의 지령 및 공표한 공인 고시 제13호의 규정에 의하여 시험성적서를 발급합니다.

2020년 12월 06일

주식회사 비 더블유 에스 테크 대표이사 (인)

주소: 경기도 용인시 처인구 모현읍 평안로480번길 23
등록번호: 031-333-5967
취소번호: 031-333-2017

※ 인증 받은 방송통신기자재는 반드시 "적합등록필증"을 부착하여 유통하여야 합니다.
취한 시 과징금 처분 및 인증이 취소될 수 있습니다.

본 시험성적서의 시험결과에 대한 상충이나 이의가 있을 시 표출 시료에 적합합니다.
본 시험성적서는 KSC 9501/IEC 17025 및 KOLAS 인증을 받은 기관이 발급합니다.

F-020-16-30(1) 1 / 48
본 시험성적서는 주식회사 비 더블유 에스 테크 사의 동의없이 무단 전표 및 복사를 할 수 없습니다.
"본 시험성적서의 전부 또는 일부가 임의적으로 "DOUG" 또는 www.doug.com에 무단으로 게시될 수 있습니다."

그림 2.95 KC 인증서

(9) 매출 실적

2018	2019	2020	합계
105,600,000	137,852,000	297,221,100	540,673,100

표 2.58 매출 실적

구분	공사명(납품명)	발주처	발급일	공사금액	세금계산서
1	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	주식회사 지스아이앤씨	2018.07.04	16,500,000	
2	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	주식회사 공간정보	2018.07.06	33,000,000	
3	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	얼라이브맵	2018.07.10	12,100,000	
4	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	주식회사 네오티즈	2018.07.17	11,000,000	
5	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	주식회사 지스아이앤씨	2018.08.01	16,500,000	
6	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	주식회사 공간정보	2018.08.06	16,500,000	
7	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	(주)석송	2019.05.28	34,100,000	
8	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	(주)서하	2019.07.25	55,000,000	
9	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	(주)석송	2019.10.18	24,585,000	
10	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	(주)선풍종합건설	2019.11.29	24,167,000	

11	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	성호건설(주)	2020.01.16	64,174,000	
12	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	(주)이제이텍	2020.07.29	17,600,000	
13	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	계룡건설산업(주)	2020.08.18	27,500,000	
14	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	(주)이제이텍	2020.10.12	5,500,000	
15	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	(주)삼원	2020.10.28	64,769,100	
16	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	합자회사 효광	2020.12.15	72,501,000	
17	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	뉴건우종합건설	2020.12.29	25,497,000	
18	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	주식회사 석태	2020.12.30	19,680,000	
계				540,673,100	

(10) 보고서

2018	2019	2020	합계
1	2	2	5

표 2.59 년도별 수치해석보고서

1차년도
얼라이브 록볼트 현장시험 모형사면 수치해석보고서 2018. 10. 22 (주)동명기술공단종합건축사사무소
2차년도
얼라이브록볼트 시스템의 현장시험 계측결과와 수치해석결과의 비교와 분석 2019. 10. 15 (주)동명기술공단종합건축사사무소
“암반사면 스마트 유지관리를 위한 얼라이브 록볼트 시스템 개발”을 위한 얼라이브 록볼트 성능 평가 실내실험 2019. 10 (주)동명기술공단종합건축사사무소
3차년도
얼라이브록볼트 현장발파시험 적정성 검토(수치해석) 2020. 11 (주)동명기술공단종합건축사사무소
얼라이브록볼트 유지관리매뉴얼 2020. 11 (주)동명기술공단종합건축사사무소

다. 연구 결과

(1) 기술적 성과

표 2.60 연도별 목표 및 성과물

구분(연도)	목표	성과물
1차 연도 (2018)	▪ 스마트 엘라이브 록볼트 시스템 개발	▪ 전문가 자문을 통한 특허분석 자료 확보 ▪ 엘라이브 록볼트 센서 시제품제작 ▪ 비즈니스모델 수립 보고서 ▪ 논문 1편 ▪ 특허출원 1건
	▪ 사물인터넷 전용 End Device & Gateway 개발	▪ End Device H/W 회로도, PBC Artwork file, 시제품제작 ▪ End Device Embedded S/W Source code, hex file 확보 ▪ End Device Embedded S/W 저작권 등록 ▪ 통신 Protocol Document 작성 및 S/W에 적용 ▪ 태양광 시스템 적용 ▪ 방수 방진 Case 설계도면 확보 및 실물제작 ▪ LoRa 전용 Gateway 확보
	▪ 신규채용 2명	▪ 신규채용 4명
	▪ 소프트웨어등록 1건	▪ 소프트웨어등록 1건
	▪ 록볼트 계측시스템 선행기술조사 및 엘라이브 록볼트 현장시험	▪ 록볼트 계측시스템 선행기술조사 자료 확보 ▪ 논문 1편
2차 연도 (2019)	▪ 특허 출원 1건	▪ 특허출원서 10-2019-0025416
	▪ 특허 등록 1건	▪ 특허결정서 M19-5948
	▪ 인증 1건	▪ KC 인증 ▪ 원가분석표 확보 ▪ 신기술 선행기술 조사보고서 ▪ 센서규격서 ▪ 시공절차서
	▪ 매출액 1억원	▪ 매출 목표 달성(주서하 외 113,685천원)
	▪ 신규채용 2명	▪ 신규채용 2명
	▪ 디자인등록 1건	▪ 디자인등록 1건
	▪ 소프트웨어등록 1건	▪ 소프트웨어등록 2건
3차 연도 (2020)	▪ 특허 등록 1건	▪ 특허 등록 1건
	▪ 신기술 2건	▪ 신기술 및 혁신제품 ① 농림식품신기술 : 농업수리시설용 토사 및 암반사면 붕괴예측을 위한 변위센서 부착 봉형 계측기술 ② 혁신제품 : 산사태 방지 스마트 붕괴경보 시스템 (스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템)
	▪ 매출액 2억원	▪ 매출액 5.4억원
	▪ 시제품 3건	▪ 시제품 3건
	▪ 신규채용 2명	▪ 신규채용 7명
	▪ 디자인등록 1건	▪ 디자인등록 1건
	▪ 소프트웨어등록 1건	▪ 소프트웨어등록 1건

(2) 경제적 성과

- 본 연구의 경제적 효과를 검증하기 위해 기존에 사용되는 지표변위계측기와 경제성효과를 비교하였으며 경제성효과 분석은 기획재정부 '예정가격 작성기준(계약예규 제464호, 2019.12.18., 이하 예정가격 작성기준)에 의해 산출되었음(표 2.61 참조).
- 검토 결과 신청기술의 경우 지표변위계측기 보다 약 54.6% 절감효과를 나타내는데 본 연구는 수명기간 중 발생하는 총비용이 비교기술 대비 45.4% 수준인 것으로 조사되었음.
- 구체적으로 본 연구는 변위센서가 봉 형태로 제작되어 소형장비로 시공이 가능하여 기존기술 대비 시공비가 절감되는 효과가 있으며, 센서제품의 비용이 기존 지표변위계측기 보다 저렴하여 경제적 파급효과가 우수하고, 고장 및 추가설치로 인한 유지관리비용을 감안하면 본 연구의 경제성은 매우 높다고 할 수 있음.
- 또한, 본 연구는 무선 변위센서를 이용하기 때문에 유선 시스템에서 발생하는 센서의 고장 및 유선 절단으로 인한 미작동 현상을 방지할 수 있고, 설치 및 유지관리가 간단하여 보급률을 높일 수 있는 장점이 있음.

표 2.61 본 연구(A)과 비교제품(B) 원가비교

구분		본 연구(A)	비교제품(B)	대비(%)
모델명		스마트 사면붕괴 예·경보 시스템	지표변위계측기	
제품수명(내용연수)		3년	3년	A/B
원가 항목	취득원가	11,626,190	26,558,340	43.77
	사용원가	792,000	792,000	100.00
	폐기원가	1,143	1,523	75.00
합계		12,419,333	27,351,864	45.40

표 2.62 원가계산 집계표

원 가 항 목		본 연구	비교제품	대비 (%)
		스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	지표변위계측기	
원가구분	산출부문	(A)	(B)	(A/B)
취득원가	제조이전 원가	95,986	26,558,340	
	제조원가	8,788,605		
	설치원가	2,741,599		
사용원가	운영비	792,000	792,000	
	계	792,000	792,000	
폐기원가	폐기처리원가	1,143	1,524	
합 계		12,419,333	27,351,864	45.40
수명(내용연수)		3 (년)	3 (년)	

1. 취득원가 중 제조이전 원가 : [표 2] 취득원가(제조이전원가)연구개발비 참조
2. 취득원가 중 설치원가 : 신청제품 - V. 제조부문 [표 1] 원가계산서 참조 : 비교제품 - VII. 비교제품 취득원가 중 집계표 참조
3. 사용원가 : [표 3] 사용원가 산출표 참조
4. 폐기원가 : [표 4] 폐기원가 산출표 참조
5. 수명(내용연수) : 법인세법 시행규칙[기획재정부령 제792호, 2020.04.21.] [별표2] 시험연구용자산의 내용연수표 96)측정기기 기준
6. 부가가치세 포함

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 목표

- 암반사면 스마트 유지관리를 위한 얼라이브 록볼트 시스템 개발
 - 스마트 얼라이브 록볼트 시스템 개발(주관기관, 주식회사 스마트지오텍)
 - 얼라이브 록볼트 시스템 현장시험 및 유지관리 매뉴얼 개발(협동기관, (주)동명기술공단)
 - 얼라이브 록볼트 시스템의 실증시험 모니터링 연구(협동기관, (주)나다건설)

나. 목표 달성 여부

(1) 최종 성과목표 및 성과지표

구분	핵심연구성과 (level1)		단위 성과 (level2)		총괄 질적 성과						해당 기관	예산 (백만)	총괄 양적 성과		
					질적 성과지표	목표치	달성 치	측정 방법	검증 방법	가 중 치			목표치	가중 치	달성치
총괄	A	스마트 얼라이브 록볼트 시스템 개발	A-1	얼라이브 록볼트 센서 개발 및 모니터링 시스템 개발	①	비즈니스 모델 수립	1건	100	보고서	보고 서	4	1,348.4	특허출원 2 건 등록 0 건 시제품: 5 건 매출액: 300 백만원 산규고용: 8 명 신기술인증: 1 건 SW등록: 3건 디자인등록: 0 건	10 0 10 20 15 5 5 0	특허: 출원 4 건 등록 0 건 시제품: 5 건 매출액: 500 백만원 산규고용: 9 명 신기술인증: 1 건 SW등록: 4 건 디자인등록: 0 건
					②	시스 템 동작 온도	-40℃ 80℃	100	공인 시험 기관 측정 방법	공인 시험 기관 인증 서	4				
					③	End Device 방수방 진 Case	IP65 이상	100	공인 시험 기관 측정 방법	공인 시험 기관 인증 서	2				
					④	무선통 신 패킷 실패율 (PER)	PER≤ 2×10 ⁻² (2%)	100	송신패 킷 대비 수신실 패킷을 측정	자체 시험 보고 서	2				
총괄	B	얼라이브 록볼트 시스템 현장시험 및 유지관리 매뉴얼 개발	B-1	얼라이브 록볼트 시스템 현장시험 및 유지관리 매뉴얼 개발	②	모형 시험 및 수치 해석 보고 서	5건	100	보고서	단면 해석 2단 면이 상 전문 가자 문을 통한 자체 평가 및 검증	6	326.5	특허: 출원 0 건 등록 2 건 시제품: 0 건 매출액: 0 백만원 산규고용: 2 명 신기술인증: 0 건 SW등록: 0 건 디자인등록: 2 건	0 15 0 0 0 0 0 15	특허: 출원 0 건 등록 3 건 시제품: 0 건 매출액: 0 백만원 산규고용: 2 명 신기술인증: 0 건 SW등록: 0 건 디자인등록: 2 건
	C	현장 사면붕괴 실험 및 모니터링 연구	C-1	레퍼런스 필드 확보를 통한 시스템 설치 및 테스트 및 붕괴예측 성능향상에 대한 연구	①	다양 한 지반 붕괴 유형 조사 및 붕괴 유형 별 붕괴 예측 방안 연구	1건	100	보고 서	보고 서	2	200.0	특허: 출원 0 건 등록 0 건 시제품: 0 건 매출액: 0 백만원 산규고용: 2명 신기술인증: 1 건 SW등록: 0 건 디자인등록: 0 건	0 0 0 0 0 5 0 0	특허: 출원 0 건 등록 0 건 시제품: 0 건 매출액: 0 백만원 산규고용: 2 명 신기술인증: 0 건 SW등록: 0 건 디자인등록: 0 건
계							100			20		1,874.9	특허: 출원 2 건 등록 2 건 시제품: 5건 매출액: 300 백만원 산규고용: 12 명 신기술인증: 2 건 SW등록: 3건 디자인등록: 2건	100	특허: 출원 4 건 등록 3 건 시제품: 5 건 매출액: 500 백만원 산규고용: 13 명 신기술인증: 1 건 혁신제품: 1 건 SW등록: 4 건 디자인등록: 2 건

(2) 1차년도 성과목표 및 성과지표

구분	핵심연구성과 (level1)		단위 성과 (level2)		1차년도 질적 성과						해당 기관	예산 (백만)	1차년도 양적 성과			
					성과지표	목표치	달 성 치	측정방법	검증방 법	가중 치			목표치	가 중 치	달성치	
총괄	A	스마트 얼라이브 로봇 시스템 개발	A-1	얼라이브 로봇 센서 개발	①	비즈니스 모델 수립	-	100	보고서	보고서	10	366,500	특허: 출원 1 건 등록 0 건 논문 등재: 1 건 시제품: 1 건 SW: 0 건 신규고용: 2 명	10	특허: 출원 1 건 등록 0 건 논문 등재: 1 건 시제품: 2 건 SW: 0 건 신규고용: 2 명	
			A-1	모니터링 시스템 개발	①	시스템 동작온도	-30℃ ~ 60℃	0	공인 시험 기관 측정 방법	공인 시험 기관 인증서	4		(주)스 마 트 지 오 텍	특허: 출원 0 건 등록 0 건 논문 등재: 0 건 시제품: 1 건 SW: 1 건 신규고용: 2 명	0	특허: 출원 0 건 등록 0 건 논문 등재: 0 건 시제품: 1 건 SW: 1 건 신규고용: 2 명
					②	무선통신 패킷 성공율	90%	0	공인 시험 기관 측정 방법	공인 시험 기관 인증서	2					
	B	얼라이브 로봇 시스템 현장시험 및 유지관리 매뉴얼 개발	B-1	얼라이브 로봇 시스템 현장시험 연구	①	수치해석 보고서	1건	100	보고서	보고서	4	134,000	특허: 출원 0 건 등록 0 건 논문 등재: 1 건 시제품: 0 건 SW: 0 건	0	특허: 출원 0 건 등록 0 건 논문 등재: 1 건 시제품: 0 건 SW: 0 건	
					B-2	스마트 암반사면 유지관리 를 위한 얼라이브 로봇 시스템 매뉴얼 개발									특허: 출원 0 건 등록 0 건 논문 등재: 0 건 시제품: 0 건 SW: 0 건	0
계								100			20	500,500	특허: 출원 1 건 등록 0 건 논문 등재: 2 건 시제품: 2 건 SW: 1 건 신규고용: 4 명	100	특허: 출원 1 건 등록 0 건 논문 등재: 2 건 시제품: 3 건 SW: 1 건 신규고용: 4 명	

(3) 2차년도 성과목표 및 성과지표

구분	핵심연구성과 (level1)		단위 성과 (level2)		2차년도 질적 성과						해당 기관	예산 (백만)	2차년도 양적 성과		
					질적 성과지표	목표치	달 성 치	측정 방법	검증 방법	가 중 치			목표치	가 중 치	달성치
총괄	A	스마트 얼라이브 록볼트 시스템 개발	A-1	얼라이브 록볼트 센서 및 모니터링 시스템 개발	①	시스 템 동작 온도	-35℃ ~ 70℃	100	공인 시험 기관 측정 방법	공인 시험 기관 측정 방법	10	522,000	(주) 스마 트 지오 텍		
					②	방수 방진 Case	IP45	100	공인 시험 기관 측정 방법	공인 시험 기관 측정 방법	0				
	B	얼라이브 록볼트 시스템 현장시험 및 유지관리 매뉴얼 개발	B-1	얼라이브 록볼트 시스템 현장시험 및 유지관리 매뉴얼 개발	①	모형 실험 및 수치 해석 보고 서	2건	100	보고 서	단면 해석 2단면 이상, 전문가 자문 을 통한 자체 평가 및 검증	10	154,000	(주) 동명 기술 공단		
계							100				20	667,000		100	

(4) 3차년도 성과목표 및 성과지표

구 분	핵심연구성과 (level1)		단위 성과 (level2)		3차년도 질적 성과							해당 기관	예산 (백만)	3차년도 양적 성과		
					질적 성과지표	목표치	달성 치	측정 방법	검증 방법	가중 치	목표치			가중 치	달성치	
주관	A	스마트 얼라이브 록볼트 시스템 개발	A-1	얼라이브 록볼트 센서 개발 및 모니터링 시스템 개발	①	End Device 방수방진 Case	IP65 이상	100	공인 시험 기관 측정 방법	공인 시험 기관 인증 서	5	(주) 스마 트 지오 텍	8027	특허: 출원 0 건	0	특허: 출원 0 건
					②	무선통신 패킷 실패율 (PER)	PER≤2× 10 ⁻² (2%)	100	송신 패킷 대비 수신 실패 패킷 율 측정	자체 시험 보고 서	5			특허: 등록 0 건	0	특허: 등록 0 건
공동	B	얼라이브 록볼트 시스템 현장시험 및 유지관리 매뉴얼 개발	B-1	얼라이브 록볼트 시스템 현장시험 및 유지관리 매뉴얼 개발	①	수치해석 보고서	1건	100	보고서	전문 가자 문을 통한 자체 평가 및 검증	5	(주) 동명 기술 공단	1449	시제품: 3 건	10	시제품: 3 건
											매출액: 200 백만원			10	매출액: 297 백만원	
공동	C	얼라이브 록볼트 시스템의 실증시험 모니터링 연구	C-1	테스트 베드 확보를 통한 시스템 설치 및 모니터링 연구	①	모니터링 연구 결과보고 서	1건	100	보고서	보고서	5	(주)나 다 건설	178	신규고용: 2 명	10	신규고용: 2 명
											신기술인증: 1 건			10	신기술인증: 0 건	
계								100			20		11256	SW등록: 0 건	5	SW등록: 0 건
														디자인등록: 0 건	0	디자인등록: 0 건
														특허: 출원 0 건	0	특허: 출원 0 건
														등록 0 건	0	등록 0 건
														시제품: 0 건	0	시제품: 0 건
														매출액: 0 백만원	0	매출액: 0 백만원
														신규고용: 2 명	10	신규고용: 2 명
														신기술인증: 0 건	10	신기술인증: 0 건
														SW등록: 0 건	0	SW등록: 0 건
														디자인등록: 1 건	5	디자인등록: 1 건

다. 목표 미달성 원인 및 차후 대책

해당 없음

4. 연구개발성과의 활용 계획

가. 기 사업화 실적

년도	제품명	매출액	비고
2018	스마트 사면 센서	105,600 천원	
2019	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	137,852 천원	
2020	스마트 사면 붕괴 예·경보 시스템	297,221 천원	
계		540,673 천원	

나. 2021년 사업화 예상액

기관	사업명	매출예상액	비고
행정안전부	급경사지 붕괴위험지역 계측사업	1,890,000 천원	
OO군청	산사태 위험지구 계측 사업	360,000 천원	
OOO도 종합건설사업소	급경사지 붕괴위험지역 계측사업	210,000 천원	
OOO도 도로관리사업소	급경사지 붕괴위험지역 계측사업	530,000 천원	
OOO도 북부건설사업소	급경사지 붕괴위험지역 계측사업	100,000 천원	
계		3,000,000 천원	

다. 중·장기적 성과활용 계획

(1) 사업화 지속

- 행정안전부, 자치단체 중심의 급경사지 붕괴위험지구 계측사업 지속
- 건설신기술 인증을 통한 한국도로공사 및 국토유지관리 계측사업 확장
- Q마크 인증 및 조달청 우수조달물품인증을 통한 공공기관 조달 전략 수립
- 지역 협력사와의 전략적 영업 제휴 추진

(2) 추가 연구를 통한 성능 개선 고급화 및 사업화 분야 확대

- 변위 계측과 가속도 계측이 동시에 가능한 기능 추가 → 지진계로 활용 가능
- 태양광 패널 연결팩을 통한 배터리 유지 가능 시간 확대 → 고품질화 추진
- 제체 계측 등 다양한 대상 지역에 적합한 계측 센서 복합 채용 → 댐 및 저수지 분야 확장
- 하천 제방 유지관리에 적합한 계측 기술 개발 → 신제품화 전략 수립
- 추후 다양한 분야(건설, 국방, 행정/재해, 농수축산 등)로의 시장 확대 전략 검토

〈 참고 문헌 〉

1. 천동진, 박영직, 이승호, 김정섭, 정동영, 2013, u-IT기반 계측정보를 이용한 급경사지 예측 시스템 개발, 한국산학기술학회지,
2. 김학승, 조남준, 2004, 사면붕괴 예경보시스템 도입에 관한 연구, 한국방재학회논문집
3. 한국전자통신연구원, KR 2012-0067079, 국방과학연구소, 도로 사면 붕괴 감시 시스템 및 방법
4. 지식사업정보원, IOT 기반 정부육성 핵심 산업별 융합기술·응용사례 및 R&D전략
5. 한국건설기술연구원, 안전한 지반굴착기술 개발기획 최종보고서
6. (주)스마트지오텍, 등록특허 제10-1786628, 사면붕괴예측시스템
7. 전토사면 유지관리 매뉴얼 2013.
8. 국립공원관리공단, 낙석계측시스템 운영매뉴얼
9. 급경사지 상시계측관리 센서 및 계측장비 설치 운영 가이드라인, 국민안전처 2012
10. Kim, Y. S., Kim, B. J., 2017. A study on predicting slope failure through the measurement of surface ground deformation, ASABE.
11. Kim, Y. S., Kim, B. J., 2018. Predicting reservoir failure through the measurement of surface ground deformations, ASABE.
12. Park, S. Y., Lim H. T., Tamang B., Jin, J. H., Lee, S. J., Chang, S. H., Kim, Y. S., 2019, A Study on the Slope Failure Monitoring of a Model Slope by the Application of a Displacement Sensor, Journal of Sensors, Volume 2019, Article ID 7570517, 9 pages.
13. Park, S. Y., Lim H. T., Tamang B., Jin, J. H., Lee, S. J., Chang, S. H., Kim, Y. S., 2019, Analysis of Slope Failure Behaviour Based on Real-Time Measurement Using the x-MR Method, Journal of marine science and engineering, 7(10), 360.
14. 박성용, 민연식, 강민서, 정희돈, 사미 플립반, 김용성, 2017, 현장모형실험 기반 표층거동 분석을 통한 사면붕괴 예측, 한국지반신소재학회논문집, Vol.16, No.3, pp.1-10.
15. 박성용, 장동수, 정재훈, 김영주, 김용성, 2018, 통계관리도 기법을 적용한 사면붕괴 예측, 한국지반신소재학회논문집, Vol.17, No.2, pp.9-18.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술사업화지원사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통부사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.