

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

국토교통기술사업화지원사업 제3차 연도 최종보고서

R&D / 20TBIP-C144356-03

저전압 가열기반의 발열팽창을 이용한 무진동 암반파쇄공법 개발 최종보고서

2021. 02. 04.

**주관연구기관 / (주)태평양기술산업
공동연구기관 / (주)코원에프에이**

**국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원**

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

'저전압 가열기반의 발열팽창을 이용한 무진동 암반파쇄공법 개발'(연구개발 기간 : 2018.04.01. ~ 2020.12.31.) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2021. 02. 04.

주관연구기관명 : (주)태평양기술산업

(대표자)

한 상 욱

(인)

공동연구기관명 : (주)코원에프에이

(대표자)

공 병 민



주관연구기관책임자: 이 정 우

공동연구기관책임자: 공 병 민

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20TBIP-C144 356-03	해당 단계 연구 기간	2020.01.01. ~2020.12.31.	단계구분	3차년도/ 총 3차년도
연구사업명	중사업명	국토교통기술사업화지원사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	저전압 가열기반의 발열팽창을 이용한 무진동 암반파쇄공법 개발			
	세부과제명				
연구책임자	이 정 우	해당단계 참여연구원 수	총: 13명 내부: 13명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:222,000천원 민간:149,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:371,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 35명 내부: 35명 외부: 명	총 연구비	정부:700,000천원 민간:503,700천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:1,203,700천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)태평양기술산업 기업부설연구소			참여기업명	(주)코원에프에이
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:경북대학교 산학협력단			연구책임자:변용훈	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

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

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	2	3	5	1	0	0	0	0	0	0	0

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

요약 핵심개발목표 저전압 가열기반의 발열팽창을 이용한 무진동 암반파쇄공법 개발 세부목표 1. 팽창력 최대화를 위한 발열팽창재 혼합재료 개발 2. 발열팽창기 하우징 설계 및 개발 3. 고효율 암반파쇄 발열 코일 설계 및 개발 4. 시뮬레이션 기반 암반 환경에 따른 파쇄 시나리오 설계 5. 시뮬레이션 기반 암반파쇄 시공법 최적화 및 파쇄 시나리오 개발 6. 다양한 현장여건을 반영한 시뮬레이션 기반 기술적용 가이드라인 수립 7. 암반파쇄 발열기반 능동형 전력변환장치 기초설계 및 개발 8. 암반파쇄 발열기반 능동형 전력변환장치 제품화 개발 및 신뢰성 평가 9. 암반파쇄 발열장치 제품 상용화 및 신뢰성 검증	
	보고서 면수 124면

요약문

연구의 목적 및 내용	■ 연구의 목적 - 발열팽창을 이용한 무진동 암반파쇄공법 개발 ■ 연구의 내용 - 팽창력 최대화를 위한 발열팽창재 혼합재료 개발 - 발열팽창기 하우징 설계 및 개발 - 고효율 암반파쇄 발열 코일 설계 및 개발 - 시뮬레이션 기반 암반 환경에 따른 파쇄 시나리오 설계 - 시뮬레이션 기반 암반파쇄 시공법 최적화 및 파쇄 시나리오 개발 - 다양한 현장여건을 반영한 시뮬레이션 기반 기술적용 가이드라인 수립 - 암반파쇄 발열기반 능동형 전력변환장치 기초설계 및 개발 - 암반파쇄 발열기반 능동형 전력변환장치 제품화 개발 및 신뢰성 평가 - 암반파쇄 발열장치 제품 상용화 및 신뢰성 검증				
연구개발성과	■ 연구의 개발 성과 - 발열팽창 암반파쇄용 팽창재료 팽창력 200MPa 획득 - 상용 하우징 팽창력 90% 이상 획득 - 발열기반 능동형 전력변환장치 및 고효율 코일 시제품 개발 - 무진동 발열팽창 암반파쇄 시공 비즈니스 모델, 마케팅 전략 수립 - 무진동 발열팽창 암반파쇄 공법 시방서작성 - 발열기반 능동형 전력변환장치 CE, KC 인증 획득				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	■ 연구의 활용계획 (기대효과) - 철도 및 도로 터널 무진동 굴착 공사 적용 - 협소한 특수 무진동 굴착 공사 적용 - 도심지 토목 및 건설 무진동 굴착 공사 적용 - 기존 무진동 기술 대비 공사기간 단축 및 비용 절감				
국문핵심어 (5개 이내)	무진동	암반파쇄	발열	팽창	굴착

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
가. 연구 개발의 목적	1
나. 연구 개발의 필요성	1
다. 연구 기술 개념	2
2. 연구수행내용 및 성과	3
가. 현재 기술 수준	3
나. 현재까지 확보된 기술개발 현황	4
다. 연구 내용 및 범위	7
라. 연구 개발 성과	114
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	121
가. 질적 목표 및 달성율	121
나. 양적 목표 및 달성율	122
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	123

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구 개발의 목적

- 발열팽창을 이용한 무진동 암반파쇄공법 개발
- 발열팽창 암반파쇄용 팽창재료 개발
- 발열기기용 능동형 전력변화장치 및 고효율 발열체 개발
- 실용화를 위한 무진동 발열팽창 암반파쇄 시공 프로세스 개발

나. 연구 개발의 필요성

국내에서 널리 적용되고 있는 발파공법은 변화하는 막장의 지질 조건에 유연하게 대처할 수 있으며 대단면 터널의 사공이 용이하다는 장점이 있으나, 발파 시 동반되는 소음 및 진동에 따른 민원 때문에 도심밀집지역은 물론 인가가 있는 산악지역에서도 활용이 제한되는 경우가 지속적으로 보고되고 있다. 그림 1-1과 같이 도심구간 내 다양한 철도 시스템의 적용에 따라 근접시공 및 도심지 터널 굴착 사례가 증가하고 있으며, 발파로 인한 소음 진동으로 안전문제 및 주변민원으로 인하여 시공자체에 제약이 있는 사례가 증가하고 있다.

저진동의 빠른 굴착속도가 특징인 TBM(Tunnel Boring Machine)을 이용한 기계화 시공은 고가 장비로 인한 공사비용 상승으로 저가의 무진동 굴착 방법이 요구 되고 있다. 무진동 유압 암반 파쇄 방법인 유압식 할암기 공법은 진동유압펌프에 증압, 유량 및 속도제어기능을 갖는 부스타를 정착한 자동제어식 유압공급원과, 원통형 지향선 확장장치를 결합한 것으로 암반을 파쇄하는 공법이지만, 파쇄 속도가 매우 느려 공사기간 연장으로 인한 공사비용 상승을 초래한다.

그림 1-1은 파이프루프 공법으로 진행되고 있는 국내 터널 시공 현장 모습이다. 그림과 같이 파이프 삽입 시 암반이 존재하여도 진동 및 소음이 큰 발파공법을 사용하지 못하는 경우, 파이프내 공간의 협소함으로 인해 유압을 이용한 할암기만을 이용할 수 있는 상황이다. 이와 같은 방법으로는 10시간동안 약 30cm 파이프 삽입만이 가능한 현실이며, 전체 공사기간 연장에 따른 급격한 시공비용 증가를 야기한다. 특수한 공법에 따른 무진동 암반파쇄 기술은 시공업체의 도산위기까지 초래 할 수 있는 심각한 상황임에도 불구하고 현재 해결 가능한 새로운 무진동 암반파쇄 기술이 필요한 상황이다.



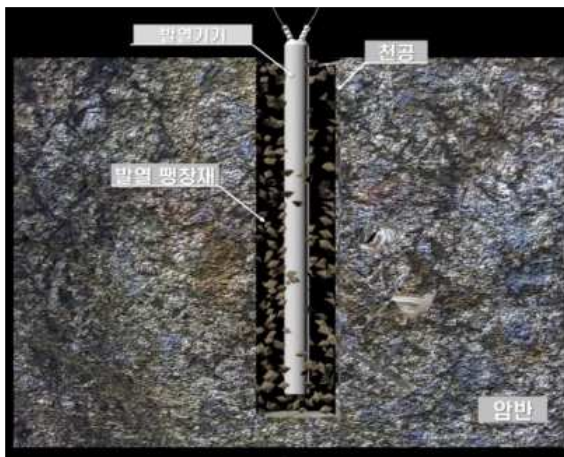
[그림 1-1] 기존 무진동 암반파쇄 기술 예

다. 연구 기술 개념

급속 초고온 800도 이상 발열 시 약 20~30배 이상의 급격한 부피팽창이 되는 저비용 발열 팽창재료와 발열 팽창재에 급속한 열을 전달해 주는 초고온 발열기기를 이용하여 다양한 암반상황에 적용 가능한 새로운 무진동 암반파쇄 기술이다.

파쇄대상물에 구멍을 천공하여 내부에 가열에 의해 부피 팽창하게 되는 발열 팽창재를 채우고, 전기에 의해 가열되는 막대 형상의 가열봉을 발열 팽창재 내에 매립되도록 구멍 내에 삽입 배치한다. 가열봉은 전기를 공급하여, 가열 팽창재의 부피팽창이 빠른 시간 내 팽창 임계온도 이상이 되도록 급속한 가열이 가능한 것으로 하여야 한다. 가열된 팽창재는 부피팽창에 의하여 파쇄대상물에 화학적(비발파적)으로 균열 및 파쇄를 유도한다.

* 발열팽창기기를 이용한 무진동 무소음 암반파쇄 기술 적용 개념도



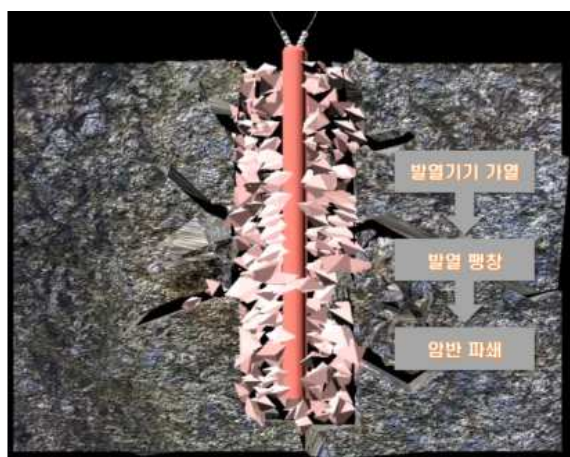
발열팽창 기기 천공에 삽입 (1단계)



발열팽창 기기 가열 (2단계)



가열에 따른 팽창재 팽창 (3단계)



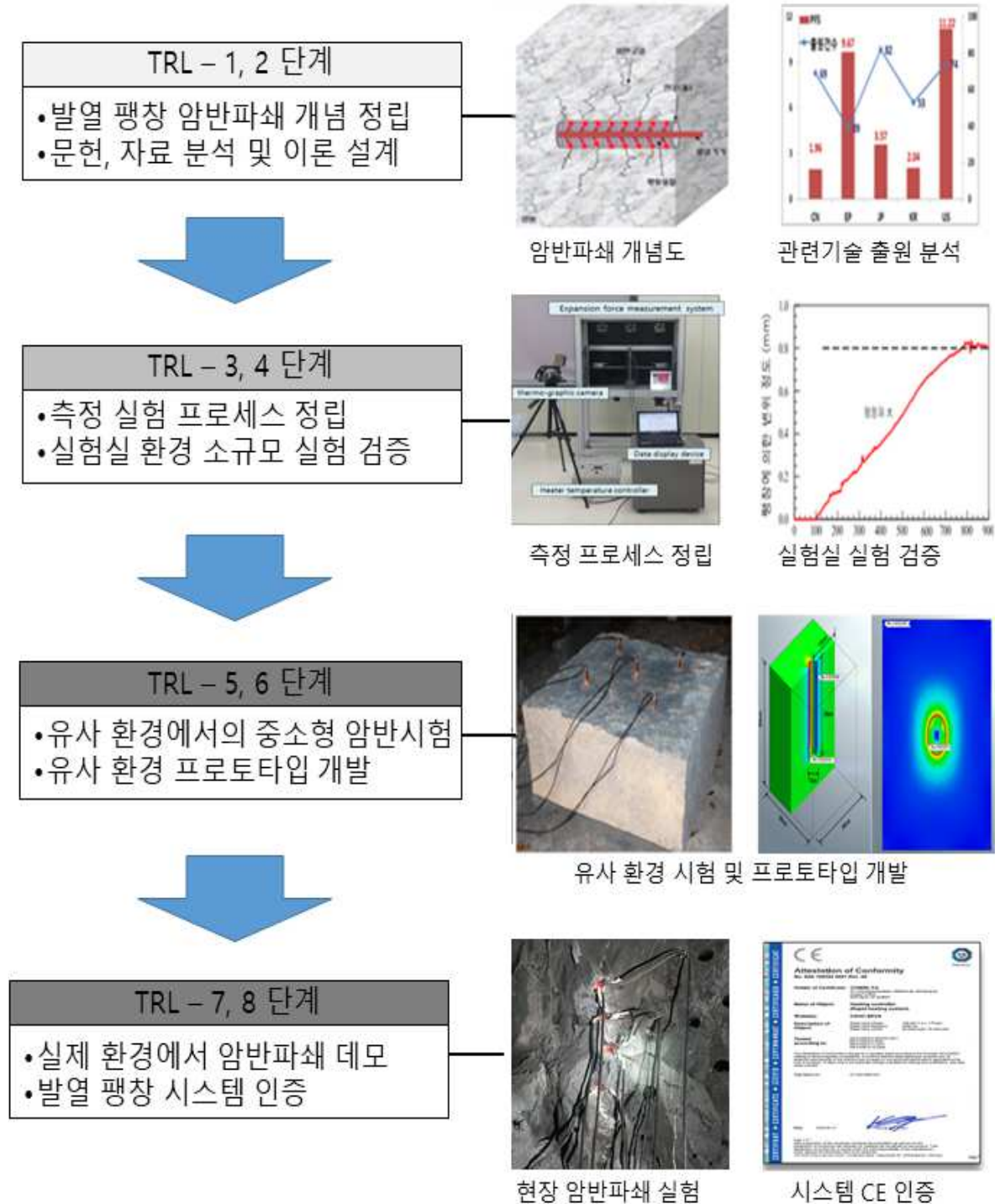
암반파쇄 (4단계)

2. 연구수행내용 및 성과

가. 현재 기술 수준

구분		표기	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	☐	【기초실험】 기본원리발견
	TRL 2	☐	【개념정립】 기술개념과 적용분야의 확립
실험 단계	TRL 3	☐	【기본성능검증】 분석과 실험을 통한 기술개념 검증
	TRL 4	☐	【부품/시스템 성능검증】 연구실 환경에서의 Working Model 개발
시작품 단계	TRL 5	☐	【장치/시스템 시제품 제작】 유사 환경에서의 Working Model 검증
	TRL 6	☐	【시제품 성능평가】 유사 환경에서의 프로토타입 개발
실용화 단계	TRL 7	☐	【시제품 신뢰성평가】 실제 환경에서 시제품 데모
	TRL 8	■	【시제품 인증】 상용제품 시험평가 및 신뢰성 검증
양산 단계	TRL 9	☐	【사업화】 상용제품생산

나. 현재까지 확보된 기술개발 현황
(1) TRL 기준 기술개발



(2) 추진 일정 및 상황

개발과정	일 자	주요 진행내용	개발주체
개발동기	2014.01	- 무진동 터널 굴착 기술 수요 증대 - 마이크로웨이브를 이용한 암반파쇄 기초 연구	한국철도 기술연구원
시장조사	2015.01	- 무진동 암반파쇄 기술 특허조사 - 암반파쇄 논문 및 연구동향 조사 - 카트리지히터를 이용한 암반파쇄 기초 연구	한국철도 기술연구원
원천특허 출원 (1차 특허출원)	2015.11	1차 원천특허 ‘팽창재를 이용한 파쇄방법’ 출원	한국철도 기술연구원
공동 기술개발 협약	2016.01	한국철도기술연구원과 (주)태평양기술산업의 무진동 발열팽창 암반파쇄 기술 공동 개발 협약 체결	한국철도기술 연구원, (주) 태평양기술산 업
측정 시스템 구축	2016.03	무접점 센서를 이용한 발열팽창력 측정 시스템 구축	한국철도 기술연구원
팽창력 증대 연구	2016.04	팽창력 증대를 위한 혼합재료 연구	한국철도기술 연구원, (주) 태평양기술산 업
모의 환경 시험	2016.06	소형암반을 이용한 모의 현장 암반파쇄 시험 성공	한국철도기술 연구원, (주) 태평양기술산 업
원천특허 출원 (2차 특허출원)	2016.08	2차 원천특허 ‘무진동 파쇄장치’ 출원	한국철도기술 연구원, (주) 태평양기술산 업
무진동 암반파쇄 기술 시연 및 언론 홍보	2016.09	MBC, YTN, 연합뉴스, 토목신문을 통한 발열팽창 암반 파쇄 시연 및 홍보	한국철도기술 연구원, (주) 태평양기술산 업
기술 이전 실시 계약	2016.10	‘발열팽창을 이용한 암반파쇄 기술’ 기술이전 계약	한국철도기술 연구원, (주) 태평양기술산 업
원천특허 등록	2017.03	1차 원천특허 등록 (스마트 등급 BBB)	한국철도기술 연구원, (주) 태평양기술산 업
원천특허 등록	2017.08	2차 원천특허 등록 (스마트 등급 BBB)	한국철도기술 연구원, (주) 태평양기술산 업
연구과제 선정	2018.04	저전압 가열기반의 발열팽창을 이용한 무진동 암반파쇄공법 개발 과제 선정	(주)태평양기술 산업 (주)코윈에프에 이

개발과정	일 자	주요 진행내용	개발주체
발열코일개발	2018.05	• 발열코일개발을 위한 용역착수	(주)태평양기술 산업
측정시스템구축	2018.08	• 무접점 센서를 이용한 발열팽창력 측정시스템 구축	(주)태평양기술 산업
모의환경시험	2018.08	• 능동형 전력변환장치를 이용한 발열팽창시험 (50cm급 코일테스트)	(주)태평양기술 산업 (주)코원에프에이
팽창력 증대 개선	2018.09	• 능동형 전력변환장치 시스템 성능 개선 (유동가열방식에서 직접가열방식으로 개선)	(주)태평양기술 산업 (주)코원에프에이
특허 출원	2018.10	• 1차특허 ‘무진동 파쇄장치’ 출원 • 2차특허 ‘파쇄장치’ 출원	(주)태평양기술 산업
모의환경시험	2019.02	• 능동형 전력변환장치 동시작동 테스트 • 발열팽창재 성능개선을 위한 혼합비 테스트 • 팽창재 하우징을 이용한 팽창력 테스트	(주)태평양기술 산업 (주)코원에프에이
학술발표	2019.09	• ‘ASEM19’ 발표자료개제 ‘Poster 4-3 -Modelling of Rock Cracking Using Expansion of Vermiculite’	(주)태평양기술산 업 경북대학교 산학협력단
특허 등록	2019.09	• 2차특허 ‘파쇄장치’ 등록	(주)태평양기술 산업
특허 등록	2019.11	• 1차특허 ‘무진동 파쇄장치’ 등록	(주)태평양기술 산업
모의환경시험	2019.11	• 실대형 모의암반 팽창파쇄 테스트 성공	(주)태평양기술 산업
특허 출원	2019.12	• 3차특허 ‘저전압 가열기반의 발열팽창을 이용한 무진동 파쇄장치’ 출원	(주)태평양기술 산업
팽창력 증대 개선	2020.03	• 100cm급 발열코일 성능테스트 후 능동형 전력변환장치 시스템 개선	(주)태평양기술 산업 (주)코원에프에이
제품 인증	2020.05	• 능동형 전력변환장치 KC인증, CE인증 완료	(주)코원에프에이
현장 테스트 사전조사	2020.05	• 암반파쇄 현장 조사 실시 (강원도 고성 하수처리장, 포천 채광현장)	(주)태평양기술산 업
특허 등록	2020.08	• 3차특허 ‘저전압 가열기반의 발열팽창을 이용한 무진동 파쇄장치’ 등록	(주)태평양기술 산업
암반파쇄 현장 실험	2020.09	• 포천 관인광산 갱구 암반파쇄 현장테스트	(주)태평양기술 산업 (주)코원에프에이
암반파쇄 현장 실험	2020.11	• 고성군 공공하수처리시설 증설사업 지하터파기 암반파쇄 현장테스트	(주)태평양기술 산업
논문 성과	2020.12	• SCI 논문 게재 1편 및 리뷰(review) 중 1편	(주)태평양기술 산업

다. 연구 내용 및 범위

(1) 발열팽창 암반파쇄용 팽창재료 및 상용 하우징 개발

(가) 발열팽창재료 팽창력 개선

① 발열팽창력 측정 시스템 구축

급속발열팽창 암반파쇄용 재료개발을 위하여 특수한 팽창력 측정 장비가 필요하다. 800℃ 이상의 고온에서 팽창정도를 측정하기 위하여 비접촉 센서와 시간별 팽창정도를 자동 데이터화 할 수 있는 장비를 개발 하였다. 발열 팽창된 팽창정도로부터 팽창력을 산술적으로 정리하고 이를 바탕으로 암반파쇄와 같은 조건의 강관을 이용하여 실제 암반파쇄시 시간에 따라 발생하는 팽창력을 측정할 수 있도록 하였다. 그림과 같이 팽창력 측정 장비는 크게 3부분으로 구성된다. 실제 발열기로부터 열을 받아 팽창된 정도를 측정하는 무접점 팽창력 측정 장비, 팽창정도를 시간별로 자동 데이터화 하는 데이터 디스플레이 장비, 시간별 히터 온도를 제어하기 위한 히터 온도 제어장비이다. 특히, 그림 2-1와 같이 비접촉 센서를 이용한 발열팽창재의 팽창력 측정 장치는 강관의 표면에 센서를 직접 부착하지 않는 비접촉 광학센서를 장착하여 초고온에서도 팽창정도를 측정할 수 있게 하였다. 실험중에는 강관 표면온도가 500도 이상 고온으로 발열되어 열에 의한 센서시스템 보호를 위하여 센서와 히터 사이 거리를 최소 20cm 이상 격리하였다. 그림 2-2와 그림 2-3은 과제를 통하여 구축한 팽창력 측정 시험 장비를 보여준다.



그림 2-1 팽창력 측정 시스템 구축



그림 2-2 팽창력 측정 장비 지그

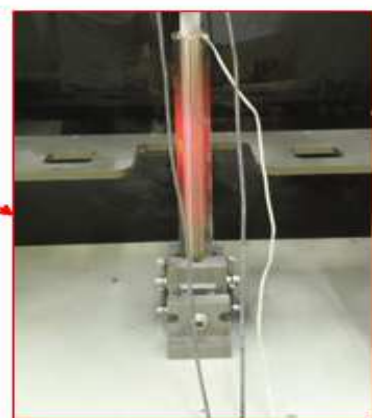
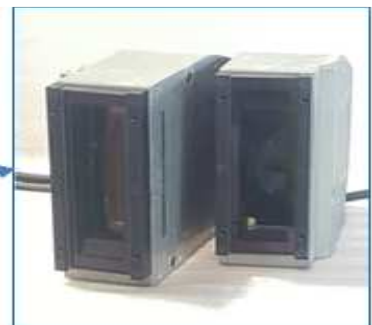


그림 2-3 팽창력 측정 실험

② 발열팽창력 측정수식 적용

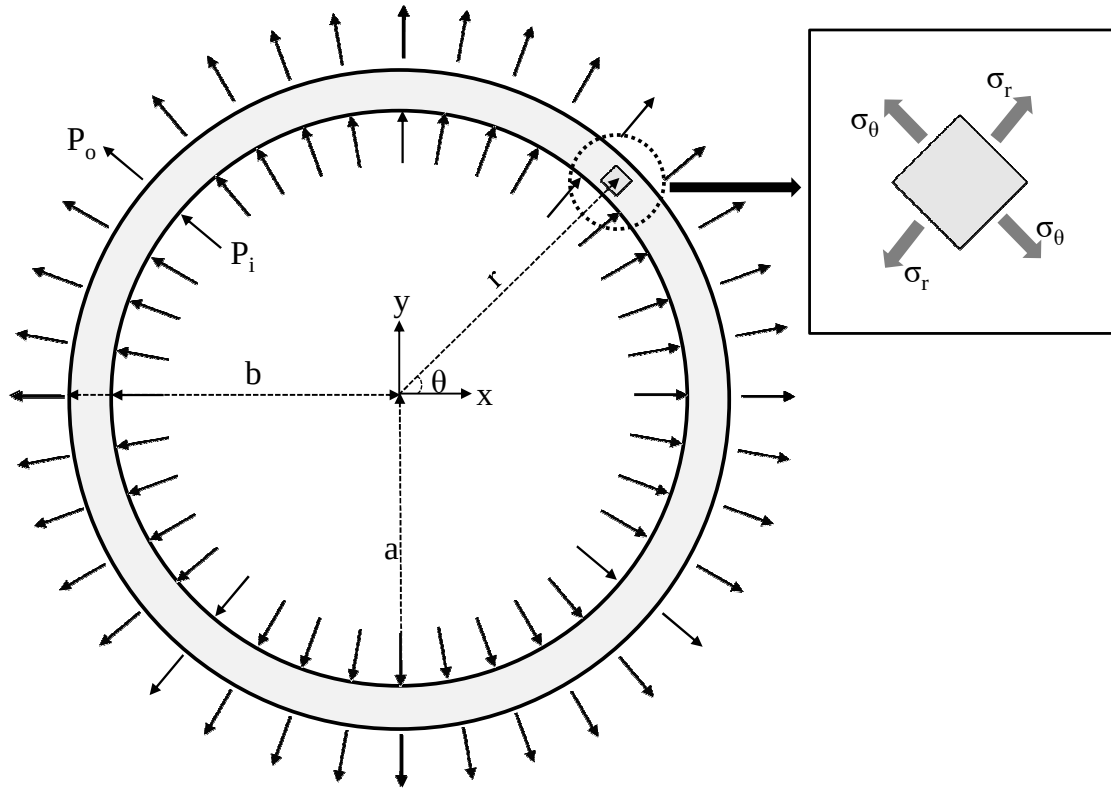


그림 2-4 강관에 대한 스트레스(stress) 요소들

시험에 사용되는 스테인리스 강관은 얇은 원통형 모양으로 힘은 방사방향으로 팽창이 되도록 받는다. 그림 3.43 과 같이 강관의 얇은 벽에 대해서 두종류의 스트레스가 발생한다. σ_r 와 σ_θ 는 각각 방사방향과 접선방향의 스트레스를 나타낸다. r 은 구조물의 중심에서부터 관심지점까지의 방사방향 거리를 나타낸다. P_i 와 P_o 는 각각 내부와 외부 압력을 의미하며, a 와 b 는 각각 두꺼운 벽의 원통구조물의 내측과 외측 반지름을 의미한다. 또한 구조물 몸체뿐만 아니라 하중이 모두 선대칭이기 때문에 재질에서의 shear 스트레스가 존재하지 않는다. 다음은 두꺼운 원통형 구조물에 대한 조건을 보여준다.

$$\frac{b-a}{a} \geq \frac{1}{20} \quad (1)$$

균일한 분포의 외측, 내측 하중을 받는 두꺼운 원통형구조물 안쪽의 스트레스 분포 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_r = \frac{(a^2 P_i + b^2 P_o)}{(b^2 - a^2)} - \frac{a^2 b^2 (P_i + P_o)}{r^2 (b^2 - a^2)} \quad (2)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{(a^2 P_i + b^2 P_o)}{(b^2 - a^2)} + \frac{a^2 b^2 (P_i + P_o)}{r^2 (b^2 - a^2)} \quad (3)$$

원통구조물의 압력에 의한 방사형의 변위는 Hook's law 에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$u_r = \frac{1-\nu}{E} \frac{(a^2 P_i + b^2 P_o)}{r(b^2 - a^2)} + \frac{1+\nu}{E} \frac{a^2 b^2 (P_i + P_o)}{r(b^2 - a^2)} \quad (4)$$

E 와 ν 는 스테인리스 강관의 Young' s modulus 과 Poisson' s ratio 수치이다.

팽창력 측정에 사용되는 조건에서는 단지 내부 압력만이 존재하기 때문에 (e.g., $P_o = 0$) 위 수식 (2), (3), (4) 는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_r = \frac{a^2 P_i}{(b^2 - a^2)} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (5)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{a^2 P_i}{(b^2 - a^2)} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (6)$$

$$u_r = \frac{P_i a^2 r}{E(b^2 - a^2)} \left((1-\nu) + (1+\nu) \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (7)$$

또한, 최대 방사방향 스트레스는 내부면 표면에서 발생한다. (where $r = a$, $r = b$)
반면에 최대 방사변위는 외각 표면에서 발생한다.

$$\sigma_{r=a} = -P_i \quad (8)$$

$$u_{r=b} = \frac{2P_i a^2 b}{E(b^2 - a^2)} \quad (9)$$

수식(9)로부터 방사방향으로 강관의 변위가 발생하기 위한 내부압력은 다음과 같이 최종적으로 얻을 수 있다. 이 수식 (10)으로부터 강관의 재질과 구조, 변이 정도를 알면 내부에서 발생하는 압력을 수치적으로 계산할 수 있다.

$$P_i = \frac{E(b^2 - a^2)}{2a^2 b} u_{r=b} \quad (10)$$

③ 팽창재료 개선을 위한 팽창력 실험분석

암반파쇄를 위한 최대 압력을 갖는 팽창재료 개발을 위하여 다양한 설계 인자들의 영향을 고려하여야 한다. 본 과제에서는 팽창재료의 설계 인자를 팽창재의 크기, 팽창재의 크기 비율, 팽창재와 혼합재의 비율, 히터 굽기의 변화로 분석하였다.

㉔-1 팽창재 크기 변화

암반 파쇄재인 질석의 크기에 따른 영향은 다음과 같다. 질석의 파티클 크기에 따라 A(직경이 8mm, 두께 0.5mm), B(직경이 1~4mm, 두께 0.5mm 이하), C(직경이 1mm 이하, 두께 0.5mm 이하)로 구분하였다. 팽창재의 크기에 따른 팽창력 변화를 확인하기 위하여 팽창재와 전열재의 비율을 5:5, 히터 직경을 21mm로 고정하였다. 실험에서 온도 900도까지 도달하는데 히터의 발열 신뢰도를 얻기 위하여 히터 컨트롤로를 이용하여 시간에 따라 온도제어를 하였다. 총 20분 동안 시험을 수행하였고 대부분 온도 900도에서 팽창력이 수렴하는 것을 확인하였다. 그림 2-5은 팽창재 크기를 A로 하였을 때 히터 온도에 따른 팽창력 결과를 보여준다. 그래프를 보면 온도가 100도까지 거의 팽창되지 않다가 100도부터 팽창을 시작하였다. 또한, 500도부터 800도까지 급격하게 팽창력 상승을 보여주었다. 900도에서 최종적으로 141MPa 팽창력을 보여주었다. 그림 2-6은 팽창재 크기가 중간인 B를 이용한 경우이다. A 경우와 마찬가지로 온도가 100도부터 팽창이 시작되었으며 500도부터 크게 팽창력의 상승을 확인하였다. 최종적으로 112MPa 팽창력을 보여주었다.

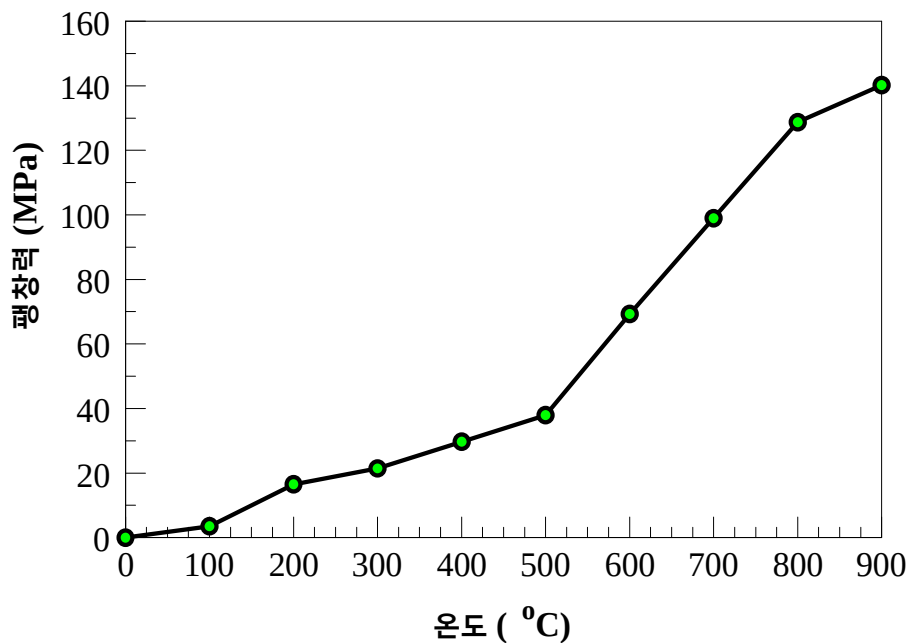


그림 2-5 팽창재 A타입 팽창력 결과

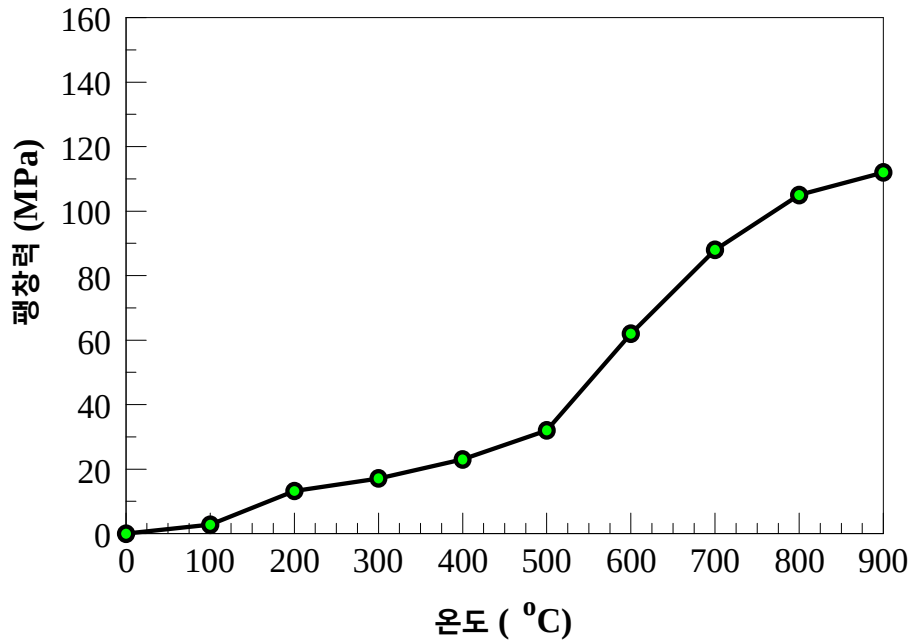


그림 2-6 팽창재 B타입 팽창력 결과

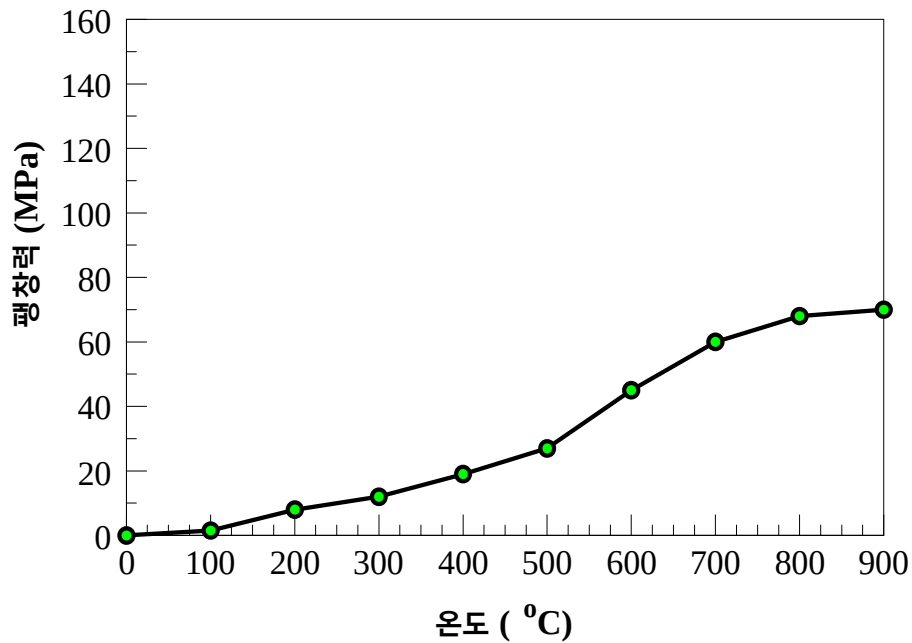


그림 2-7 팽창재 C타입 팽창력 결과

그림 2-7은 팽창재 크기가 가장 작은 타입인 C를 이용한 경우이다. A, B 경우와 마찬가지로 온도가 100도부터 팽창이 시작되지만 500도부터도 큰 팽창력 상승이 없었다. 가장 작은 팽창력으로 70MPa를 보여주었다. 위 결과로부터 팽창재의 크기에 따라 팽창력의 차이가 상당히 큰(112~70) 것을 확인하였다. 팽창재의 크기가 클수록 팽창력이 컸으며, 가장 작은 C 타입의 경우 시험도중 전열재가 위로 솟구치는 현상이 발생하여 팽창력을 크게 얻지 못하였다. 이는 발열로부터 팽창재의 부피팽창이 천공의 방사방향으로의 팽창된 것이

아니라 크기가 작은 팽창재로 인해 위로 압력이 발생되어서 생기는 현상으로 고려된다. 이 결과로부터 향후 팽창력 테스트에서 팽창재 C 타입은 사용하지 않기로 하였다.

㉔-2 팽창재 크기 비율 (A/B) 변화

앞절의 결과를 바탕으로 팽창재 크기 A와 B의 비율을 변화하여 팽창력 변화를 분석하였다.

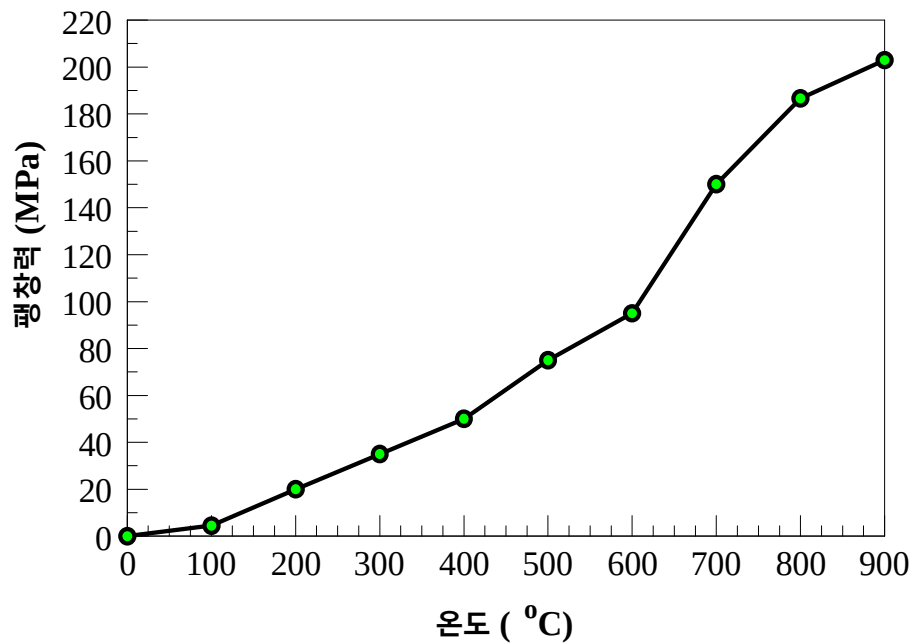


그림 2-8 팽창재 비율(A/B) 9:1 결과 203

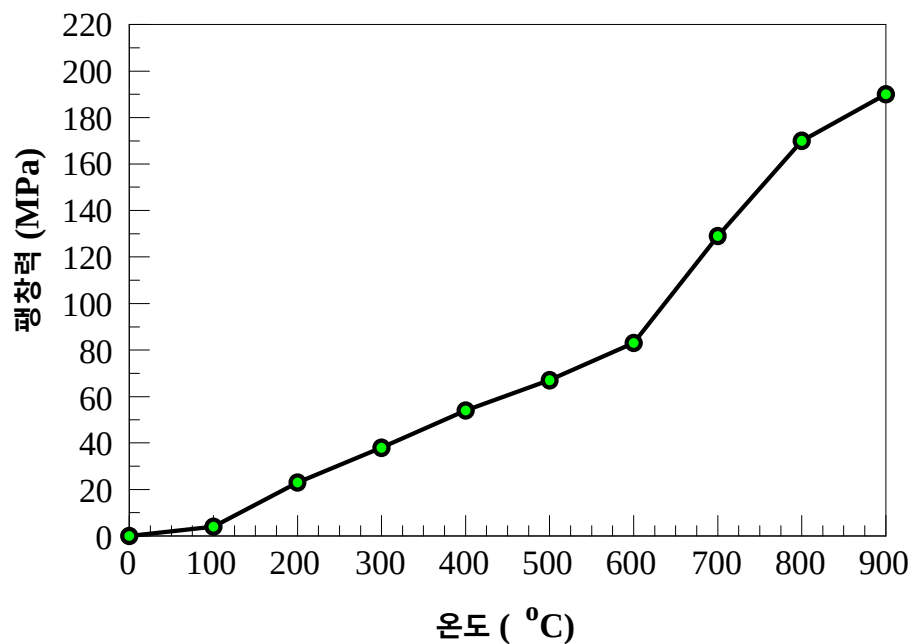


그림 2-9 팽창재 비율(A/B) 8:2 결과

팽창력 비율 변화만 확인하기 위하여 이번에도 온도 900도까지 도달하는데 히터 컨트롤로를 이용하여 시간에 따라 온도제어를 하였다. 총 20분 동안 시험을 수행하였고 대부분 온도 900도에서 팽창력이 수렴하는 것을 확인하였다.

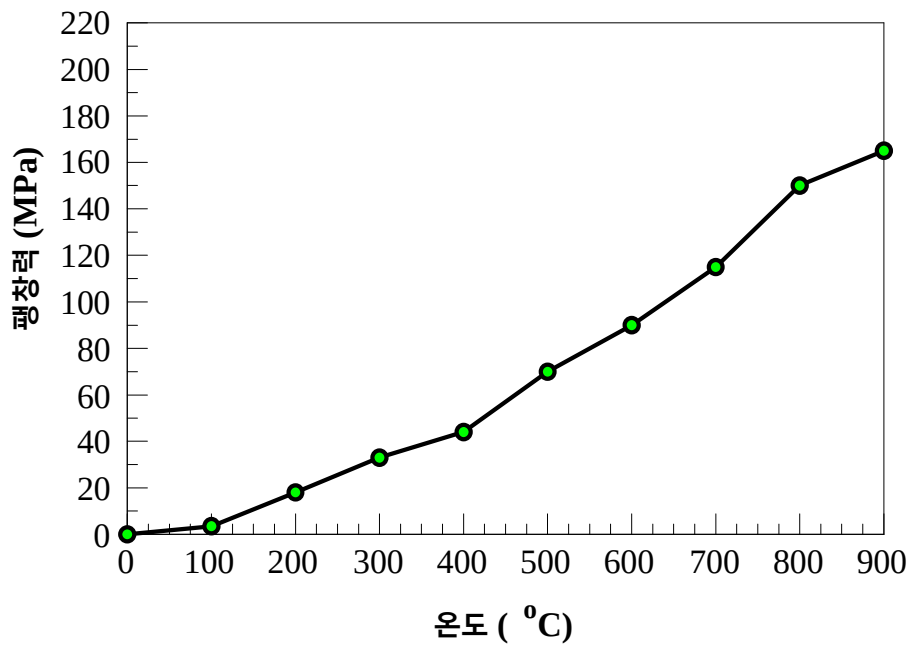


그림 2-10 팽창재 비율(A/B) 7:3 결과

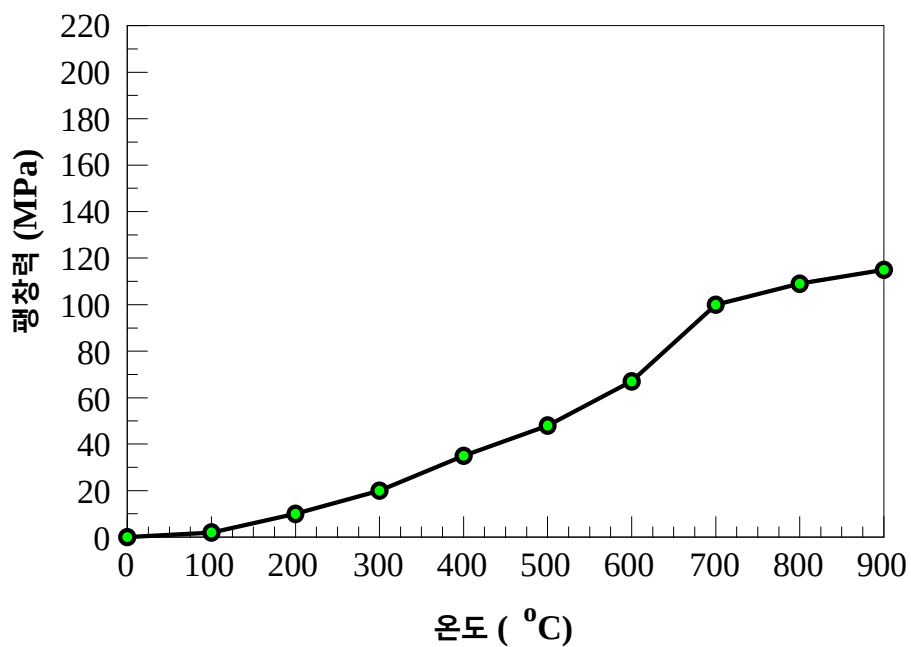


그림 2-11 팽창재 비율(A/B) 6:4 결과

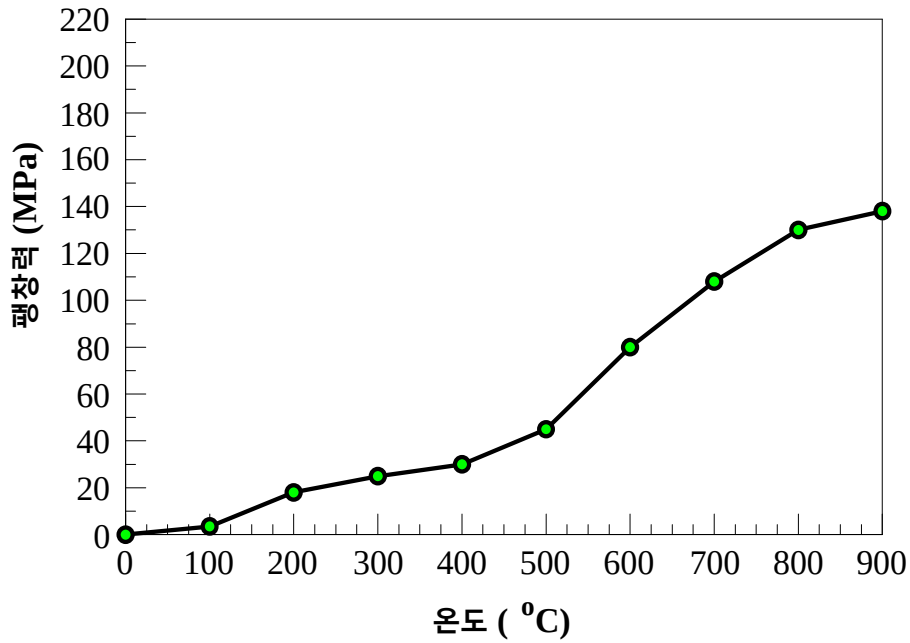


그림 2-12 팽창재 비율(A/B) 5:5 결과

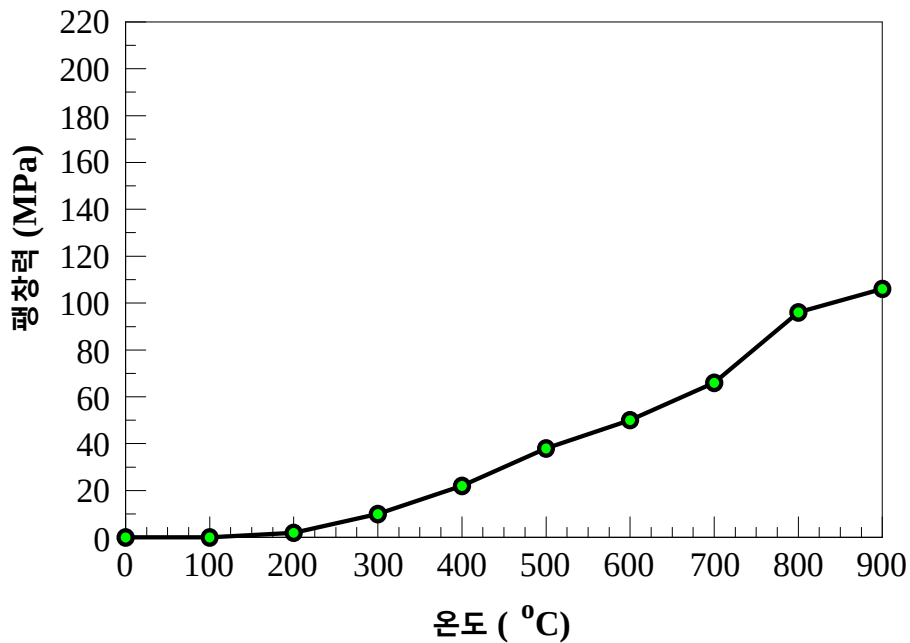


그림 2-13 팽창재 비율(A/B) 4:6 결과

그림 2-8는 팽창재 A와 B의 비율이 9:1인 경우를 보여준다. 온도 900도에서 최종 팽창력이 203MPa를 확인하여 상당히 높은 팽창력을 얻을 수 있었다. 그림 2-9는 팽창재 비율이 8:2로 최종 팽창력이 190MPa를 확인하였다. 그림 2-10은 7:3 비율의 팽창재를 실험하여 165MPa의 결과를 확보하였다. 가장 낮은 팽창력은 팽창재 비율이 4:6로 110MPa를 확인하였다. 실험결과로부터 팽창재의 크기를 혼합하는 경우가 단일한 경우보다 높아졌고, 팽창재의 크기가 큰 입자의 비율이 클수록 높은 팽창력을 얻을 수 있었다.

㉔-3 팽창재와 전열재 비율 변화

앞절의 결과를 바탕으로 팽창재 크기A와 B의 비율을 변화하여 팽창력 변화를 분석하였다. 그림 2-14는 팽창재와 전열재 비율이 7:3으로 최종 팽창력으로 140MPa를 확인하였다. 비율이 6:4, 5:5로 갈수록 팽창력이 커지는 것을 확인하였다.

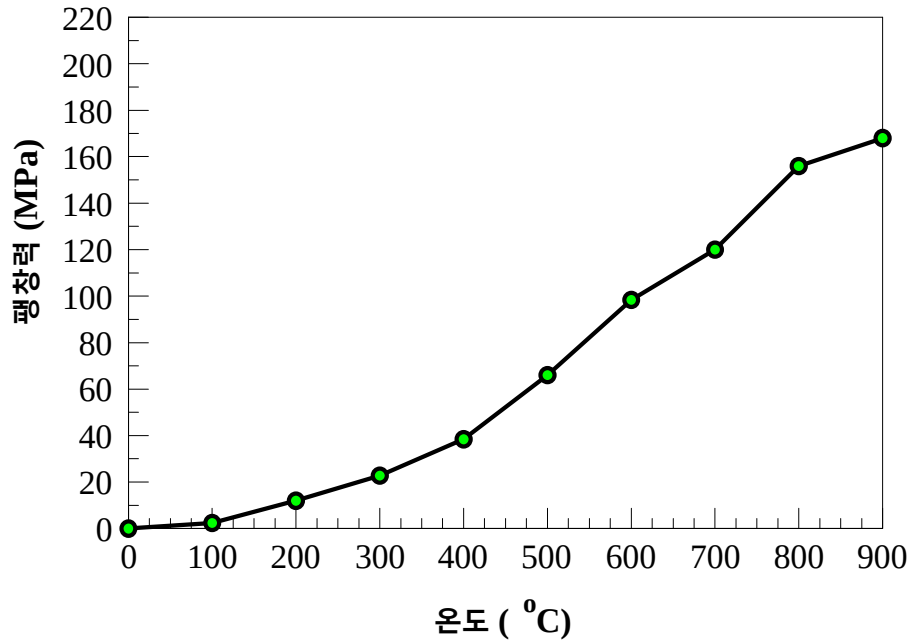


그림 2-14 팽창재와 전열재 비율 7:3 결과

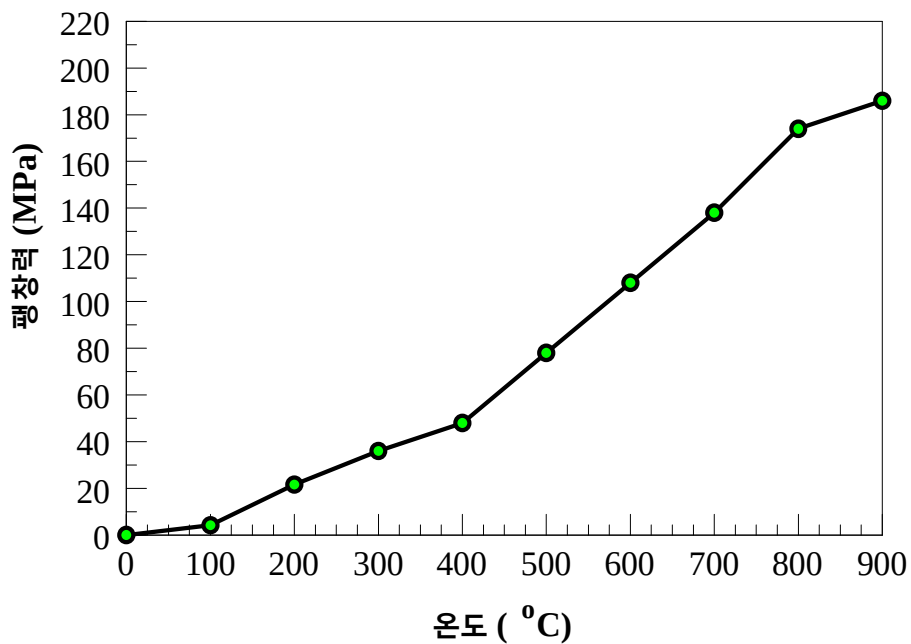


그림 2-15 팽창재와 전열재 비율 6:4 결과

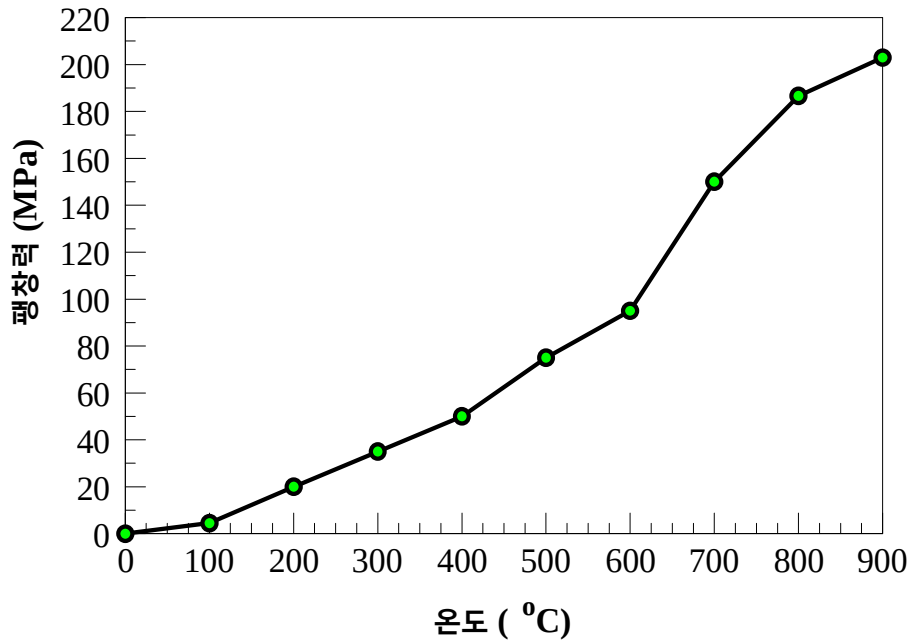


그림 2-16 팽창재와 전열재 비율 5:5 결과

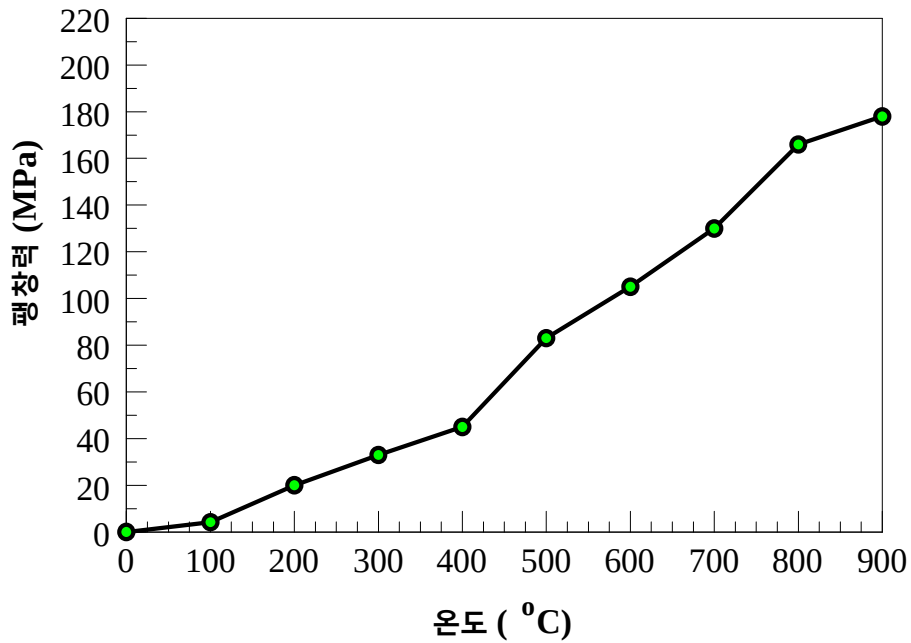


그림 2-17 팽창재와 전열재 비율 4:6 결과

팽창재와 전열재 비율이 5:5가 팽창력 203MPa로 가장 높은 것을 확인하였다. 분석결과 팽창재와 전열재의 비율이 팽창력에 큰 영향을 주는 것을 확인하였다. 팽창력이 많으면 열의 전달이 잘 안되어 팽창재가 고르게 발열부피팽창이 되지 못하며, 전열재가 많은 경우에는 팽창되는 재료의 양이 적어서 팽창력이 감소하는 것을 알 수 있다.

㉔-4 발열히터 굽기 변화

앞절의 결과를 바탕으로 팽창재 크기A와 B의 비율을 9:1로 하고, 팽창재와 전열재의 비율을 5:5로 하여 발열히터의 굽기 변화를 분석하였다. 그림 2-18은 히터의 직경이 18mm 인 경우로 최종 팽창력으로 170MPa을 확인하였다.

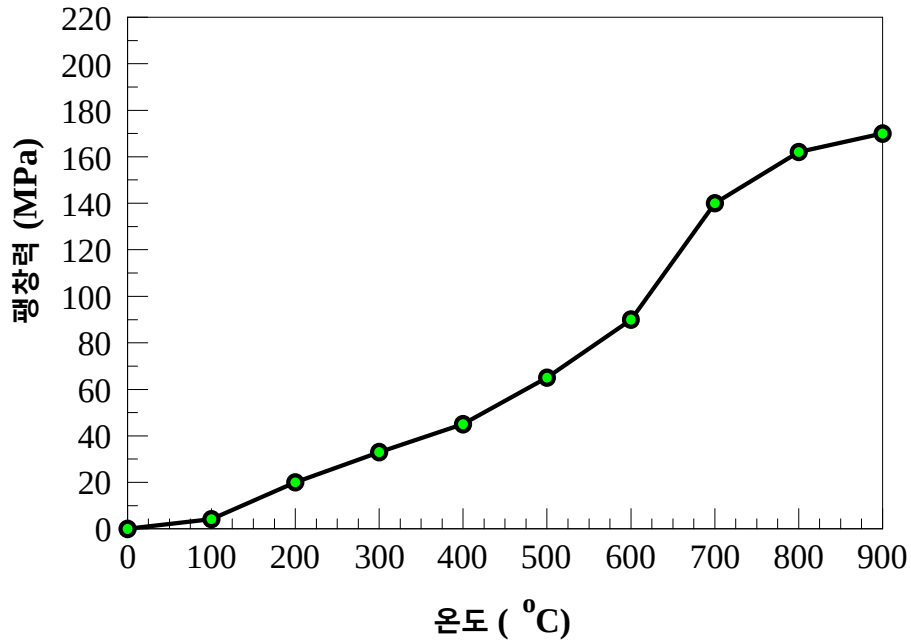


그림 2-18 발열히터 굽기 18mm

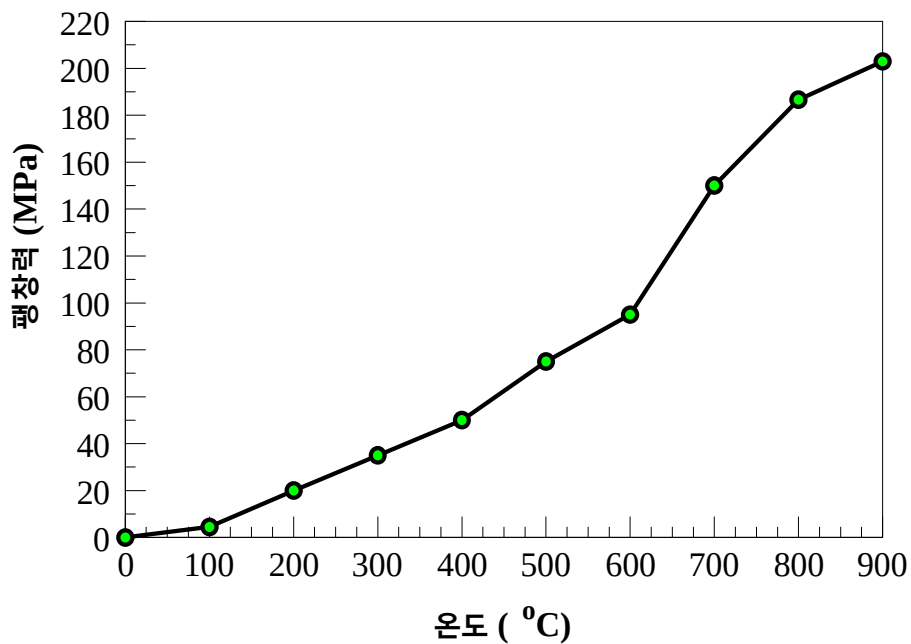


그림 2-18 발열히터 굽기 21mm

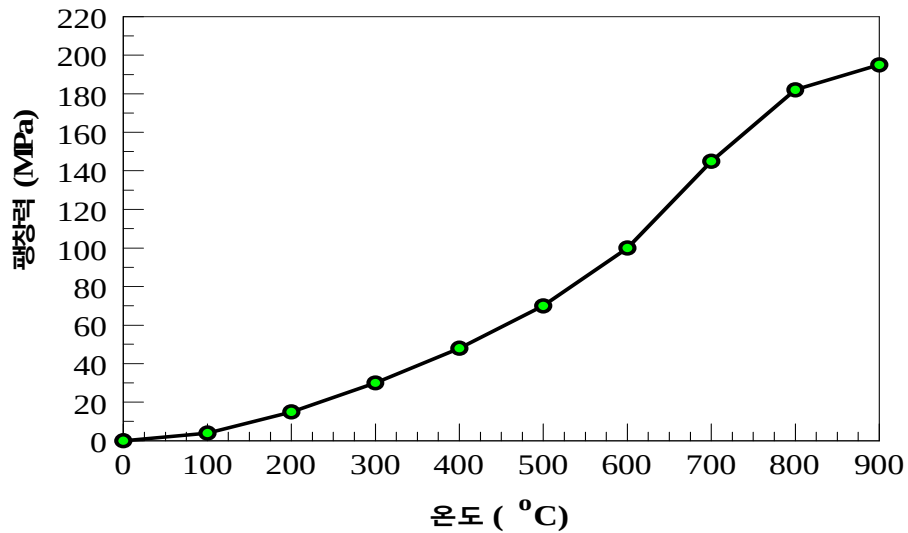


그림 2-19 발열히터 굵기 24mm

그림 2-18은 히터의 굵기가 21mm 로 가장 큰 팽창력을 확인하였다. 그림 2-19은 히터 굵기가 24mm인 경우 195MPa 의 팽창력을 확인하였다. 위의 결과로부터 21mm 이하의 경우 많은 팽창재에 비해 히터의 용량이 작아 열이 팽창재에 충분히 전달되지 못하는 것을 알 수 있으며, 24mm인 히터는 발열기기의 부피가 커서 적은 양의 팽창재로부터 팽창력이 감소 되는 것을 확인하였다. 지금까지 암반파쇄 팽창력 극대화를 위한 다양한 설계 인자들의 영향을 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 결론적으로 이번 실험을 통하여 팽창재 A/B=9:1, 팽창재/전열재 = 5:5, 발열히터의 직경이 21mm 인 조건에서 최대 팽창력 203MPa를 확보하였다. 세부결과는 아래 표로 정리되었다.

■ 팽창재 크기 변화 결과

조건	팽창재 크기	팽창력
팽창재 크기에 따른 변화	팽창재 A (직경이 8mm, 두께 0.5mm)	140 MPa
	팽창재 B (직경이 1~4mm, 두께 0.5mm 이하)	112 MPa
	팽창재 C (직경이 1mm이하, 두께 0.5mm이하)	70 MPa

■ 발열히터 굵기 변화 결과

조건	팽창재 크기	팽창력
발열히터 굵기 변화	히터 직경 = 18 mm	170 MPa
	히터 직경 = 21 mm	203 MPa
	히터 직경 = 24 mm	195 MPa

■ 팽창재 크기 비율 변화

조건	팽창재 크기	팽창력
팽창재 크기 비율변화	팽창재 A/B = 9:1	203 MPa
	팽창재 A/B = 8:2	190 MPa
	팽창재 A/B = 7:3	165 MPa
	팽창재 A/B = 6:4	115 MPa
	팽창재 A/B = 5:5	138 MPa
	팽창재 A/B = 4:6	110 MPa

■ 팽창재와 전열재 비율 변화

조건	팽창재 크기	팽창력
팽창재 /전열재 비율변화	팽창재/전열재 = 7:3	168 MPa
	팽창재/전열재 = 6:4	186 MPa
	팽창재/전열재 = 5:5	203 MPa
	팽창재/전열재 = 4:6	178 MPa

(나) 발열팽창기 하우징을 위한 재료 개발

① 발열팽창재 하우징 제작

무진동 발열팽창 암반파쇄 기술을 수평천공에 대한 시공이 가능하도록 발열체와 발열재료를 일체화하는 것이 중요하다. 이런 일체화를 암반파쇄용 하우징이라고 한다. 하우징을 위하여 기존의 발열재료와 함께 추가적으로 일체화용 재료의 개발이 필요하다. 본 장에서는 일체화용 재료의 비율과 그에 따른 결과를 확인하였다.



그림 2-20 발열 팽창재 하우징

② 발열팽창재 하우징 제작 과정



그림 2-21 하우징 재료 혼합 및 지그에 투입

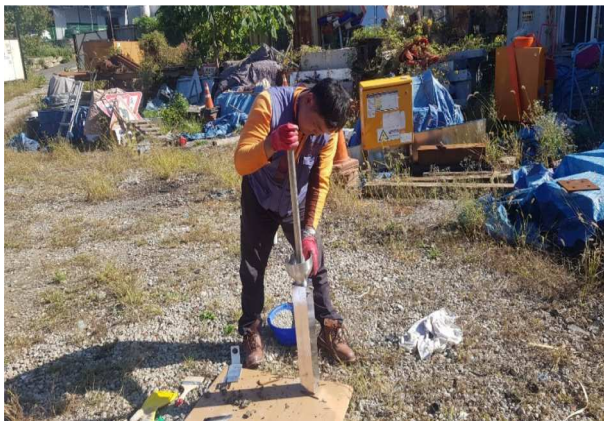


그림 2-22 하우징 지그 재료 다짐

③ 하우징 재료 분석

하우징용 재료 (수지2%, 경화제 2%, 촉진제 0.2% 비율)와 기존의 발열 팽창재를 그림과 같이 결합하였다. 혼합 후 20분후에 굳기정도를 확인하였다.



그림 2-23 일체화 발열팽창재료 1번

하우징용 재료 (수지3%, 경화제 3%, 촉진제 0.3% 비율)와 기존의 발열 팽창재를 그림과 같이 결합하였다. 혼합 후 20분후에 굳기정도를 확인하였다.



그림 2-24 일체화 발열팽창재료 2번

하우징용 재료 (수지4%, 경화제 4%, 촉진제 0.4% 비율)와 기존의 발열 팽창재를 그림과 같이 결합하였다. 혼합 후 20분후에 굳기정도를 확인하였다.



그림 2-25 일체화 발열팽창재료 3번

하우징용 재료 (수지5%, 경화제 5%, 촉진제 0.5% 비율)와 기존의 발열 팽창재를 그림과 같이 결합하였다. 혼합 후 20분후에 굳기정도를 확인하였다.



그림 2-26 일체화 발열팽창재료 4번

발열 팽창재 양을 100%를 기준으로 하우징용 혼합재료를 4가지 비율로 정하여 제작하였다. 일체화된 발열팽창재료 1번의 경우 발열 팽창재 100%기준, 하우징용 수지 2%, 경화제 2%, 촉진제 0.2%를 혼합하였고, 하우징용 재료를 1%씩 증가시켜 일체화된 발열팽창재료 2번, 3번, 4번을 혼합하여, 혼합 20분 후의 굳기 정도를 확인 하였다. 확인한 결과로 1번, 2번 재료의 경우 다짐에의 형상은 잘 갖춰졌으나 결합력이 떨어져 부서졌고, 4번의 경우는 경화도가 강하여 발열시 팽창력의 정도가 약한 것으로 보이며, 3번의 경우 적당한 굳기 및 발열에 의한 팽창력 확보가 가능한 상태로 판단된다. 이에 일체화된 발열팽창재료는 3번으로 결정하며, 그 혼합 비율은 발열팽창재 100% 대비, 하우징용 수지 4%, 경화제 4%, 촉진제 0.4%를 사용하기로 한다.

④ 팽창력 측정을 통한 하우징 영향 분석

㉠ 발열체 모델 2에 대한 팽창력 측정

최종 암반파쇄용 발열체로 결정된 코일을 이용하여 발열체의 구성성분인 질석(A)과 발열합성재료(B)의 비율을 다양화하여 팽창력을 최대화할 수 있는 조건을 도출하였다.

㉠-1 발열체 모델2, 질석 팽창재(A) 90%, 발열합성재(B) 10%

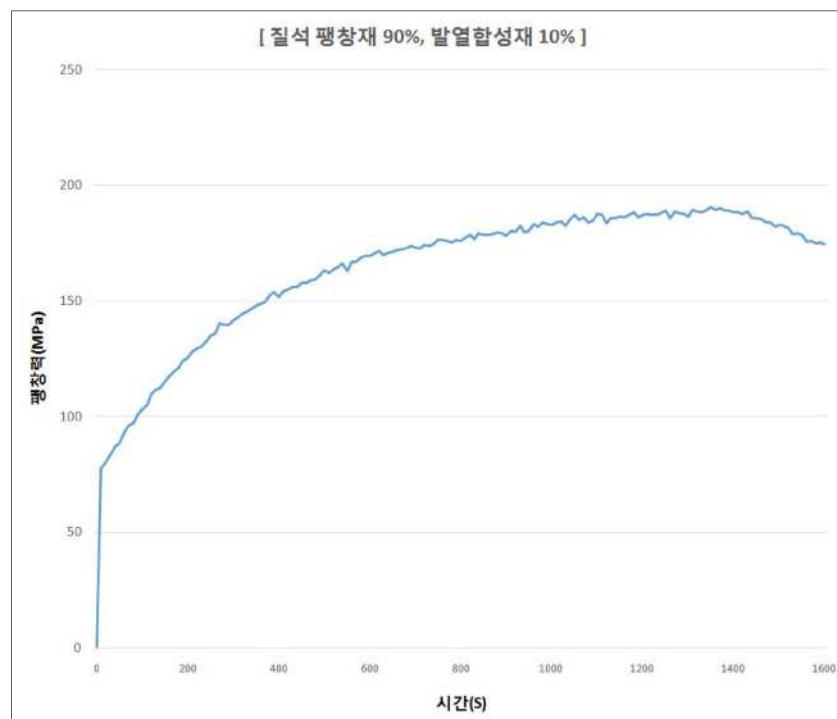


그림 2-27 팽창재 비율(A/B) 90:10 결과 - 최대팽창력 190 MPa

㉔-2 발열체 모델2, 질석 팽창재(A) 85%, 발열합성재(B) 15%

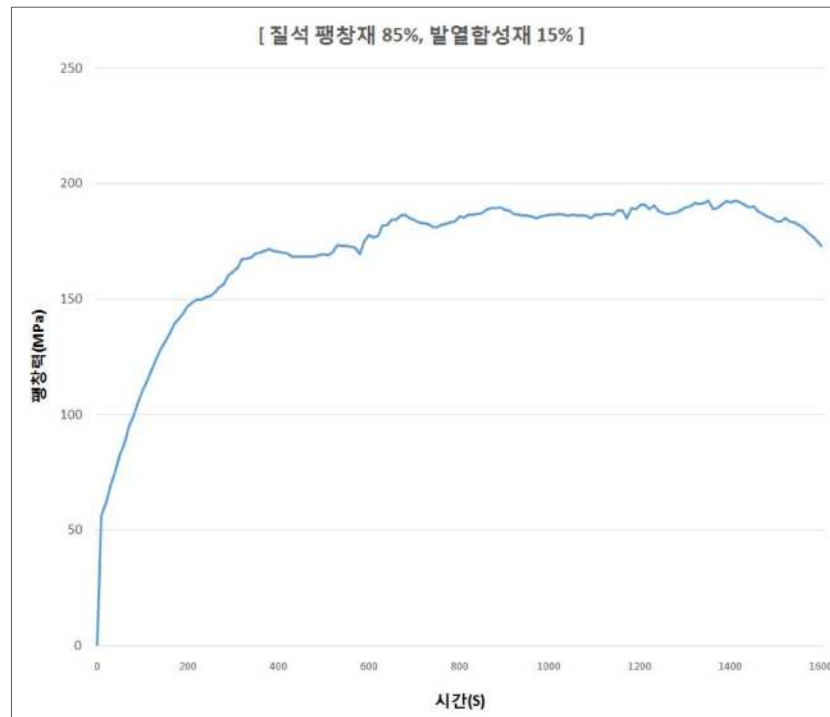


그림 2-28 팽창재 비율(A/B) 85:15 결과 - 최대팽창력 192 MPa

㉔-3 발열체 모델2, 질석 팽창재(A) 80%, 발열합성재(A) 20%

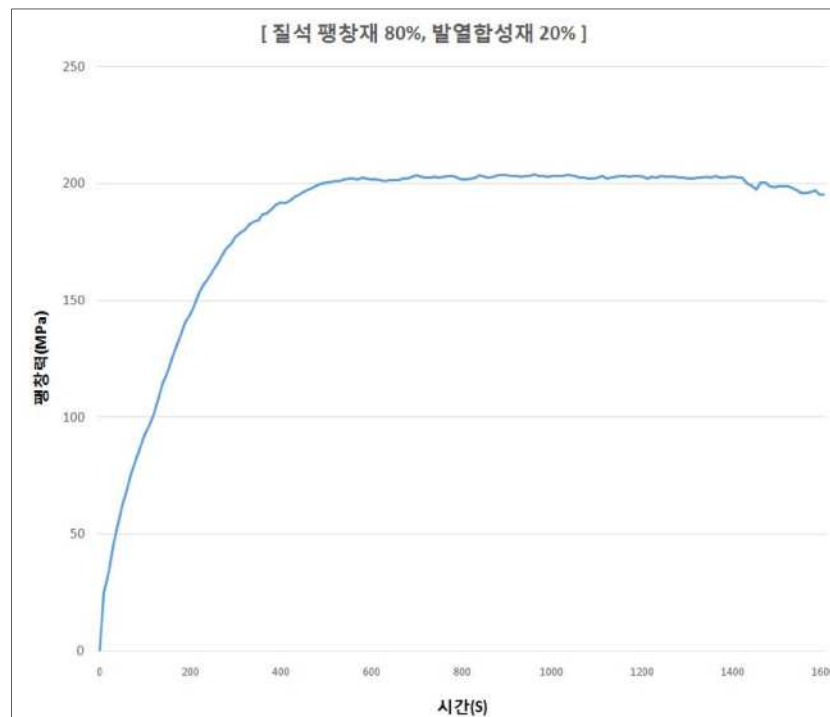


그림 2-29 팽창재 비율(A/B) 80:20 결과 - 최대팽창력 204 MPa

㉔-4 발열체 모델2, 질석 팽창재(A) 75%, 발열합성재(B) 25%

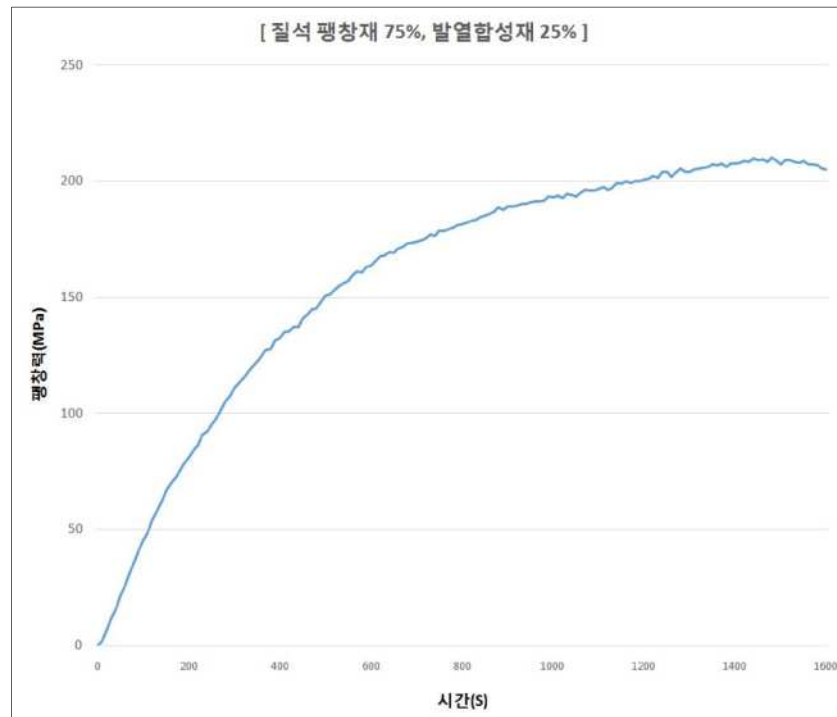


그림 2-30 팽창재 비율(A/B) 75:25 결과 - 최대팽창력 210 MPa

㉔-5 발열체 모델2, 질석 팽창재(A) 70%, 발열합성재(B) 30%

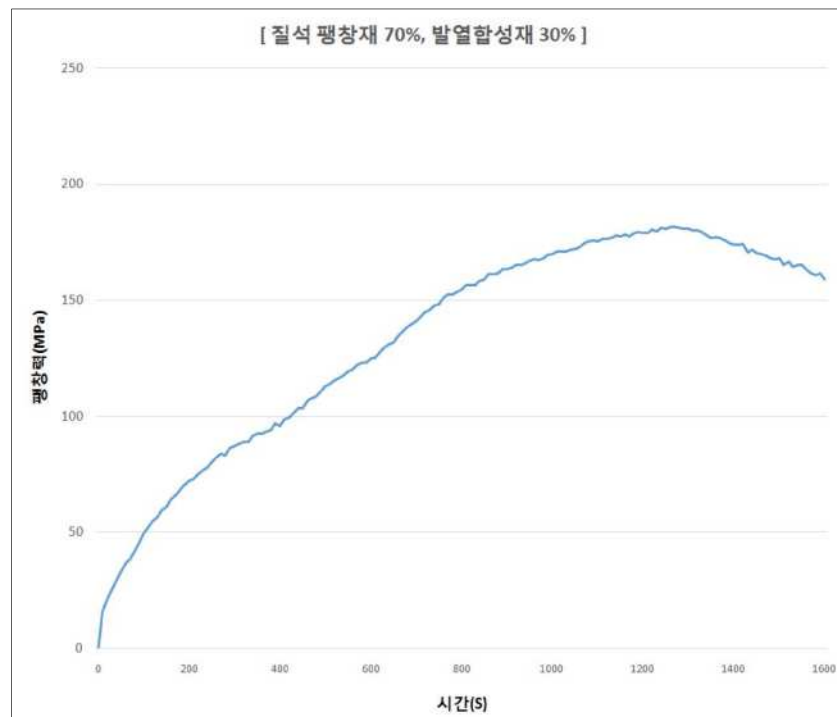


그림 2-31 팽창재 비율(A/B) 70:30 결과 - 최대팽창력 181 MPa

암반파쇄 팽창력 극대화를 위한 다양한 설계 인자들의 영향을 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 결론적으로 이번 실험을 통하여 발열체 모델 2번을 사용하여 팽창재/발열합성재 A/B = 75 : 25인 조건에서 수직방향 최대 팽창력은 210MPa를 확보 하였으며, 발열체 모델 2번을 사용하여 혼합 팽창재/하우징 혼합재 = 100 : 8.4인 조건에서 하우징된 팽창재를 수평조건으로 가정하여 테스트 결과 최소 팽창력 196MPa를 확보하였다. 세부결과는 아래 표로 정리되었다. 결과적으로 수직천공 조건의 최대 팽창력 210 MPa 대비 수평천공 조건인 하우징 발열팽창력은 최소 93% 이상임을 확인하였다.

■ 팽창재와 발열합성재 비율 변화

조건	비 율	팽창력
팽창재 / 발열합성재 비율변화	90 : 10	190 MPa
	85 : 15	192 MPa
	80 : 20	204 MPa
	75 : 25	210 MPa
	70 : 30	181 MPa

■ 하우징 상태의 수평조건의 최소 팽창력

조건	발열체 모델2 사용 발열 팽창재(질석팽창재 75%, 발열합성재 25%) 100% 대비, 하우징용 수지 4%, 경화제 4%, 촉진제 0.4% 혼합	팽창력
테스트	테스트 1번	197.7 MPa
	테스트 2번	196 MPa
	테스트 3번	199 MPa
	테스트 4번	199.5 MPa

⑤ 팽창력 측정 인증

研究報告書 CU20-02743K Final Report	
『저전압 가열기반의 발열팽창을 이용한 무진동 암반파쇄 공법』 Final Report 2021년 1월 7일 의뢰기업명 : (주)태평양기술산업 한국건설생활환경시험연구원장	
	
총 10페이지 중 1페이지	
양식TQP-12-01-03(1)	

(2) 발열기반 능동형 전력변화장치 및 고효율 코일 개발

(가) 50cm 급 암반파쇄용 코일 설계 및 개발

① 발열체 구조에 따른 열해석 시뮬레이션

각 모델의 형상 별로 시간에 따른 온도의 평균, 최대, 최소 온도 및 온도 편차의 그래프를 나타내고 300초에서의 위에서 바라본 장치의 온도분포 이미지를 보였다. 또한, 각각의 Case에 관한 간략한 분석을 포함하였다. 전체적인 열분포 이미지에서 장치 아랫부분의 온도가 상대적으로 낮은 것은 두 파이프 혹은 1열 파이프의 각 편을 접합시키기 위한 조인트가 열용량이 높기 때문이다.

㉠ 모델 1 시뮬레이션 구조

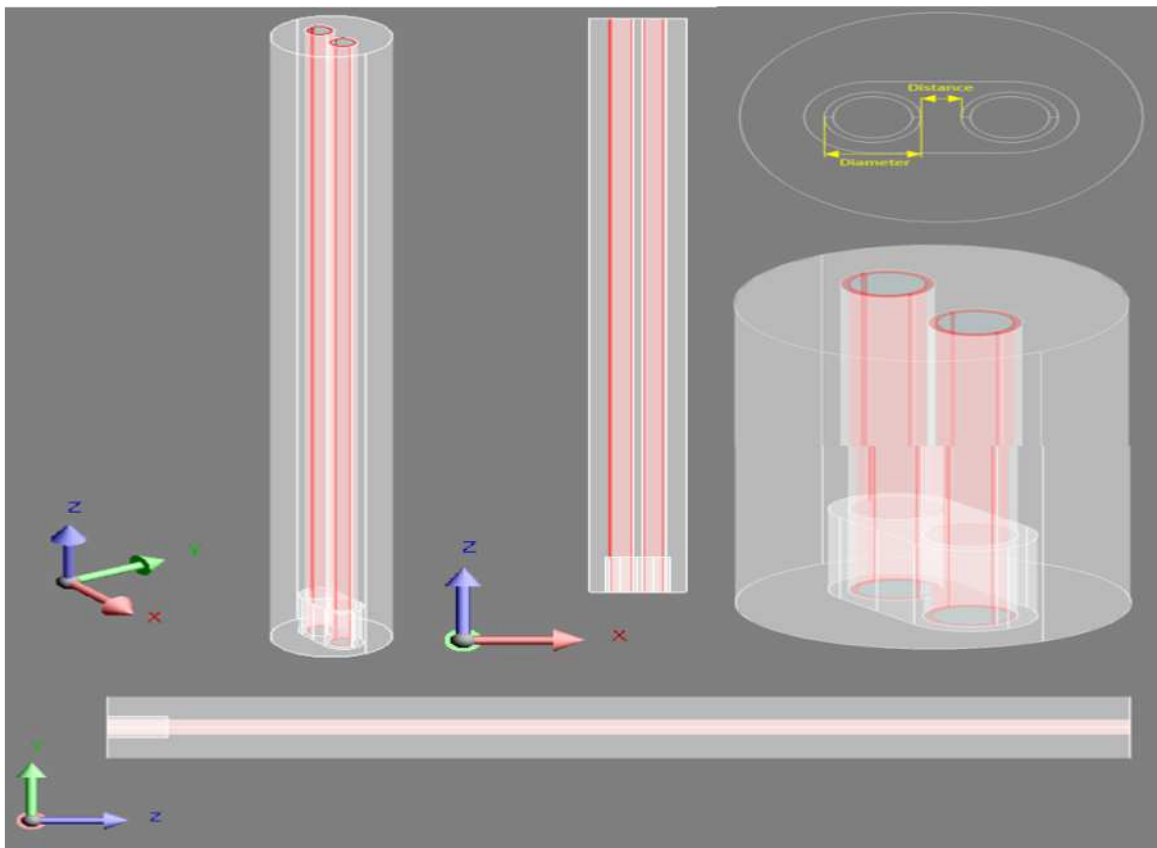


그림 2-32 유한요소해석 프로그램으로 구현한 모델 1의 3D 이미지

그림 2-32는 유한요소 해석 프로그램에서 구현한 모델 1의 3D 이미지이다. 모델 1의 발열부는 평행한 두 파이프와 두 파이프를 연결하기 위한 하단의 조인트로 이루어져 있으며 각 파이프의 내부는 공기만으로 채워져 있다. 외부에 직경 50mm 높이 500mm의 원통형의 질석 혼합물이 둘러싼 형상으로 구현하였다. 파라미터는 각 파이프의 직경(Diameter)와 파이프 사이의 거리(Distance)로 이루어진다.

㉔-1 모델 1 시뮬레이션 해석 결과

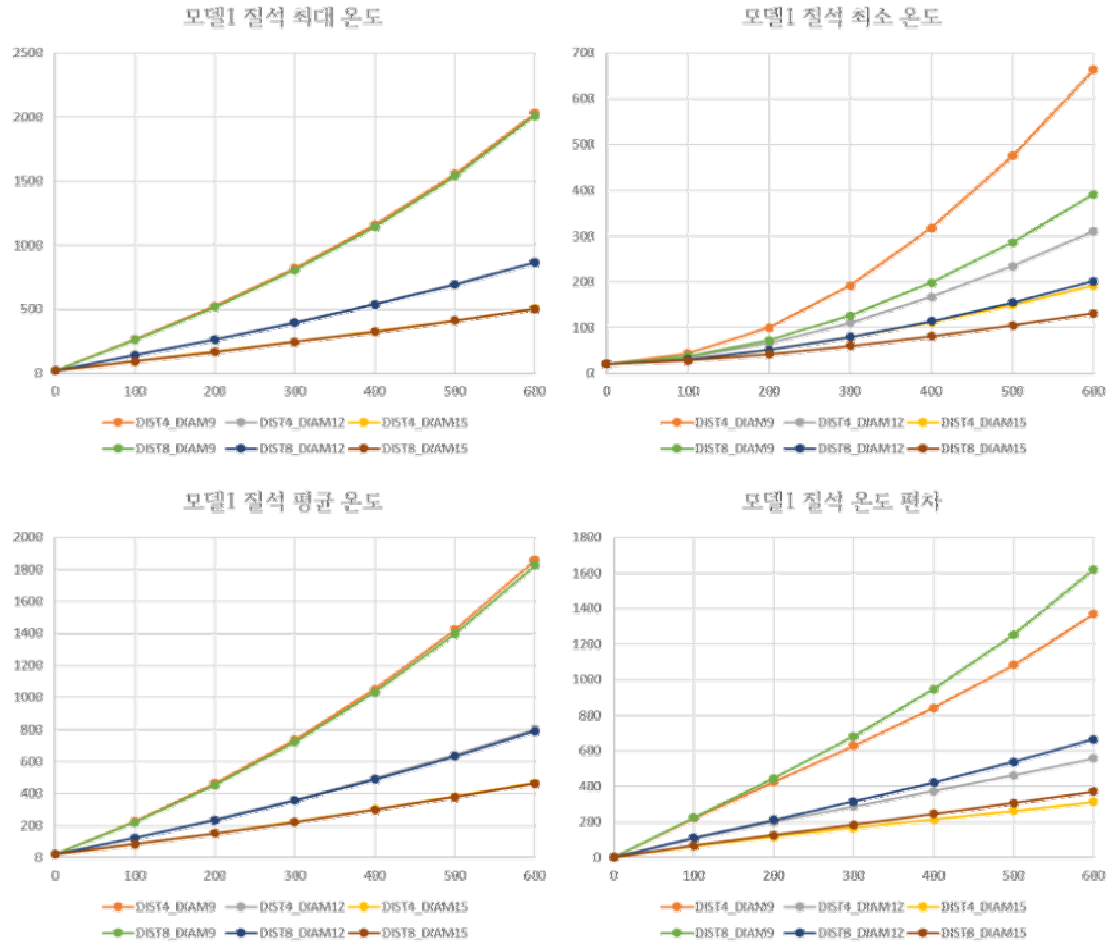


그림 2-33 모델 1의 열 해석 결과

모델 1에서 삽입된 파이프의 외부는 질석으로 채워져 있으며 파이프의 내부는 공기이다. 따라서 파이프의 직경이 커질수록 장치의 전체적인 열용량은 감소하여 동일한 열이 발생하였을 때 온도가 더 빠르게 상승할 수 있다. 하지만 내장되는 질석의 양이 줄어들기 때문에 열팽창률은 감소할 것이다. 각 모델에 대해서 0~600초 동안의 100초 단위 열 해석을 진행하였고, 그림 3-4에 나타난 모델 1의 결과는 위와 같다. 모델 1의 질석 평균 온도 그래프를 통해 파이프 간 거리 DIST와 직경 DIA가 작을수록 전류밀도가 높아져 일정 전류에서 온도가 더 높음을 알 수 있다. 또한, 모든 그래프에서 직경 9mm에서 가장 큰 차이가 발생하였다. 하지만 질석 내의 온도 편차 또한 매우 크기 때문에 불균일한 열팽창의 원인이 될 소지가 있다. 따라서 400초 지점에서 최대 온도와 평균 온도가 각각 섭씨 1321도, 1252도에 도달하는 DIST4_DIA9(직경 9mm, 거리 4mm) 또는 DIST8_DIA9(직경9mm, 거리 8mm)가 가장 적절한 형상으로 볼 수 있다. 이 때, 400초에서의 최대 온도와 최소 온도 사이의 편차는 약 921도로 나타난다.

㉔ 모델 2 시뮬레이션 구조

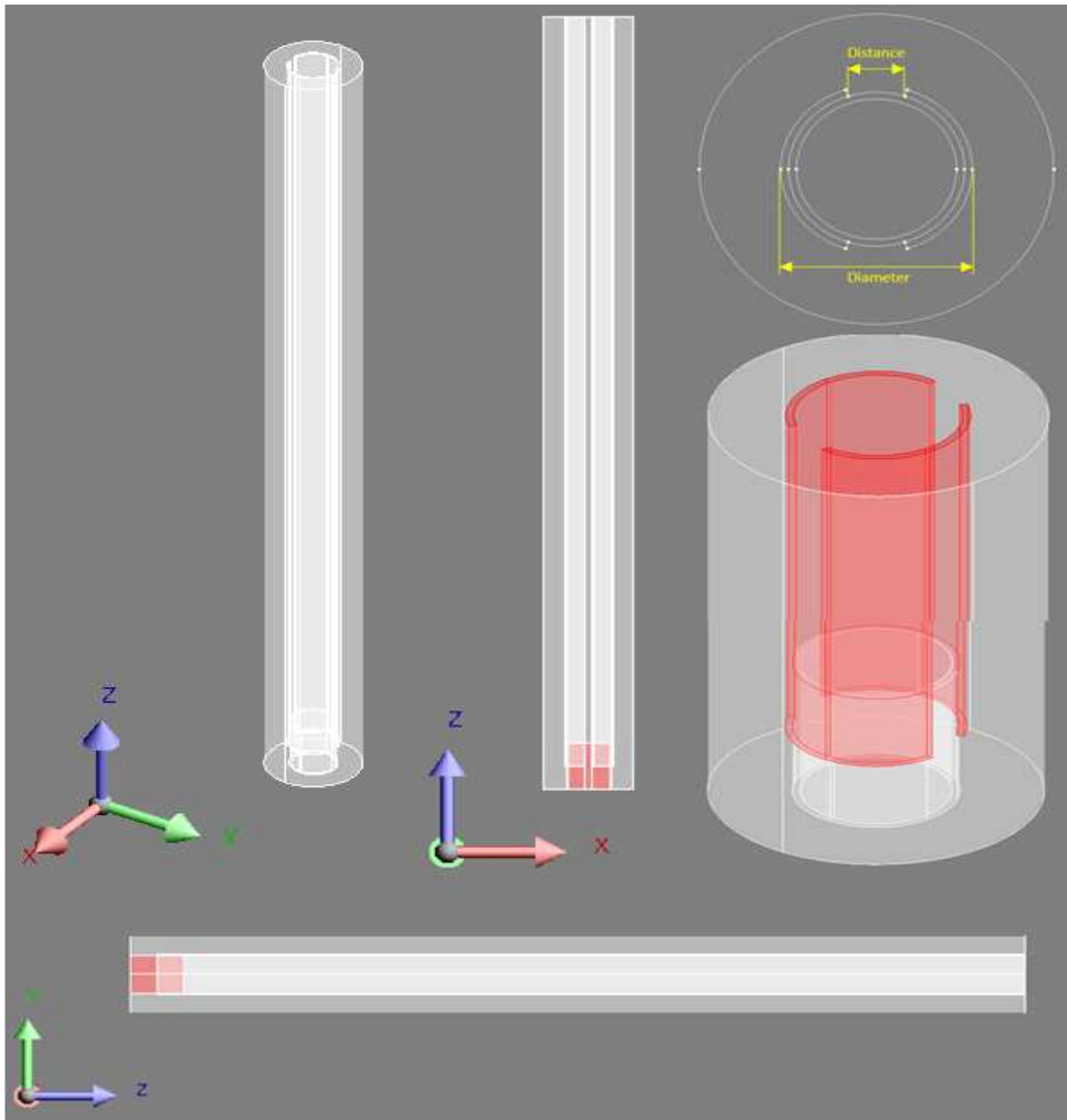


그림 2-34 유한요소해석 프로그램으로 구현한 모델 2의 3D 이미지

그림 2-34은 유한요소 해석 프로그램에서 구현한 모델 2의 3D 이미지이다. 모델 2의 발열부는 1열의 원형 파이프를 2편으로 나누어 하단의 조인트로 연결되었으며 파이프의 내부도 질석으로 채워져 있다. 파이프의 외부는 직경 50mm 높이 500mm의 원통형의 질석 혼합물이 둘러싼 형상으로 구현하였다. 파라미터는 각 파이프의 직경(Diameter)와 파이프 사이의 거리(Distance)로 이루어진다.

㉔-1 모델 2 시뮬레이션 해석 결과

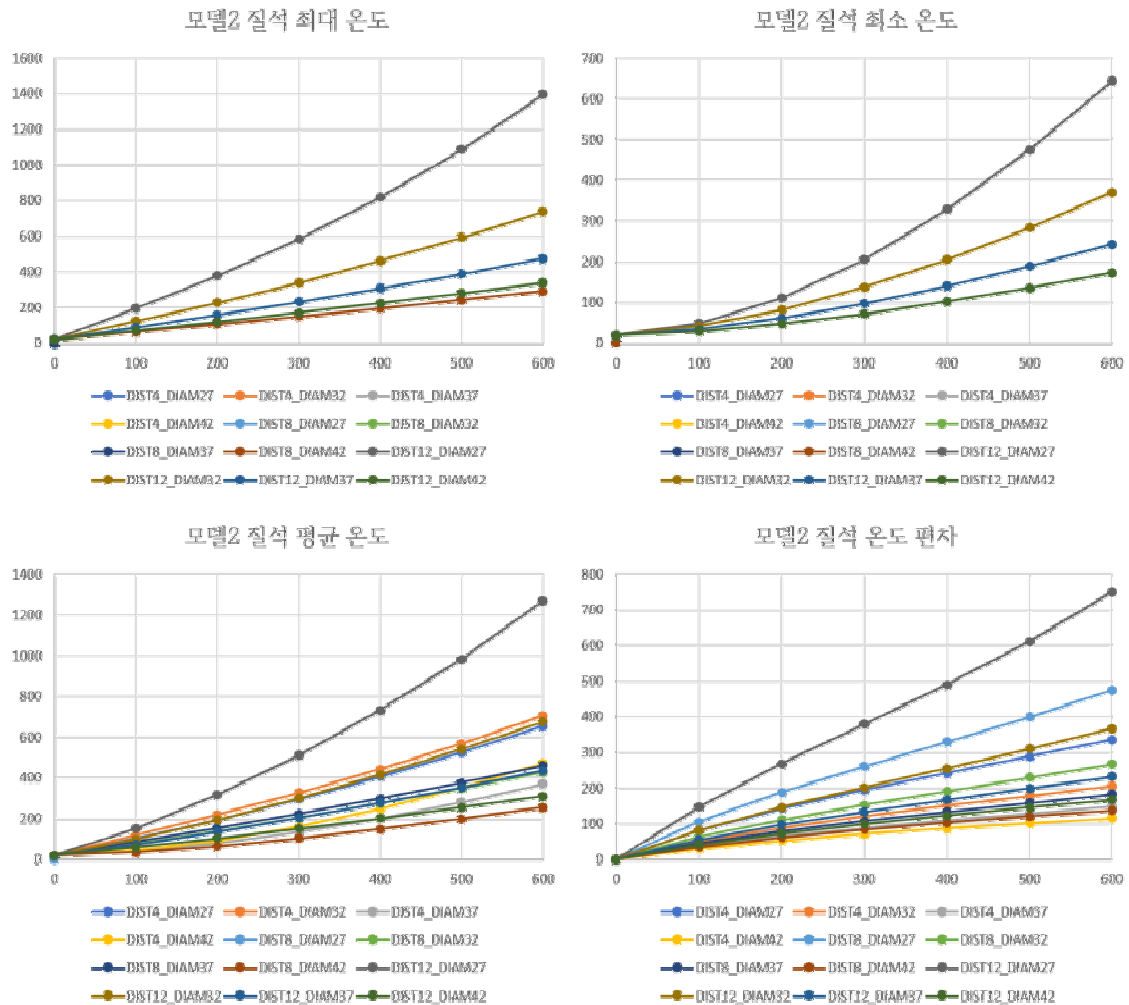


그림 2-35 모델 2의 열 해석 결과

모델 2의 결과는 위와 같으며 전체적으로 모델1에 비해서 낮은 온도 결과가 나왔다. 그 이유는 모델 1과는 달리 파이프 내부도 질석으로 채워져 있어, 섭씨 1도당 열용량이 상대적으로 훨씬 높기 때문으로 추측된다. 하지만 더 많은 양의 질석이 내장되므로 열팽창률도 높을 것으로 예상된다. 400초에서 평균 온도가 800도에 가장 근접하는 경우는 DIST12_DIAM27(직경 27mm, 거리 12mm)이다. 정확한 평균 온도는 섭씨 871도이며 800도 도달의 예상시간은 430초이다. 400초에서의 최대 온도와 최소 온도는 각각 958, 405도이며 따라서 편차는 553도로 나타난다.

㉔ 모델 3 시뮬레이션 구조

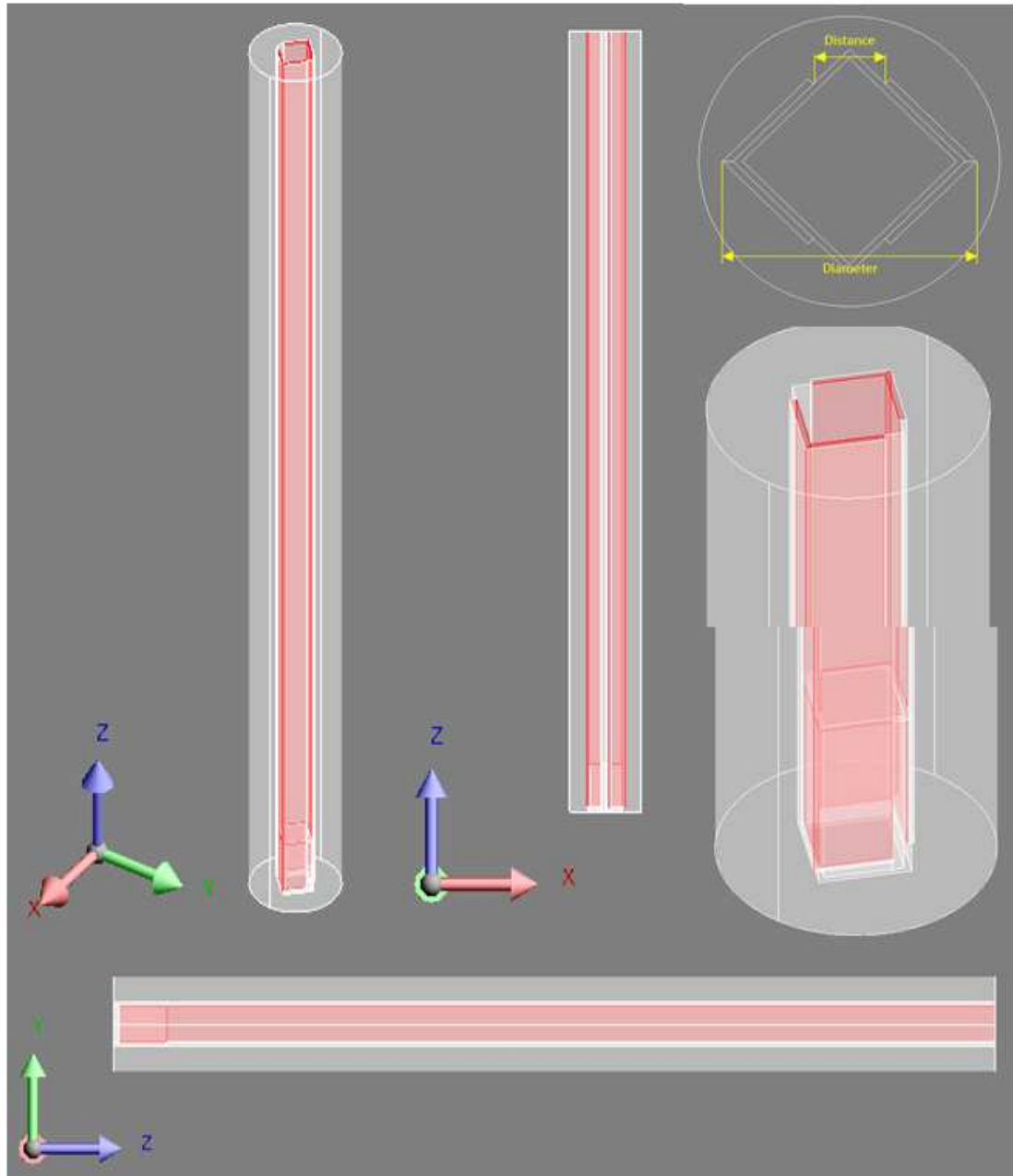


그림 2-36 유한요소해석 프로그램으로 구현한 모델 3의 3D 이미지

그림 2-36은 유한요소 해석 프로그램에서 구현한 모델 3의 3D 이미지이다. 모델 3의 발열부는 1열의 사각형 파이프를 2편으로 나누어 하단의 조인트로 연결되었으며 파이프의 내부도 질석으로 채워져 있다. 파이프의 외부는 직경 50mm 높이 500mm의 원통형의 질석 혼합물이 둘러싼 형상으로 구현하였다. 파라미터는 각 파이프의 직경(Diameter)와 파이프 사이의 거리(Distance)로 이루어진다.

㉔-1 모델 3 시뮬레이션 해석 결과

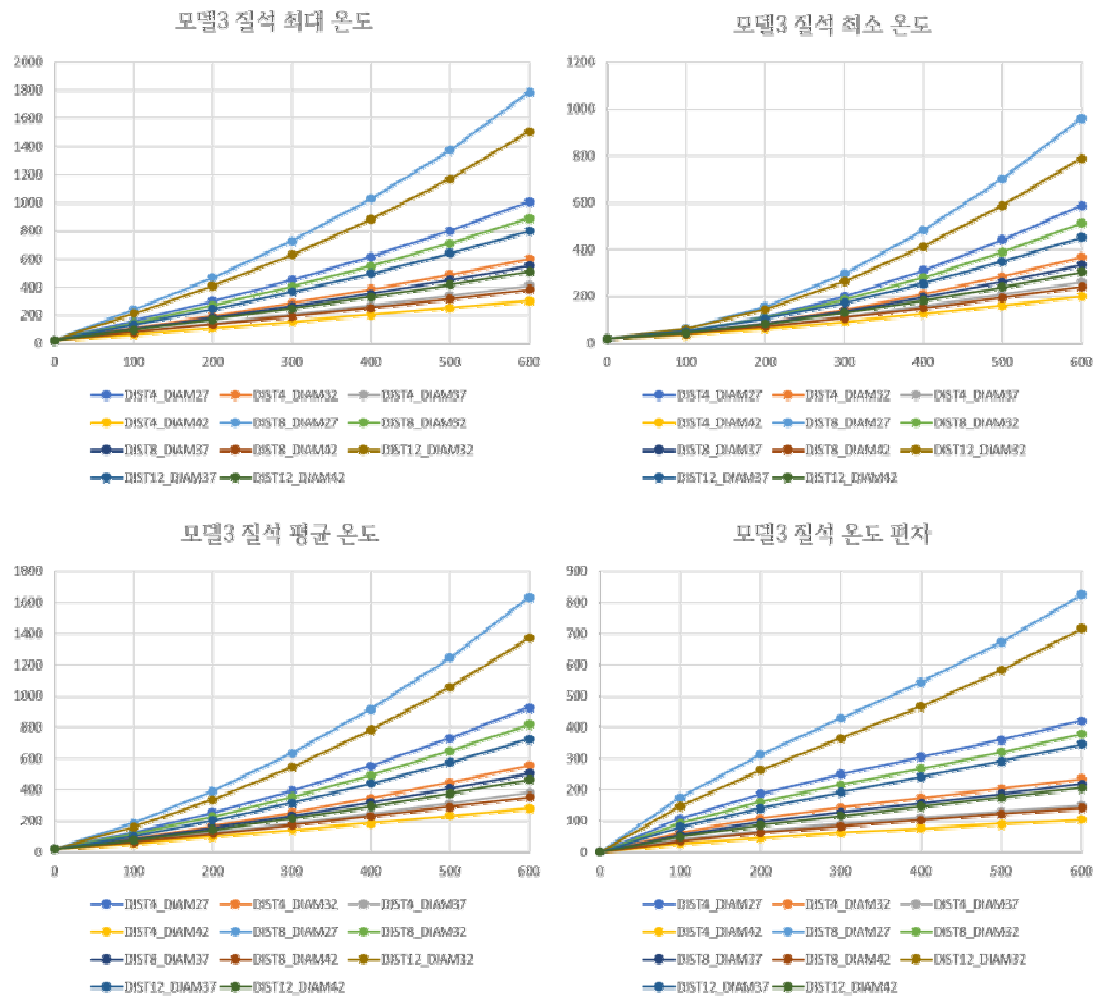


그림 2-37 모델 3의 열 해석 결과

모델 3은 모델 2와 전반적으로 구조가 같다. 모델 3의 직경 DIAM은 사각형 파이프의 대각선 방향 길이를 의미한다. 400초에서 800도에 가장 근접해서 도달하는 형상은 DIST8_DIAM27 (직경27, 거리8) 이다. DIST8_DIAM27의 평균, 최대, 최소 온도는 각각 1185도, 1240도, 620도이며 편차는 619도로 나타났다.

무진동 암반파쇄용 발열체의 모델을 3개로 구분하여 각각 시뮬레이션을 하였다. 그 결과를 기반으로 팽창력 측정 시험을 위한 발열체를 다음과 같이 제작 하였다.

모델 1 - 원형 타입 (2열)

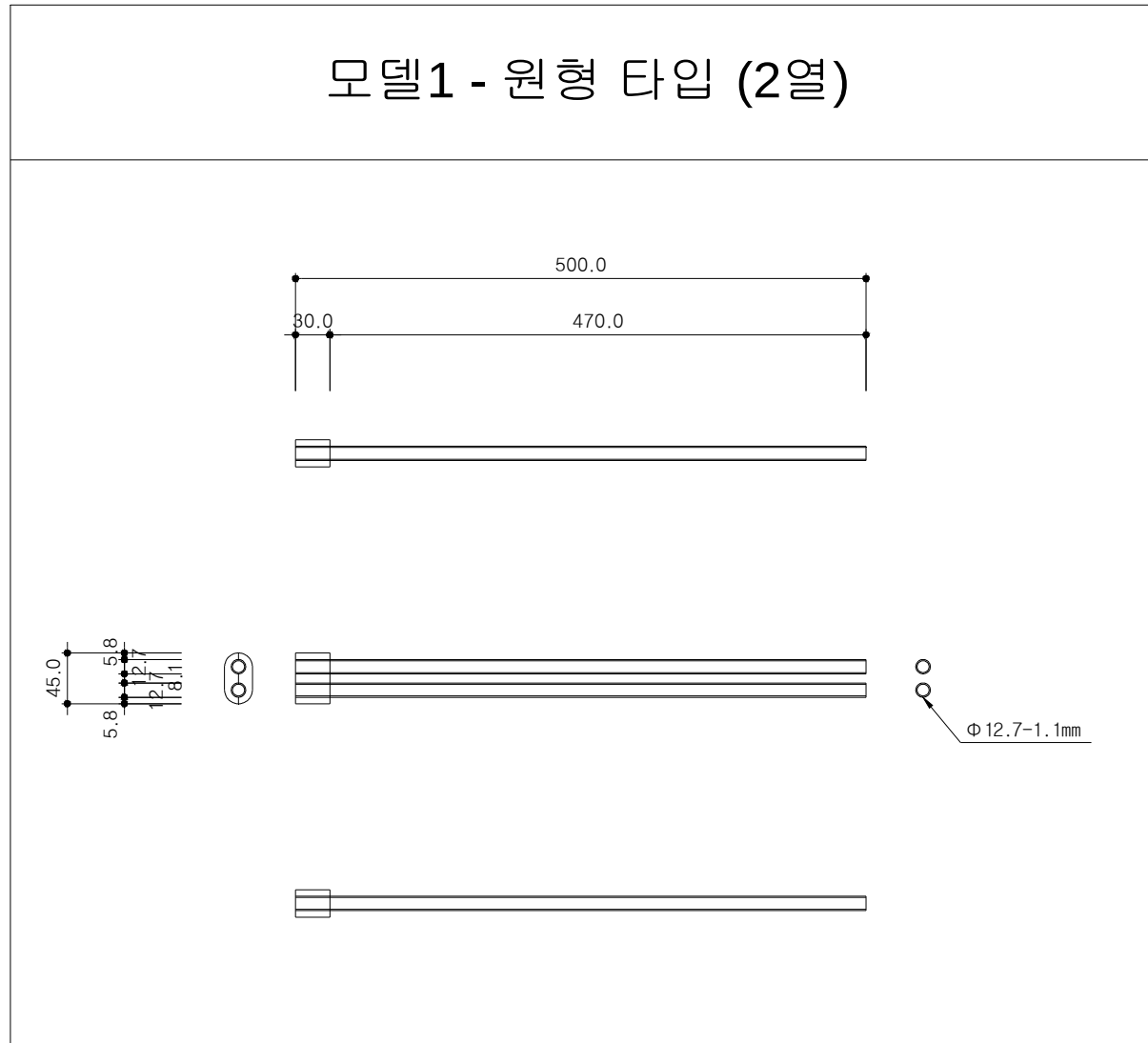


그림 2-38 모델 1 - 발열체 도면

㉔-2 모델 1 사진



그림 2-39 모델 1 - 발열체 형상



그림 2-40 모델 1 - 발열체 치수



그림 2-41 모델 1 - 직접 가열 테스트

라-3 모델2 제작

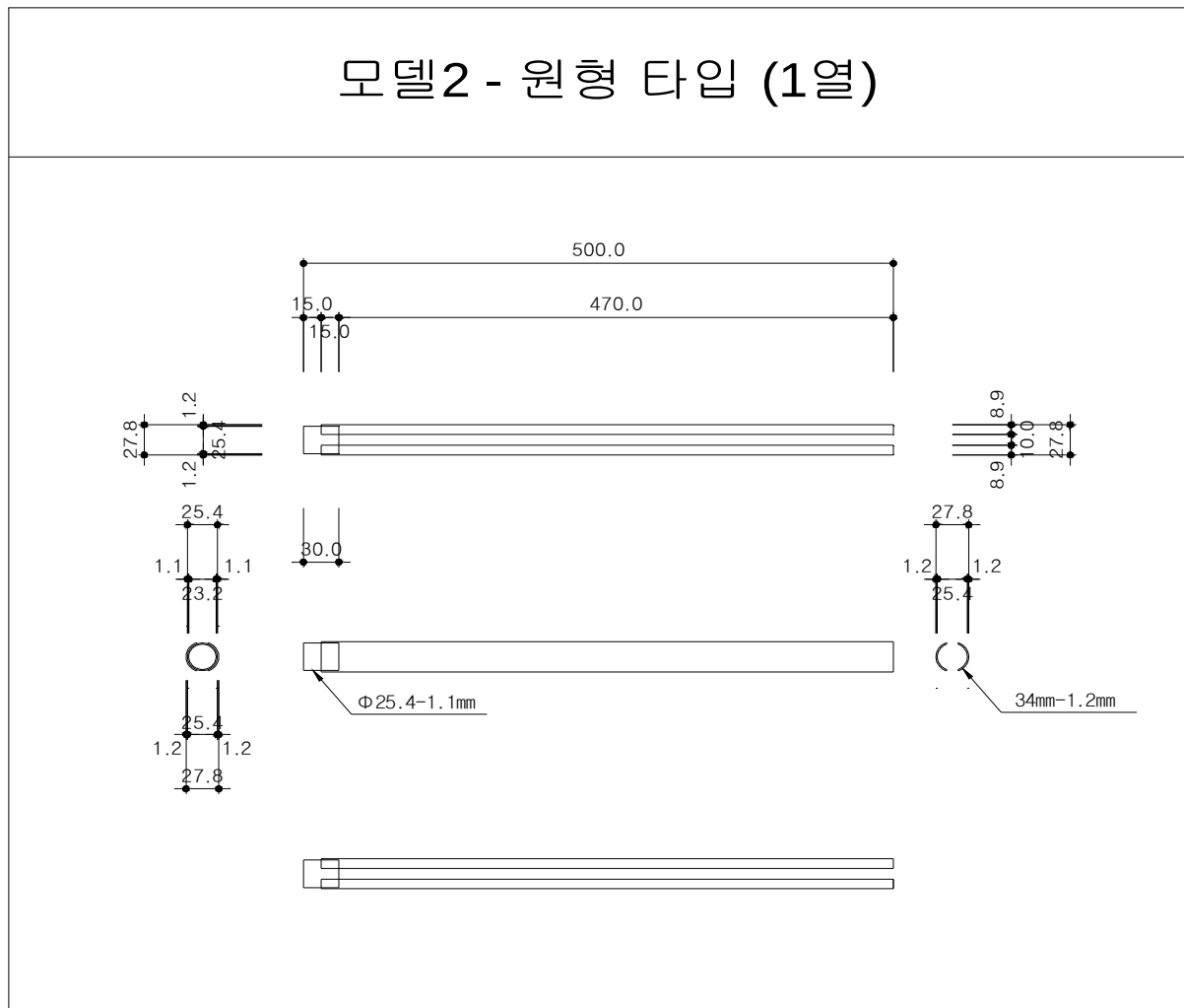


그림 2-42 모델 2 - 발열체 도면

라-4 모델2 사진



그림 2-43 모델 2 - 발열체 형상



그림 2-44 모델 2 - 발열체 치수 및 형상



그림 2-45 모델 2 - 발열체 형상 및 가열 테스트

라-5 모델3 제작

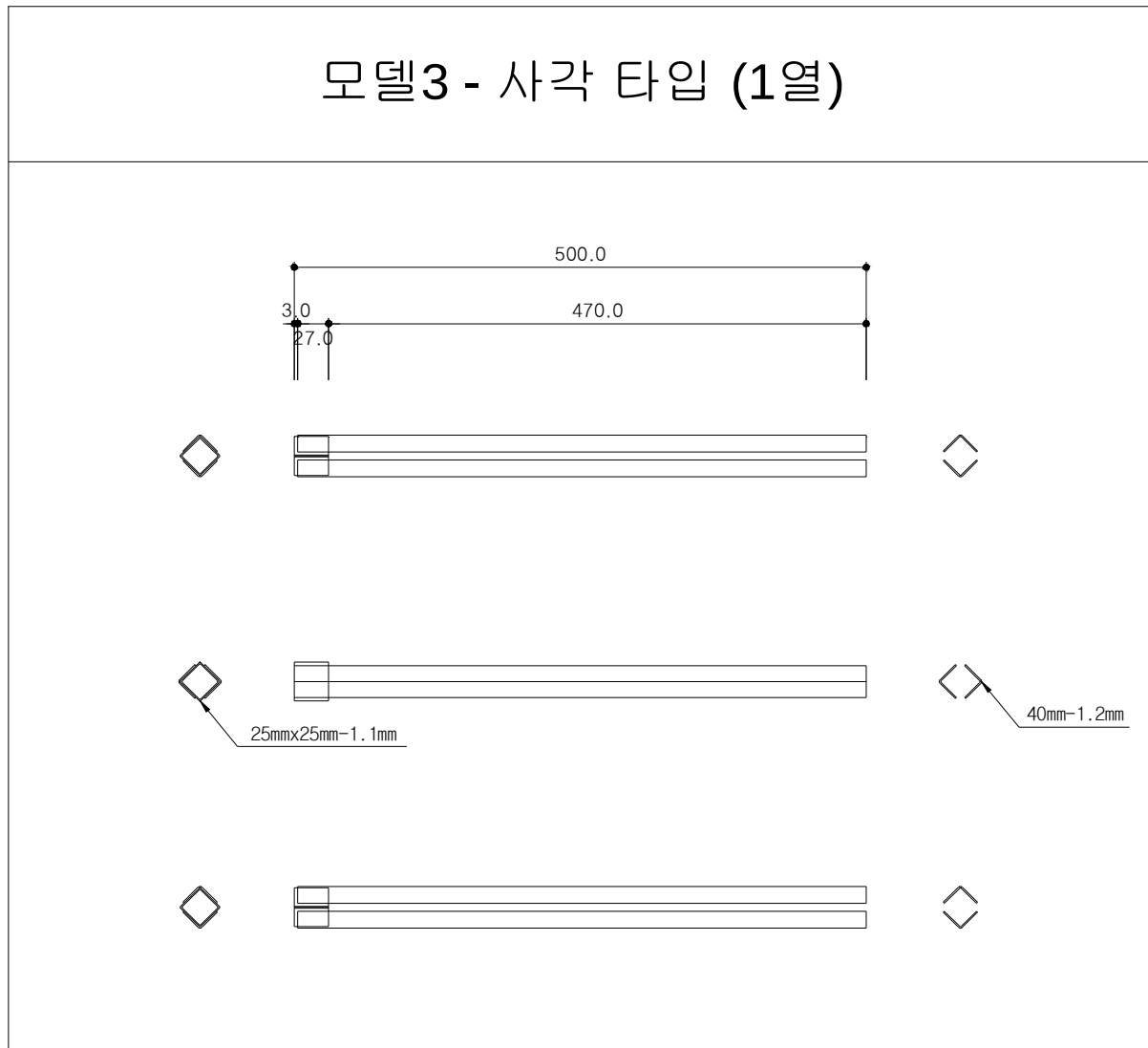


그림 2-46 모델 3 - 발열체 도면

라-6 모델 3 - 실제 사진



그림 2-47 모델 3 - 발열체 형상



그림2-48 모델 3 - 발열체 치수



그림 2-49 모델 3 - 직접 가열 테스트

(3) 실용화를 위한 무진동 발열팽창 암반파쇄 시공 프로세스 개발

(가) 시뮬레이션기반 가상환경 암반 파쇄시나리오

① 가상 환경 설정을 위한 국내 암반 특성 조사

암반의 역학적 특성은 암종 및 강도분류에도 불구하고 다양한 범위 및 평균값을 보이기 때문에, 암반파쇄를 위한 설계정수로 활용하기 위해서는 지질학적 생성과정, 지질상태 및 절리의 발달정도, 지역, 암석의 생성시기, 심도 등 다양한 변수를 고려한 분석이 필요로 함. 국내에 분포하는 대표적인 암반의 물리/역학적 특성에 대한 분석결과를 선행문헌 (서용석, 2016)으로부터 발췌하였다.

암반의 상태가 풍화암부터 경암에 이르기까지, 암석의 단위중량, 점착력, 마찰각, 탄성계수, 포아송비, 압축강도 및 인장강도, 초기수평응력계수, 비중에 대한 평균값을 제공하고 있다. 본 연구에서는 주로 대표적 암반의 종류 중 하나인 화강암을 대상으로 암반파쇄 특성을 조사하였으며, 경암의 탄성계수의 평균값을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였음. 연약한 암반과 비교를 위하여 연암상태의 퇴적암의 탄성계수 평균값을 이용한 수치해석 결과도 뒤따르고 있다.

표. 편마암의 물리/역학적 특성

Mechanical property of geniss		γ_i (kN/m ³)	C (MPa)	Φ (°)	E_d (GPa)	E (GPa)	ν	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	k ($\times 10^{-5}$ cm/sec)	G
Weathered rock	Q ₁	-	0.03	31.3	0.02	0.5	-	25.8	-	4.3	-
	Q ₃	-	0.2	35.2	0.3	0.5	-	75.1	-	11.7	-
	Median	-	0.1	33.3	0.1	0.5	-	66.6	-	7.7	-
	Mean	-	1.2	32.3	0.1	0.5	-	54.1	-	8.3	-
Soft rock	Q ₁	22.0	0.04	29.4	0.7	4.3	0.22	31.2	8.3	1.4	2.69
	Q ₃	26.5	19.5	45.3	6.9	30.5	0.23	100.8	15.1	4.5	2.75
	Median	25.3	12.0	39.0	3.7	8.2	0.20	64.3	10.7	2.6	2.71
	Mean	24.0	11.1	36.4	5.4	18.9	0.19	76.6	11.2	3.6	2.70
Moderate rock	Q ₁	26.4	8.5	44.8	5.8	11.7	0.15	45.5	8.5	0.4	2.66
	Q ₃	27.8	20.5	50.1	13.0	31.8	0.22	98.6	15.0	2.9	2.78
	Median	26.6	17.0	46.9	10.0	17.4	0.18	69.0	13.0	1.0	2.76
	Mean	27.2	15.4	47.5	9.6	25.3	0.18	74.5	14.5	1.5	2.74
Hard rock	Q ₁	26.9	0.03	43.0	4.8	11.5	0.16	64.0	9.2	0.1	2.65
	Q ₃	28.2	22.0	53.3	17.1	41.6	0.23	107.7	15.0	1.6	2.74
	Median	27.6	14.2	48.6	11.9	24.4	0.19	87.2	12.0	0.6	2.68
	Mean	27.6	12.9	47.2	13.2	28.2	0.20	90.5	14.7	2.2	2.70

표. 화강암의 물리/역학적 특성

Mechanical property of granite		γ_i (kN/m ³)	C (MPa)	Φ (°)	E_d (GPa)	E (GPa)	ν	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	k ($\times 10^{-5}$ cm/sec)	G
Weathered rock	Q ₁	26.1	0.03	31.8	0.04	0.2	0.30	47.6	4.7	4.7	-
	Q ₃	26.4	0.09	47.0	0.5	0.9	0.30	74.6	4.7	10.9	-
	Median	26.3	0.03	33.7	0.2	0.6	0.30	59.3	4.7	8.7	-
	Mean	26.2	1.2	38.7	0.3	0.6	0.31	62.9	4.7	15.7	-
Soft rock	Q ₁	24.9	3.9	45.5	0.5	2.00	0.21	33.5	4.8	0.8	2.60
	Q ₃	26.0	8.3	49.0	4.1	11.7	0.27	85.0	7.1	3.0	2.61
	Median	25.8	7.8	49.0	1.1	5.2	0.26	52.9	6.0	2.1	2.61
	Mean	25.6	5.5	46.7	2.4	10.9	0.25	64.0	5.9	2.5	2.61
Moderate rock	Q ₁	26.2	9.7	54.0	2.3	3.7	0.25	62.9	5.9	0.7	2.63
	Q ₃	26.4	12.4	56.0	3.4	46.3	0.27	81.6	7.9	1.3	2.68
	Median	26.2	10.8	55.0	2.8	6.2	0.27	68.9	6.3	1.0	2.67
	Mean	26.3	12.1	53.8	6.3	21.1	0.26	81.1	11.2	1.0	2.66
Hard rock	Q ₁	25.9	0.02	44.7	5.4	14.2	0.20	94.6	7.4	0.5	2.65
	Q ₃	26.2	24.0	56.0	17.4	58.2	0.25	189.7	16.3	2.3	2.70
	Median	26.1	13.6	53.0	11.8	32.1	0.22	132.4	11.0	1.0	2.68
	Mean	25.9	13.7	49.8	12.3	35.8	0.21	138.6	26.6	2.9	2.68

표3. 퇴적암의 물리/역학적 특성

Mechanical property of sedimentary rock		γ_i (kN/m ³)	C (MPa)	Φ (°)	E_d (GPa)	E (GPa)	ν	σ_c (MPa)	σ_t (MPa)	k ($\times 10^{-5}$ cm/sec)	G
Weathered rock	Q ₁	-	8.5	53.3	-	-	-	-	5.4	1.5	-
	Q ₃	-	9.5	55.8	-	-	-	-	5.8	3.8	-
	Median	-	9.0	54.5	-	-	-	-	5.6	2.6	-
	Mean	-	9.0	54.5	-	-	-	-	5.6	2.6	-
Soft rock	Q ₁	26.6	7.6	50.8	-	6.1	0.17	42.8	5.5	0.4	-
	Q ₃	26.9	15.3	55.3	-	8.4	0.26	131.2	9.6	1.0	-
	Median	26.8	11.8	53.0	-	6.8	0.25	82.3	8.0	0.5	-
	Mean	26.7	11.3	53.0	-	9.1	0.22	84.4	7.1	1.5	-
Moderate rock	Q ₁	-	7.0	54.5	-	-	0.19	46.8	3.4	2.1	-
	Q ₃	-	12.8	56.2	-	-	0.21	86.6	3.4	3.3	-
	Median	-	7.0	55.0	-	-	0.19	67.1	3.4	2.8	-
	Mean	-	10.8	55.4	-	-	0.20	66.4	3.4	2.9	-
Hard rock	Q ₁	26.7	3.4	54.0	6.4	18.3	0.22	104.0	9.6	0.8	2.70
	Q ₃	27.0	21.6	60.3	10.6	48.0	0.27	204.6	17.7	2.2	2.70
	Median	26.7	17.3	55.8	9.5	30.2	0.24	132.0	14.0	1.5	2.70
	Mean	26.7	13.7	56.7	9.0	32.6	0.24	149.5	13.9	1.8	2.70

표. 화성암의 물리/역학적 특성

Mechanical property of volcanic rock		γ_i (kN/m ³)	C (MPa)	Φ (°)	E_d (GPa)	E (GPa)	ν	σ_c (MPa)	α_i (MPa)	k ($\times 10^{-5}$ cm/sec)	G
Weathered rock	Q ₁	-	0.01	-	-	-	0.23	41.0	12.6	6.0	2.54
	Q ₃	-	0.01	-	-	-	0.23	140.7	14.7	6.8	2.55
	Median	-	0.01	-	-	-	0.23	86.4	13.7	6.4	2.55
	Mean	-	0.01	-	-	-	0.23	95.3	13.7	6.4	2.55
Soft rock	Q ₁	26.1	0.1	35.2	2.4	5.3	0.23	37.8	12.4	0.8	2.66
	Q ₃	26.9	21.9	56.0	10.1	48.5	0.25	96.4	15.1	6.7	2.73
	Median	26.3	11.6	54.0	6.1	29.8	0.24	55.9	13.2	1.9	2.69
	Mean	26.4	12.9	47.4	6.4	32.9	0.25	83.7	12.8	6.0	2.69
Moderate rock	Q ₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Q ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Median	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mean	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hard rock	Q ₁	26.3	0.1	39.3	5.4	38.4	0.20	48.2	11.9	0.6	2.64
	Q ₃	27.0	27.0	60.5	26.5	57.0	0.26	173.6	18.8	1.2	2.69
	Median	26.9	8.2	46.0	5.7	53.5	0.25	89.0	13.9	0.8	2.66
	Mean	26.7	12.8	49.4	20.4	57.5	0.23	137.9	15.9	2.1	2.65

표. 변성암의 물리/역학적 특성

Mechanical property of metamorphic rock		γ_i (kN/m ³)	C (MPa)	Φ (°)	E_d (GPa)	E (GPa)	ν	σ_c (MPa)	α_i (MPa)	k ($\times 10^{-5}$ cm/sec)	G
Weathered rock	Q ₁	-	0.01	25.9	0.1	0.2	0.30	-	-	-	-
	Q ₃	-	0.03	32.2	0.1	0.3	0.30	-	-	-	-
	Median	-	0.02	31.4	0.1	0.2	0.30	-	-	-	-
	Mean	-	0.02	28.3	0.1	0.2	0.30	-	-	-	-
Soft rock	Q ₁	26.1	17.6	46.0	0.8	29.2	0.21	91.0	4.1	0.9	2.74
	Q ₃	26.3	21.0	51.0	1.7	51.8	0.26	128.7	10.0	0.9	2.77
	Median	26.2	19.0	46.0	1.1	38.1	0.26	99.5	9.0	0.9	2.75
	Mean	26.2	20.3	49.0	1.2	38.2	0.23	99.3	7.3	0.9	2.74
Moderate rock	Q ₁	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Q ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Median	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mean	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hard rock	Q ₁	26.1	6.4	51.0	0.6	6.6	0.22	51.0	4.9	0.4	2.68
	Q ₃	26.5	12.6	55.0	3.0	34.2	0.26	56.9	10.7	1.2	2.68
	Median	26.2	8.3	53.0	0.7	18.3	0.24	54.0	7.8	0.4	2.68
	Mean	26.2	9.5	53.3	2.2	24.3	0.25	54.0	8.6	9.4	2.68

② 시뮬레이션 기반의 가상환경 암반 파쇄 시나리오

㉦ 팽창거동 모델링 및 시험 결과 비교

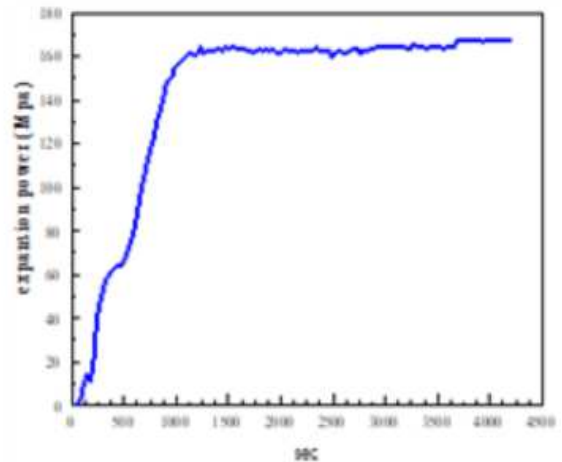
본 연구에서는 암반모형에 매입된 단본의 발열기기에 의한 팽창압 시험결과와 팽창거동 모델링 결과를 비교하였다.

■ 암반모형 파쇄시험

시험에 사용된 암반은 화강암으로서, 암반의 크기는 가로/세로 30cm, 높이 40cm를 이용하였으며, 암반의 중앙에 직경 5cm 크기로 천공하여 발열기기를 삽입하였음. 시험 결과, 발열기기가 작동된 후, 약 1080초 경과된 시간에서 암반파쇄가 발생하였으며, 이때의 팽창압은 159MPa로 산정되었음.



(a)



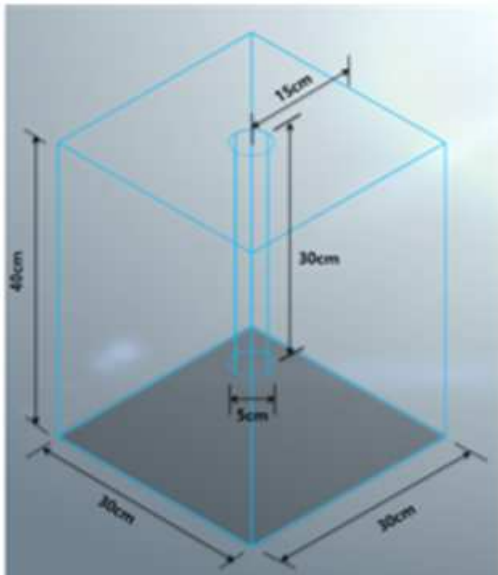
(b)

그림 2-50 모형 암반 파쇄시험: (a) 시험사진; (b) 팽창압 결과

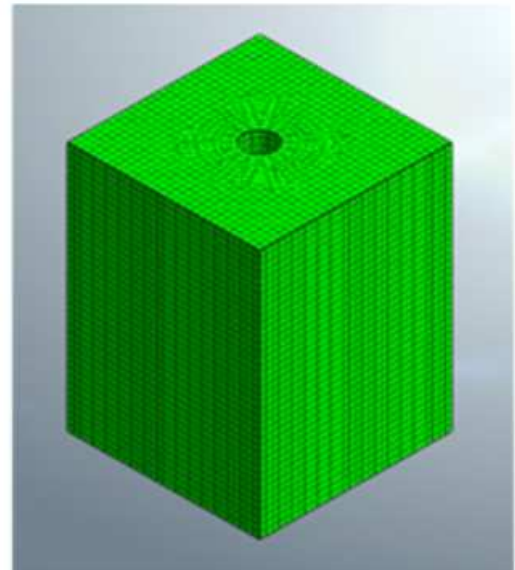
■ 암반모형 파쇄시험 모델링

시험용 암반과 동일한 조건을 모사하기 위하여, 그림 2-51(a)와 같이 가로/세로 30cm, 높이 40cm인 모형을 모델링하였으며, 중앙에 직경 5cm의 홀을 조성하였음. 모형 암반의 단위중량(γ), 탄성계수(E), 포아송비(ν)는 국내 분포하는 경암 상태의 화강암의 평균값인, $\gamma=25.9\text{kN/m}^3$, $E=36\text{GPa}$, $\nu=0.21$ 를 입력물성으로 사용하였다.

기본 요소의 크기를 1cm로 설정하여 정육면체 형태로 분할하였으며, 요소생성 후 천공홀 내부에 내공압을 160MPa의 크기로 적용하여 그에 따른 파쇄거동을 평가하였다.



(a)



(b)

그림 2-51 모형 암반 모델링: (a) 기하형상; (b) 요소생성

그림 52 에서는 홀의 중심을 기준으로 절단면을 생성하여, 발열팽창으로 발생된 내공압에 의한 y축 방향 변형률 분포를 보여주고 있다.

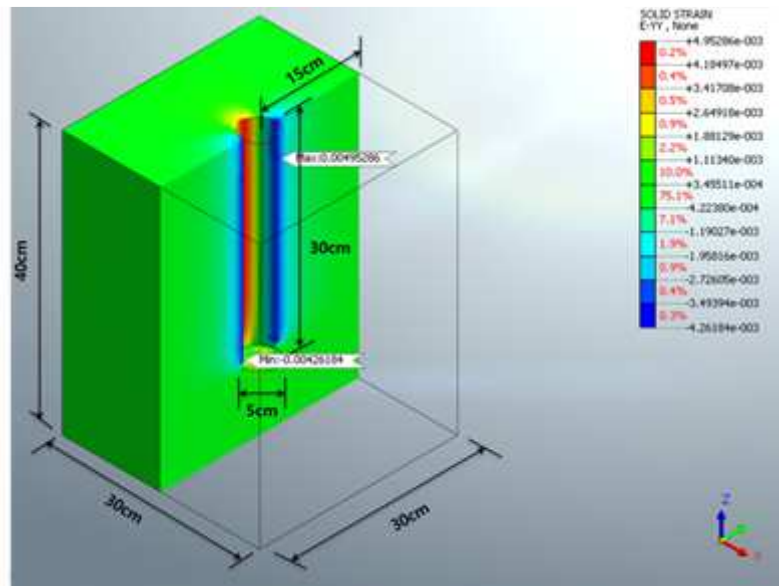


그림 2-52 y축방향 변형률 분포(입체도)

y축 방향 변형률을 평면도로 나타내면, 그림 2-53와 같이 천공홀의 양측(붉은색 영역)에서 최대 인장변형률을 보여주고 있으며, 이러한 최대 인장이 발생하는 부분에서 파쇄가 발생하기 시작하는 것을 알 수 있음.

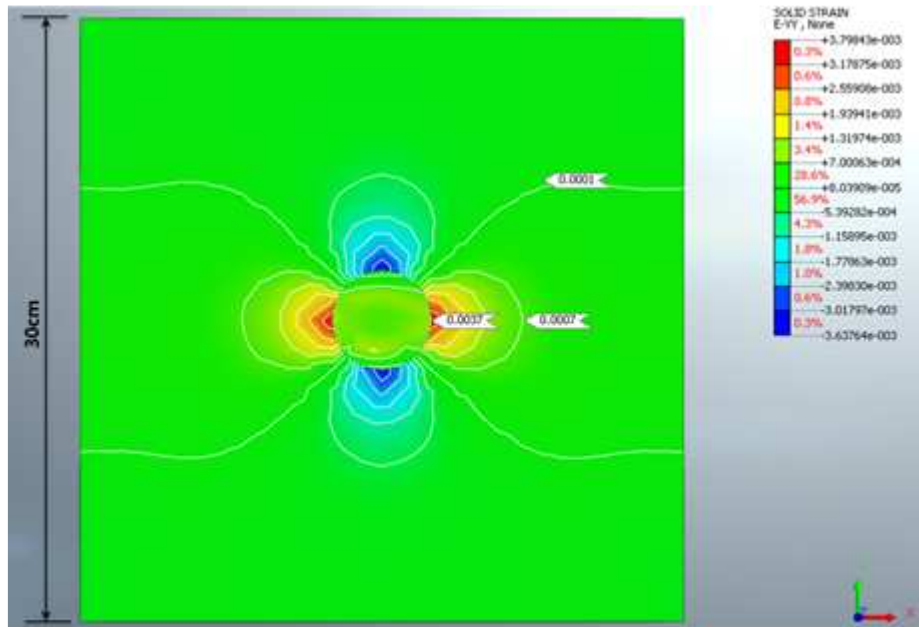


그림 2-53 y축방향 변형률 분포(평면도)

Fujii 등(1998)은 삼축압축시험 시 임계인장변형률을 0.005로 제안하였으며, 본 연구에서도 암석의 실제적인 파쇄상태를 나타내기 위하여 이를 파쇄변형률로 정의함. 파쇄된 모형암반의 시험결과를 시뮬레이션에서 암반의 최대 주인장변형률이 0.005를 초과한 것을 통해 파쇄상태의 암반거동을 잘 모사함을 알 수 있다.

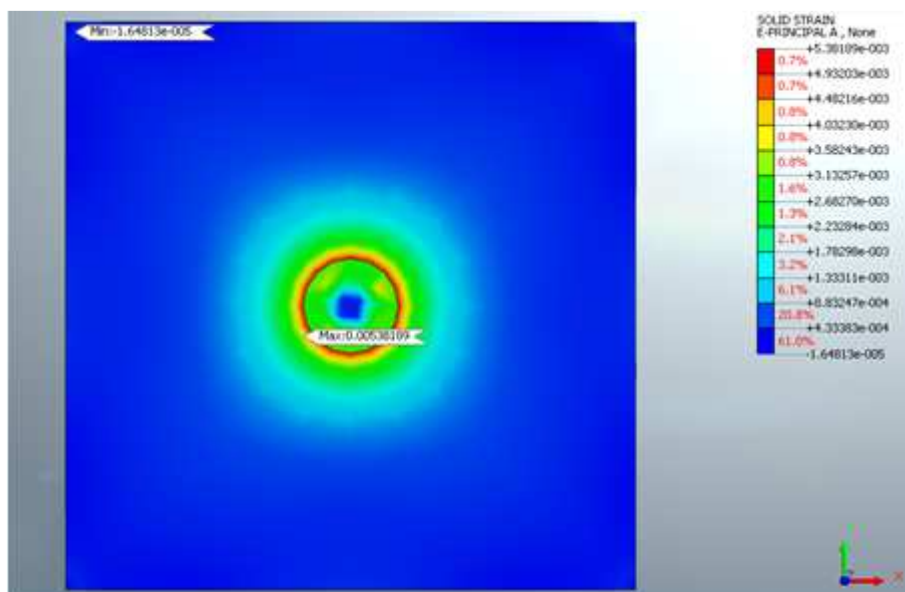


그림 2-54 원주방향에서의 주인장변형률 분포(평면도)

㉞ 암반의 탄성계수 변화에 따른 파쇄 모델링

1단원에서 제시된 바와 같이, 암반의 물성은 암반의 종류 및 상태에 따라 달라질 수 있으며, 이러한 암반 종류에 따른 파쇄거동 변화를 본 연구를 통해 파악하였음. 앞서 시뮬레이션에 적용된 화강암 외에 대표적인 암반 종류 중 하나인 퇴적암을 대상으로 동일한 수치해석을 수행함. 퇴적암의 물성을 적용한 시뮬레이션에서는 연암 상태의 퇴적암의 평균값인, $\gamma = 26.7\text{kN/m}^3$, $E=9\text{GPa}$, $\nu=0.22$ 를 입력물성으로 사용하였으며, 동일한 팽창압을 적용하였다.

수치해석 결과, 그림6에서 보는 바와 같이 원주방향의 최대 주인장변형률이 0.0217로 나타났다. 앞 절의 결과에서, 경암 상태의 화강암($E=36\text{GPa}$)에서의 최대값(0.0054)와 비교했을 때 크게 증가한 것을 알 수 있다. 이를 토대로 본 연구의 발열기기를 이용하여 팽창압 적용 시 암반의 종류 및 상태에 따라 파쇄를 위해 요구되는 팽창압의 크기가 줄어든 것으로 판단되었다.

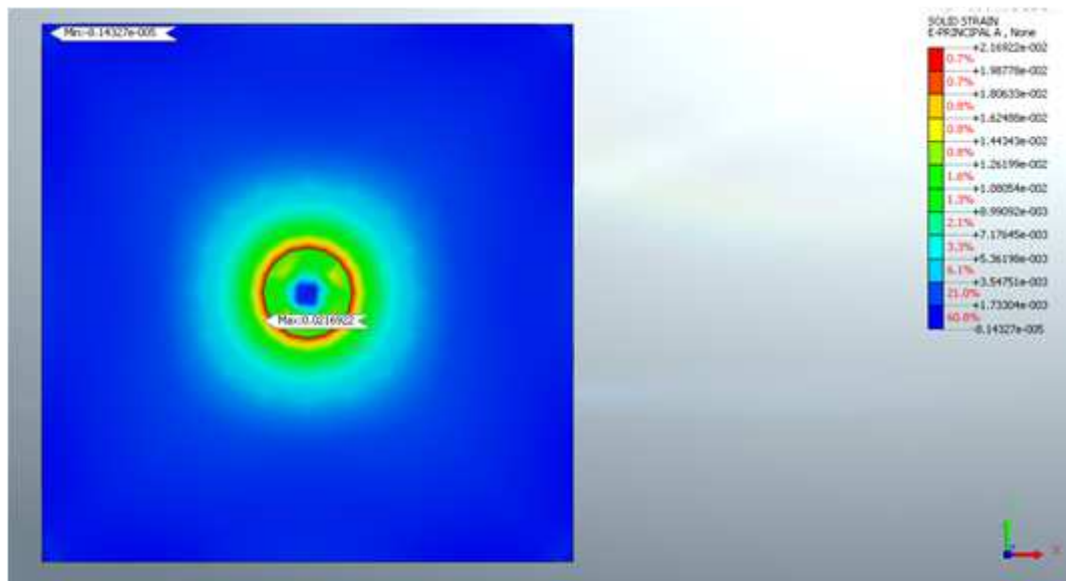


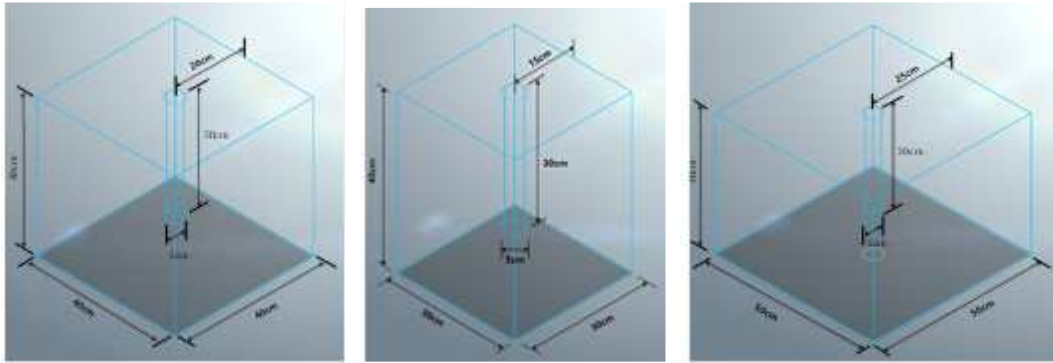
그림 2-55 암반의 탄성계수 9GPa 적용시 원주방향에서의 주인장변형률 분포

표. 원주방향 최대 주인장변형률 변화

암반의 탄성계수	9 GPa	36 GPa
주인장변형률	0.0217	0.0054

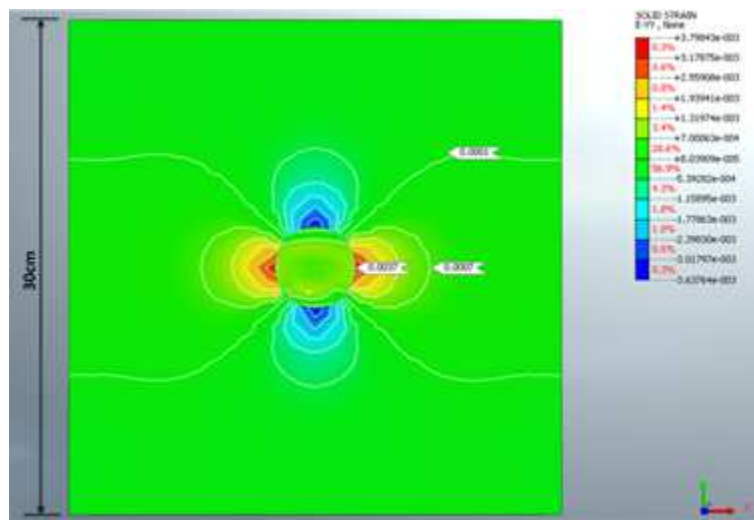
㉔ 암반의 크기변화에 따른 파쇄 모델링

암반 크기변화에 따른 파쇄 거동을 평가하고자 아래의 그림 7과 같이 가로/세로 길이가 다른 모형 암반에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 천공홀의 직경 및 깊이는 각각 5cm 및 30cm로 설정하였으며, 천공홀의 위치는 암반의 중앙에 고정하였음. 암반의 물성은 경암 상태의 화강암을 대상으로 입력정수를 앞절과 동일하게 설정하였다.



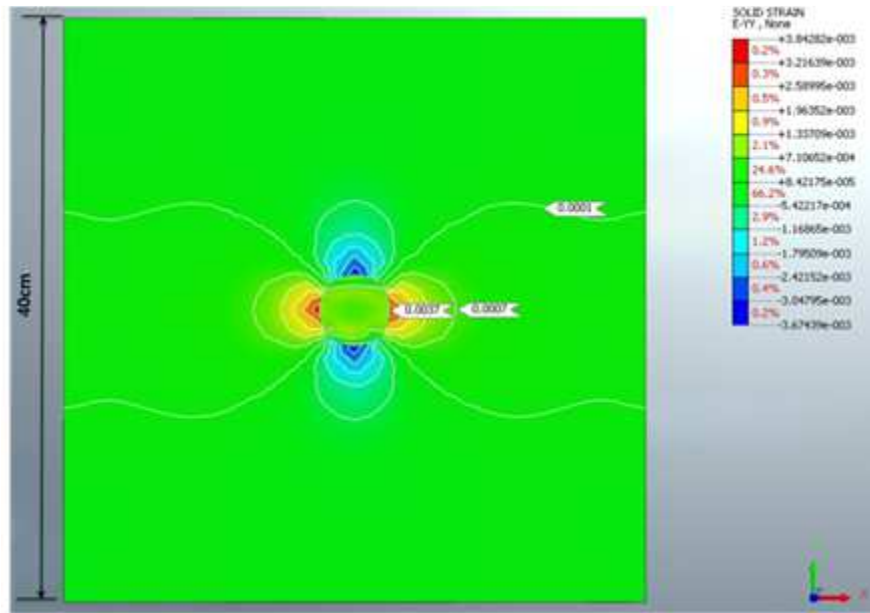
(a) (b) (c)
그림 2-56 모형 암반의 기하형상: (a) 30cm; (b) 40cm; (c) 50cm

암반 크기변화에 따른 변형률의 분포를 나타내기 위하여, y축방향의 변형률 분포를 그림 8에 도시하였다. y축방향의 경우, 최대 인장률을 보이는 붉은색 영역을 기준으로 파쇄가 발생하기 시작되어 전개될 것으로 판단할 수 있다.

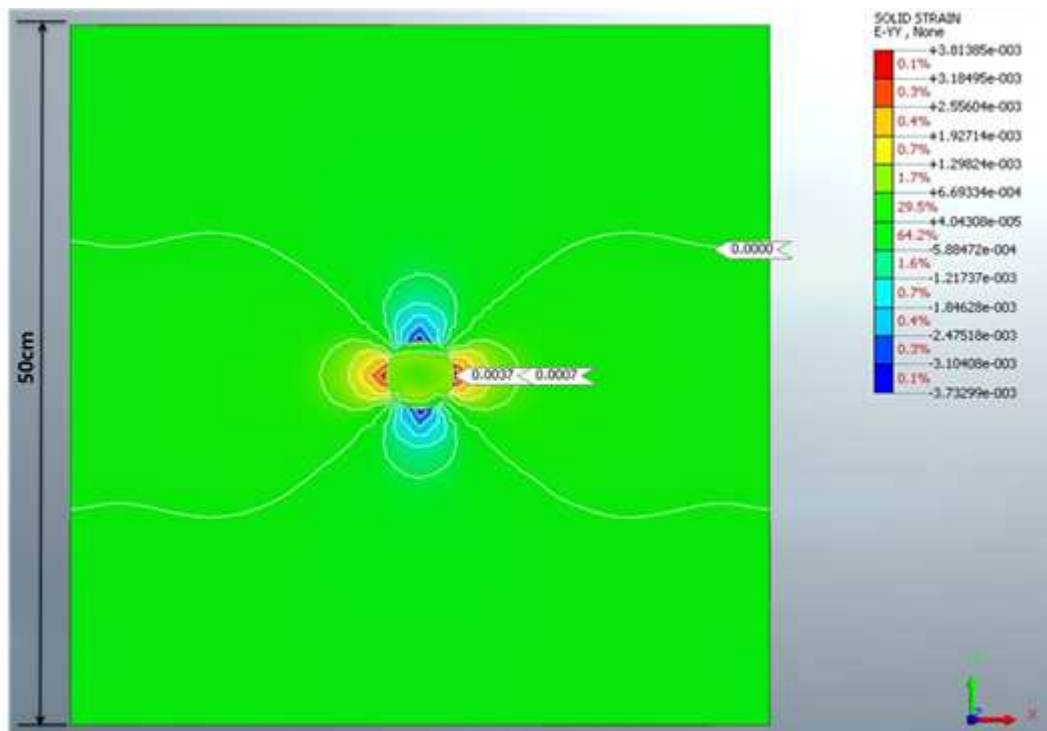


(a)

그림 2-57 y축방향 변형률 분포(평면): (a) 30cm; (b) 40cm; (c) 50cm (계속)



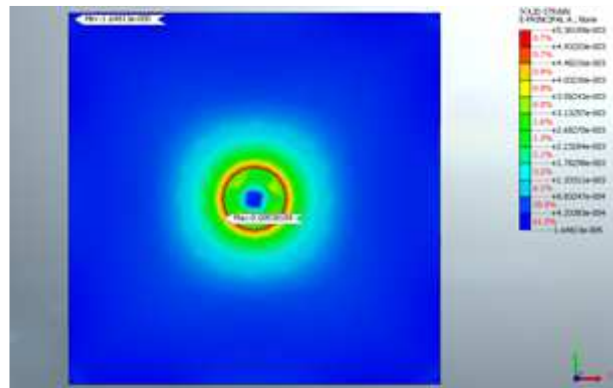
(b)



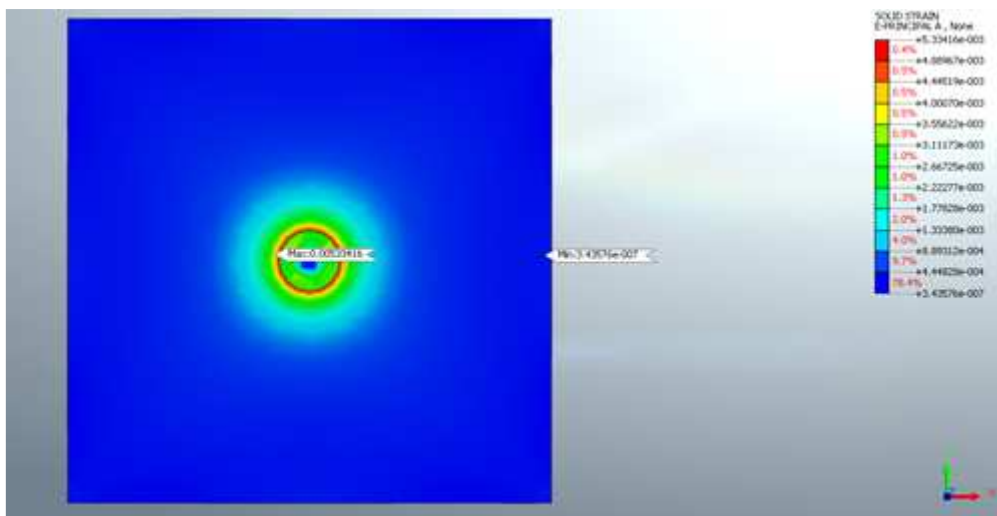
(c)

그림 2-57 y축방향 변형률 분포(평면): (a) 30cm; (b) 40cm; (c) 50cm

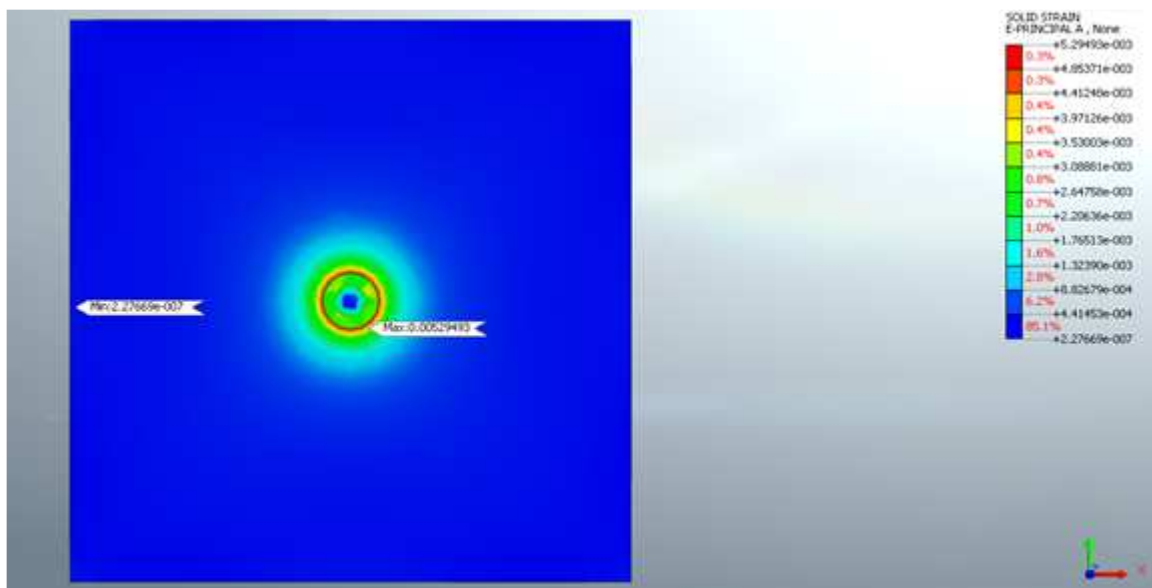
실제적인 파쇄가능 여부를 판단하기 위하여, 그림 2-58와 같이 원주방향 최대 주인장변형률을 각 암반 크기에 따라 도출하였으며, 표 7에 최대 주인장변형률의 결과를 정리하였다.



(a)



(b)



(c)

그림 2-58 원주방향에서의 주인장변형률 분포(평면도): (a) 30cm; (b) 40cm; (c) 50cm

표. 암반크기에 따른 원주방향 최대 주인장변형률 변화

암반의 크기	30cm	40cm	50cm
최대 주인장변형률	0.00538	0.00533	0.00529

㉔ 암반의 자유면 거리변화에 따른 파쇄 모델링

암반의 중앙에 위치한 천공홀로부터 특정 자유면까지 거리에 따른 파쇄거동 변화를 파악하기 위하여, 그림 10과 같이 홀의 위치를 변화시켜 암반모형을 모델링 하였다. 이때 암반의 가로/세로 길이는 50cm로, 높이는 40cm로 고정시켰으며, 홀의 직경 및 길이도 각각 5cm 및 30cm로 설정된 상태로 유지하였다.

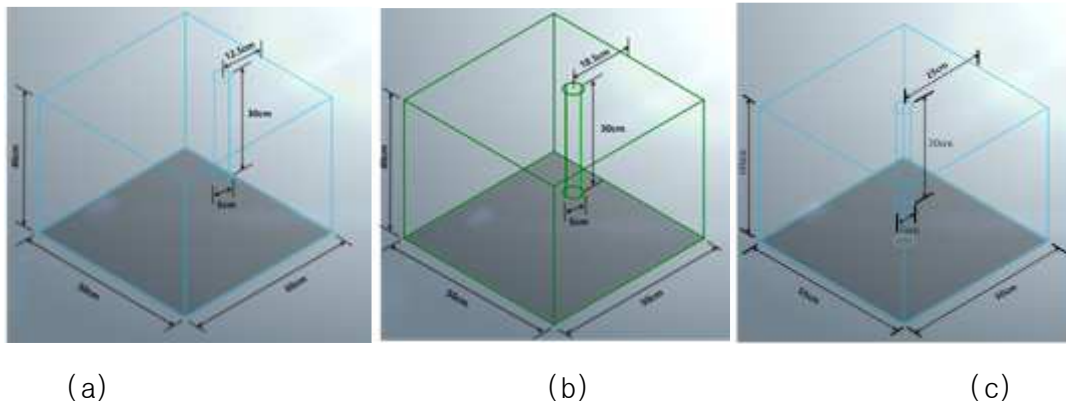
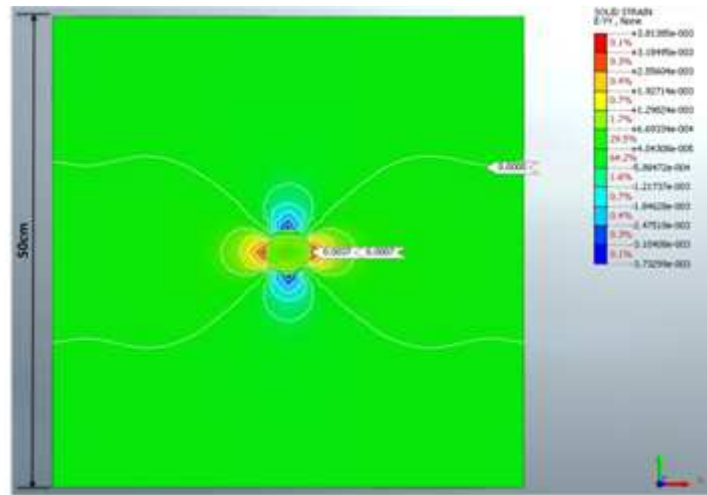


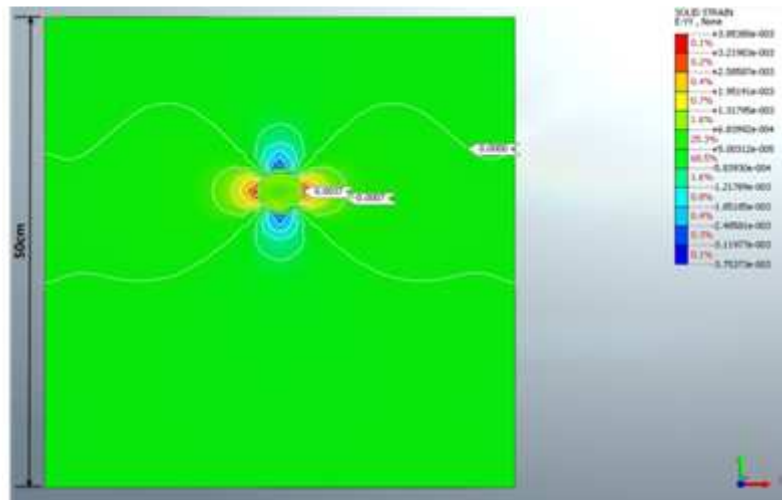
그림 2-59 가로/세로50cm 크기 암반모형의 천공홀 위치에 따른 기하형상: (a) 중심위치 (25cm); (b) 편심 case1 (18.5cm); (c) 편심 case2 (12.5cm)

수치해석 결과, 각 위치에 따른 x 및 y축방향 인장변형률 분포를 그림 11 및 12에 나타내었다. 천공홀의 위치에 따라 y축방향 인장변형률 분포변화는 크지 않은 반면에, x 축방향 인장변형률은 자유면으로 거리가 가까워지는 방향으로 인장변형률이 다소 증가함을 보여주었다. 1차년도 연구에서는 단일 내공압의 크기 (160MPa)로 수치해석을 수행하였으나, 2차 년도의 해당 case별 모형 암반실험을 통해 파쇄시 내공압 크기로 적용하였을 때 변형률 분포를 검토할 필요가 있다.

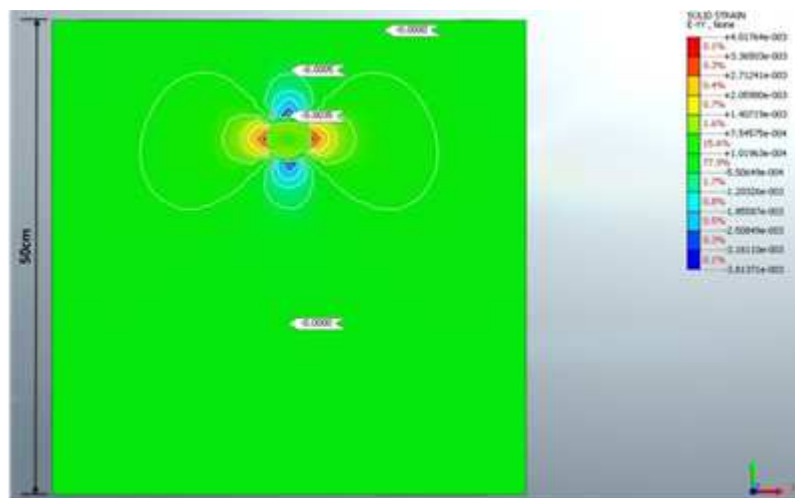
그림 2-62의 원주방향 주인장변형률의 경우, 천공홀이 중앙부로부터 자유면쪽으로 근접함에 따라, 최대 주인장변형률이 0.00529에서 0.00552로 증가함을 보여줌. 이로부터 자유면이 천공홀에 근접할수록 파괴가능성이 높아지는 것으로 판단된다.



(a)

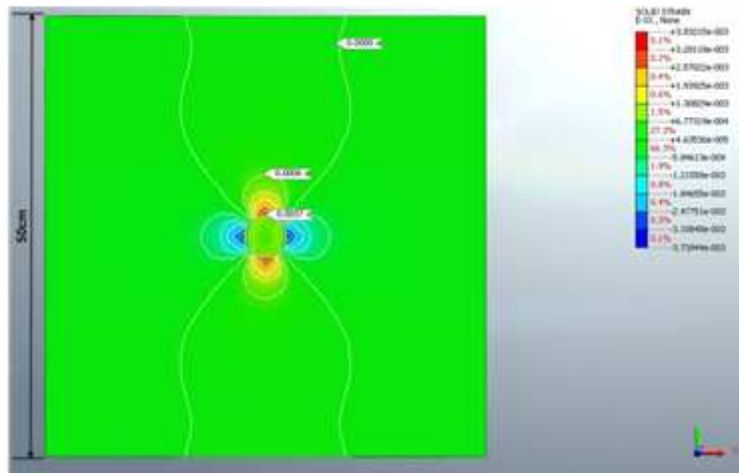


(b)

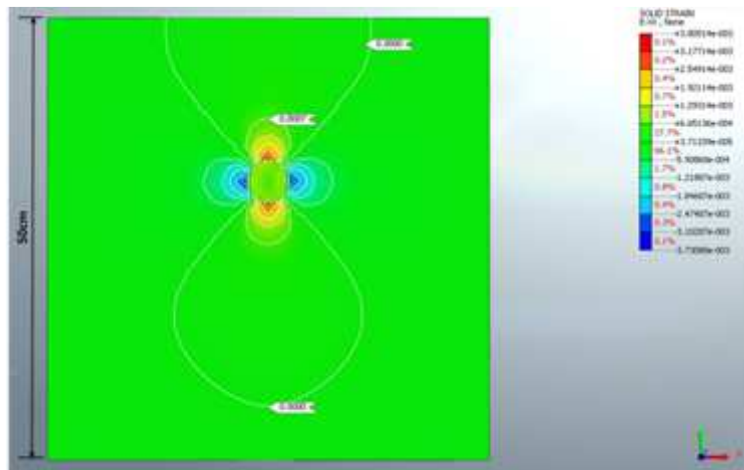


(c)

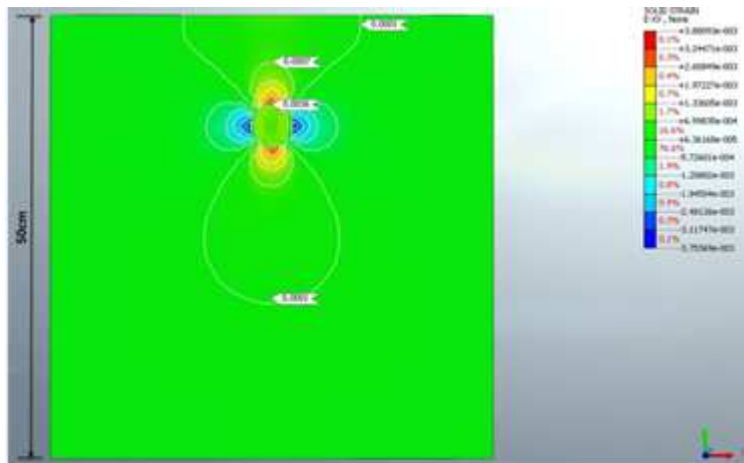
그림 2-60 y축방향 변형률 분포: (a) 중심위치; (b) 편심case1; (c) 편심case2



(a)

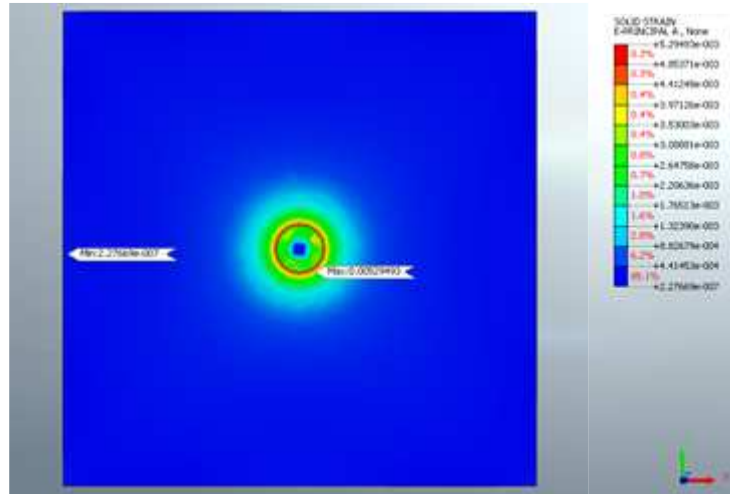


(b)

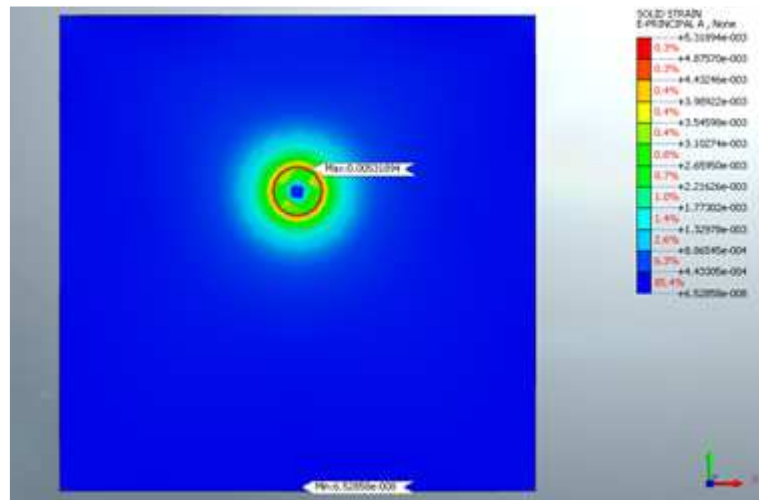


(c)

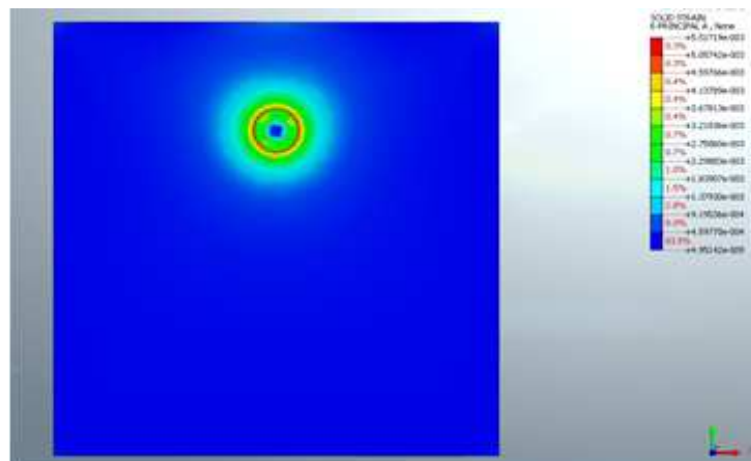
그림2-61 x축방향 변형률 분포: (a) 중심위치; (b) 편심case1; (c) 편심case2



(a)



(b)

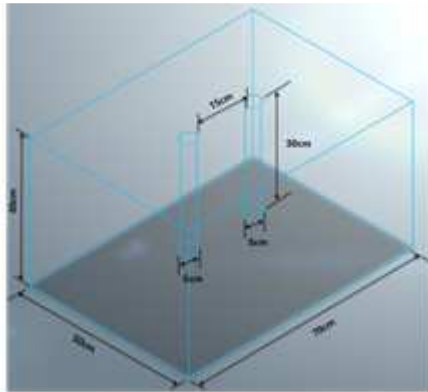


(c)

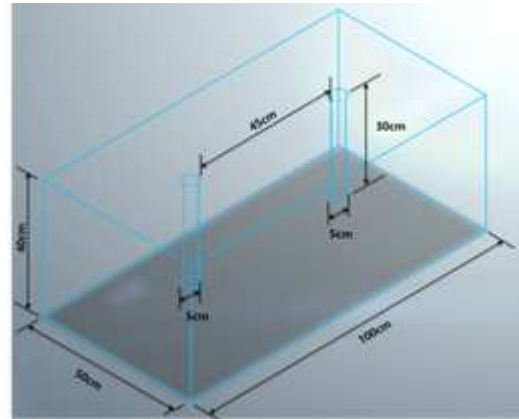
그림 2-62 원주방향 주인장변형률 분포: (a) 중심위치; (b) 편심case1; (c) 편심case2

㉞ 천공홀 간격에 따른 파쇄 모델링

본 연구에서는 당초 2차년도에 수행목표로 삼았던 복수의 천공홀의 간격에 따른 파쇄거동 평가를 일부 선수행하기 위하여 아래의 그림 2-63와 같이 2가지 경우의 모형암반을 모델링 함. 모형 암반의 가로 길이는 50cm로 고정된 채, 세로길이가 증가되었으며, 그에 따라 2개의 천공홀 사이 거리를 증가시켰다.



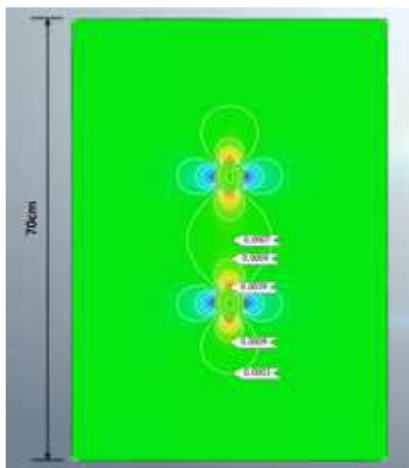
(a)



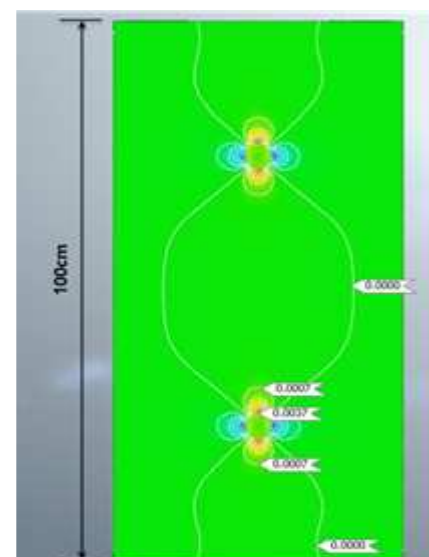
(b)

그림2-63 천공홀 간격에 따른 암반모형의 기하형상: (a) 15cm; (b) 45cm

동일한 크기의 2개의 천공홀에 팽창압을 적용시켰을 때, 암반모형 내부에 형성되는 x축 방향 인장변형률 분포를 그림 15에 나타내었다. 천공간격이 15cm인 경우, 0.0007인장변형률이 천공간격에 형성된 반면, 천공간격이 45cm인 경우, 홀 주변에 국한된 것을 볼 수 있다.



(a)



(b)

그림 2-64 천공홀 간격에 따른 x축방향 변형률 분포(평면): (a) 15cm; (b) 45cm

암반모형 내부에 형성되는 y축방향 인장변형률의 경우, 그림 16에 나타난 바와 같이 천공간격에 따라 천공홀 주변에서 큰 차이 없이 유사하게 분포하는 것으로 나타남. 다만, 변형률이 0에 근접한 저변형률 영역의 분포가 다소 차이가 있음을 알 수 있다.

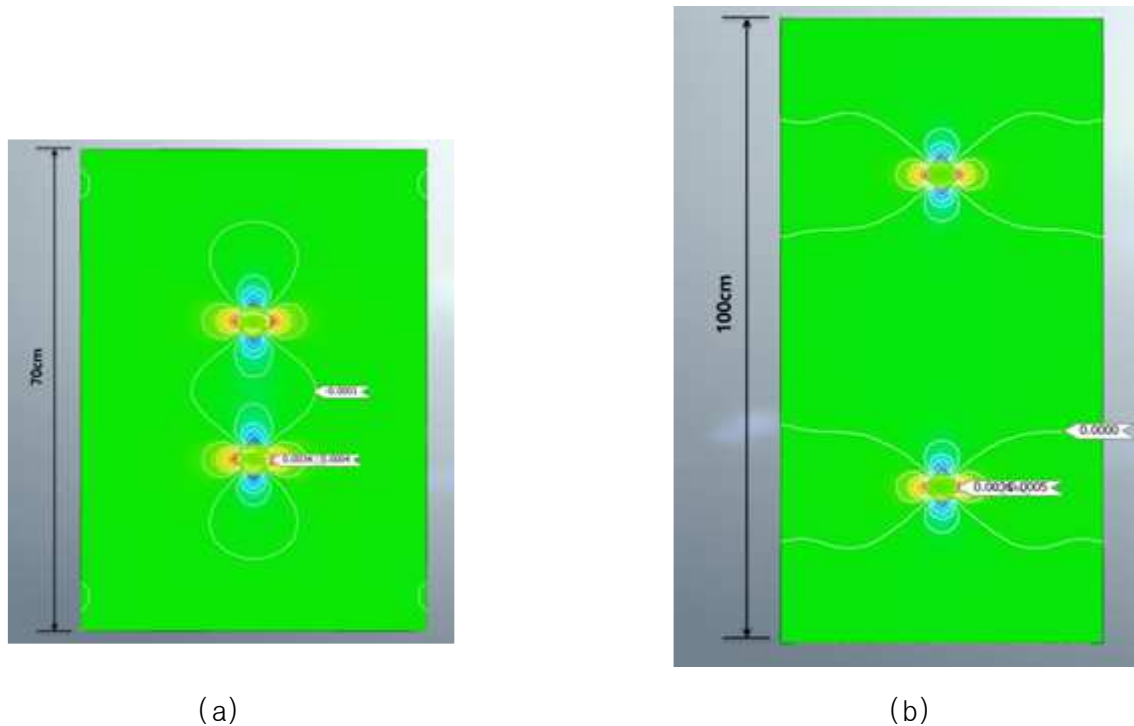


그림 2-65 천공홀 간격에 따른 y축방향 변형률 분포(평면): (a) 15cm; (b) 45cm
주인장변형률 분포의 경우, 천공간격이 근접했을 때 최대 변형률이 0.00557로써 먼 경우 (0.00533)에 비해 증가한 것을 볼 수 있음.

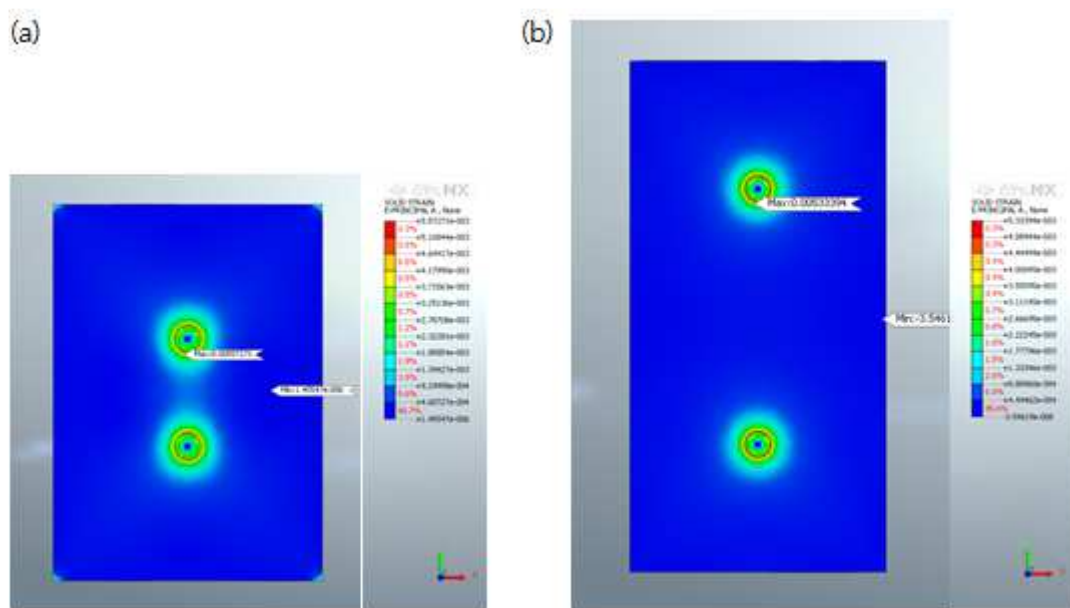
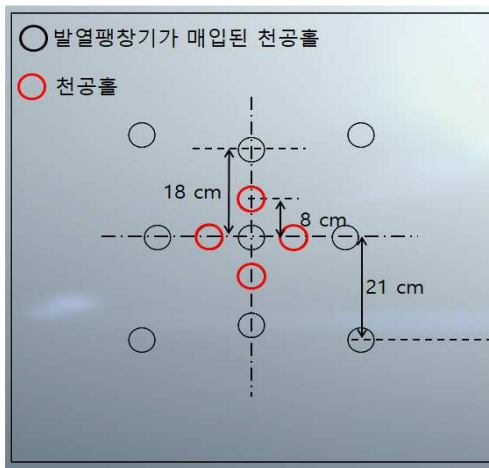


그림 2-66 천공홀 간격에 따른 원주방향 주인장변형률 분포: (a) 15cm; (b) 45cm

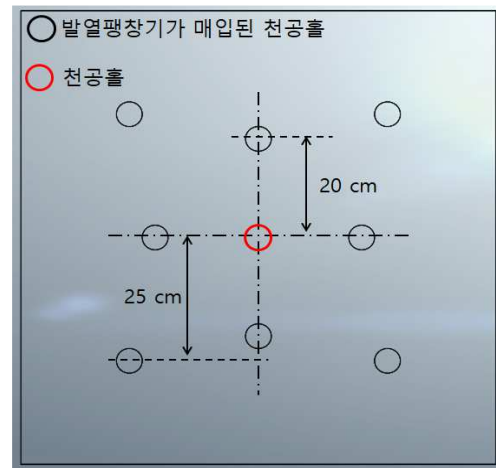
(나) 다양한 현장여건을 반영한 암반파쇄 가이드라인

① 배치 패턴에 따른 파쇄 모델링

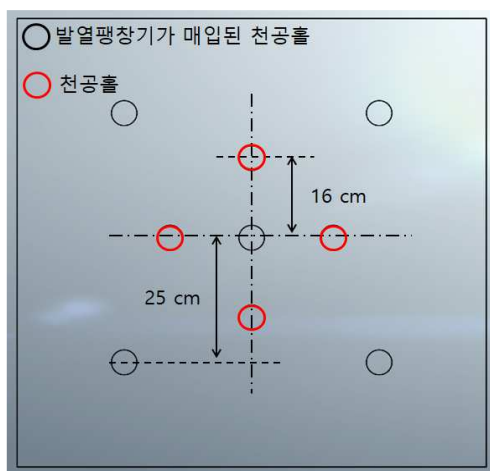
본 연구에서는 기본 요소의 크기를 2cm로 설정하고 그 외 조건들은 앞선 연구와 동일하게 적용함. 빈 천공홀 및 발열팽창기가 매입된 천공홀을 일정한 패턴에 따라 배치하며, 배치에 따른 암반의 자유면 조건을 변화시키고자 하였다. 천공홀 및 발열팽창공의 배치 및 파쇄순서는 화약발파에 사용되는 방법을 참조하였다. 자유면 수 변화에 따른 파쇄거동평가를 수행하기 위하여 아래 그림 23과 같이 4가지 경우의 모형암반을 모델링하였다. 모형 암반의 가로 및 세로 길이는 92cm로 고정하였으며, 높이는 40cm로 고정함. 발열팽창기가 매입된 천공홀의 직경은 5cm로 고정시켰으며, 자유면을 형성하는 천공홀의 직경은 배치 A형 및 D형의 경우 5cm와 7.5cm로 나누어 모델링을 수행하였고, 배치 B형 및 C형의 경우 5cm, 7.5cm, 10cm로 변화시켜 모델링을 수행하였다.



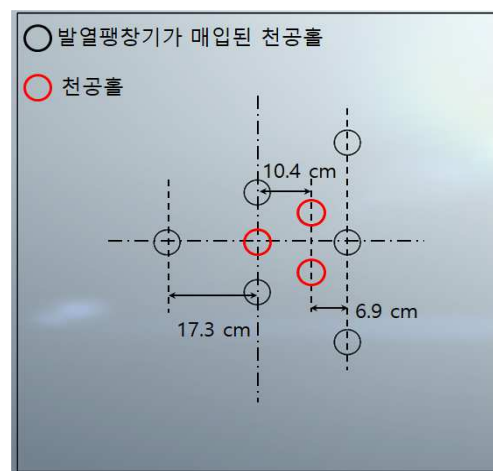
배치 A형



배치 B형



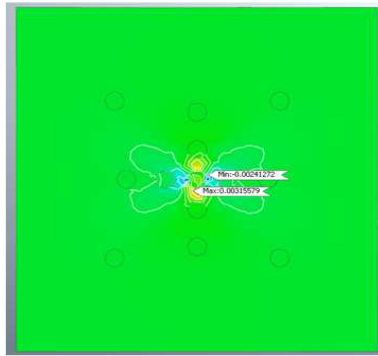
배치 C형



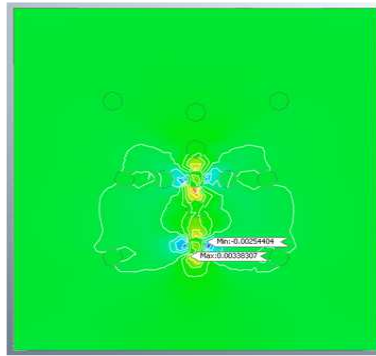
배치 D형

그림 2-67 가로 및 세로 92cm 크기의 암반모형의 천공홀 위치에 따른 기하형상

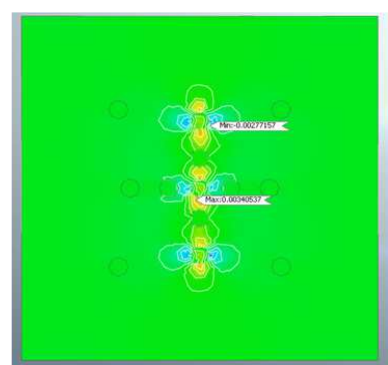
배치 A형 천공홀 5cm의 수치해석결과, x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률 분포를 단계별 발열팽창 진행상황에 따라 그림 24 ~ 26에 나타내었다. 발열팽창 단계별 x축 방향 변형률은 큰 변화 없이 약 0.003이며, y축 방향 변형률도 약 0.0029로써 큰 변화가 나타나지 않음. 주인장변형률의 최대값은 발열팽창기가 매입된 천공홀 중앙부에서 약 0.0056으로 나타나며, 또한 발열팽창기가 매입된 천공홀의 단계별 주인장 변형률도 0.0051~0.0053의 범위를 보인다.



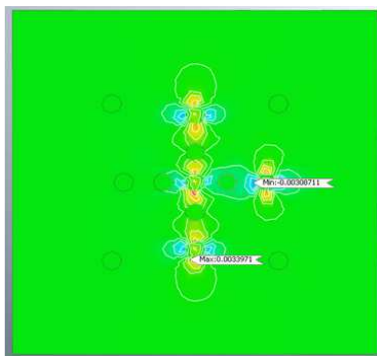
(a)



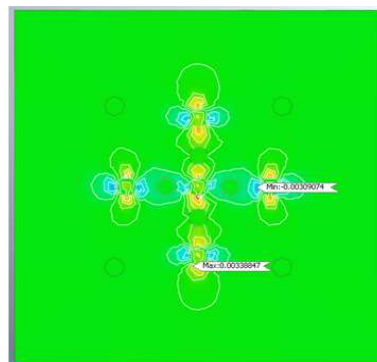
(b)



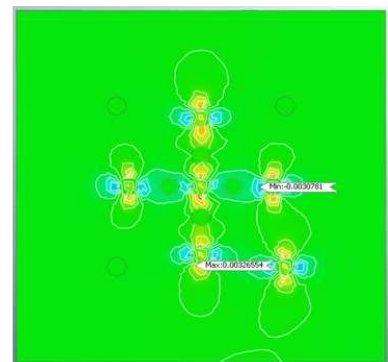
(c)



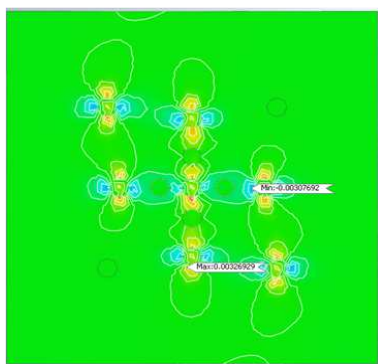
(d)



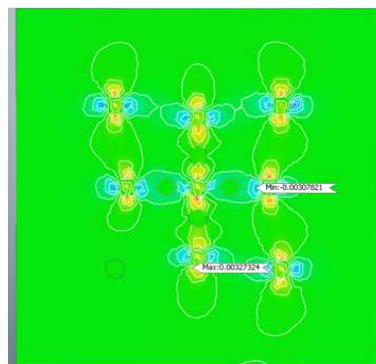
(e)



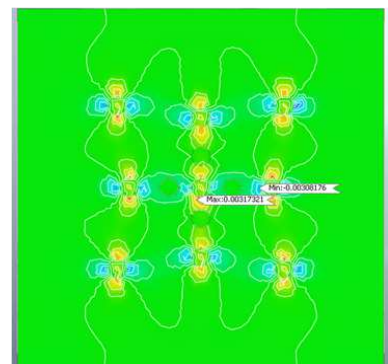
(f)



(g)



(h)



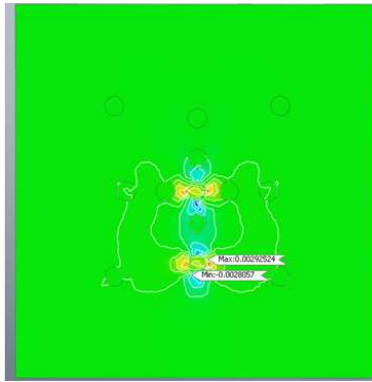
(i)

그림 2-68 암반모형의 배치 A형 - 천공홀 5cm일 때의 팽창공 순서에 따른 x축 방향 변형률:

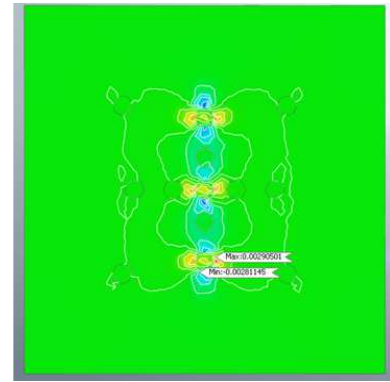
(a) 1번; (b) 2번; (c) 3번; (d) 4번; (e) 5번; (f) 6번; (g) 7번; (h) 8번; (i) 9번



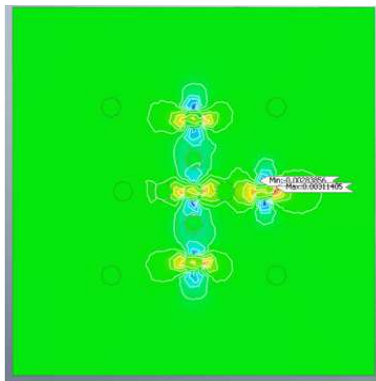
(a)



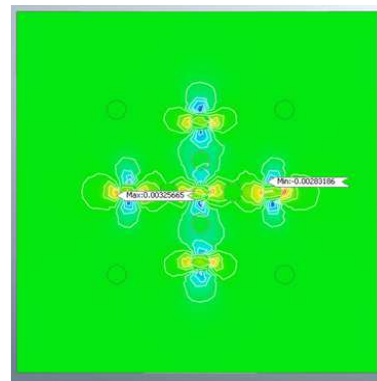
(b)



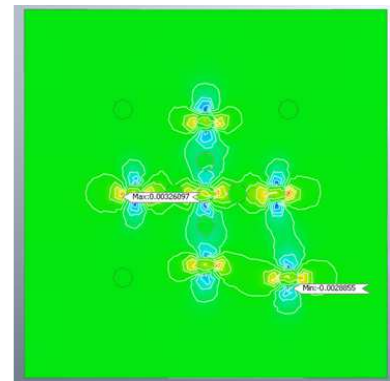
(c)



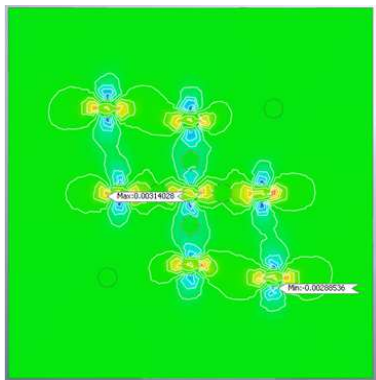
(d)



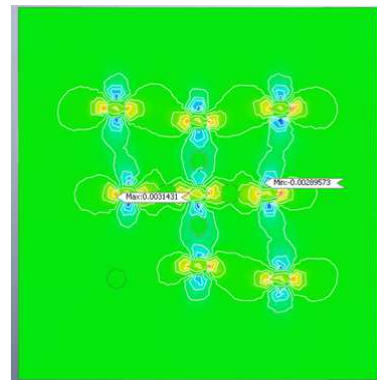
(e)



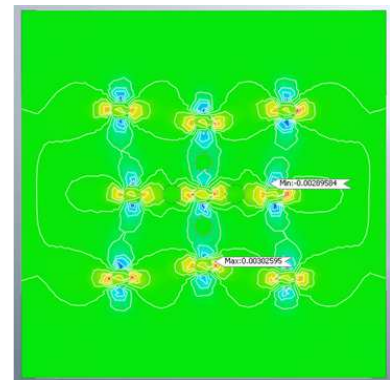
(f)



(g)



(h)



(i)

그림 2-69 암반모형의 배치 A형 - 천공홀 5cm일 때의 팽창공 순서에 따른 y축 방향 변형률:

(a) 1번; (b) 2번; (c) 3번; (d) 4번; (e) 5번; (f) 6번; (g) 7번; (h) 8번; (i) 9번

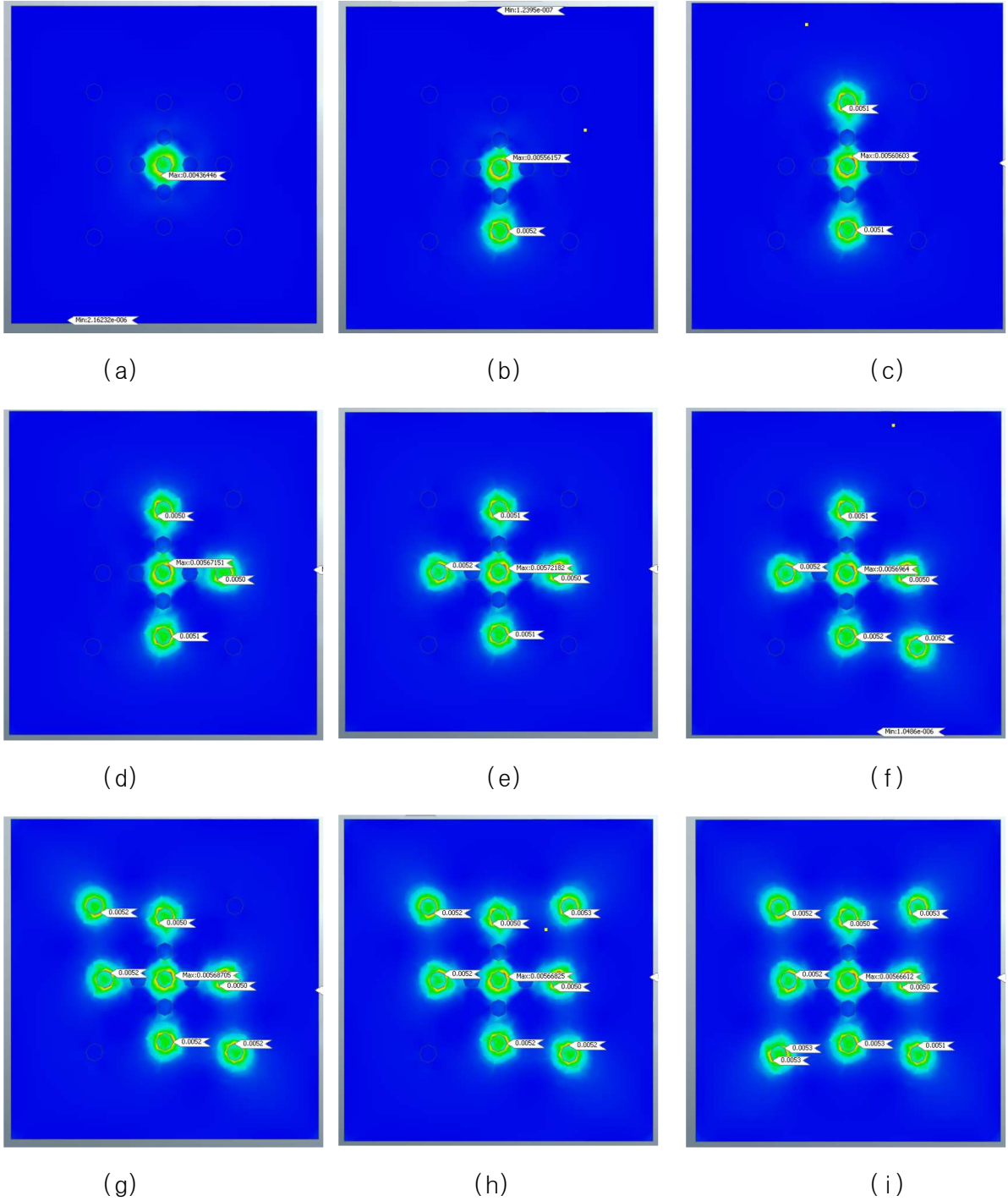


그림 2-70 암반모형의 배치 A형 - 천공홀 5cm일 때의 팽창공 순서에 따른 주인장 방향 변형률:

(a) 1번; (b) 2번; (c) 3번; (d) 4번; (e) 5번; (f) 6번; (g) 7번; (h) 8번; (i) 9번

배치 A형 천공홀 7.5cm의 수치해석 결과, x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률 분포를 그림 2-71에 나타내었다. 발열팽창은 단계별로 진행되었으며, x축 방향 변형률은 0.0052~0.0055의 범위를 보였으며, y축 방향 변형률은 0.0038~0.004의 범위를 보인다. 주인장변형률의 최대값은 발열팽창기가 매입된 천공홀 중앙부에서 0.0066으로 나타나며, 발열팽창기가 매입된 천공홀의 단계별 주인장 변형률도 0.0064~0.0066의 범위를 보인다.

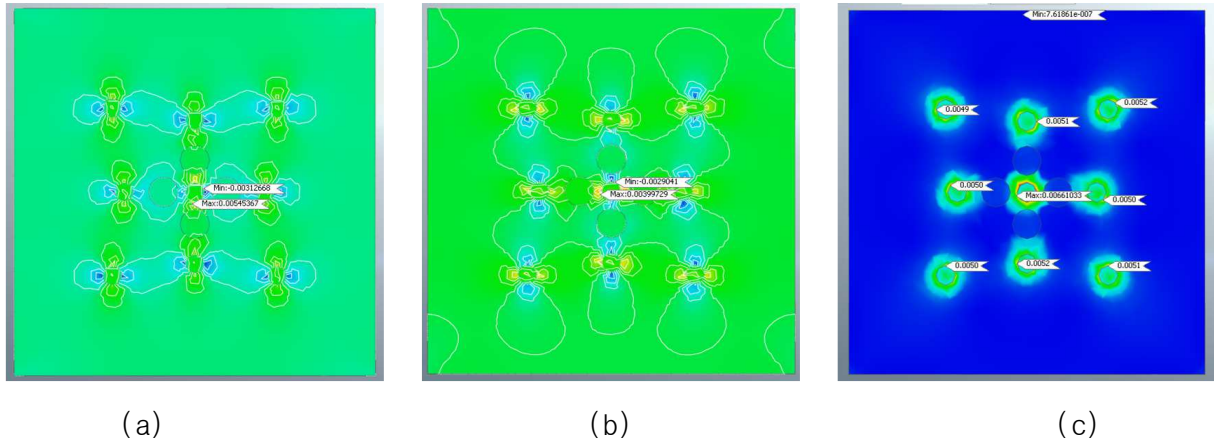


그림 2-71 암반모형의 배치A형 - 천공홀 7.5cm의 변형률 분포: (a) x축; (b) y축; (c) 주인장 변형률

배치 A형 수치해석 결과, 천공홀의 직경이 증가할수록 x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률이 증가하며, 천공홀 직경이 7.5cm인 경우에는 단계별 발열팽창 시, x 및 y축 그리고 주인장 변형률 값이 변화하며, 이에 단계별 발열팽창의 영향을 받는 것으로 확인된다.

배치 B형 천공홀 5cm의 수치해석 결과, x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률 분포를 그림 2-72에 나타내었다. 발열팽창은 단계별로 진행되었으며, x축 방향 변형률은 0.0028~0.0032의 범위를 보였으며, y축 방향 변형률은 0.0032~0.0033의 범위를 보인다. 주인장변형률의 최대값은 발열팽창기가 매입된 우측 상단 천공홀에서 0.0055로 나타나며, 발열팽창기를 매입한 천공홀의 단계별 주인장변형률은 0.0052~0.0055의 범위를 보인다.

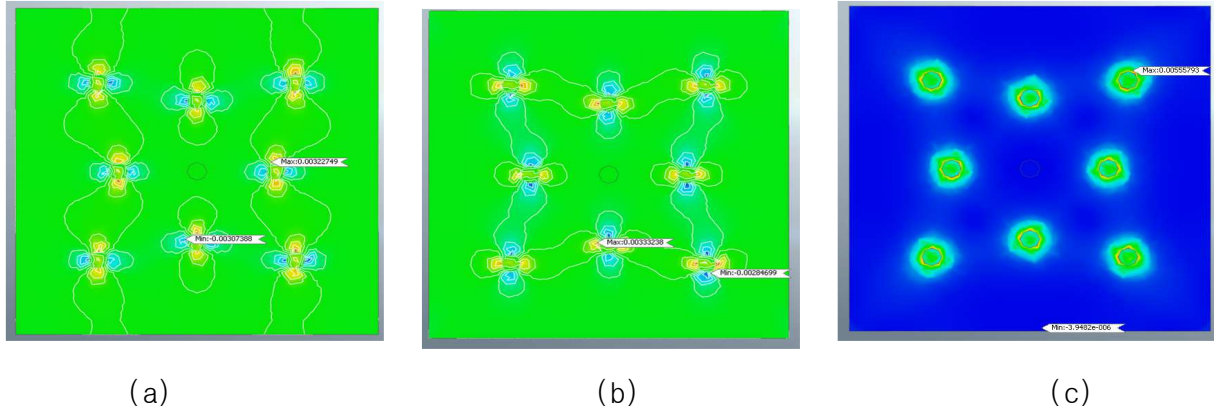


그림 2-72 암반모형의 배치B형 - 천공홀 5cm의 변형률 분포
: (a) x축; (b) y축; (c) 주인장 변형률

배치 B형 천공홀 7.5cm의 수치해석 결과, x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률 분포를 그림 2-73에 나타내었음. 발열팽창은 단계별로 진행되었으며, x축 방향 변형률은 0.0027~0.0033의 범위를 보였으며, y축 방향 변형률은 0.0031~0.0032의 범위를 보인다. 주인장변형률의 최대값은 발열팽창기가 매입된 우측 하단 천공홀에서 0.0053으로 나타나며, 발열팽창기가 매입된 천공홀의 단계별 주인장변형률은 0.0052~0.0053의 범위를 보인다.

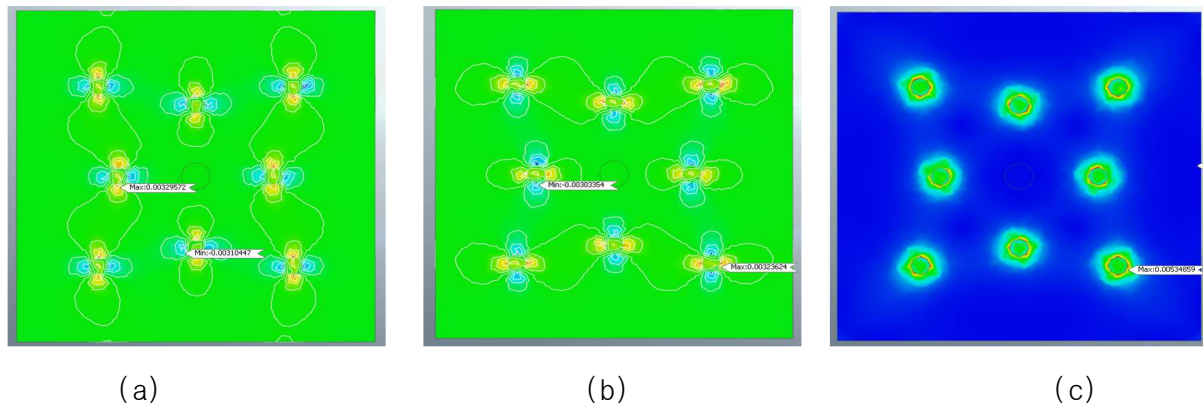


그림2-73 암반모형의 배치B형 - 천공홀 7.5cm의 변형률 분포
: (a) x축; (b) y축; (c) 주인장 변형률

배치 B형 천공홀 10cm의 수치해석 결과, x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률 분포를 그림 2-74에 나타내었다. 발열팽창은 단계별로 진행되었으며, x축 방향 변형률은 0.0032~0.0033의 범위를 나타내며, y축 방향 변형률은 0.0029~0.0031의 범위를 나타낸다. 주인장변형률의 최대값은 발열팽창기가 매입된 우측 중앙에서 0.0053으로 나타나며, 발열팽창기가 매입된 천공홀의 단계별 주인장 변형률은 0.0052~0.0053의 범위를 보인다.

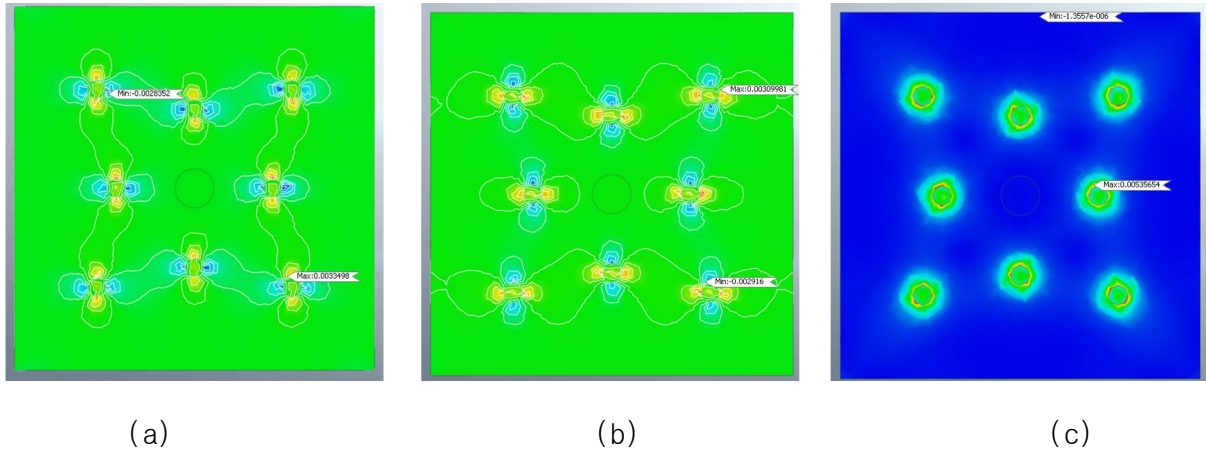


그림 2-74 암반모형의 배치B형 - 천공홀 10cm의 변형률 분포
: (a) x축; (b) y축; (c) 주인장 변형률

배치 B형의 수치해석 결과, 천공홀의 직경이 증가할수록 x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률에서 큰 차이는 나타나지 않았으며, 천공홀 직경 5, 7.5, 10cm 모든 경우에서 단계별 발열팽창 시, x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률 값이 변화하며, 이에 단계별 발열팽창의 영향을 받는 것으로 확인된다.

배치 C형 천공홀 5cm의 수치해석 결과, x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률 분포를 그림 2-75에 나타내었음. 발열팽창은 단계별로 진행되었으며, x축 방향 변형률은 0.0027~0.0031의 범위를 나타내며, y축 방향 변형률은 약 0.0031로 나타남. 주인장변형률의 최대값은 발열팽창기가 매입된 좌측 상단부에서 0.0053으로 나타나며, 발열팽창기가 매입된 천공홀의 단계별 주인장변형률은 0.0051~0.0053의 범위를 보인다.

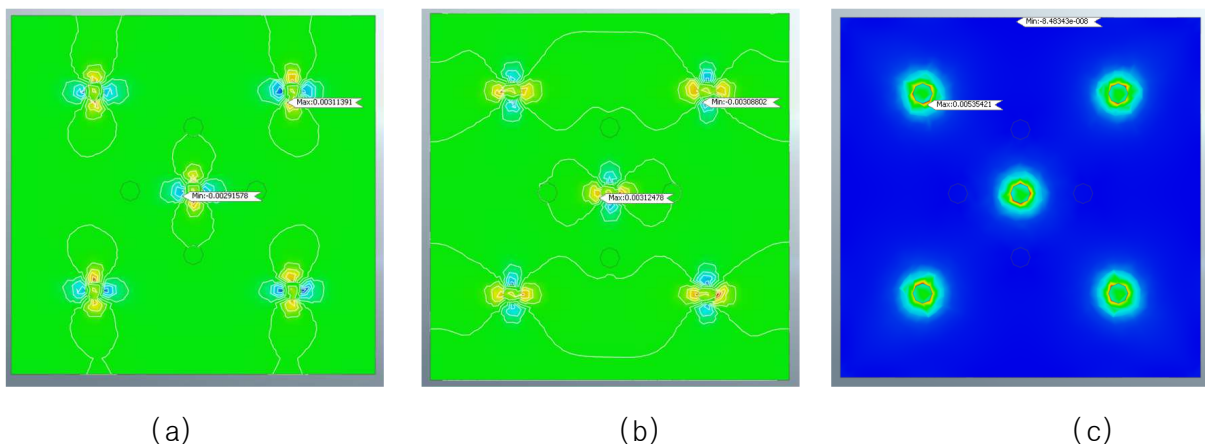


그림 2-75 암반모형의 배치C형 - 천공홀 5cm의 변형률 분포
: (a) x축; (b) y축; (c) 주인장 변형률

배치 C형 천공홀 7.5cm의 수치해석 결과, x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률 분포를 그림 2-76에 나타내었다. 발열팽창은 단계별로 진행되었으며, x축 방향 변형률은 0.0028~0.0031의 범위를 나타내며, y축 방향 변형률은 0.0027~0.0031로 나타난다. 주인장변형률의 최대값은 발열팽창기가 매입된 좌측 상단부에서 0.0054로 나타나며, 발열팽창기를 매입한 천공홀의 단계별 주인장 변형률은 0.0051~0.0054의 범위를 보인다.

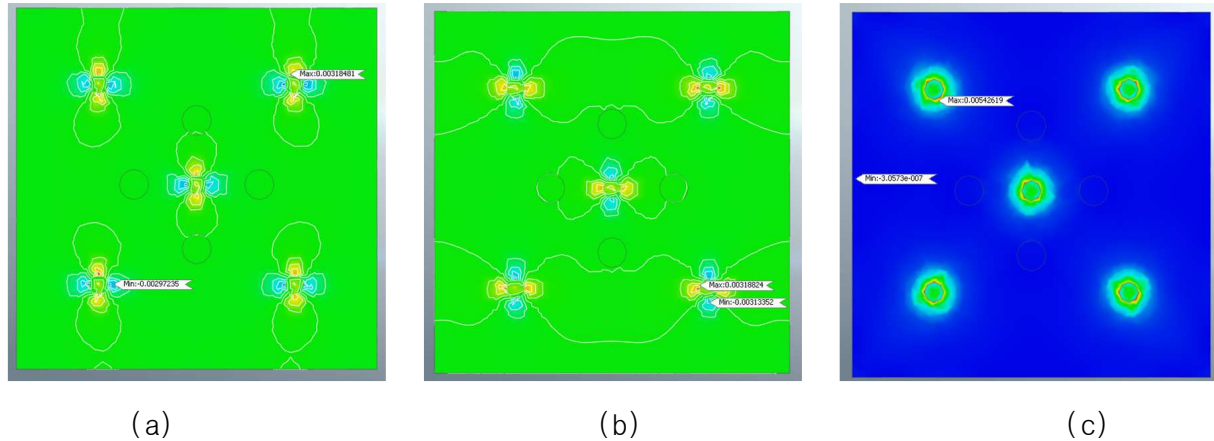


그림 2-76 암반모형의 배치C형 - 천공홀 7.5cm의 변형률 분포

: (a) x축; (b) y축; (c) 주인장 변형률

배치 C형 천공홀 10cm의 수치해석 결과, x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률 분포를 그림 2-77에 나타내었다. 발열팽창은 단계별로 진행되었으며, x축 방향 변형률은 약 0.0032로 나타나며, y축 방향 변형률은 0.0030~0.0031의 범위로 나타난다. 주인장변형률의 최대값은 발열팽창기가 매입된 우측 하단부에서 0.0052로 나타나며, 발열팽창기가 매입된 천공홀의 단계별 주인장 변형률은 0.0053으로 나타나며, 발열팽창기를 매입한 단계별 주인장 변형률은 0.0052~0.0053의 범위를 보인다.

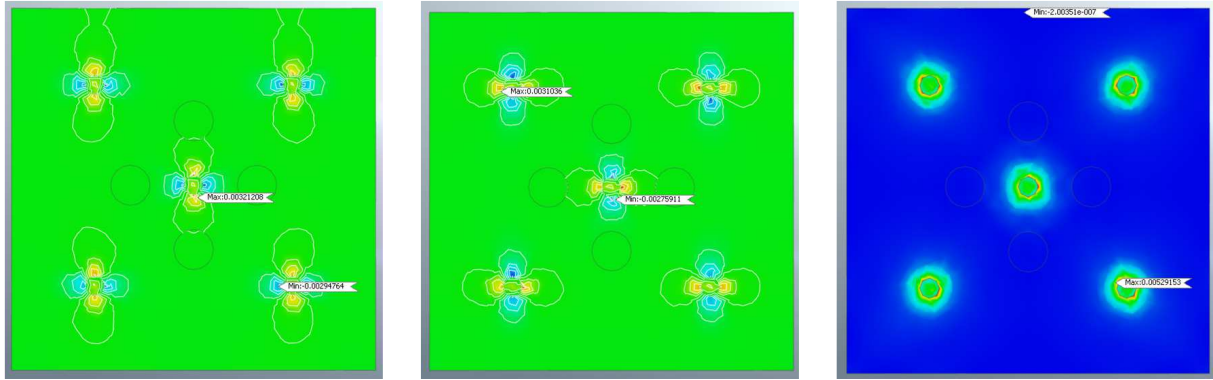
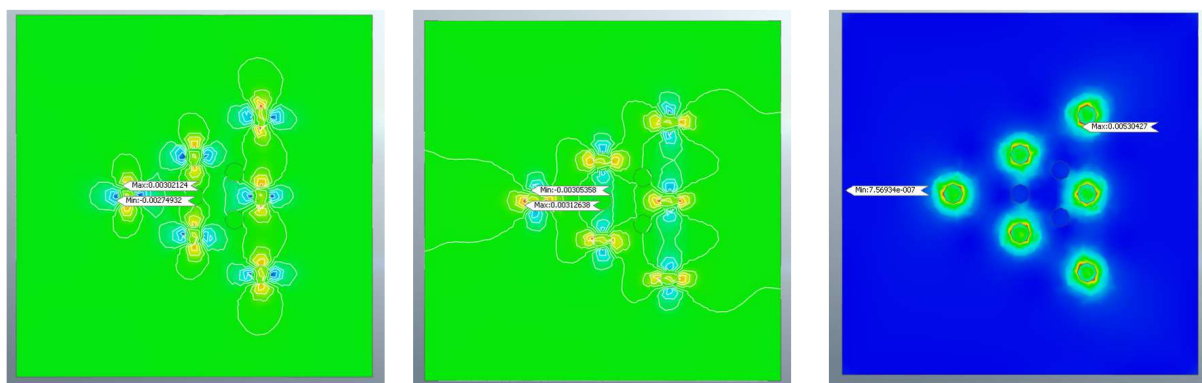


그림 2-77 암반모형의 배치C형 - 천공홀 10cm의 변형률 분포

: (a) x축; (b) y축; (c) 주인장 변형률

배치 C형 수치해석 결과, 천공홀의 직경이 증가할수록 x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률에서 큰 차이는 나타나지 않았으며, 천공홀 직경 5, 7.5, 10cm 모든 경우에서 단계별 발열팽창 시, x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률 값이 변화하며, 이에 단계별 발열팽창의 영향을 받는 것으로 확인된다.

배치 D형 천공홀 5cm의 수치해석 결과, x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률 분포를 그림 2-78에 나타내었다. 발열팽창은 단계별로 진행되었으며, x축 방향 변형률은 0.0024~0.003의 범위로 나타나며, y축 방향 변형률은 0.0029~0.0031 범위로 나타낸다. 주인장변형률의 최대값은 발열팽창기가 매입된 우측 상단부에서 0.0053으로 나타나며, 발열팽창기가 매입된 천공홀의 단계별 주인장 변형률은 0.0052~0.0053의 범위를 보인다.



(a)

(b)

(c)

그림 2-78 암반모형의 배치D형 - 천공홀 5cm의 변형률 분포

: (a) x축; (b) y축; (c) 주인장 변형률

배치 D형 천공홀 7.5cm의 수치해석 결과, x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률 분포를 그림 2-79에 나타내었다. 발열팽창은 단계별로 진행되었으며, x축 방향 변형률은 0.0028~0.0033의 범위로 나타나며, y축 방향 변형률은 0.0027~0.0035 범위로 나타낸다. 주인장변형률의 최대 값은 발열팽창기가 매입된 중앙 상단부에서 0.0055로 나타나며, 발열팽창기가 매입된 천공홀의 단계별 주인장 변형률은 0.0053~0.0055의 범위를 보인다.

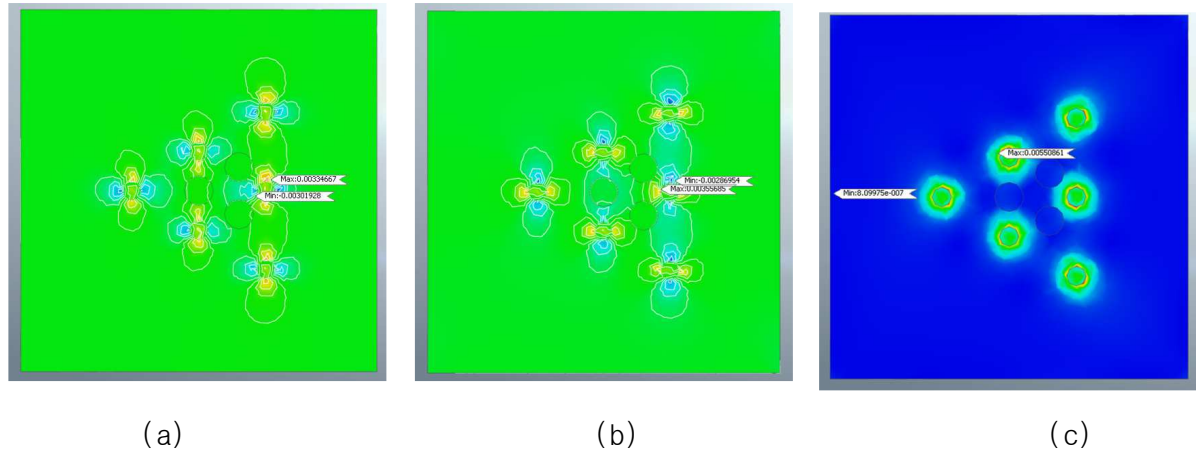


그림 2-79 암반모형의 배치D형 - 천공홀 7.5cm의 변형률 분포
: (a) x축; (b) y축; (c) 주인장 변형률

배치 D형 수치해석 결과, 천공홀의 직경이 증가할수록 x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률이 다소 증가하였으며, 천공홀 직경 5, 7.5cm 모든 경우에서 단계별 발열팽창 시, x 및 y축 방향 그리고 주인장변형률의 값이 변화하며, 이에 단계별 발열팽창의 영향을 받는 것으로 확인된다.

전체 수치해석 결과, 패턴 (a)의 직경 7.5cm 최대 주인장변형률이 0.0066으로 가장 큰 변형률을 보여준다. 패턴 (a)의 파괴가능성이 가장 높은 것으로 판단된다. 발열팽창 순서 및 천공홀 직경이 변형률에 영향을 미치는 것으로 보아 발열팽창 순서와 천공홀 직경이 파괴에 중요한 영향을 끼치는 요소로 판단된다.

(다) 실용화 무진동 암반파쇄 공법 개발

① 비즈니스모델 수립

㉞ 국내 목표시장 및 고객 환경분석

국내에서의 무진동 및 미진동발파공사 시장규모는 660억이며, 암파쇄굴착시공 및 정밀진동제어 발파공사 규모는 2,500억으로 추정되며, 고객이 요구하는 가치는 화학적 오염물 제거 및 대기오염 방지의 최소화하는 환경적인 측면과 도심지역별 작업의 차별화를 통한 시공의 정확성과 생산성 향상을 요하는 시공기술적 측면이 있으며, 궁극적으로는 민원발생의 최소화과 공사기간의 단축으로 비용절감 효과를 기대하는 면이 크다.

따라서 자사에서는 목표시장을 공공기관의 발주 수급처인 대기업 건설사 및 엔지니어링사를 1차 목표로 하며, 틈새시장으로 일반아파트, 빌라, 빌딩 등을 건설하는 중견,중소기업 건설사들을 대상으로 전문기술시공 위탁업체로서의 사업추진을 목표로 하고 있다.

시장 규모 및 고객 가치	시장 규모	고객 가치
	1. 연간 국도공사 및 지자체 관급공사 총 규모는 5,500억으로 5%씩 증가함 - 무진동 및 미진동 발파공사 규모는 660억(총 관급공사 12%)이며, - 암파쇄굴착시공 및 정밀진동제어발파 규모는 2,500억(관급공사의 50%) 임	1. 무진동 무소음 적용 기술 (민원 발생 최소화) 2. 부대비용 절감(예:비산먼지 방지망) 3. 공사기간 단축(수시공사)
고객 요구 사항	환경적 측면	시공 기술적 측면
	1. 화학적 오염물 제거 2. 석재(파쇄석) 재활용 가능 3. 대기오염 방지	1. 작업률 : 2배이상 가능(화약발파 대비) 2. 정확성 : 시뮬레이션을 통한 예측발파 3. 도심지역 작업 차별화
제품	목표시장-1(B2G)	목표시장-2(B2B)
	1. 대규모 SOC사업(댐, 저수지, 광산, 지하철) - 철도공사, 도로공사, 지자체 공단 2. 대기업 건설사 및 엔지니어링사 - 조달청 수주공사 위탁 시공	1. 일반아파트, 주택, 빌딩, 전원주택 - 난장터파기, 사면절취, 관로터파기, 도로공사, 특수구조물 터파기

표. 국내시장 환경 및 고객 요구사항 분석

㉞ 자사 사업화 및 시공기술력 분석

사업화를 위한 운영체제로 전문암파쇄 기술연구소와 전문 토목엔지니어들을 기반으로 산학협력 자문단을 구성하고 있으며, 시공기술에 대한 신공법 적용으로 무진동,무소음, 무분진 등 친환경적인 결과물 산출과 파쇄시간의 단축을 통한 대외경쟁력을 확보하고 있다.

기존시장의 대체방안으로 신시장을 개척하는 신기술 융합공법과 다양한 암반재질과 시공 환경에 대한 제약된 애로사항은 4개 융합분야의 검증시나리오에 의한 정기적인 시험을 통하여 검증을 추진하며, 다양한 유사공법을 지속적으로 기적용된 사례중심으로 연구하여 애로사항을 해결 할 계획이며, B2B 사업을 중점 목표시장을 하여 사업화를 추진 한다.

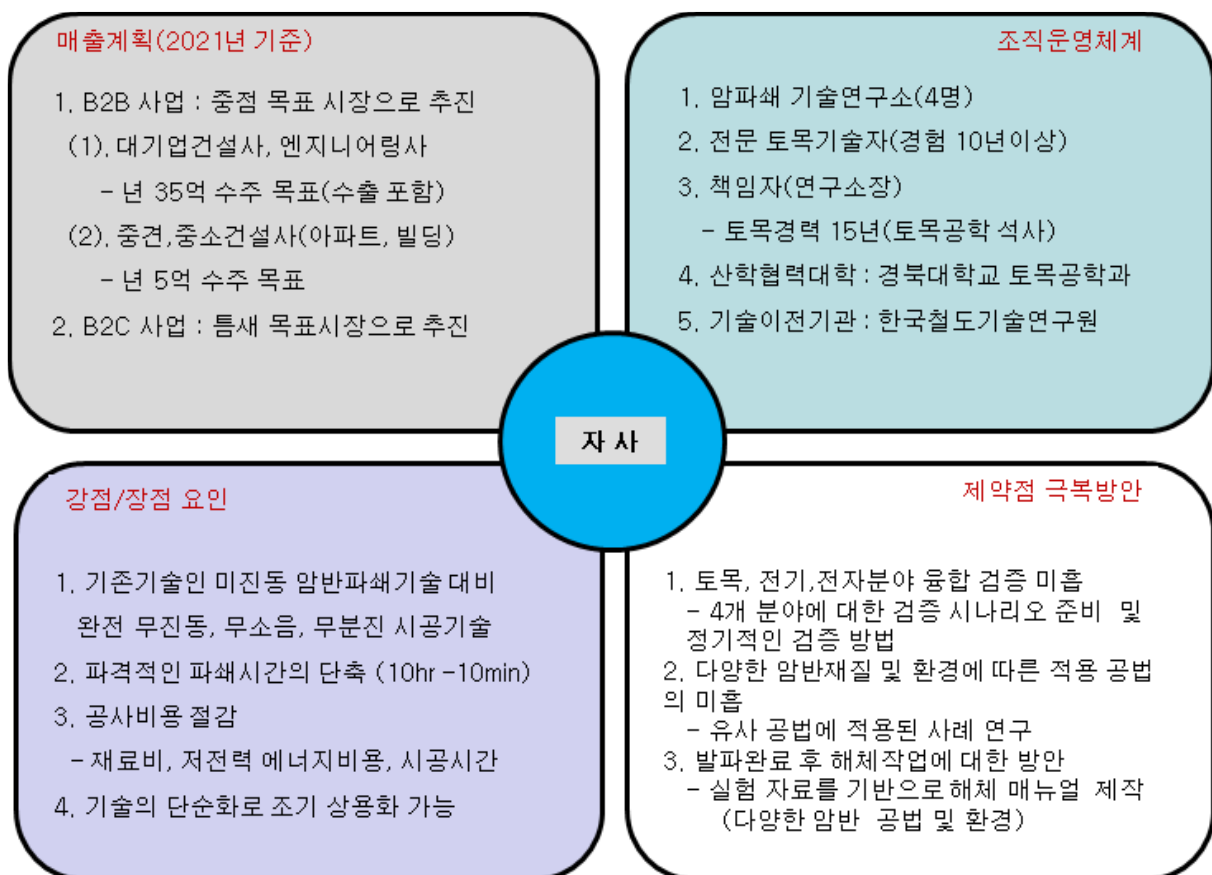


표. 자사 사업화 및 시공 기술력 분석

㉔ 경쟁사(D사) 시공 기술력 분석

튜브 팽창기술 시공에 의한 무진동, 무소음이 가능 한 유사 시공기술을 보유한 D사는 많은 시공 경험과 노하우를 보유하고 있고 시공 기술에 대한 신뢰도를 이념으로 추진하고 있는 장점을 가지고 있다.

파쇄시간이 길고 공사비용이 과다하게 투입되는 단점이 있기 때문에 향후 신기술 적용이 확산되는 시점에서는 대외적인 경쟁력이 감소 한다.

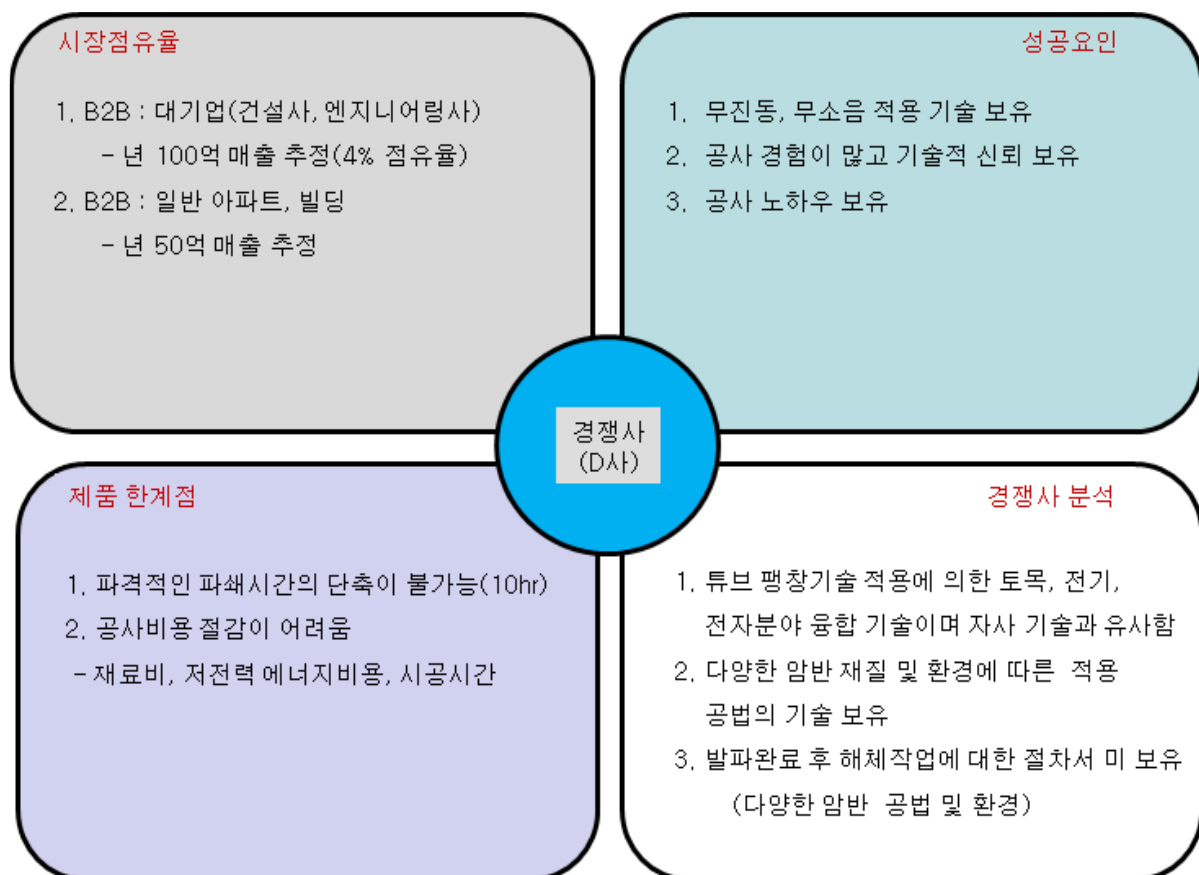


표. 경쟁사 사업화 및 시공 기술력 분석

㉔ 사업화 방향 분석

㉔ -1 SWOT분석

자사의 최대 강점은 암파쇄기술에 대한 전담 연구조직과 발열팽창 융합기술로서의 신공법기술을 보유하고 있으며, 이에따른 시공기간 단축과 경제적 비용절감이 가능하며 대외적으로 비용 및 품질 경쟁력을 갖추고 있다.

약점으로는 신기술, 신물질을 적용한 공법기술 사례가 미흡하여 신시장 개척에 다소 시간이 필요하기때문에 경영적인 운영자금의 애로사항이 있다.

기회적인 측면에서는 원전 해체작업 및 도심지역공사에 대한 민원 요소발생으로 신규시장의 증가와 더불어 기존시장들의 대체시공이 가능하다.

또한, 위협적인 측면에서는 기존업체들의 원가경쟁이 치열하며, 신기술에 대한 숙련된 엔지니어들의 부족함을 들 수 있다.

외부환경 내부역량	강 점 (Strength)	약 점 (Weakness)
	1. 시장 요구에 의한 신기술, 신물질을 적용한 신공법 기술보유 (발열팽창 융합기술) 2. 신규시장(암파쇄)의 진입 가능성이 높음 3. 유관사업 경험을 보유(약30여년) 4. 관련기술 연구조직의 전담화	1. 신기술, 신물질을 적용한 공법 기술 사례가 미흡 (현재 시뮬레이션 단계) 2. 신규시장에 대한 사업화 조직의 미흡(협업, 대리점 등)
기 회 (Opportunity)	1. 신규시장 및 틈새시장의 적용 사례 발표 및 홍보전략 수립 2. 관련기술의 표준화 정립에 따른 기술보호 방안 수립 SO	1. 기술개발 단계별 객관적 검증에 의한 시험방안 수립 및 문서화 2. 관련기술의 표준화로 기술 및 사업의 조직화 방안 수립 WO
위 험 (Threat)	ST 1. 기존업체들의 원가경쟁이 심함 2. 초기 시공으로 인한 기술적 이해도를 높일 수 있는 기술인력 부족 1. 기간별 시공 원가 절감 방안 수립 2. 관련 기술 로드맵 방안 수립과 기술 표준등록 방안 수립	WT 1. 기간별 시공 원가 절감 방안 수립 2. 관련 기술 로드맵 방안 수립과 기술 표준등록 방안 수립

표. SWOT 분석

㉔ -2 모델 분석(Canvas 9Block)

목표고객에게 제공되는 가치요소는 민원 요인을 감소시키는 무진동, 무소음, 무분진 등 친환경적인 요인과 시공시간의 단축 및 비용 절감, 단순한 기술 적용에 따른 상용화 확대 가능성 요소를 부여 할 수 있다.

기술안정화를 위한 시범 기술시연회, 적용사례 논문 발표 및 동영상 제공 등을 통하여 고객과의 기술적 신뢰성을 얻을 수 있으며, 이에따른 시공계약의 수급으로 수익원(시공금액)을 산출할 수 있다.

토목, 전기, 장비기술자들의 핵심인력 보유와 시공작업에 대한 활동과 관련 기술자문 및 주요제품 구매업체들과의 협업 지원을 통 한 사업화 모델을 추진한다.

비즈니스 모델		CANVAS OVERLAY		
Key Partners	Key Activities	Value Propositions	Customer Relationship	Customer Segments
1. 코아제품 구매업체 2. 무진동 암파쇄 기술 자문업체 3. 무진동 암파쇄 기술 교수진	1. 시공 작업 - 굴착, 전기, 천공 2. 시공완료보고서	1. 무진동, 무소음, 무분진 공사 2. 파쇄시간의 단축 3. 공사비용 절감 - 재료비 - 저전력 에너지 - 시공기간 단축 4. 기술의 단순화 5. 무진동 원천기술에 따른 선도시장 진입	1. 기술시연회 2. 논문 3. 적용사례표 (적용사례 동영상) Channels 1. 자사 홈페이지 2. 관련 협회 홈페이지 3. 유튜브 4. 관련대학 강의 5. 전문지	1. 공공기관, 지자체 2. 대기업 건설회사 3. 중소 건설회사 4. 개인 건설사업자
	Key Resource 1. 토목 기술자 2. 전기 기술자 3. 장비 기술자			
Cost Structure 1. 엔지니어 인건비 : 60% 2. 재료비(발열체, 팽창제) : 10% 3. 연구시험비 : 5% 4. 경 비 : 5% 5. 일반관리비 : 10% 6. 영업관리비 : 10%		Revenue Streams 1. 암파쇄 시공비 : 90% 2. 위탁공사 이윤 : 5% 3. 장비판매편 및 소모품 판매비(대리점) : 5%		

표. 비즈니스 모델

㉮ 사업화 전략

㉮-1 사업화 홍보 및 판로개척(STP 전략)

발열팽창재를 이용 한 무진동 암반파쇄 공법 적용이 가능한 시장으로 B2G, B2B 중대형 수주업체의 위탁생산과 B2B 소형건설시장을 중심으로 APT, 오피스텔, 대형 건축물 신축 등 주거밀집지역 대상의 공사지역과 문화재, 보안건물, 인접 구조물, 야간공사, 축산농가 관련 인접지역, 작업공간 미확보지역 등의 화약발파시장 대체 지역을 주 목표 시장으로 설정하였다.

자사의 제품화 포지셔닝(S사 기준)은 환경적인 측면에서 무소음, 무진동, 무분진은 비슷한 수준이며, 시공 공정과 운용의 단순화로 시공시간은 매우 단축이 가능하고 시공비 측면에서 발열팽창재료(질석+전도성 혼합재료)를 활용함에 따라 비용 감소효과가 높음에 따라 시공기간과 비용측면에서는 S사 대비 우수한 위치를 가지고 있다.

시장세분화 Segmentation	발열팽창재를 이용한 무진동 암반파쇄 공법 적용이 가능한 시장으로 1. B2G 수주업체(대형건설사) 위탁 시장 2. B2B 수주업체(중견건설사) 위탁 시장 3. B2B 의뢰(소형건설사, 개인) 시장 - 직접 수주
목표시장 Targeting	1. 주거 밀집지역 대상 공사 지역 - APT, 오피스텔, 대형 건축물 신축 2. 화약발파시장 대체 지역 - 문화재, 보안건물, 인접 구조물, 야간공사, 축산농가 관련 인접지역, 작업 공간 미확보지역 등
포지셔닝 Positioning	1. 환경적인 측면에서 무소음, 무진동, 무분진은 비슷한 수준 (S사) 2. 시공 비용적인 측면에서 발열팽창재료(질석+전도성 혼합재료)를 활용함에 따라 비용 감소효과가 높음 3. 따라서 시공기간과 비용측면에서는 S사 대비 우수함

표. STP 전략

㉔-2 4p 전략

제품화 측면에서는 다양한 공법과 시공 수주 유형에 의한 제품 사업화 방안과 연계하여 표준화된 일위대가 산출로 유연성있는 가격 경쟁력을 확보하는 전략을 가지고 있다.

B2G, B2B 중대형 수주업체의 위탁생산과 B2B 소형건설시장에 대한 직접수주 및 시공과 함께 대리점(위탁시공업체)을 통 한 협업 유통채널을 확보하여 추진하고 있다.

적용사례 결과에 대한 기술 시연회 및 동영상 배포, 시공사례 URL을 통하여 기술적인 신뢰성 검증과 기존 고객들과의 채널을 유지하는 홍보 전략으로 사업화를 추진 한다.

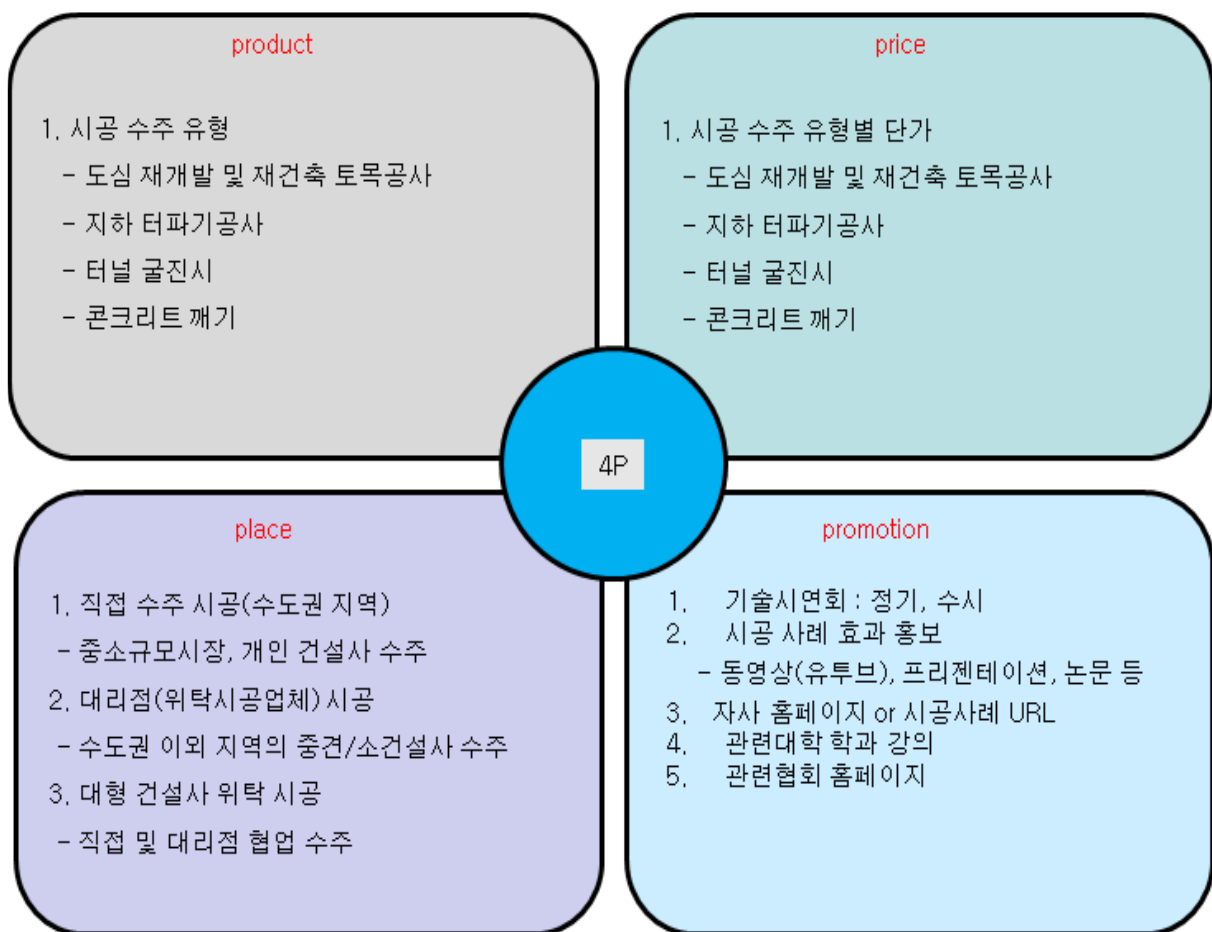


표. 4P 전략

㉢ 사업 추정 매출 및 고용 계획

㉢-1 추정매출계획

매출발생 1차년도(2020년)에는 신기술 신공법 지정 이전으로 소규모 무진동, 미진동 발파현장에서 시험적으로 우선 적용하여 내수시장에서 2,000만원의 매출을 목표로 추진 한다.

매출발생 2차년도(2021년)에는 국내.외 시공 결과의 성공적인 수행 경험과 홍보를 통하여 대리점(위탁시공업체) 개설 및 영업 확대, 관급공사 설계 반영 및 시공 등으로 약 5억 원 이상의 수주를 목표로 추진 한다.

매출발생 3차년도(2022년)에는 기존 무진동 발파업체에게 위탁시공으로 시공 실시료 위주의 영업 확대와 장비(인덕션 기반 발열팽창 기기) 및 소모품(팽창재료 등) 판매를 추가하여 약 35억원의 수주를 목표로 추진 한다.

매출발생 4차년도(2023년 ~)이후에는 기존의 영업활동과 더불어 전국에 위탁시공업체 확산 체계(조직 및 교육, 시공 표준화 등)를 구축하여 약 50억 이상의 수주를 목표로 추진 한다.

구 분		(2020)년 (개발종료 해당년)	(2021)년 (개발종료 후 1년)	(2022)년 (개발종료 후 2년)	(2023)년 (개발종료 후 3년)
사업화 제품		발열팽창 무진동 암반파쇄 신기술을 적용한 발열팽창기기 상용화 제품	발열팽창 무진동 암반파쇄 신기술을 적용한 발열팽창기기 상용화 제품	발열팽창 무진동 암반파쇄 신기술을 적용한 발열팽창기기 상용화 제품	발열팽창 무진동 암반파쇄 신기술을 적용한 발열팽창기기 상용화 제품
투자계획(백만원)		20	200	500	1,000
판매 계획 (백만원)	내 수	20	200	1,000	2,000
	직접수출	0	100	500	1,000
	간접수출	0	200	2,000	2,000
	계	20	500	3,500	5,000
고용계획(단위 : 명)		1	3	5	9

표. 추정매출계획

※암반파쇄판매단가 : M3당

㉞-2 매출 및 고용 추진 계획

개발종료이후 1차년도(2021년)에는 국내.외 시공 결과의 성공적인 수행 경험과 홍보를 통하여 수도권 중심의 대리점(위탁시공업체) 개설(5개점)과 대기업 건설사 중심의 수주 시공과 신규고용인원 3명을 목표로 추진 한다.

개발종료이후 2차년도(2022년)에는 광역권 중심의 대리점(위탁시공업체) 추가 개설(5개점)과 대기업 건설사 중심의 수주 시공과 신규고용인원 5명을 목표로 추진 한다.

개발종료이후 3차년도(2023년 ~)이후에는 지방권 중심의 대리점(위탁시공업체) 추가 개설(10개점)과 대기업 및 중견건설사 중심의 수주 시공과 신규고용인원 9명을 목표로 추진 한다.

추진 항목	(2021)년 (개발종료 후 1년)	(2022)년 (개발종료 후 2년)	(2023)년 (개발종료 후 3년)
매출 목표 (백만원)	500	3,500	5,000
매출추진 방안	1. 대리점(위탁시공업체) 개설 및 시공 - 수도권 중심(5개점) : 1억 2. B2B에 의한 수주 - 대기업 건설사 : 약 3억 - 중견/소건설사 : 약 1억	1. 대리점(위탁시공업체) 추가개설 및 시공 - 광역권 중심(10개점) : 10억 2. B2B에 의한 수주 - 대기업 건설사 : 약 15억 - 중견/소건설사 : 약 10억	1. 대리점(위탁시공업체) 추가개설 및 시공 - 지방권 중심(20개점) : 20억 2. B2B에 의한 수주 - 대기업 건설사 : 약 25억 - 중견/소건설사 : 약 5억
고용창출 방안	1. 암파쇄 설계기술자 : 1명 2. 암파쇄 시공기술자 : 1명 3. 현장관리인원 : 1명	1. 암파쇄 설계기술자 : 2명 2. 암파쇄 시공기술자 : 2명 3. 현장관리인원 : 1명	1. 암파쇄 설계기술자 : 3명 2. 암파쇄 시공기술자 : 5명 3. 현장관리인원 : 1명

표. 년도별 매출 및 고용 추진방안

㉞ 해외시장 진출 계획

주거 밀집지역이 많고 인구 밀도가 높은 일본과 홍콩을 목표시장으로 계획 중이며, 세부 목표시장은 국내와 동일한 도심 밀집지역의 공사 및 화약발파시장 대체 지역을 우선 목표로 추진할 계획이다.

진출방안으로는 매몰비용(Sunk Cost)에 대한 경영 리스크를 줄이기 위하여 중장기적인 측면에서 목표 국가의 로컬 건설사와 전문기술협력업체 등록 및 협업을 통한 진출계획이며, 세부 방안으로는 국내 시공실적의 효과분석 사례에 대한 컨퍼런스를 개최하고, 목표 국가의 시범 적용사례를 도출하여 진입하는 방안을 추진 중이다.

기타 지역(아프리카 및 동남아)은 개도국 유상지원인 경제개발협력기금(EDCF), 시장개척자금, KOICA사업 등 해외진출지원자금이 가능한 정부사업을 기반으로 추진 할 예정이다.

㉟ 사업화 성공 및 리스크 대응 전략(key word)

1. 성공 전략

- (1) 전국적인 대리점(위탁시공사) 체제 구축에 따른 Time to Market 적용
- (2) 기술 표준화 정립에 따른 시공기술 인력 교육 및 양성
- (3) 정기적인 기술시연회를 통한 고객의 신뢰성 구축

2. 리스크 대응 전략

- (1) 기술 인력들에 대한 HRD 양성 계획 수립 : 경력 및 역량관리, 보상체계 등
- (2) 중단기별 시공 원가절감 계획 수립(향후 경쟁사 대응방안)
- (3) 시공현장 사례별로 성공과 실패에 대한 분석을 통한 사전 교육으로 품질관리 실천

② 마케팅 전략 수립

㉠ 마케팅 실행 전략 로드맵

마케팅 실행전략 로드맵은 3단계로 1단계인 개발 & 사업화 진입단계에서는 무진동, 무소음, 무분진에 의한 암파쇄시공기술에 대한 맞춤형 시공 시범사업의 사례를 구축하고 현장 유형별 맞춤형 시공방법의 홍보와 자사의 기술개발 보호방안 전략 수립과 안전보건경영시스템(KOSHA18001) 인증을 추진하고 2단계인 사업화 확장단계에서는 기술적인 시험방법과 시공원가의 표준화를 정립하여 국내 대리점체제를 구축과 시공모니터링시스템의 스마트화를 추진하며, 3단계인 사업화 안정단계에서는 신규 융복합기술 개발로드맵을 작성하여 4차 산업에 적합한 스마트 제품기술(IoT)을 적용하고 시공원가를 절감하여 대외적인 경쟁력 확보와 해외 대리점에 대한 협업체제를 구축하여 사업화를 추진한다. (아래표 참조)

로드맵	개발 / 사업화 진입기	사업화 확장기	사업화 안정기
실행기간	2018년 - 2020년	2021년 - 2022년	2023년 - 2024년
실행과제	1. 맞춤형 홍보 2. 시공 시범 적용사례 3. 기술개발 보호	1. 기술적 시험 방법의 표준화 2. 시공원가 표준화 3. 국내대리점 시공 체제	1. 기술 로드맵 구축 2. 시공원가 절감 3. 해외대리점 협업 체제
실행전략	1. 맞춤형 수주 전략 수립 2. 기술적 애로사항 해결 사례집 작성 3. 시공 결과에 대한 효과 분석 4. 개발제품 기술 표준화 사양의 정립 5. 안전보건경영시스템 구축 및 인증	1. 개발제품의 기술적 시험방법의 표준화 2. 시공원가 표준안 제작 3. 국내 대리점 구축 조직 및 인력 양성 4. 시공교육교안 제작 5. 시공 모니터링 시스템의 스마트화	1. 신규 융복합 기술개발 로드맵 구축 2. 시공원가의 절감방안 3. 국내,외 기술 표준 보완 및 등록 방안 4. 해외대리점 협업체제 구축 5. 모니터링 결과의 빅데이터 분석

표. 마케팅 실행 전략 로드맵

④ 성장 전략 - 핵심 추진 전략과제

사업화의 가능성과 자사 기술보호를 위한 표준화 방안인 단기과제(3개), 기술의 검증 및 시험방안과 사업화 운영조직, 시공원가 산출의 표준화 방안인 중기과제(6개), 사업화 이후의 경쟁력 확보를 위한 원가절감 및 기술로드맵 구축 방안인 장기과제(3개)를 도출하여 핵심 성장 전략으로 추진한다. (아래 표 참조)

구분	전략과제	파급효과	실행가능성	우선 순위
SO 전략	기존시장 및 틈새시장의 적용 사례 발표 및 홍보전략 수립	상	상	단기과제
	관련기술의 표준화 정립에 따른 기술 보호 방안 수립	상	상	단기과제
	안전보건경영시스템 구축 및 인증 취득(KOSHA18001)	상	상	단기과제
WO 전략	기술개발 단계별 객관적 검증에 의한 시험방안 수립 및 문서화	중	중	중기과제
	관련기술의 표준화로 기술 및 사업의 조직화 방안 수립	중	중	중기과제
	적용사례결과에 대한 성과지표(KPI)	중	중	중기과제
	도출과 맞춤형 적용방안을 수립			
ST 전략	합리적인 시공원가 산출방안의 표준화 정립	중	중	중기과제
	기술인력 양성 및 시공업무의 표준화(교육, 시공절차, 매뉴얼 등)	중	중	중기과제
	스마트시스템에 의한 시공과정의 모니터링시스템을 구축	중	중	중기과제
WT 전략	기간별 시공 원가 절감 방안 수립	하	하	장기과제
	관련 기술 로드맵 방안을 수립과 기술 표준 등록 방안 수립	하	하	장기과제
	누적된 시공과정의 모니터링 데이터를 빅데이터 분석을 통한 시공기술을 확보하는 방안의 도출	하	하	장기과제

표. 핵심 성장 전략과제

㉔ 중장기 세부 전략(2021년 ~ 2024년 이후)

구분	전략과제	추진일정(년)								주요 추진 내용
		2021		2022		2023		2024		
		1H	2H	1H	2H	1H	2H	1H	2H	
중기	1. 기술개발 단계별 객관적 검증에 의한 시험방안 수립 및 문서화 정립									● 기술평가항목 및 시험방법 표준화 ● 기술관리조직의 신설
	2. 관련기술의 표준화로 기술 및 사업의 조직화 방안 수립									
	3. 합리적인 시공원가 산출방안의 표준화 정립									● 시공원가(일위대가) 표준 제작 ● 대리점체제 구축에 의한 기술 인력 양성계획 수립 ● 시공 교육 교안의 제작(시공공법 유형, 시공절차, 매뉴얼 등)
	4. 기술인력 양성 및 시공업무의 표준화 (교안, 공법유형, 시공절차, 매뉴얼 등)									
	5. 적용사례 결과에 대한 성과지표(KPI) 도출과 맞춤형 적용 방안 수립									● 효과분석을 위한 성과지표(KPI : 시공기술 측면, 시공시간 등)도출 ● 유비쿼터스 시공 모니터링시스템 구축 (시공방법, 시공 과 정, 시공분석 등)
	6. 스마트시스템에 의한 시공과정의 모니터링 시스템을 구축									

구분	전략과제	추진일정(년)								주요 추진 내용
		2021		2022		2023		2024		
		1H	2H	1H	2H	1H	2H	1H	2H	
장기	1. 기간별 시공 원가 절감 방안 수립									● 기술로드맵에 의한 시공원가 절감방안
	2. 관련 기술 로드맵 방안과 기술 표준 등록 방안 수립									● 보완된 기술적 사항을 정립하여 기술 표준 제작 및 등록 추진
	3. 누적된 시공 과정의 모니터링 데이터의 빅데이터 분석 추진									● 빅데이터에 의한 시공 방법의 개선 및 맞춤형 시공유형의 도출 방안

③ 공법 시방서 작성

㉠ 굴착방법

굴착방법에는 인력굴착, 기계굴착, 발파굴착, 파쇄굴착 등이 있으며 현장여건과 지반조건을 고려하여 적합한 굴착방법을 선정하여야 한다. 일반적으로 점착력이 적거나 파쇄 혹은 팽창성 등이 심하여 굴착면의 자립시간이 짧은 지반에서는 굴진면의 안정을 위하여 휘폴링, 주입공법 등 굴착 보조공법을 적용하여야 한다. 굴착방법 선정시에는 다음 사항을 고려하여야 한다.

- 원지반이 본래 가지고 있는 지보능력을 최대한 유지할 수 있으며 안정성, 경제성 및 시공성이 우수한 굴착방법을 채택하여야 한다.
- 지반조건, 지하수 유입정도, 굴착단면의 크기와 형태, 터널 연장, 근접구조물 유무와 주변 환경영향(진동, 소음 및 지표침하 등), 보조공법의 적용성 등을 고려하여야 한다.

㉠-1 인력굴착

인력굴착은 곡괭이, 삽, 착암기, 소형브레이커 등 간단한 굴착도구를 사용하여 인력으로 굴착하는 방법으로 주로 다음과 같은 조건에서 적용한다.

- 자립시간이 짧아 토사지반을 소규모로 분할굴착하고 조기에 지보재를 설치하여야 하는 경우
- 진동의 영향을 크게 받는 지반을 소규모로 분할굴착하고 조기에 지보재를 설치하여야 하는 경우

㉠-1 기계굴착

기계굴착은 일반적으로 토사~연암의 지반에서 적용 가능한 것으로 평가되고 있으며, 각 굴착장비별 특징은 다음과 같다.

㉠-2 쇼벨(shovel) 굴착

쇼벨은 백호(backhoe) 또는 굴삭기라고도 하며 가장 일반적인 기계굴착장비로서 굴착에서 상차 및 바닥면 고르기까지 다양한 용도로 사용된다. 비교적 느슨한 토사는 굴착이 가능하나, 풍화토이상의 지반에서는 굴착속도가 느리다.

㉠-3 브레이커 굴착

브레이커굴착은 굴삭기 선단에 브레이커를 장착하여 굴착하는 방법으로 터널굴착장비 중에서 가장 일반적인 장비로서 초기투자비가 낮고 토사에서 풍화암까지 굴착이 가능하다. 그러나 굴착속도가 다소 느리고 소음 및 진동의크기는 발파에 비해 작으나 지속시간이 긴 단점이 있다. 일일 굴착속도는 지하철터널에 적용한 실적에 의하면 복선단면 기준으로 0.25~0.45m 정도이다.

ITC는 브레이커 또는 쇼벨에 버력처리가 가능한 장비가 탑재되어 비교적 작은 단면에서도 굴착속도가 상대적으로 빠르다. 다만, 초기투자비가 높고 터널 외 타공종과의 호환성이 낮아

현장 경제성이 다소 낮다. 일일 굴착속도는 지하철 단선터널의 실적에 의하면 0.39~0.53m/일 정도이다.

㉔ 로드헤더 굴착

로드헤더는 임의의 형상의 터널단면을 굴착할 수 있는 터널전용 굴착장비로서 전방의 커터 헤드에 많은 픽(pick)이 부착되어 있다. 전방하부에는 버력을 모으는 장비가 부착되어 있고 장비후방까지는 컨베이어벨트가 설치되어 있다. 커터헤드의 회전에 의해 굴착이 이루어짐과 동시에 후방으로 버력이 반출되기 때문에 버력상차시간이 절감되어 굴착속도가 매우 빠르다.

다만, 연암이상의 지반에서는 픽 소모량이 많아 경제성이 저하된다. 또한, 굴착시 분진이 많이 발생하기 때문에 작업원 위생을 위해환기 및 살수설비가 필요하다. 일일 굴착속도는 지하철 복선터널에 적용한 실적에 의하면 0.4~0.6m/일 정도이다. 터널굴착에서 로드헤더의 장 단점은 다음과 같다.

-장점

- ① 발파공법에 비하여 지반의 이완이 적고 여굴도 적다.
- ② 작업원이 적고 시공도 안전하다.
- ③ 부분적인 경암에 대해서는 발파공법으로 변경하여 병용 시공이 가능하다.

-단점

- ① 초기투자비가 높다.
- ② 분진의 발생량이 많아 환기 및 살수설비가 필요하다.
- ③ 일축압축강도 60 MPa이상의 암반에서는 픽(pick)의 소모량이 많다.
- ④ 석영 함유량 및 마모를 촉진시키는 광물에 의한 영향이 크다.
- ⑤ 용수가 있는 지질에서는 버력이 이토화되어 작업능률이 저하된다.

㉕ 발파굴착

발파굴착은 가장 일반적인 암반 굴착방법으로 설계 시에 다음 사항을 고려하여야 한다.

- ① 발파굴착은 경제성과 시공성은 양호하나진동과 소음 등이 수반되기 때문에 지반조건 또는 주변여건에 따라서 적용여부를 결정하여야 한다.
- ② 발파설계는 지반조건을 고려하여 발파진동으로 인한 터널 주변 지반의 이완영역을 최소화 하며 평활한 굴착면이 형성되고, 버력의 크기가 적재 및 운반에 적합하도록 수행되어야 한다. 발파설계시에는 굴착 단면의 크기 및 형상, 굴진장, 심발형식, 심발공 등을 고려하여 발 파공과 주변공의 직경, 배치, 각도 및 천공깊이와 화약의 종류 및 장약량, 뇌관의 형식, 발파 순서, 현장 시험발파 계획 등을 계획하여야 한다.

③ 발파설계 시에는 발파진동이나 소음이 주변 환경에 미치는 영향을 고려하여 필요시에는 미진동 굴착공법, 정밀진동제어발파 등과 같은 방진대책을 수립하여 허용진동기준을 만족토록하고 터널 갱구부 발파소음이 문제가 되는 경우에는 방음시설과 같은 대책을 수립하여야 한다.

④ 주변에 발파진동으로부터 보호하여야 할 시설물이나 구조물이 있는 경우, 대상 시설물 위치에서의 발파진동 허용치는 입자속도를 기준으로 에서 정한 값을 준용하여 설계하여야 한다. 단, 진동에 아주 민감한 특정시설의 진동규제치는 해당 시설의 규제치를 기준으로 설계하여야 한다.

⑤ 발파지점 주변의 주민에 대한 생활공해 방지를 위한 발파진동 허용치는 환경부제정 ‘생활소음·진동의 규제기준’을 준용한다. 단, 가축사육장 및 양식장, 정밀기계공장 등에 대한 인접공사의 경우에는 해당 전문가의 자문을 얻어 발파진동 허용치를 정하여야 한다.

㉠ 파쇄굴착

파쇄굴착은 저진동으로 암을 파쇄굴착하는 방법으로 견고한 암반에서 기계 또는 발파굴착을 적용하기 어려운 경우에 적용한다.

파쇄굴착은 정적파쇄와 동적파쇄로 나눌 수 있다. 정적파쇄는 유압에 의한 팽창력 또는 경질 우레탄 고내압 튜브의 팽창을 이용하여 암반에 균열을 발생시키고 브레이커나 백호를 이용하여 굴착하는 방법으로서 국내에는 많은 공법들이 개발되어 있다. 동적파쇄는 미소충격력으로 암반에 균열을 발생시키는 방법으로서 많은 공법들이 개발되어 있다.

이들 파쇄 굴착공법은 진동, 비산석의 발생은 적지만, 2차 파쇄를 위하여 대형 브레이커를 사용해야 하므로 연속적인 기계소음이 발생할 수 있고, 공기지연, 공사비 증가 등의 문제를 내포하고 있다. 따라서 불가피하게 파쇄굴착을 적용해야 하는 경우에는 기계소음 및 2차 파쇄로 인한 소음 영향 등을 고려하여야 한다.

㉡ 기타 굴착방법

기타 굴착방법으로는 상기 굴착방법을 병용하는 경우가 있으며, 죽령터널에 적용된 바 있는 TBM선진도강 및 확대 발파굴착이 대표적이다.

당시 죽령터널은 연장이 약 4.6km에 이르는 장대 고속도로 터널로써 죽령단층대의 공사용사 전조사를 위해 TBM 선진도강 및 확대발파굴착이 적용되었다. 상 하행선 시점측에 각각 직경 4.5m 와 5.0m TBM을 투입하고 종점측 약 0.9km는 일반 발파굴착을 적용하였다. TBM선진도강은 본선터널이 전단면과 상 하반단면이 혼용되어 있어 상반에 위치되도록 계획되었다.

죽령터널의 시공성과 분석에 의하면, 본 공법은 일반 발파굴착에 비해 공사기간과 공사비는 약간 증가하였으나, 장대터널의 시공중 지반조사를 통한 안정성 확보 및 공사중 터널내 환기 및 배수 용이로 인한 작업환경 개선 측면에서는 장점이 있었다.

④. 발파공법

㉠ 발파계획

발파계획을 세우는 데 있어서는 미리 정해진 굴착공법, 굴착공정을 근거로 하여 지반조건, 단면의 모양과 크기를 고려하여 우선 발파예정 진행장(천공깊이)을 정한 다음 심발 형식, 발파공배치, 폭약의 종류, 장약량, 뇌관의 형식, 주변공의 간격 및 약량, 발파순서 등을 정한다.

경제적 측면에서는 굴진길이를 길게 하는 것이 바람직하나, 지반의 자립성 및 주변환경에 의하여 제약을 받게 된다. 굴진길이는 대부분 지반의 종류에 따라 다르게 되나 일반적으로 연암에서는 1.5~2.0m 정도로 하며, 강지보재 설치가 필요 없는 경암지역에서는 지반의 상태에 따라 유연하게 조정이 가능하다.

다만 발파지역 주위에 미치는 지반진동, 소음 등에 유의하고, 장공(4.0m이상)발파도 포함하여 경제성과 안정성을 고려하여 1회 발파 굴진길이를 결정할 필요가 있다.

특히, 지상 및 지중구조물, 인가, 축사, 기타시설에 접근하여 터널을 굴착하는 경우에는, 발파진동이 이들에게 악영향을 미칠 경우가 발생하므로 시험발파를 실시하여 주변환경에 대한 영향을 사전 분석해서 대책을 강구하여야한다. 발파진동의 최대치는 주로 심발발파 단계에서 발생하므로 적절한 심발발파방법을 선택하여야 한다.

진동경감대책으로서는 1회에 폭파하는 폭약의 사용량을 제한하고 또 폭속이 낮은 폭약을 사용하는 등의 방법을 쓰고 있고, 또한 심발발파에 순발 이외의 지발 뇌관을 사용함으로써 뇌관의 미소한 발파시간차를 활용하여 지반진동을 경감할 수 있다. 발파의 기본은 적정 장약량 산정에 있고 과대장약이 되지 않도록 주의하여야 한다.

과소장약은 오히려 발파진동 및 발파음을 크게 할 때가 있다. 경우에 따라서는 현장 시험 발파 후 발파진동과 발파음에 대한 상시계측으로 적정한 발파를 계획하여야 한다.

㉡ 발파공법의 종류

터널 굴착에서는 굴착면 주변지반의 손상을 최소로 하는 것이 필수요건이므로 이를 위해 특수한 발파공법이 이용되고 있으며 발파는 큰 에너지를 짧은 시간에 방출함으로써 주변의 건물이나 인체에 손상을 입힐 우려가 많다. 이러한 손상을 일으키지 않기 위해서는 지반과 폭약의 성질을 잘 이용하여 최적의 발파공법을 적용해야 하며 심발 및 굴착면 주변공에 대한

일반적인 발파공법의 분류는 <그림 2-80>과 같다.

㉔ 심발발파

터널발파시 가장 중요한 요소는 심발발파이다. 심발발파를 통해 자유면을 증가시킴으로써 확공발파가 용이해지기 때문이다. 특히, 심발발파는 주변공 발파 전에 먼저 이루어지는 자유면 형성 과정이므로 현장여건 및 지반조건을 고려하여 최적의 심발방법을 채택하여야 한다. 심발방법의 종류는 여러 가지 있으나 비교적 많이 사용되는 심발방법에 대하여 간략하게 설명하고자 한다.

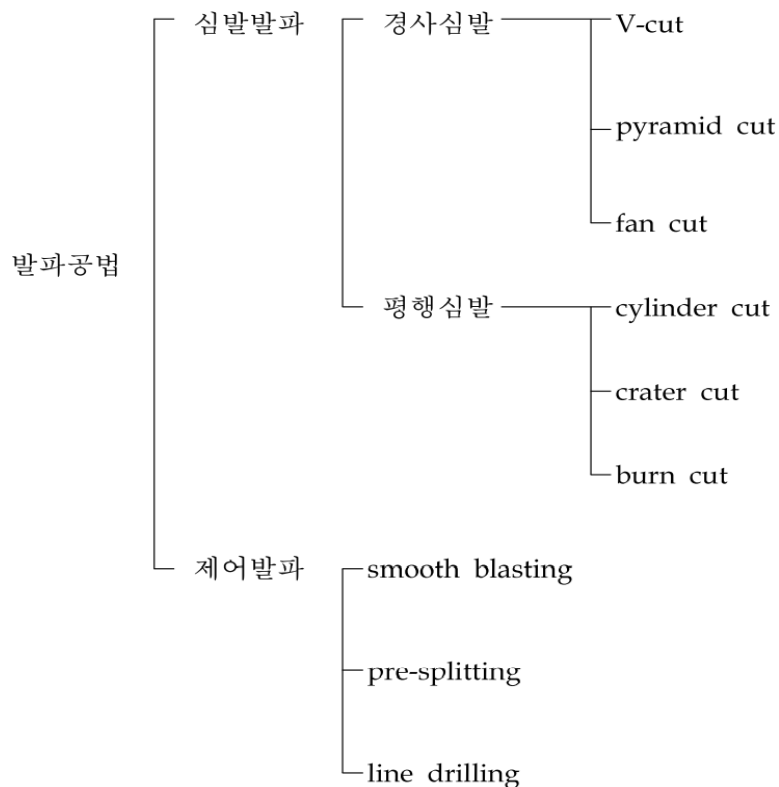


그림 2-80 발파공법의 종류

㉠ 대표적인 심발발파의 특징

심발방법은 여러 가지가 있으나 사용되고 있는 종류는 <그림 2-81>에서 열거된 바와 같이 그 동안 국내 실적이 많은 V-cut, burn-cut, cylinder-cut 등이 있으며, 최근 신기술 특허 등록을 받은 supex-cut 및 superhole-cut 등을 들 수 있다. 이들 중 주로 많이 사용되고 있는 공법에 대한 그 특징 및 원리를 살펴보면 다음과 같다.

㉠-1 V-cut

경사심발 중 가장 일반적인 심발방법으로 충분한 발파 진행장을 얻기 위해서는 어느 정도의 폭을 필요로 한다. 즉 천공방향이 수렴점으로부터 심발중심선 방향으로 향하는 것이 가장 이상적이지만 천공시 로드(rod) 조작의 한계성 때문에 소단면에서는 적용하기가 곤란하다

그러나 1회 굴진장이 비교적 짧아(L=1.5 m이하) 장약량이 극히 제한될 수 밖에 없는 경우에는 심발을 여러 단계로 나눈 다중심발발파를 적용하여 비교적 적은 장약량으로도 소기의 목적을 달성할 수 있다.

시공측면에서는 cylinder cut와 달리 대구경(통상 75 ~ 200mm)을 천공하기 위한 특수장비를 필요로 하지 않는 장점이 있다. 도심지 터널에서는 진동제어로 인하여 굴진장도 짧고 단면의 크기도 중단면 이상일 뿐만 아니라 특히, 심발부에서의 진동제어를 할 필요성이 있기 때문에 적절히 활용하면 효과적인 심발방법이다.

㉠-2 Burn cut 및 cylinder cut

Burn cut이나 cylinder cut은 공히 심발의 중앙부에 무장약공을 천공하여 이를 자유면으로 활용한다는 점을 기본으로 한다. Burn cut은 비교적 장약공과 같은 직경의 무장약공을 사용하고, cylinder cut은 대구경(공경 75 ~ 200 mm)의 무장약공을 사용하기 때문에 심발효과면에서는 cylinder cut이 burn cut보다 우수하다.

Burn cut은 중앙부에 1개 혹은 수개의 burnhole을 천공하고 그 주변의 수평공으로부터 발파를 하여 순차적으로 발파를 해가는 방법으로 정확한 수평천공을 기본요건으로 하며 burnhole 주변공의 장약량이 많아지고 또 burnhole의 공경이 작아 자유면 역할을 충분히 못할 경우 진동이 커질 가능성이 높다.

Cylinder cut은 중앙부에 비교적 큰 burnhole을 1~2개 형성시켜 자유면으로 활용함으로써 burn cut에 비하여 심발효과가 확실하여 최근 터널 굴착에 가장 널리 쓰이는 방법이다.

또 burn hole의 공경이 클수록 공수가 많을수록 발파효과가 양호하므로 공간격을 좁힐 수도 있고, 장약량의 조정도 가능하여 장약량의 제한을 받는 경우 효과적인 방법이다. 특히, v-cut과는 달리 굴착폭에 제한을 받지 않아 장공 발파에 유효한 공법이다

그러나 대구경의 천공을 하기 위해서는 특수한 장비를 필요로 하며 burn hole 천공이 정

확히 수평이 되지 않으면 심발효과가 크게 저하되는 것이 단점이다.

㉠ 국내 적용 심발발파 종류 및 특징

국내 터널공사에서는 현재까지 v-cut, cylinder cut을 도입·적용하고 있는 실정이며, 여기서는 기 적용된 바 있는 v-cut와 cylindercut에 대해서 <표>과 <그림 2-81>에서 간략하게 비교하였다.

<표>에서 본 바와 같이 천공장이 길고 숙련된 기능공에 의해 정확한 시공이 이루어질 경우에는 cylinder cut이 효과적이고, 불량 암질에서는 지보목적상 발파당 굴진장을 1.5m 내외로 짧게 하여야 하므로 천공장이 짧은 때에 유리한 v-cut 공법을 주로 적용하고 있다.

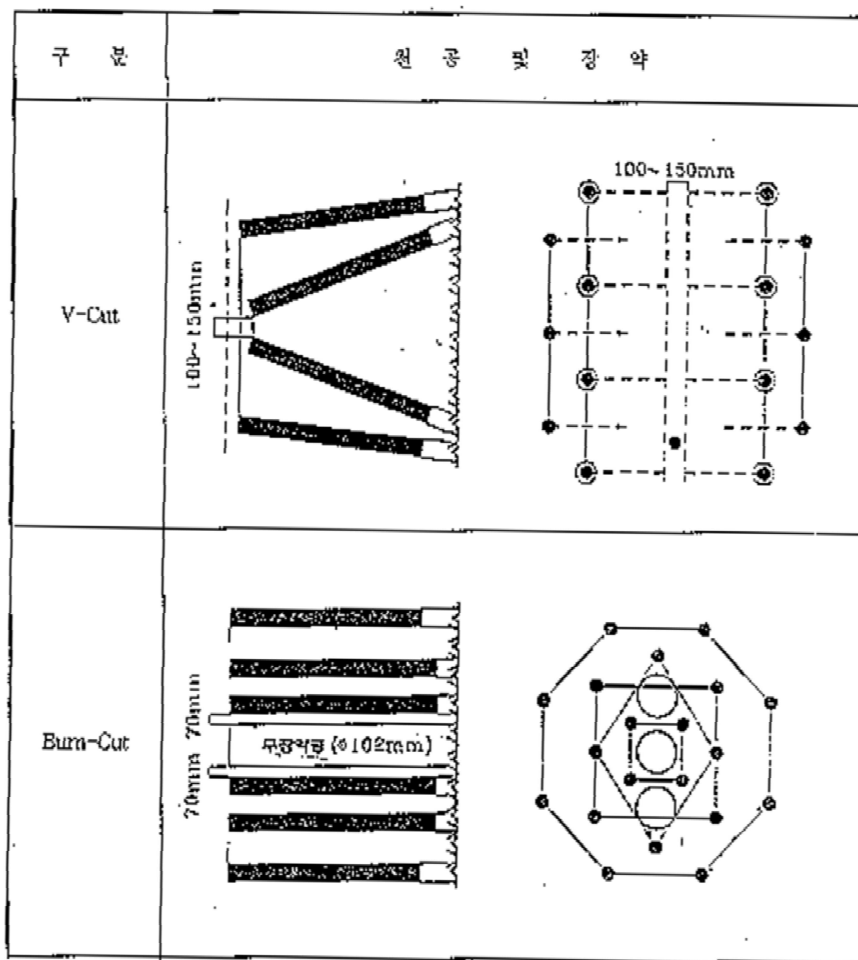


그림 2-81 심발 공법별 천공 및 장약

표. V- cut와 cylinder cut의 비교

구분	개요	장단점
V- cut	현재 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 공법으로 터널 중앙부로부터 일정간격의 양측에서 여유를 주어 천공하여 공저에서 일치하도록 하며 각 hole은 공저에서 최소 60°각도를 갖도록 한다.	• 신자유면이 크므로 기능 미숙련 또는 천공편차, 천공면의 악조건 등으로 다소 천공이 불량하여도 비교적 목적에 가까운 굴진장을 얻을수 있다. • 심발공을 자유면에 대하여 60°각도를 주어 천공하므로 천공길이에 비해 굴진길이가 줄어든다.
Cylinder cut	Burn cut법을 개량한 신발파법으로 인위적인 자유면 역할을 하는 무장 약공을 장약공보다 대구경으로 천공한 다음 이를 중심으로 심발공을 밀집으로 천공하여 발파하는 공법	• 심발공을 평행으로 천공하므로 v- cut과 같이 굴진길이가 줄어드는 결점을 보완하였다. • 발파에 실패할 경우 다음 발파를 위한 천공이 어렵고 잔류화약 등으로 매우 위험하다. • 심발공의 공간거리를10~20cm로 밀집하여 평행 천공하므로 심발공 천공에 고도의 숙련을 요구하며 기능미숙, 천공편차, 천공면의 악조건 등으로 공발의 우려가 높다.

㉮ 무진동 암반파쇄공법 현장적용

㉮-1 모형현장 수치해석 사례

본 연구에서는 무진동 암반파쇄 공법을 현장에 적용하기에 앞서, 유한요소해석 프로그램을 사용하여 가상 터널을 모델링하여 무진동 암반파쇄 공법의 적용성에 대해 검증하였다.

암반의 거동 및 파괴기준은 Griffith의 파괴기준, Mohr-Coulomb의 파괴기준, Hoek-Brown의 파괴기준이 있으며, 본 연구에서는 암석 및 암반의 파괴거동을 가장 잘 묘사한 Hoek-Brwon의 파괴기준을 사용하였다.

① 암반은 강성이 크며 풍화정도에 따라 강도특성이 달라지고, 응력에 따른 강성 변화가 무시할 수 있을만큼 작다는 거동특성을 가진다.

② Hoek와 Brwon은 파괴함수를 제안하였으며, 제안된 파괴함수에 의해 암반의 파괴가 정의되면 파괴함수를 정의하는 특정 계수값을 감소시켜 응력감소현상을 묘사하도록 하였다.

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad \text{<식 1>}$$

③ 기존 Mohr-Coulomb의 파괴기준이 고려할 수 없는 암반의 일축압축강도를 정의하여, 암반의 거동을 보다 정확하고 간편하게 나타낼 수 있음

④ 파괴기준식에 필요한 암반 특성치는 m_b , S , a 가 있으며, 특성치는 암반의 GSI(Geological Strength Index ; 지질강도지수)를 통해 산정할 수 있다.

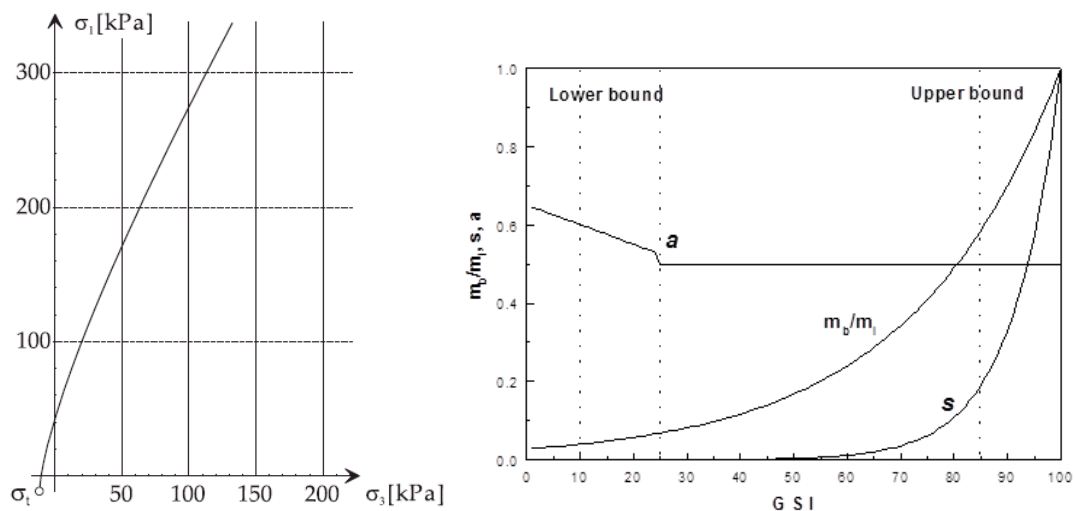


그림 2-82 Hoek-Brown 파괴기준(좌), GSI와 m_b , S , a 의 관계(우)

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX		SURFACE CONDITIONS				
From the description of structure and surface conditions of the rock mass, pick an appropriate box in this chart. Estimate the average value of the Geological Strength Index (GSI) from the contours. Do not attempt to be too precise. Quoting a range of GSI from 36 to 42 is more realistic than stating that GSI = 38. It is also important to recognize that the Hoek-Brown criterion should only be applied to rock masses where the size of the individual blocks or pieces is small compared with the size of the excavation under consideration. When individual block sizes are more than approximately one quarter of the excavation dimension, failure will generally be structurally controlled and the Hoek-Brown criterion should not be used.		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings of angular fragments	VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY				
	INTACT OR MASSIVE – intact rock specimens or massive in situ rock with very few widely spaced discontinuities	90	80	N/A	N/A	N/A
	BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets		70	60		
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets			50		
	BLOCKY/DISTURBED - folded and/or faulted with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	FOLIATED/LAMINATED – Folded and tectonically sheared foliated rocks. Schistosity prevails over any other discontinuity set, resulting in complete lack of blockiness	N/A	N/A			10
						5

그림 2-83 GSI 값(지질강도지수)

2) 다양한 현장 조건을 반영하기 위해서 초기지중응력, 암반의 풍화도를 해석조건에 반영하여 <그림 2-84>와 같이 모델링을 실시하였다. 해석영역은 터널중심으로부터 폭 3D(D= 터널 직경) 이상 포함시켰으며, 터널하부 1D 이상으로 설정하였다.

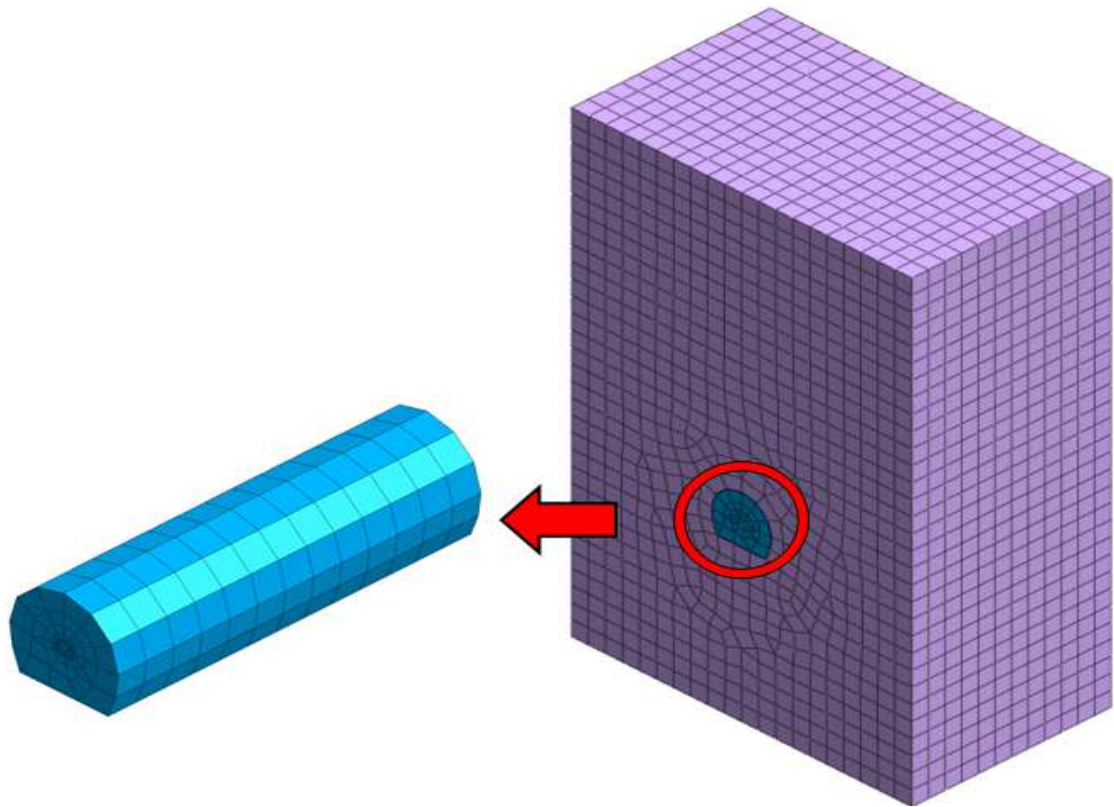


그림 2-84 가상 터널 모델링 형상

초기 지중응력의 변화를 위해 터널이 위치한 깊이를 지표면에서부터 30, 60, 90m로 설정하였으며, 암반의 풍화도는 GSI를 90, 70, 50으로 선정하였다. 암석의 종류는 석회암, 화강암, 편마암으로 선정하였으며, 암석의 일축압축강도와 파괴 기준식에 필요한 암반 특성치는 아래 표에 정리하였다. 또한 암반에 가해지는 내공압은 30 MPa로 입력하여 수치해석을 실시하였다.

암석종류	일축압축강도 [MPa]
석회암	74.5
편마암	162
화강암	122.5

표. 암석 종류에 따른 일축압축강도 값

	암반의 풍화도								
	GSI= 90			GSI= 70			GSI= 50		
	m_b	S	a	m_b	S	a	m_b	S	a
석회암	7	0.0039	0.5	-	-	-	-	-	-
편마암	23.09	0.329	0.5	11.3	0.0356	0.5	5.53	0.00386	0.5
화강암	23.09	0.329	0.5	11.3	0.0356	0.5	5.53	0.00386	0.5

표. 암반의 풍화도에 따른 암반 특성치

㉔ 시뮬레이션 기반의 현장모형 수치해석 결과

모델링한 터널의 수치해석 결과 중 석회암에서의 최대 주응력과 주인장 변형률의 분포도를 그림 2-85~87에 나타낸다. 석회암은 GSI 값 90인 경우를 제외한 나머지 GSI 값에서 수치해석을 진행할 경우 해석 결과값이 수렴하지 않아 분석에서 제외하였다.

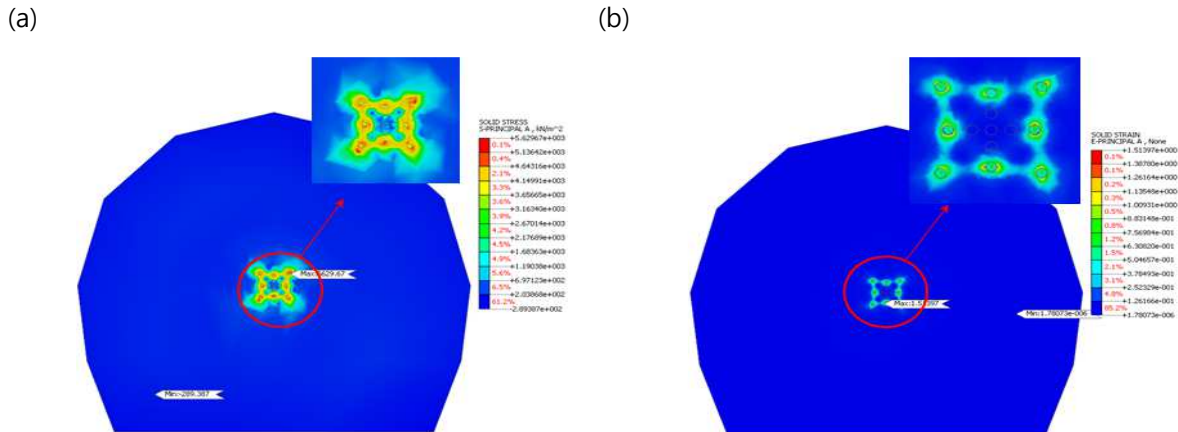


그림 2-85 매설깊이 30m에서 석회암 암반 모델링: (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

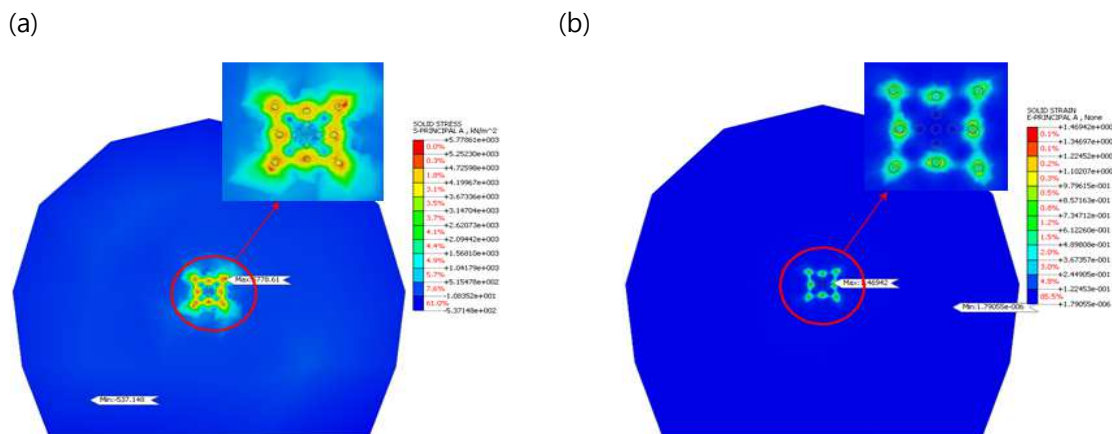


그림 2-86. 매설깊이 60m에서 석회암 암반 모델링: (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

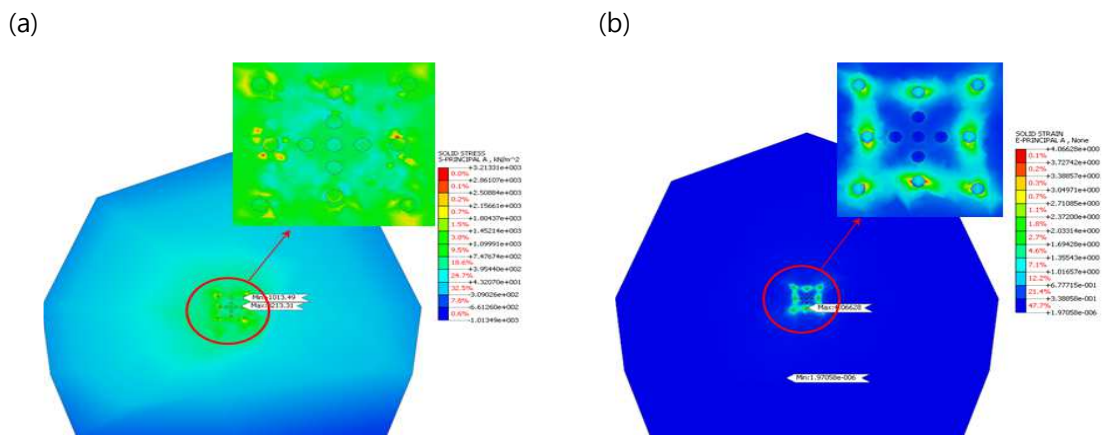


그림 2-87.. 매설깊이 90m에서 석회암 암반 모델링: (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

석회암 터널에서 발생한 최대 주응력과 주인장 터널의 매설깊이와는 연관성이 나타나지 않는다.

		터널의 매설 깊이 [m]		
		30	60	90
GSI	90	5.63	5.78	3.21

표. 석회암 최대 주응력 변화 [단위: MPa]

		터널의 매설 깊이 [m]		
		30	60	90
GSI	90	1.51	1.47	4.07

표. 석회암 주인장변형률 변화

모델링한 터널의 수치해석 결과 중 상재하중 30m인 편마암에서의 최대 주응력과 주인장 변형률의 분포도를 그림 2-88~90에 나타낸다.

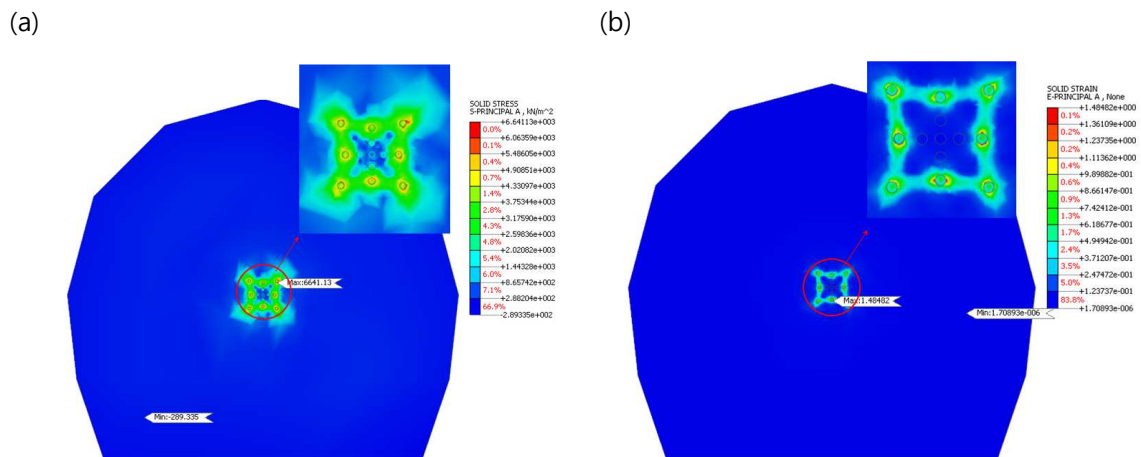


그림 2-88. 상재하중 30m, GSI 90에서 편마암 암반 모델링: (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

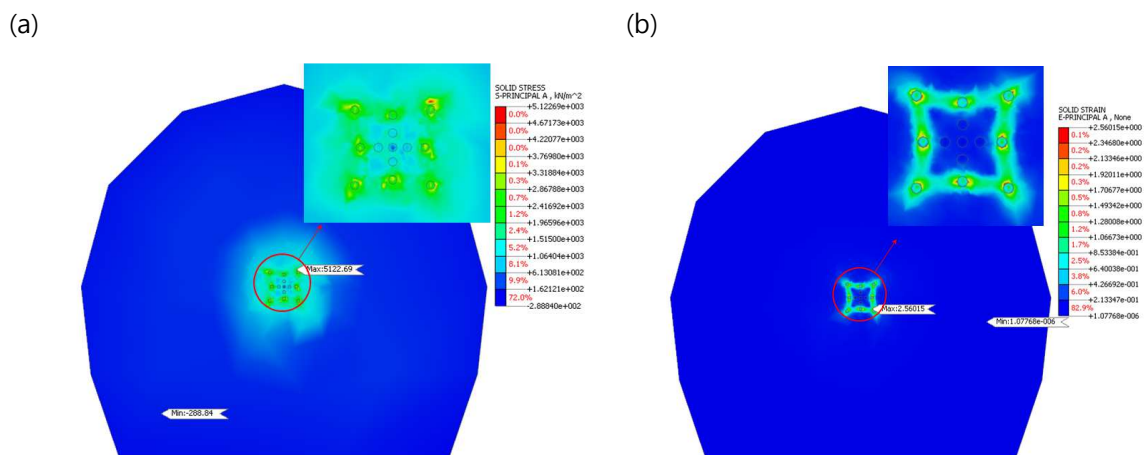
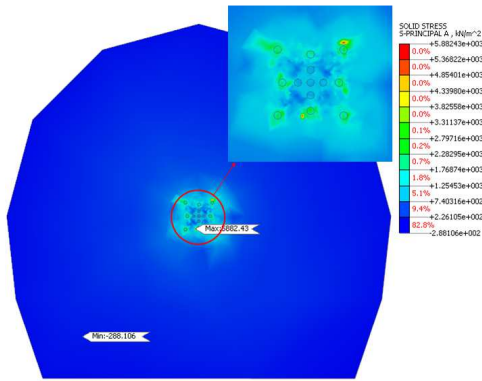


그림 2-89. 상재하중 30m, GSI 70에서 편마암 암반 모델링: (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

(a)



(b)

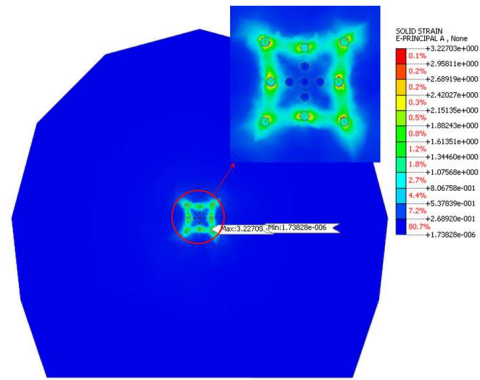
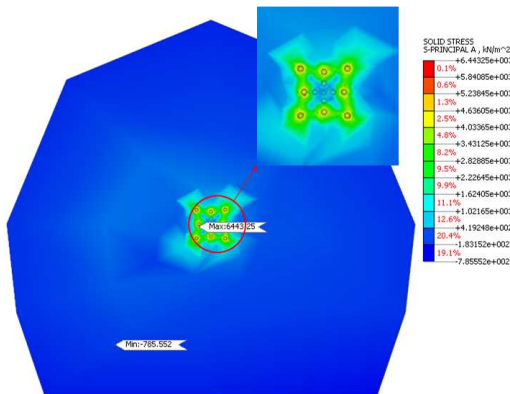


그림 2-90. 상재하중 30m, GSI 50에서 편마암 암반 모델링: (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

모델링한 터널의 수치해석 결과 중 상재하중 90m인 편마암에서의 최대 주응력과 주인장 변형률의 분포도를 그림 2-91~93에 나타낸다.

(a)



(b)

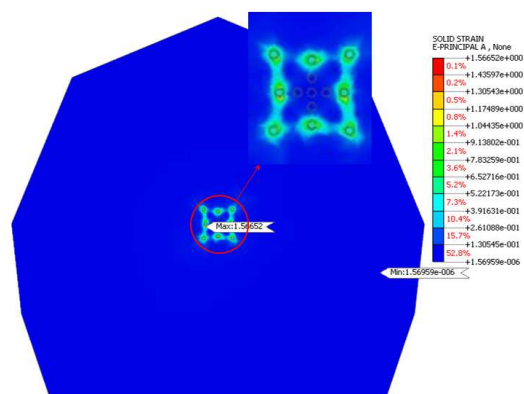
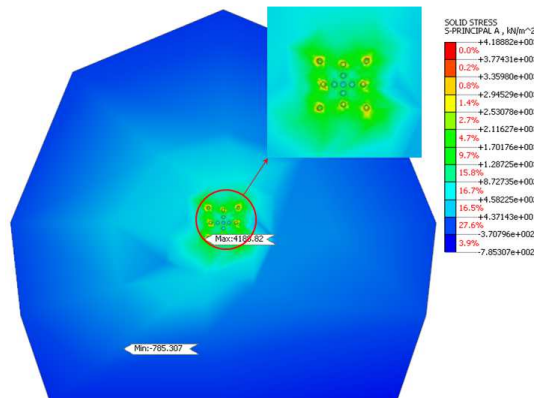


그림 2-91. 상재하중 90m, GSI 90에서 편마암 암반 모델링: (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

(a)



(b)

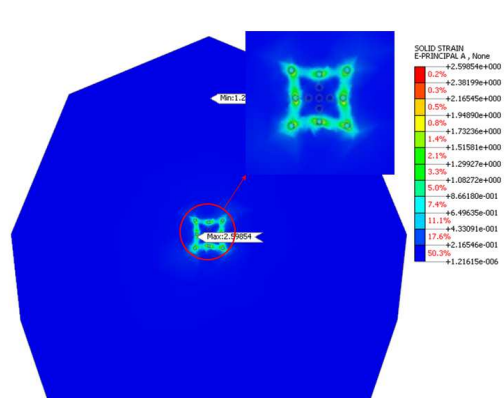
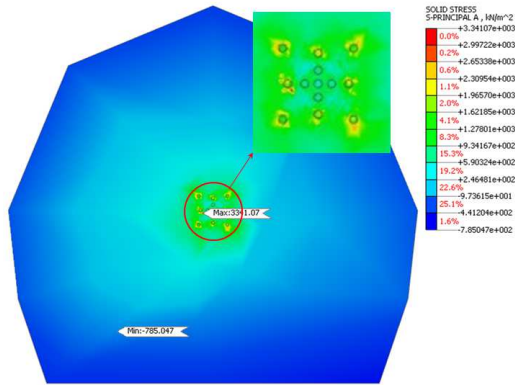


그림 2-92. 상재하중 90m, GSI 70에서 편마암 암반 모델링: (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

(a)



(b)

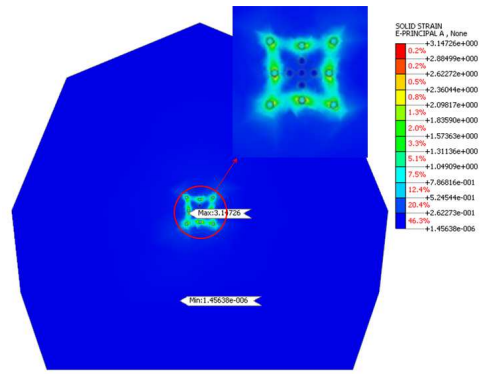


그림 2-93. 상재하중 90m, GSI 50에서 편마암 암반 모델링: (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

편마암 터널에서 발생한 최대 주응력은 GSI=70인 경우를 제외한 나머지 값들은 매설깊이가 깊어질수록 최대 주응력이 감소한다. 편마암 터널에서 발생한 주인장변형률은 매설깊이에 따른 큰 차이는 발생하지 않으나, GSI 값이 감소할수록 주인장변형률이 증가하는 것으로 나타난다.

		터널의 매설 깊이 [m]		
		30	60	90
GSI	90	6.64	6.62	6.44
	70	5.12	5.23	4.19
	50	5.88	5.8	3.34

표 . 편마암 최대 주응력 변화 [단위: MPa]

		터널의 매설 깊이 [m]		
		30	60	90
GSI	90	1.48	1.45	1.57
	70	2.56	2.53	2.6
	50	3.23	3.09	3.15

표 . 편마암 주인장변형률 변화

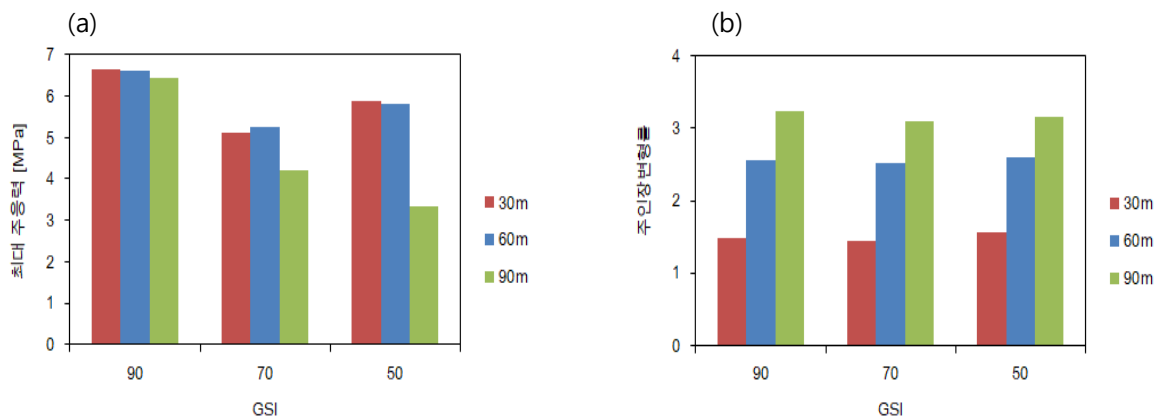
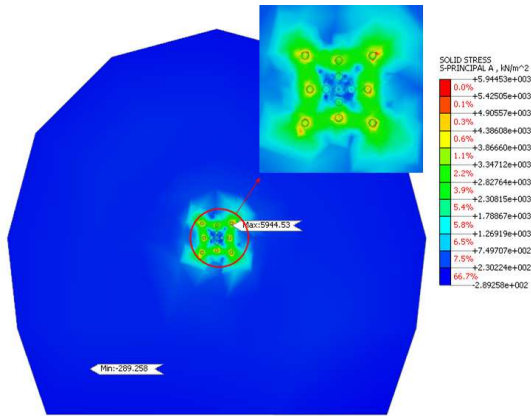


그림 2-94. GSI에 따른 편마암 (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

모델링한 터널의 수치해석 결과 중 상재하중 30m인 화강암에서의 최대 주응력과 주인장 변형률의 분포도를 그림 2-95~97에 나타낸다.

(a)



(b)

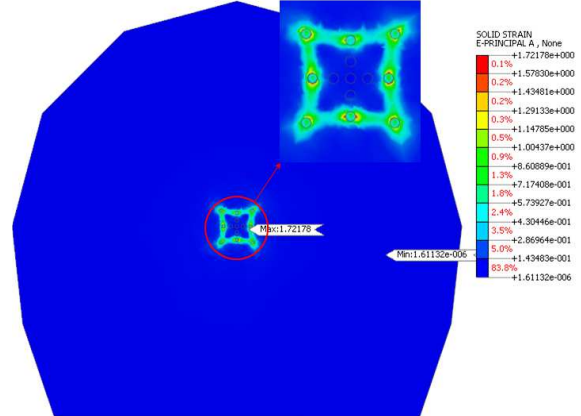
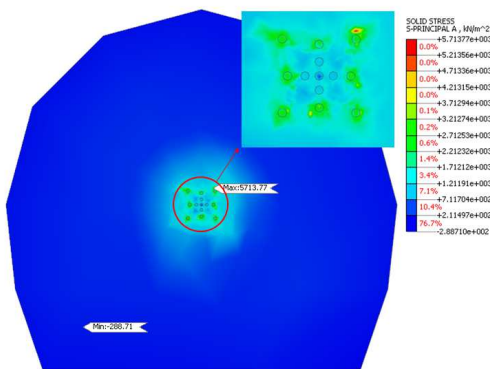


그림 2-95. 상재하중 30m, GSI 90에서 화강암 암반 모델링: (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

(a)



(b)

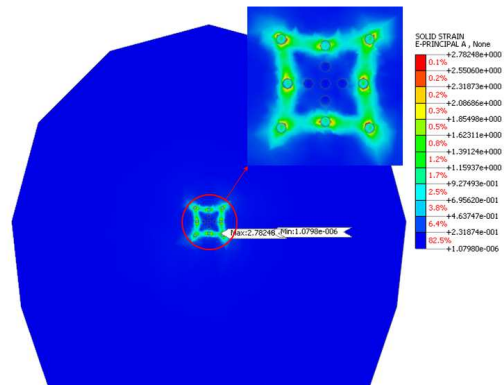
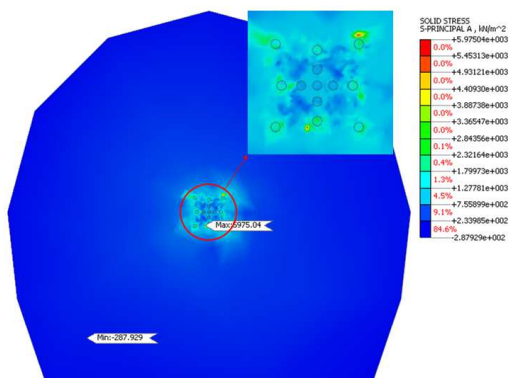


그림 2-96. 상재하중 30m, GSI 70에서 화강암 암반 모델링: (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

(a)



(b)

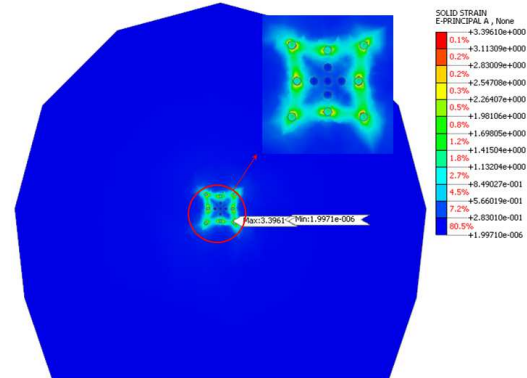
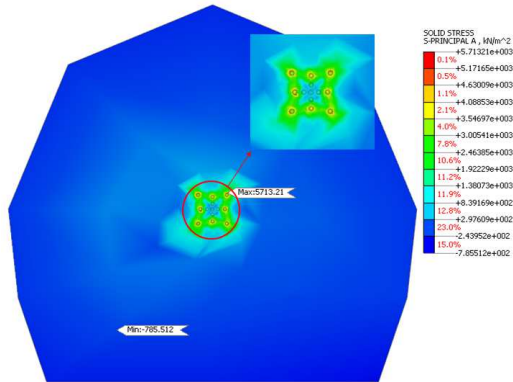


그림 2-97. 상재하중 30m, GSI 50에서 화강암 암반 모델링: (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

모델링한 터널의 수치해석 결과 중 상재하중 90m인 화강암에서의 최대 주응력과 주인장 변형률의 분포도를 그림 2-98~100에 나타낸다.

(a)



(b)

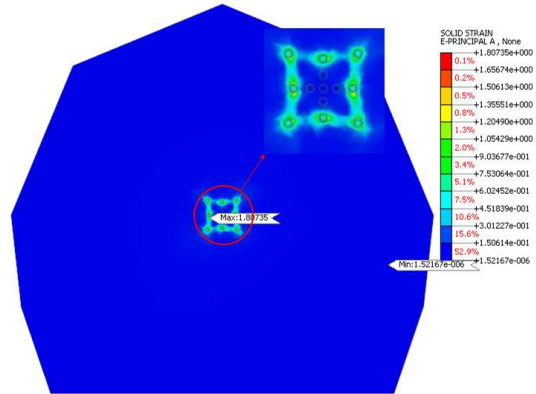
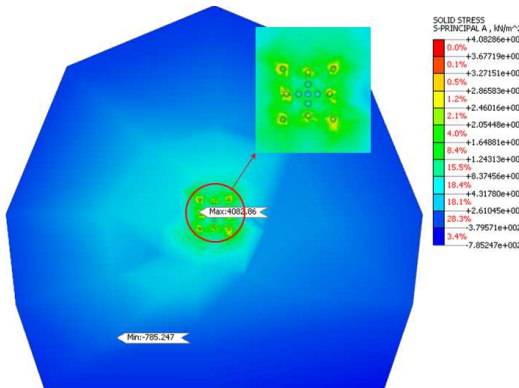


그림 2-98. 상재하중 90m, GSI 90에서 화강암 암반 모델링: (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

(a)



(b)

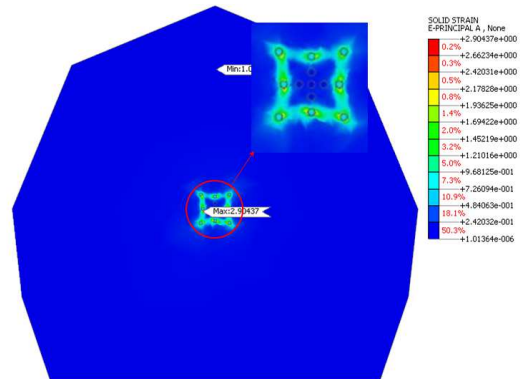
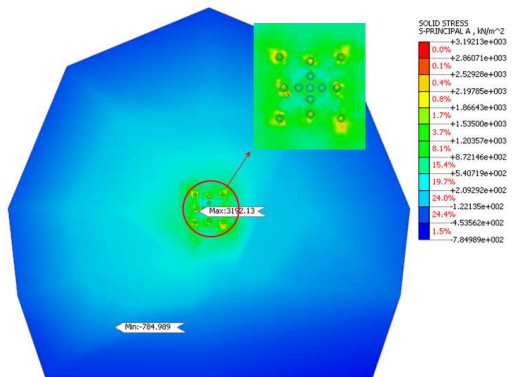


그림 2-99. 상재하중 90m, GSI 70에서 화강암 암반 모델링: (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

(a)



(b)

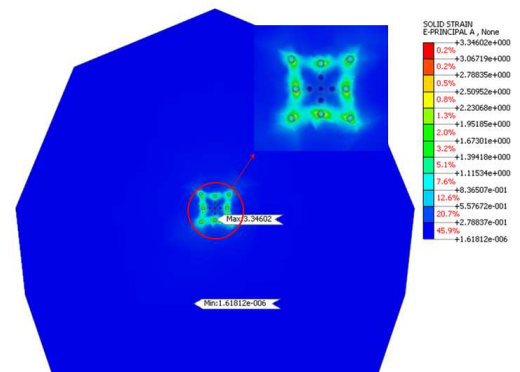


그림 2-100. 상재하중 90m, GSI 50에서 화강암 암반 모델링: (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

화강암 터널에서 발생한 최대 주응력은 매설깊이가 깊어질수록 감소한다. 화강암 터널에서 발생한 주인장변형률은 매설깊이에 따른 큰 차이는 발생하지 않으나, GSI 값이 감소할수록 주인장변형률이 증가하는 것으로 나타난다.

		터널의 매설 깊이 [m]		
		30	60	90
GSI	90	5.94	5.93	5.71
	70	5.71	4.97	4.08
	50	5.97	5.68	3.19

표 . 화강암 최대 주응력 변화 [단위: MPa]

		터널의 매설 깊이 [m]		
		30	60	90
GSI	90	1.72	1.7	1.81
	70	2.78	2.52	2.9
	50	3.4	3.29	3.35

표 . 화강암 주인장변형률 변화

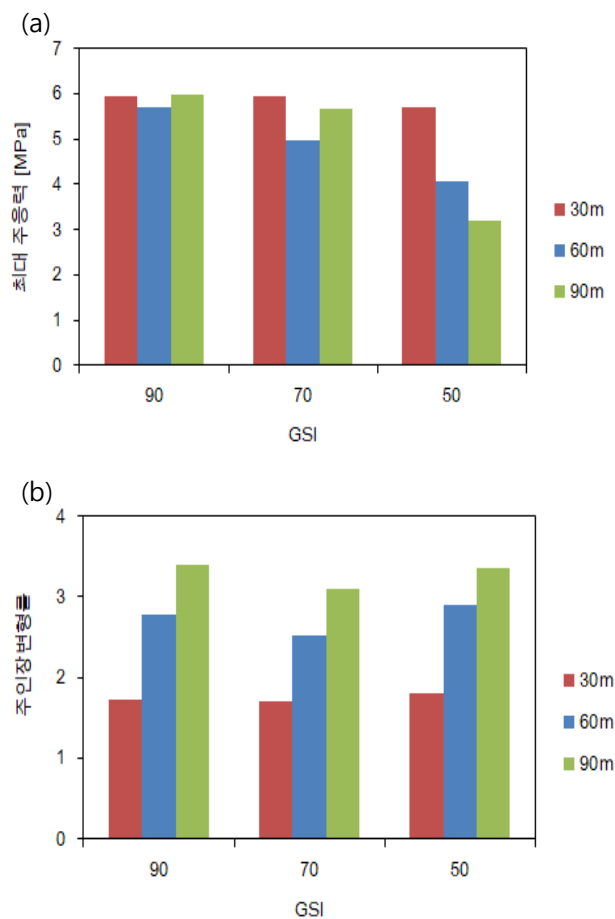


그림 2-101. GSI에 따른 화강암 (a) 최대 주응력; (b) 주인장 변형률

④ 공법 현장 시험 (위치:포천시 관인광산 채광터널 현장)

㉞ 현장 사전조사



그림 2-102

㉟ 홀 천공 및 발열팽창장치 설치



그림 2-103

㊱ 능동형 발열장치 작동 및 발열팽창 진행



그림 2-104

④ 현장 공법 소개(설문조사 3건)

㉞ 설문조사 1

II. 현장 설문 조사

* 귀하의 인적사항을 적어 주세요.

회사명	한국환경공단		
부서/ 직급	과장		
연락처(이메일)	gaswls@keeo.or.kr	성명	주 권진 (인)

1. 설문자께서 건설.토목업에 참여한 기간은 얼마입니까? ()

- ① 5년 미만 ② 5~10년 ③ 10~20년 ④ 20년 이상 ⑤ 기타 ()

2. 설문자께서는 무진동암반파쇄 공법에 대해서 얼마나 알고 계십니까?

- ① 잘 알고있다 ② 조금 알고있다 ③ 자세히 알지 못한다 ④ 전혀 알지 못한다

3. 최근 또는 가까운 미래에 무진동 암반파쇄 신기술이 필요 하다고 생각 하십니까 ?

- ① 매우 그렇다 ② 그렇다 ③ 보통이다 ④ 그렇지 않다 ⑤ 매우 그렇지 않다

4. (3번 ④⑤번을 응답하신 분만) 무진동 암반파쇄 신기술이 필요 없는 이유가 무엇인지 간단하게 기술해 주세요.

5. 기존 무진동 암반파쇄 기술에서 보완되어야 하는 사항 중 가장 중요한 사항이 무엇 이라고 생각하십니까?

- ① 경제성 ② 사용 편의성 ③ 파쇄력 ④ 무소음무진동 정도
⑤기타 ()

㉞ 설문조사 2

II. 현장 설문 조사

* 귀하의 인적사항을 적어 주세요.

회사명	한국환경 공단		
부서/ 직급	과장		
연락처(이메일)	yicenter@keco.or.kr	성명	나 필 수 

1. 설문자께서 건설.토목업에 참여한 기간은 얼마입니까? ()

- ① 5년 미만 ② 5~10년 ③ 10~20년 ④ 20년 이상 ⑤ 기타 ()

2. 설문자께서는 무진동암반파쇄 공법에 대해서 얼마나 알고 계십니까?

- ① 잘 알고있다 ② 조금 알고있다 ③ 자세히 알지 못한다 ④ 전혀 알지 못한다

3. 최근 또는 가까운 미래에 무진동 암반파쇄 신기술이 필요 하다고 생각 하십니까 ?

- ① 매우 그렇다 ② 그렇다 ③ 보통이다 ④ 그렇지 않다 ⑤ 매우 그렇지 않다

4. (3번 ④⑤번을 응답하신 분만) 무진동 암반파쇄 신기술이 필요 없는 이유가 무엇인지 간단하게 기술해 주세요.

5. 기존 무진동 암반파쇄 기술에서 보완되어야 하는 사항 중 가장 중요한 사항이 무엇 이라고 생각하십니까?

- ① 경제성 ② 사용 편의성 ③ 파쇄력 ④ 무소음무진동 정도
⑤기타 ()

II. 현장 설문 조사

* 귀하의 인적사항을 적어 주세요.

회사명	SG 건설(주)		
부서/ 직급	차장		
연락처(이메일)	civil3085@naver.com	성명	홍성현 (인)

1. 설문자께서 건설.토목업에 참여한 기간은 얼마입니까? (3)

- ① 5년 미만 ② 5~10년 ③ 10~20년 ④ 20년 이상 ⑤ 기타 ()

2. 설문자께서는 무진동암반파쇄 공법에 대해서 얼마나 알고 계십니까? 3

- ① 잘 알고있다 ② 조금 알고있다 ③ 자세히 알지 못한다 ④ 전혀 알지 못한다

3. 최근 또는 가까운 미래에 무진동 암반파쇄 신기술이 필요 하다고 생각 하십니까 ? 3

- ① 매우 그렇다 ② 그렇다 ③ 보통이다 ④ 그렇지 않다 ⑤ 매우 그렇지 않다

4. (3번 ④⑤번을 응답하신 분만) 무진동 암반파쇄 신기술이 필요 없는 이유가 무엇인지 간단하게 기술해 주세요.

5. 기존 무진동 암반파쇄 기술에서 보완되어야 하는 사항 중 가장 중요한 사항이 무엇 이라고 생각하십니까? 3. 4

- ① 경제성 ② 사용 편의성 ③ 파쇄력 ④ 무소음무진동 정도
⑤기타 ()

(4) 발열기반 능동형 전력변화장치 개발

(가) 능동형 전력변환장치 기초 설계 및 개발

① 능동형 전력 변환기 시스템

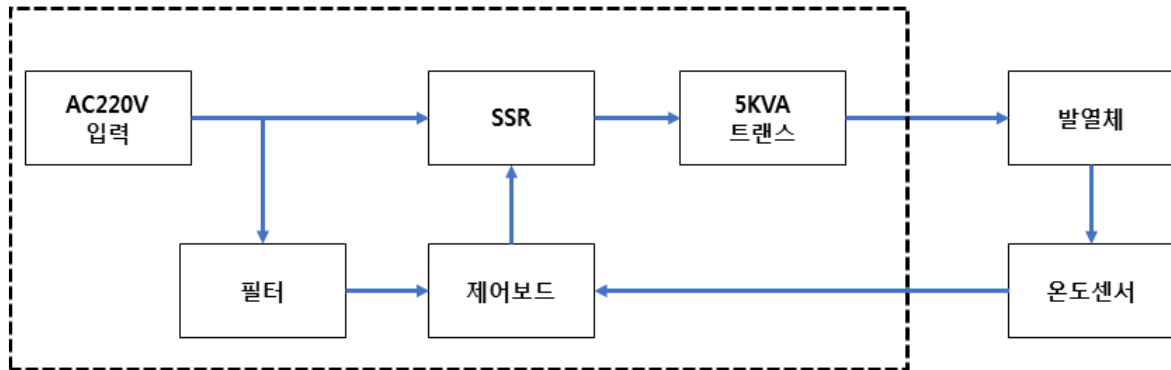


그림 2-105 시스템 블록도

시스템의 주요 구성은 위의 시스템 블록과 같으며 주요 기능은 아래와 같다.

구분	주요 기능	비고
AC220V 입력	제어기에 공급되는 외부 전원	
입력 필터부	전원부의 필터부로 고용량 전류를 사용 하므로 제어 보드 쪽의 고조파 노이즈를 제거하기 위한 필터부	
SSR	발열체 온도 조절을 위해 트랜스로 공급되는 전원 출 력	
제어보드	발열체로부터 입력 되는 온도를 측정하여 셋팅되어 진 온도로 SSR ON/OFF 현재 온도 및 셋팅 온도를 DISPLAY.	
5KVA 트랜스	발열체 가열을 위한 전력 변환	
발열체	팬창제 가열을 위한 발열체	
온도센서	K-1 급 온도 센서	

② 능동형 전력 변환기 제작 및 기능

본 과제는 제품을 상용화 할 수 있게 하기 위해 시스템의 고효율, 작업장 설치용이, 생산원가 절감과 안전을 고려하여 개발 하게 되었다.

㉠ 각부의 명칭 및 주요 기능



[측면]



[정면]



[후면]

그림 2-106 전력변환장치

㉞ 전원 입력 스위치 및 비상 스위치



그림 2-107 전원 입력 스위치 부분

- METALSOL ABS52C SHUNT TRIP(AC220V) 기능을 가진 스위치를 사용하여 비상시 EMERGENCY 스위치를 누름과 동시에 입력 전원을 차단 하도록 안정성을 고려하여 설계 함.

㉞ POWER ON/OFF 동작 스위치 및 램프



[전원 OFF]

[전원 ON]

그림 2-108 전원 스위치 동작 모습

주전원 입력 스위치로 POWER ON 시 제어보드쪽에 전원 및 발열체 가열 시스템 동작 준비 상태가 된다. POWER 램프를 구성하여 사용자가 시각적으로 현재 전원 ON/OFF 상태를 확인 할 수 있게 한다.

㉔ HEATER ON/OFF 동작 스위치 및 램프



[HEATER OFF]



[HEATER ON]

그림 2-109 Heater 동작 스위치 램프

발열체 가열을 동작 시키기 위한 스위치로 HETART ON 시 제어보드에서 SSR 을 구동 시켜 트랜스의 전력을 출력 시킨다. 트랜스 출력 전력은 설정된 온도로 도달 되기 까지 연속 출력이 아닌 제어기 파라미터 값에의해 가감속 시간을 두어 출력이 ON/OFF 를 반복적으로 진행 하도록 하였다. HEATER 램프는 트랜스에서 출력이 되었을 때 켜지도록 설계 하였다.

㉕ 센서 입력



그림 2-110 센서 입력부와 센서

센서 케이블을 연결 발열체 부분에 고정 시켜 현재 발열체의 온도를 제어보드쪽에 연결 하여 온도에 따른 트랜스 ON/OFF 으로 사용 됨.

㉮ 제어 보드

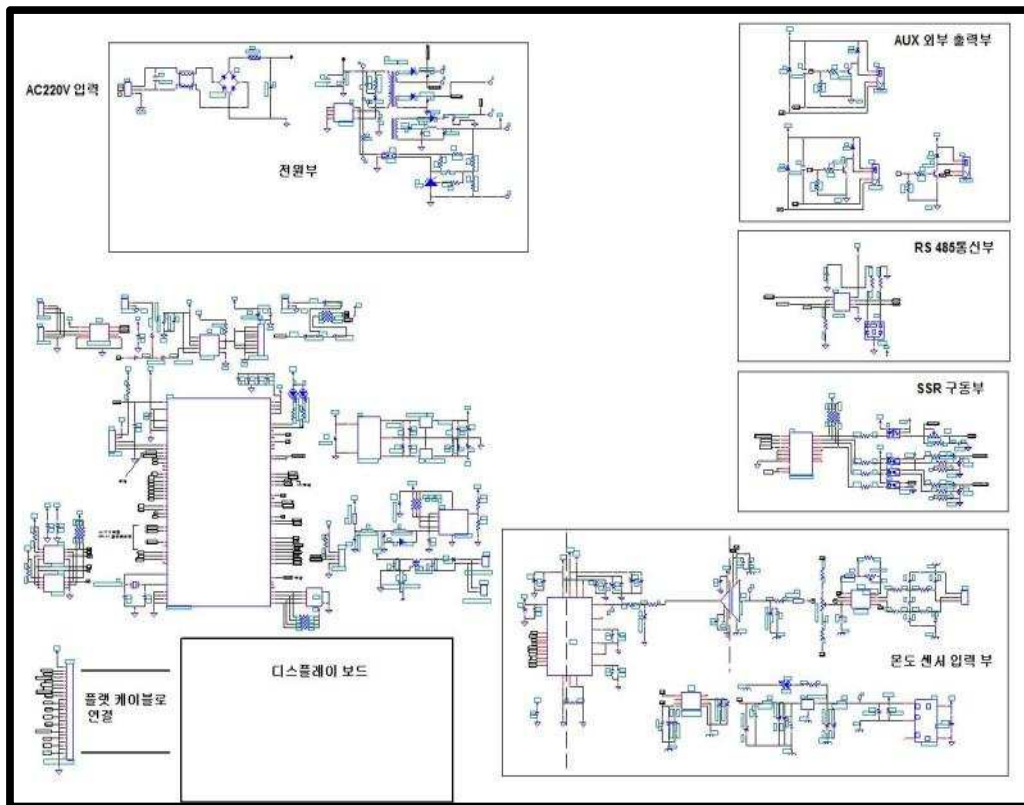


그림 2-111 메인보드 도면

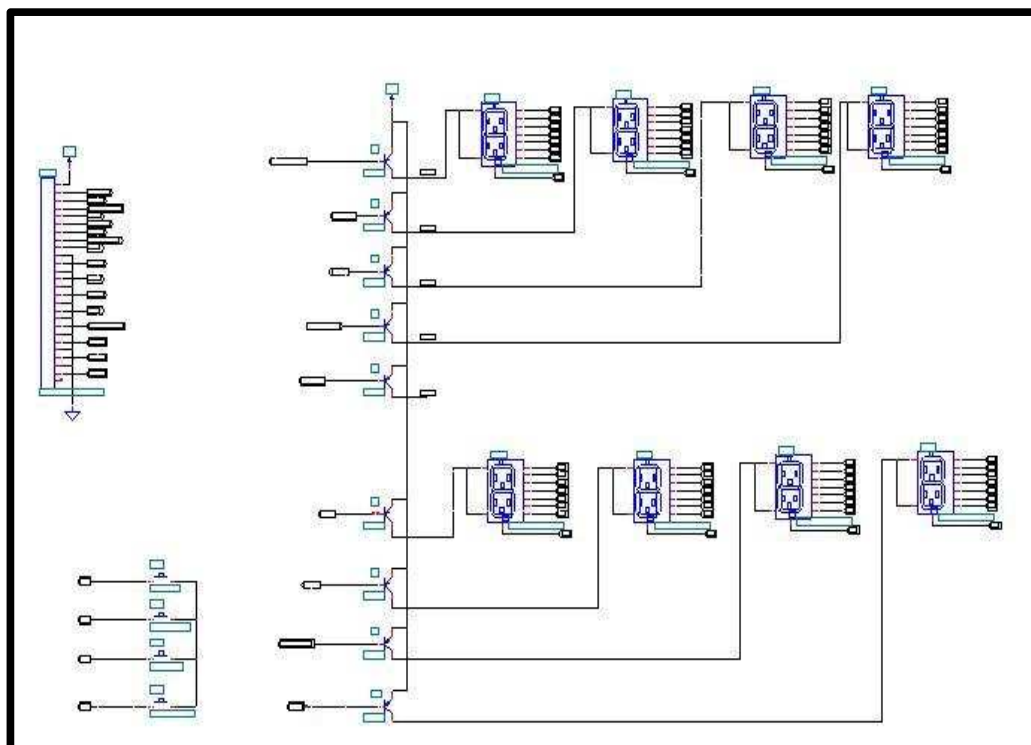


그림 2-112 디스플레이 보드 도면

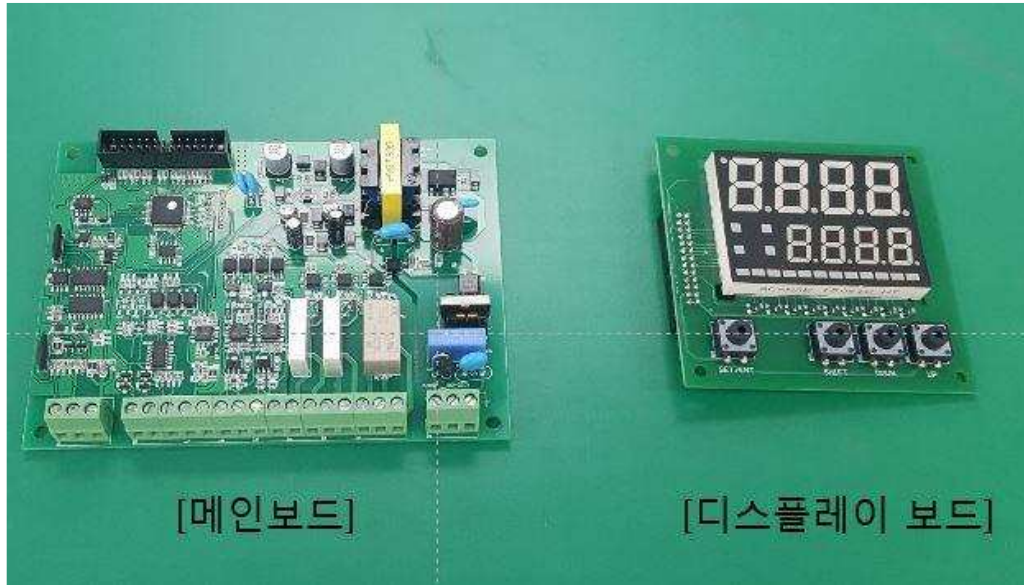


그림 2-113 메인보드와 디스플레이 보드

㉠ 기본 사양

구분	주요 기능	비고
입력 전압	AC220V ($\pm 10\%$) / 50/60 Hz	
절연저항	1차단자-2차단자 사이 : 500 VDC 20M Ω 이상 1차단자-GND 사이 : 500 VDC 20M Ω 이상 2차단자-GND 사이 : 500 VDC 20M Ω 이상	
내전압	1차단자-2차단자 사이 : 2.3 KVAC 1분간 차단자-GND 사이 : 2.3 KVAC 1분간 2차단자-F.G 사이 : 1.5 KVAC 1분간	
RS485 통신	비동기 2선식 반2중 방식 통신속도 : 600,1200,2400,4800,9600 bps (파라미터로 설정)	
디스플레이	현재 온도 값 표시 / 목표 온도값 표시 / 4개 key	
온도 설정 범위	-200℃ ~ 1370℃	
SSR 제어	PID 게인 값에 의한 제어 P(Proportional Band) 비례대 : 0.1 ~ 999.9% I (Integral Time) 적분시간 : OFF , 1~6000s(초) D(Derivative Time) 미분시간 : OFF , 1~6000s(초)	

(나) 발열장치 임계온도 도달 시간 평가

① 제어보드 온도 표시 테스트

제어기에 표시 되는 온도의 정확도를 검교정된(일련 번호 : AHH09K059) 한영닉스 GR200 제품과 테스트 하였다.

발열체에 동일한 온도 센서를 제어기와 GR200 제품 연결 하여 상온 및 발열후 온도를 비교 측정 하였다.



그림 2-114 제어보드 온도 테스트 확인

구분	발열전 온도(℃)	발열후 온도(℃)	비고
제어 보드	26	891	
GR200	24.9	913.7	
비교 값	+ 1.1	- 22.7	
온도 비교 결과 제품을 사용함에 있어 문제 없는 것으로 판단 됨.			

① 발열장치 온도 테스트

본 테스트의 목적은 제작된 능동형 전력 변환장치를 이용한 피 가열체의 가열을 목적으로 한다.

㉠ 테스트 방법

제작된 능동형 전력변환 장치에 발열체를 연결 한 후 발열체의 표면 온도를 검교정 된 GR200 제품과 검교정된 스톱와치를 사용 하여 아래 조건으로 테스트를 진행 하였다.

- 1) 발열체 800℃ 도달 시간 측정 (5 분이내 도달 할 것 / 시료 4 개)
- 2) 다중 발열기 동시 작동 (4 개 시료 동시 작동)

㉡ 테스트 설치

아래 사진과 같이 설치 후 테스트를 시작하였다.



그림 2-115 온도 테스트 상황

㉔ 온도 테스트 결과

발열체 800℃ 도달 시간 측정 (5 분이내 도달 할 것 / 시료 4 개)

시료 번호	시험 항목	발열체 온도(℃)	시간(초)
1	발열체 800℃ 도달 시간 측정	846.6	19.08
2	발열체 800℃ 도달 시간 측정	860	20.04
3	발열체 800℃ 도달 시간 측정	905	18.02
4	발열체 800℃ 도달 시간 측정	867.5	16.72



시료 1



시료 2



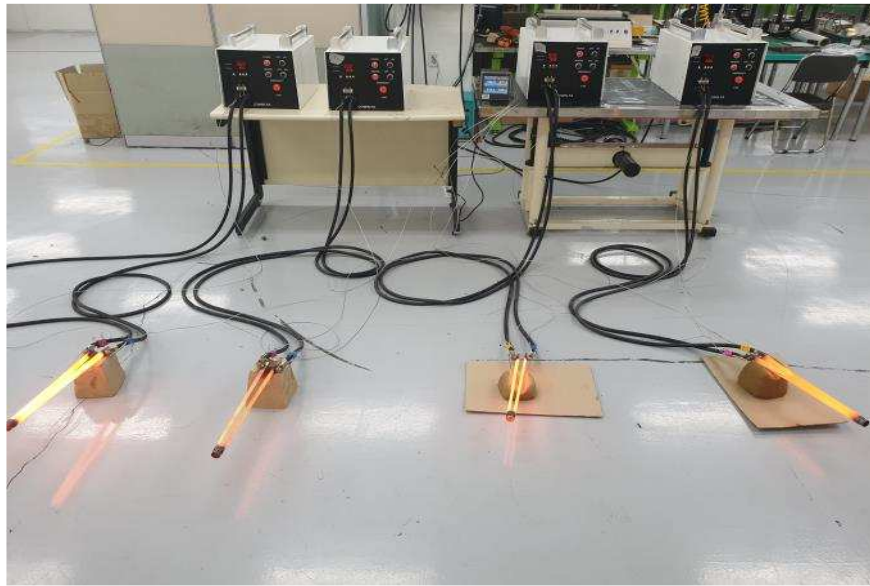
시료 3



시료 4

다중 발열기 동시 작동 (4 개 시료 동시 작동)

시료 번호	시험 항목	발열체 온도(°C)	결과
1	다중 발열기 동시 작동	879.6	이상 없음
2	다중 발열기 동시 작동	870.6	이상 없음
3	다중 발열기 동시 작동	883.7	이상 없음
4	다중 발열기 동시 작동	887.3	이상 없음



(다) 발열장치 상용화 (인증)

① 전력변환장치 KC 인증

IEAB-3518-924B-25E0

방송통신기자재등의 적합등록 필증 Registration of Broadcasting and Communication Equipments	
상호 또는 성명 Trade Name or Registrant	(주)코원에프에이
기자재명칭(제품명칭) Equipment Name	압반파쇄직접가열제어기
기본모델명 Basic Model Number	CDHC-5KVA
파생모델명 Series Model Number	
등록번호 Registration No.	R-R-CWf-CDHC-5KVA
제조사/제조(조립)국가 Manufacturer/Country of Origin	(주)코원에프에이 / 한국
등록연월일 Date of Registration	2020-05-11
기타 Others	
위 기자재는 「전파법」 제58조의2 제3항에 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) 05월(Month) 11일(Day) 국립전파연구원장 Director General of National Radio Research Agency ※ 적합등록 방송통신기자재는 반드시 "적합성평가표시" 를 부착하여 유통하여야 합니다. 위반시 과태료 처분 및 등록이 취소될 수 있습니다.	



No. E8A 108302 0001 Rev. 00

45, Cheongneung-daero, 289beon-gil, Namdong-gu
Incheon 21633
REPUBLIC OF KOREA

Model(s): CDHC-5KVA

Tested according to: EN 61000-6-4:2007/A1:2011
EN 61000-6-2:2005
EN 61000-3-11:2011
EN 61000-3-12:2000

Test report no.: OT-205-RED-023

(Byung-Seo Kang)

After preparation of the necessary technical documentation as well as the EU Declaration of conformity the required CE marking can be affixed on the product. That Declaration of conformity is issued under the sole responsibility of the manufacturer. Other relevant EU-directives have to be observed.

TÜV SÜD Product Service GmbH • Certification Body • Ridlerstraße 65 • 80339 Munich • Germany

라. 연구 개발 성과

(1) 논문 게재 성과

(가) 학술대회 (2019 world congress on ASEM19, Jeju Island, Korea, Sept,17~21,2019)



*The 2019 World Congress on
Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM19)
Jeju Island, Korea, September 17 - 21, 2019*

Modelling of Rock Cracking Using Expansion of Vermiculite

Chi-Hyung Ahn¹⁾ Joung Woo Lee²⁾ and Yong-Hoon Byun^{* 3)}

¹⁾ *School of Electrical, Electronics and Communication Engineering, Korea University of Technology and Education, Cheonan, 31253, Korea*

²⁾ *TaePyeongyang Technology Industry, Hanam, 13017, Korea*

³⁾ *School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea*

^{*} yhbyun@knu.ac.kr

ABSTRACT

Conventional excavation methods, such as drilling and blasting, are widely used for tunneling. However, the blasting process induces stress waves propagated through the ground, and subsequently, vibration and noise may occur at the ground surface. A new vibration-free excavation method using expansion of vermiculite is developed for rock cracking (Ahn and Hu 2015). The objective of this study is to evaluate the performance of vibration-free excavation method using the expansion of vermiculite according to rock condition. Rock block and expansion of vermiculite in a drilled hole are simulated using finite element method. The results of finite element analysis demonstrate that the vermiculite can be effectively used for rock cracking.

(나) 12월 게재 완료




Technical Note

Expansion-Induced Crack Propagation in Rocks Monitored by Using Piezoelectric Transducers

Chi-Hyung Ahn ¹, Dong-Ju Kim ² and Yong-Hoon Byun ^{2,*}

¹ School of Electrical, Electronics and Communication Engineering, Korea University of Technology and Education, Cheonan-si 31253, Korea; chahn@koreatech.ac.kr

² School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea; kyrix1028@knu.ac.kr

* Correspondence: yhibyun@knu.ac.kr; Tel.: +82-53-950-5732

Received: 14 October 2020; Accepted: 23 October 2020; Published: 24 October 2020

Abstract: The objective of this study is to develop a new vibration-free excavation method based on vermiculite expansion for rock cracking and to evaluate the performance of the heating system via elastic wave monitoring. Natural vermiculites expand rapidly in volume when heated above 800 °C. MgO powder is used to evenly transmit the surface temperature of a heater rod, which can attain high temperatures rapidly, to the vermiculites. The insertion direction of the heater rod greatly affects the expansion pressure. Three cuboid rock specimens are prepared and equipped with the heating system at different hole-to-face distances. Crack propagation is monitored by a pair of disk-shaped piezoelectric transducers. For short hole-to-face distances, the wave velocity and maximum amplitude rapidly decrease after certain time. For the greatest hole-to-face distance, the shear wave velocity remains constant during the test, while the maximum amplitude decreases after a certain time. The time taken for the velocity and amplitude of the shear waves to decrease reasonably corresponded to that taken for detectable crack propagation to occur on the surface of the rock specimen. The proposed method and materials may be useful from the viewpoints of rapid expansion, economy, and crack control.

Keywords: crack propagation; expansion; heater; piezoelectric transducer; rock fracture

1. Introduction

Various excavation methods are employed for constructing tunnels and underground spaces; drilling and blasting is one of the common excavation methods. However, the propagation of the stress waves, which are induced during the blasting process, to the ground surface may cause vibration and noise. To minimize such vibration, controlled blasting methods such as line-drilling and pre-splitting are used at the tunnel perimeter [1]. Nevertheless, the blast-induced stress wave can still propagate through the connected area between empty drilling holes.

Various excavation methods were developed to reduce the blast-induced vibration. Jeng et al. [2] suggested a new technology using an abrasive water jet for cutting rocks. Experimental and numerical studies on the effects of precutting the tunnel perimeter by an abrasive water jet on blast-induced vibration showed that such a jet system can be useful as an auxiliary tool for creating a free surface along the tunnel perimeter [3,4]. As another vibration-reduced excavation method, namely, the wire-saw cutting technique was proposed by Gustafsson [5]. Lee et al. [6] investigated the effect of a pre-cut discontinuity on the attenuation of blast-induced vibration. The cutting performance of a wire-saw cutting machine was reported by Lee et al. [7]; however, only rectangular rock masses can be obtained by this method. For a more rounded tunnel section, more drilling holes have to be drilled, which is time-consuming. Although the use of tunnel-boring machines (TBMs) is

Sensors **2020**, *20*, 6054; doi:10.3390/s20216054 www.mdpi.com/journal/sensors

(다) 12월 리뷰(review) 중

Manuscript Status					
Incomplete submissions (0) Under processing (1) Website Online (4) Rejected / Withdrawn (1)					
Manuscript ID	Journal	Section / Special Issue	Title	Status	Submission Date
sensors-1057695	Sensors	SI: Emerging Characterization of Geomaterials Using Advanced Geo-sensors	Piezoelectric Ring Bender for Characterization of Shear Waves in Compacted Sandy Soils	Under review	2020-12-15 09:53:00

(2) 특허 성과

(가) 특허 제10-2026620호, 파쇄장치, (주)태평양기술산업, 2019.09.24.

특허증 CERTIFICATE OF PATENT		
특허 Patent Number	제 10-2026620 호	
출원번호 Application Number	제 10-2018-0124416 호	
출원일 Filing Date	2018년 10월 18일	
등록일 Registration Date	2019년 09월 24일	
발명의 명칭 Title of the Invention 파쇄장치		
특허권자 Patentee (주)태평양기술산업(115511-*****) 경기도 광명시 범안로 998, 녹원프라자 601 (하안동)		
발명자 Inventor 등록사항란에 기재		
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.		
 특허청 Korean Intellectual Property Office	2019년 09월 24일	 QR코드로 현재기준 등록사항을 확인하세요
	특허청장 COMMISSIONER, KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE 박원주	

(나) 특허 제10-2042432호, 무진동 파쇄장치, (주)태평양기술산업, 2019.11.04.

특허증 CERTIFICATE OF PATENT		
특허 Patent Number	제 10-2042432 호	
출원번호 Application Number	제 10-2018-0124415 호	
출원일 Filing Date	2018년 10월 18일	
등록일 Registration Date	2019년 11월 04일	
발명의 명칭 Title of the Invention 무진동 파쇄장치		
특허권자 Patentee (주)태평양기술산업(115511-*****) 경기도 광명시 범안로 998, 녹원프라자 601 (하안동)		
발명자 Inventor 등록사항란에 기재		
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.		
 특허청 Korean Intellectual Property Office	2019년 11월 04일	 QR코드로 현재기준 등록사항을 확인하세요
	특허청장 COMMISSIONER, KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE 박원주	

(다) 특허 제10-2145713호, 저전압 가열기반의 발열팽창을 이용한 무진동 파쇄장치, (주) 태평양기술산업, 2020.08.12

특허증 CERTIFICATE OF PATENT			
특 허 Patent Number	제 10-2145713 호		
출원번호 Application Number	제 10-2019-0178626 호		
출원일 Filing Date	2019년 12월 30일		
등록일 Registration Date	2020년 08월 12일		
발명의 명칭 Title of the Invention 저전압 가열기반의 발열팽창을 이용한 무진동 파쇄장치			
특허권자 Patentee (주)태평양기술산업(115511-*****) 경기도 광명시 범안로 998, 녹원프라자 601 (하안동)			
발명자 Inventor 등록사항란에 기재			
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.			
 특허청 Korean Intellectual Property Office	2020년 08월 12일	 QR코드로 현재기준 등록사항을 확인하세요	
	특허청장 COMMISSIONER, KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE		
	박원주		

(라) 발열팽창재로 환경 위해성 분석 인증, (주)태평양기술산업, 2020.12.08



7456-3841-2345-7442



시험성적서

1. 성적서 번호 : CT20-135546K

2. 의뢰자

○ 업체명 : (주)태평양기술산업

○ 주소 : 경기도 광양시 범안로 998 (하안동) 녹원프라자 601

3. 시험기간 : 2020년 11월 25일 ~ 2020년 12월 08일

4. 시험성적서의 용도 : -

5. 시료명 : 발열팽창용 질석

6. 시험방법

(1) 환경부고시 제2018-23호 (2018. 2. 9)

7. 시험결과

1) 발열팽창용 질석

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고	시험장소
석면함유여부	-	(1)	불검출	-	A

※ 시험장소

A : 경기도 군포시 공단로 149 군포현대아이빌라 805호

— 끝 —

확인	작성자인명	이연성	기술책임자명	이준규
----	-------	-----	--------	-----




비고 : 1. 이 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 및 KOLAS 인정과 관련이 없으며, 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에 한정된 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.

2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용할 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.

3. 이 성적서의 일부만을 발췌하여 사용한 결과는 보증할 수 없습니다.

4. 이 성적서의 진위여부는 홈페이지(www.kcl.re.kr)에서 확인 가능합니다.

2020년 12월 08일

한국건설생활환경시험연구원



결과문의 : 15845 / 경기도 군포시 공단로 149 군포현대아이빌라 805호 ☎ (031)389-9105

총 1페이지 중 1페이지
양식TQP-12-01-03(1)





(마) 상용화 계획

① 발열팽창 장비 실용화

현재 다양한 실험을 위하여 변압기와 시스템 케이스를 스펙보다 여유롭게 설계 한 상태이다. 향후 현재 대비 약 30% 이상 무게를 감소한다면, 기존 무진동암반파쇄 기술 장치에 비하여 부피 및 무게에서 경쟁력을 갖을 것으로 판단된다.

또한, 터널 굴착시 주전원 장비를 발전기를 두고 발전기는 파쇄장치 바로 앞에서 동작을 하도록 장치를 개발하여 발열팽창에 필요한 케이블의 길이가 불필요하게 길어질 필요가 없도록 계획이다.

② 상용화를 위한 공법 개발

향후 추가적인 현장 실험을 통하여 공법이 최적으로 적용 가능한 데이터를 확보 한 후 발열팽창 암반파쇄 기술이 최적으로 적용 가능한 현장에 대한 구체적인 공법 완성을 할 예정이다. 특히, 다중 천공을 이용하는 경우 천공 사이의 구체적인 간격 및 배치를 향후 공법 안에 포함 할 예정이다.

③ 안전성 기술

현재 발열체의 저항 값은 수 mΩ (약 3mΩ)에 해당 하며, 지하수의 고유 저항값은 10,000 ~ 100,000(Ω,cm)으로 발열체에 의한 전기 감전이 발생하지 않는다. (참고로 바닷속 전기 용접도 저항값의 차이로 전기감전이 안되는 경우임) 또한, 개발된 발열체로 흐르는 전압은 SAFETY 안전 규격의 전압(24V) 보다 적은 20V 로 동작 되는 것으로 전기적인 안정성은 확인하였다. 하지만 발열체가 약 800 도 이상의 고온으로 암반파쇄이후에도 잠열이 존재하기 때문에 시공시 열에 대한 안전기술 개발을 향후 공법에 구체적으로 포함 할 예정이다.

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 질적 목표 및 달성율

핵심연구성과 (level1)		단위 성과 (level2)		질적 목표 및 성과				
				성과지표		목표치	가중치	달성율
A	발열팽창 암반파쇄용 팽창재료 및 상용 하우스 개발	A-1	발열팽창재료 팽창력 개선	①	계측가능범위	200 MPa 이상	7	100%
		A-2	발열팽창기 하우스 설계 및 개발	②	팽창력 측정	수직천공 경우대비 팽창력 90% 이상	7	100%
B	발열기반 능동형 전력변화장 치 및 고효율 코일 개발	B-1	50cm 급 암반파쇄용 코일 설계 및 개발	③	설계도면 및 사양서	1건	10.5	100%
C	실용화를 위한 무진동 발열팽창 암반파쇄 시공 프로세스 개발	C-1	시뮬레이션기반 가상환경 암반 파쇄시나리오	④	지침/메뉴얼	1건	7	100%
		C-2	다양한 현장여건을 반영한 암반파쇄 가이드라인	⑤	지침/메뉴얼	1건	7	100%
		C-3	실용화 무진동 암반파쇄 공법 개발	⑥	비즈니스 모델수립	1건	8.5	100%
				⑦	마케팅 전략수립	1건	7	100%
				⑧	공법 시방서작성	1건	5.5	100%
				⑨	현장 공법 소개 (홍보)	3건	2	100%
D	발열기반 능동형 전력변화장 치 및 고효율 코일 개발	D-1	능동형 전력변화장치 기초설계 및 개발	①	설계 도면 및 제품 사양서	1건	10.5	100%
		D-2	능동형 전력변화장치 제품화 개발	②	다중 발열기기 동시작동	4개	7	100%
		D-3	발열장치 임계온도 도달 시간 평가	③	800℃ 도달 시간	5분 이내	7	100%
		D-4	암반파쇄 발열장치 제품 상용화	④	KC 인증 획득	인증획득	7	100%
				⑤	CE 인증 획득	인증획득	7	100%

질적 목표 성과는 총 98% 달성된 상태이다. 현재 현장공법소개를 수행중이며 과제종료시 까지 100%완료 예정이다.

나. 양적 목표 및 달성을

단위 성과 (level2)		양적 목표 및 성과		
		목표치	가중치	달성을
1	특허 출원	3건	20	100%
2	특허 등록	3건	15	100%
3	시제품	4건	25	100%
4	S/W	-	-	-
5	매출액	20백만원	6	0%
6	신규고용	2명	14	100%
7	신기술인증	1건	6	0%
8	논문등재(SCI)	2건	14	100%

양적 목표 성과는 총 88% 달성된 상태이다. 현재 계획중인 현장암반파쇄실적이 완료되면 신기술인증을 향후 지원할 예정이다.

또한, 추가적으로 소프트웨어 1건을 등록 할 예정이다.

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

본 기술은 기술개발 완료 시 각 기관별 신기술 신공법 지정이 가능할 것으로 예상되며 이는 국가발주공사 설계에 반영되어 공사에 바로 적용할 수 있다. 현재 시장에서 활용되고 있는 공법보다 1일 작업량이 많고 경제적(25%이상)이기에 시장 진입이 빠를 것으로 판단되며 또한 시장 점유율 확대 및 해외시장 진출도 가능할 것으로 판단다.

○ 사업화 목표시장 및 규모

- 목표시장 : 기존 도심지 무진동 및 미진동 발파 공법 대체 토목현장
 - ※ 예상시장 : 진동 및 소음에 영향을 받는 모든 암반파쇄 공사현장
(도심지 공사, 인접구조물 공사, 야간공사, 축산농가 인근, 작업공간 미확보 공사 등)
 - : 구조물 철거 및 해체 현장
 - : 석산 등 석재원석 절취 현장
- 시장규모 : 매년 최소 200억원 규모 무진동 및 미진동 발파 예상
- 제품개발 및 실용화 완료시 최종 5년 후 시장규모의 30% 이상을 대체 할 수 있을 것으로 예상됨
- 목표시장 점유율 : 개발 5년 후 시장 규모의 30% 이상 점유

○ 사업화를 통한 기대 매출

구 분		(2019)년 (기술개발 전년)	(2020)년 (개발종료 해당년)	(2021)년 (개발종료 후 1년)	(2022)년 (개발종료 후 2년)
사업화 기술(제품, 공법)		· 발열팽창기기 상용 제품	· 발열팽창 무진동 암반 파쇄 신기술 · 발열팽창기기 상용화 제품	· 발열팽창 무진동 암반 파쇄 신기술 · 발열팽창기기 상용화 제품	· 발열팽창 무진동 암반 파쇄 신기술 · 발열팽창기기 상용화 제품
투자계획(백만원)		0	20	200	500
판매 계획 (백만원)	내 수	0	20	200	1,000
	직접수출	0	0	100	500
	간접수출	0	0	200	2,000
	계	0	20	500	3,500

- 매출발생 1차 년도
 - : 신기술 신공법 지정 이전으로 소규모 무진동, 미진동 발파현장에서 시험적으로 우선 적용하여 내수시장에서 2,000만원의 매출을 목표로 추진 함.
- 매출발생 2차 년도
 - : 국내.외 시공 결과의 성공적인 수행 경험과 홍보를 통하여 대리점(위탁시공업체) 개설 및 영업 확대, 관급공사 설계 반영 및 시공 등 으로 약 5억원 이상의 수주를 목표로 추진 함.
- 매출발생 3차 년도
 - : 기존 무진동 발파업체에게 위탁시공으로 시공 실시료 위주의 영업 확대와 장비(인덕션 기반 발열팽창 기기) 및 소모품(팽창재료 등) 판매를 추가하여 약 35억원의 수주를 목표로 추진 함.
- 매출발생 4차 년도 ~
 - : 4차 년도 부터는 기존의 공사 경험과 홍보 및 수요의 증대로 50억 이상의 매출 예상

○ 사업화를 통한 기대 인력고용

구 분	(2019)년 (기술개발 전년)	(2020)년 (개발종료 해당 년)	(2021)년 (개발종료 후 1년)	(2022)년 (개발종료 후 2년)
신규고용(명)	1	1	3	5
상시고용(명)	14	14	14	15

주 의

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