

R&D /
15CTAP-C
098126-01

순환자원

혼합

친환경

고효율

안정화제

를 활용한

Raft형태

의

대심도

연약지반

용

안정화

처리기술

개발

최

종

보

고

서

2017

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

국토교통 R&D Report

보안 과제(), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개()

국토교통기술촉진연구사업 최종보고서

R&D /
15CTAP-C098126-01

순환자원 혼합 친환경 고효율 안정화제를 활용한 Raft형태의 대심도 연약지반용 안정화 처리기술 개발 최종보고서

2017. 09. 26.

주관연구기관 / (주)산하이앤씨

공동연구기관 / 아주대학교 산학협력단

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

‘순환자원 혼합 친환경 고효율 안정화제를 활용한 Raft형태의 대심도 연약지반용 안정화 처리 기술 개발’(연구개발 기간 : 2015.06.24 ~ 2017.06.23) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2017. 09. 26.

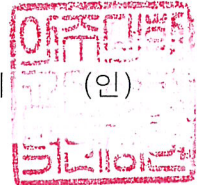
주관연구기관명 : (주)산하이앤씨

(대표자) 하 은 룡



공동연구기관명 : 아주대학교 산학협력단

(대표자) 최 경 희 (인)



주관연구기관책임자: 하 은 룡

공동연구기관책임자: 이 상 덕

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	15CTAP -C098126-01	해당 단계 연구 기간	2015.06.24. ~ 2017.06.23.	단계구분	1/1 (해당단계)/(총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	순환자원 혼합 친환경 고효율 안정화제를 활용한 Raft형태의 대심도 연약지반용 안정화 처리기술 개발			
	세부과제명	순환자원 혼합 친환경 고효율 안정화제를 활용한 Raft형태의 대심도 연약지반용 안정화 처리기술 개발			
연구책임자	하 은 롱	해당단계 참여 연구원 수	총: 14명 내부: 14명	해당단계 연구개발비	정부:300,000천원 기업:100,000천원 계:400,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 14명 내부: 14명	총 연구개발비	정부:300,000천원 기업:100,000천원 계:400,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)산하이앤씨 기술연구소			참여기업명	
<연구 내용 요약>				보고서 면수	
◦연구 핵심내용 - Raft 형태의 대심도 연약지반용 안정화 공법 실험적 검증 - 순환자원을 활용한 연약지반용 안정화제 개발 - 친환경 안정화제와 지오그리드 및 고정유닛을 활용한 최종 패 키지형 연약지반 공법 개발 ◦연구 개발성과 - Raft 형태의 대심도 연약지반용 안정화 공법의 효과 검증 - 기존 시멘트계 안정화제와 비교하여 강도가 향상된 재료비 5% 이상 절감 할 수 있는 연약지반용 안정화제 개발 - 기존 기술대비 공사비 15% 이상 절감할 수 있는 최종 패키지 형 공법 개발 - 이론 및 설계기초 정립과 관련 논문제출 - 최종 성과를 바탕으로 공법시공/재료 제조 매뉴얼 작성				138p	

〈 국 문 요 약 문 〉

연구의 목적 및 내용	◦ 본 연구개발의 최종목표는 Raft 형태의 대심도 연약지반 안정화 공법의 개발과 이에 적합한 경제적이고 친환경적인 안정화제의 개발로서 제품 및 공정개발임 ◦ 연약지반 처리 공법 및 재료의 효과 연구 - 수치해석을 통해 지반 및 개량깊이, 간격, 직경과 표층두께 등 조건에 따른 연약지반 안정화 공법 효과 검증 - 실내시험을 통한 지오그리드 및 고정유닛에 의한 일체화 효과 검증과 지지력 증가 매커니즘 규명 - 전로 제강슬래그는 자력선별 및 파분쇄를 실시하고, 굴폐각은 소성 및 파분쇄를 함으로서 재료를 가공한 친환경 연약지반 안정화제와 시멘트, 탈황석고, 조경제 등을 혼합하여 배합비에 따른 연약지반 고화효과 검증 ◦ 시험을 통한 개발공법 검증 - 실내모형시험을 통한 기존공법 대비 보유기술의 지지력 증가와 부등침하 감소 확인하고, 결과를 바탕으로 시공시 발생할 수 있는 시공순서, 재료의 배합을 확인하여 해결책 제시 - 친환경성/경제성/시공성/안정성을 확보한 최종 패키지형 대심도 연약지반 안정화 공법 개발				
연구개발성과	◦ Raft 형태의 대심도 연약지반용 안정화 공법 - Raft 형태의 대심도 연약지반용 안정화 공법의 효과 검증 - 기존 기술대비 공사비 10~15% 이상 절감할 수 있는 공법 개발 ◦ 순환자원을 활용한 연약지반용 안정화제 - 자력선별, 소성, 파분쇄 등의 가공을 통한 순환자원의 품질 조정 - 재료비 5% 이상 절감 할 수 있는 연약지반용 안정화제 개발 - 기존 시멘트계 안정화제와 비교하여 강도 향상 ◦ 친환경 안정화제와 지오그리드 및 고정유닛을 활용한 최종 패키지형 연약지반 공법의 매뉴얼 - 이론 및 설계기초 정립 - 고정유닛 디자인 - 최종 성과를 바탕으로 공법시공/재료 제조 매뉴얼 작성				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	◦ 현장적용방안 - 국내 낙동강 델타지역이나 동남아시아 해안 및 습지와 같은 지역에서 지지력, 침하 등 다양한 지반공학적인 문제 해결 가능 - 산업경쟁력 증대에 따른 해외 건설시장 진출기회 확대로 대형 건설사와 동반성장 ◦ 실용화/제품화방안 - 연구개발 완료후 사업화과제나 추가 연구개발과제를 통하여 국내현장에서 테스트베드 실시 - 실용화 및 제품화 방안으로서 국내외 학회 논문 게재 및 학술발표 홍보와 기술적 경쟁력 확보 ◦ 신사업창출 - 해외 시장에 진출한 대기업과 슬래그 수출업체, 공사와의 연계로 해외 연약지반 안정화제시장 확대, 해외건설시장의 투자확대 가능 - 기술개발에 따른 안정화제는 중금속 오염 토양 및 폐광산지역 토양과 광물찌꺼기 고형화/안정화처리 등에 확대 적용하여 토양 복원시장 진출을 통한 신사업창출				
핵심어 (5개 이내)	연약지반 안정화	연약지반	혼합처리	순환자원	Raft 기초

< SUMMARY >

Purpose & Contents	◦ Development of raft shape method for deep soft ground using economical and eco-friendly recycled resources mixing stabilizer ◦ Development and evaluation of improvement depth, spacing, and diameter and surface later thickness of the method for soft ground by numerical analysis ◦ Investigation of mechanisms in respect of bearing capacity increasement and unification effect by geogrid and fixing unit by laboratory investigation ◦ Development of stabilizer as manufacturing converter slag and oyster shells by magnetic separation, firing burning and comminution and mixing with cement, fly ash and gypsum ◦ Comparison of exisiting method(ex DCM) and suggesting problem solutions ◦ Development of package method securing environmental Performance, economics, construct ability, and stability				
Results	◦Method - Construction cost reduction(10~15%) contrasted with existing method - Construction manual writing ◦Stabilizer - Cost of materials reduction(5%) and strength enhancement contrasted with existing materials - Produciton manual writing				
Expected Contribution	◦Practicality - Applicability for deep soft ground such as South Korea' s western coast landfills and delta areas of the Nakdong River as well as Southeast Asia' s wetlands and coastal areas ◦New enterprise initiation - Advancing foreign countrys with major company and public enterprise and investment expansion - Extended application of soil pollution(ex heavy-metal-contaminated soil solidify)				
Keywords	Soil Stabilization	Soft Ground	Mixing Method	Recycled Resource	Raft Foundation

〈 목 차 〉

제1장. 연구개발과제의 개요	1
제 1절. 연구개발 목적	1
1. 기술개발 목표 요약	1
2. 연약지반 처리 공법 및 재료의 효과 연구	1
3. 실내모형시험을 통한 개발공법 검증	1
제 2절. 연구개발의 필요성	2
1. 연구개발과제의 설명	2
2. 연구개발과제의 중요성	5
3. 경제 산업적/사회 문화적 필요성	7
제 3절. 연구개발 범위	8
제2장. 국내외 기술 개발 현황	9
제 1절. 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과	9
1. 국가 연구개발사업 유사연구 실적	9
2. 관련분야의 국내외 연구동향 및 학술적 흐름 분석	10
제 2절. 국내외 관련 기술 동향	11
1. 국내외 혼합처리 공법 기술 특허	11
2. 국내외 혼합처리 특허 기술 비교	12
3. 국내외 연약지반 안정화제 특허 동향	13
제3장. 연구 수행 내용 및 성과	15
제 1절. 세부 추진내용	15
1. 연구개발 흐름도	15
2. 연구개발 단계에 따른 세부 연구 내용	15
제 2절. 연약지반 처리 공법 연구	16
1. 유사공법 설계자료 검토	16
2. ALiCC 공법과의 비교	17
3. 수치해석 : 공법 성능 검토	18
4. 실내 모형실험 : 지오그리드 최적 설치 위치	21
5. 수치해석 : 표층개량체와 심층개량체 보강효과 선검증	25
6. 실내 모형 실험 : 모형실험에 의한 표층개량체와 심층개량체 보강효과 검증	31
7. 실내 모형 실험 : 심층개량체의 하중분담을 확인을 위한 거동특성 분석	34
8. 수치해석 : 공법 Case 검토	38
제 3절. 연약지반 안정화제 연구	51
1. 목표 성능 검토	51
2. 안정화제 재료	52

3. 전로 제강슬래그 자력선별 실험	53
4. 전로 제강슬래그 파분쇄 실험	55
5. 전로 제강슬래그 안정화제 배합 시험 - 파일럿 테스트	57
6. 전로 제강슬래그 안정화제 배합 시험	59
7. 굴폐각 소성 실험	64
8. 굴폐각 안정화제 배합시험	66
9. 안정화제 선정	69
제 4절. 안정화제 환경성 평가	74
1. 분석 목적	74
2. 분석 대상	74
3. 분석 방법	75
4. 분석 결과	76
제 5절. 최종 공법 경제성 평가	77
1. 개요	77
2. 경제성 검토 조건	77
3. 경제성 검토 결과	82
제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	83
제 1절. 목표 달성도	83
제 2절. 관련 분야 기여도	84
1. 기술적 측면	84
2. 경제적·산업적 측면	84
3. 사회적 측면	84
제5장. 연구개발성과의 활용 계획	85
제 1절. 사업화 추진 핵심	85
1. 사업화 추진 내용	85
2. 시장 규모	85
3. 주요 고객	87
제 2절. 추진 전략	88
1. 추진 계획	88
2. 기술개발 추진계획	88
3. 차별화 전략	89
4. 수익모델	89
5. 시장 확보 방안	89
6. 환경마크	90
7. 건설신기술	90
8. Risk 분석 및 대책	91

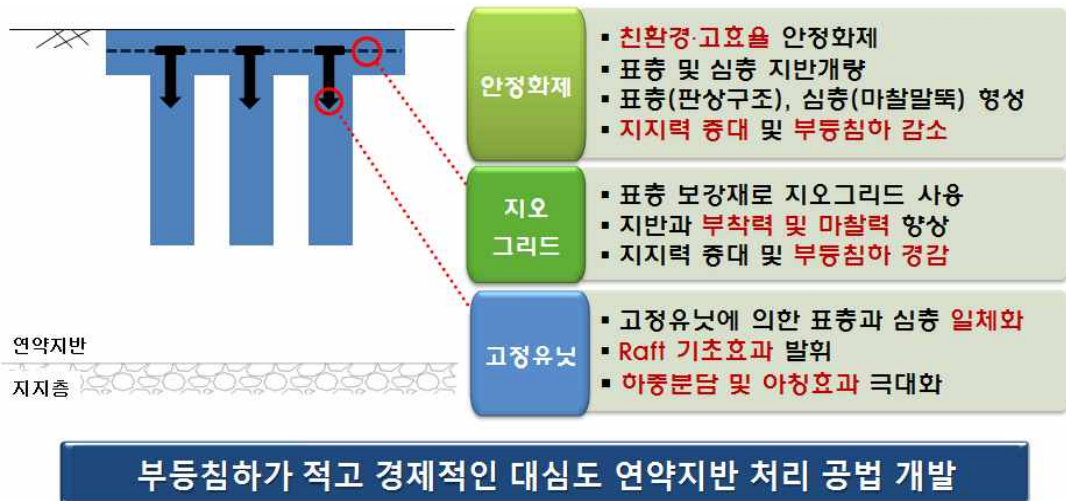
제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	92
1. ALiCC 공법	92
2. 싱가포르 출장	94
제7장. 연구개발성과의 보안등급	95
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황	95
제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	95
제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	96
제11장. 기타 사항	96
제12장. 참고 문헌	97
부록 1. 제강슬래그 혼화재 제조 매뉴얼	100
부록 2. 공법 시공 매뉴얼	117
부록 3. 고정유닛 디자인	129

제1장. 연구개발과제의 개요

제1절. 연구개발 목적

1. 기술개발 목표 요약

- 본 연구 개발을 위한 총괄 및 세부 목표 그리고 이에 따른 세부 성과 모식도는 <그림 1.1> 과 같음



<그림 1.1> 기술 개발 목표

2. 연약지반 처리 공법 및 재료의 효과 연구

- 수치해석을 통해 지반 및 개량깊이, 간격, 직경과 표층두께 등 조건에 따른 연약지반 안정화 공법의 거동 특성 분석
- 부등침하 감소와 충분한 지지력을 확보할 수 있는 조건을 분석하여 실내시험 및 시공 매뉴얼에 반영
- 실내시험을 통한 지오그리드 및 고정유닛에 의한 일체화 효과 검증과 지지력 증가 메커니즘 규명
- 전로 제강슬래그는 자력선별 및 과분쇄를 실시하고, 굴폐각은 소성 및 과분쇄를 함으로서 재료를 가공하여, 생산성을 고려한 최적의 생산조건을 도출
- 재료 가공 실험결과 도출된 조건으로 생산된 친환경 연약지반 안정화제와 시멘트, 탈황석고, 조경제 등을 혼합하여 배합비에 따른 연약지반 고화효과 검증
- 재료의 종류, 배합비, 재령일수에 따른 일축압축강도 비교하여 연약지반에 특화된 안정화제 선정

3. 실내모형시험을 통한 개발공법 검증

- 실내모형시험을 통하여 지지력증가 및 부등침하 감소 확인
- 기존공법 대비 보유기술의 지지력 증가와 부등침하 감소 확인하고, 결과를 바탕으로 시공시 발생할 수 있는 시공순서, 재료의 배합을 확인하여 해결책 제시
- 친환경성/경제성/시공성/안정성을 확보한 최종 패키지형 대심도 연약지반 안정화 공법 개발

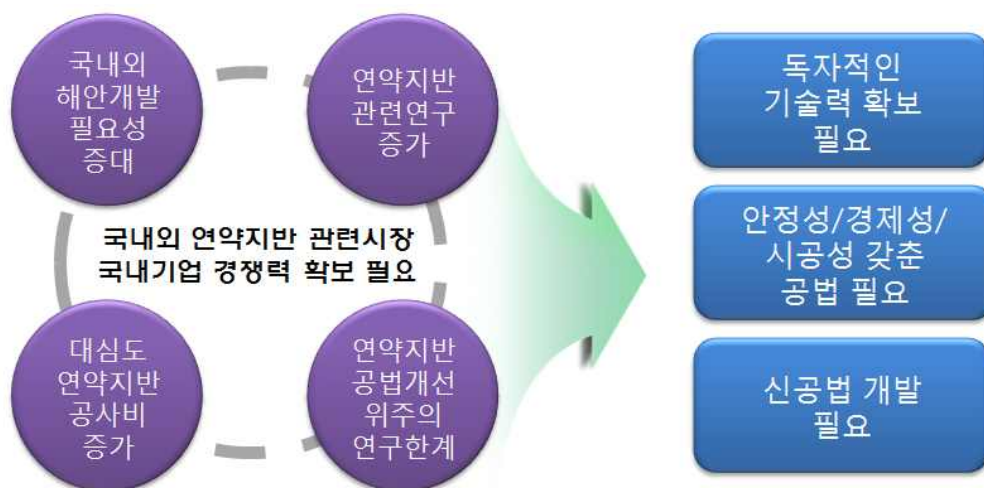
제2절. 연구개발의 필요성

1. 연구개발과제의 설명

가. 연약지반 안정화 공법

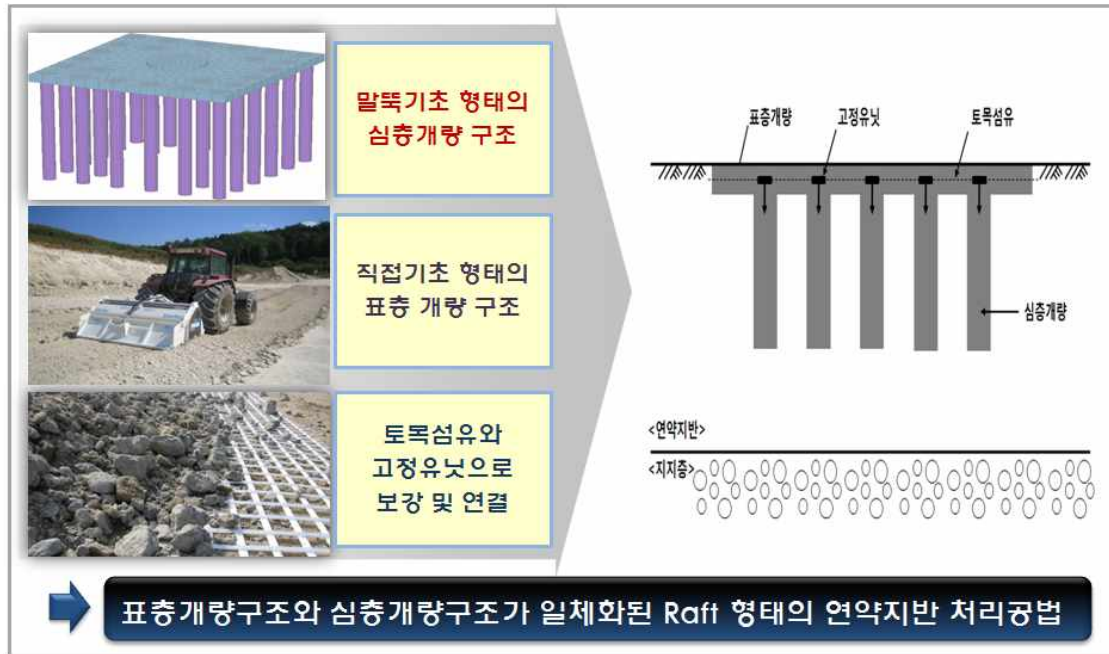
1) 연약지반공법

- 최근 국내 서해안 간척지와 낙동강 델타지역 및 동남아시아 해안지대와 습지 등에서 대규모 항만개발, 산업단지 조성, 신도시건설 등에 의한 해안개발의 필요성이 증대됨에 따라 연약지반 지반개량관련 기술개발 연구가 증가하는 추세임
 - 연약지반은 높은 함수비와 낮은 강도로 인하여 압축성이 매우 커 일반적인 지반과 다른 공학적 특성을 가지고 있기 때문에, 부지를 조성하기 위해서는 압축성과 강도특성을 개선하기 위한 다양한 지반개량공법이 필요함
- ##### 2) 기존 연약지반 대책공법의 문제점
- 기존 연약지반 대책공법으로는 다짐말뚝공법이나 배수공법, 치환공법, 혼합처리공법 등이 주로 적용되나, 국내 낙동강 델타 지역이나 동남아시아 연약지반과 같이 연약지반의 심도가 대심도인 경우 배수거리 증가에 따른 압밀지연과 장기침하량 증가로 공사비의 막대한 증가를 야기해 경제성/시공성이 저하된다는 단점이 존재함
 - 연약지반 처리에 관한 연구는 기존의 기술을 재료 및 시공기술 측면에서 개량하여 시공성/경제성을 높이는 방향으로 이루어졌으나, 이러한 기존 기술의 개선측면만의 연구로는 해외건설업체와 비교시 국내기업의 독자적인 기술력을 확보하는데 한계가 있음
 - 지속적으로 확대되는 국내외 연약지반 처리기술 관련시장에서 국내기업의 경쟁력 확보를 위하여, 안정성/경제성/시공성을 갖춘 신공법 개발이 필요한 실정임



<그림 1.2> 연구개발의 필요성

3) 안정화제와 토목섬유를 이용한 연약지반 안정화 공법



<그림 1.3> 안정화 공법 개념도

- 연약지반 표면에 안정화제 혼합층 및 지오그리드를 사용하여 강성을 가지는 판상구조를 형성시키고, 일정 심도까지의 심층부 연약지반을 말뚝형태로 개량한 후, 고정유닛으로 지오그리드와 심층개량부를 고정하여, 연약지반 표층과 심층개량부를 Raft 형태로 연결 및 일체화시킴으로써 영구적인 지반개량 목적 달성
- 표층 및 심층혼합처리공법 지반개량효과에 지오그리드의 보강, 연결 및 하중의 전달/분산효과를 더하여 처리대상 개량지반을 최소화함으로써, 대심도 연약지반 처리에 적합한 경제성/시공성을 보유한 부등침하 저감공법
- Raft 형태로 연약지반을 개량하여 아칭효과를 활용한 낮은 치환율로, 전반적인 침하량을 감소시키고 부등침하를 획기적으로 저감할 수 있는 대심도 연약지반에 적합한 최적의 지반개량공법임

나. 순환자원을 활용한 연약지반 안정화제

1) 연약지반 안정화 재료

- 연약지반은 일반지반과는 다른 특성을 지니고 있기 때문에 소요강도를 확보하기 위해 연약지반을 고결하기 위한 다양한 재료개발이 이루어지고 있음
- 특히, 최근에는 순환자원 재활용을 통해 CO₂절감 및 천연 자연 골재 사용을 최소화시킴으로써, 환경 훼손을 감소시키는 재료개발에 대한 연구가 활발하게 수행되는 추세임

2) 전로 제강슬래그

<표 1.1> 2015년 슬래그 예상 발생량

(단위 : 백만톤)

구 분		발생량	주요용도
고로슬래그		14.0	시멘트원료
제강슬래그	전로슬래그	7.2	단순매립용 도로용, 성토용
	전기로슬래그	4.3	

- 철을 생산하는 공정에서 발생하는 고로슬래그는 시멘트를 대체할 수 있는 우수한 재료로 인정 받아 많이 사용되고 있으나, 제강슬래그는 제조특성상 고로슬래그에 비해 사용이 제한적으로 저부가가치인 성토 매립재로 사용됨
- 최근 많은 연구기관에서는 제강슬래그의 용도개발을 위한 연구를 활발히 수행하고 있지만 전로 슬래그는 고로슬래그와 달리 성분 중 미반응석회(유리석회, Free-CaO)로 인해 시간이 경과하면 팽창하는 특성을 가지고 있어 사용이 제한적이기 때문에 대부분의 기술개발은 전기로 슬래그에 대한 연구에 국한되어 있음
- 전로슬래그의 팽창성은 철근콘크리트에는 사용하는데 어려움이 있지만 연약지반 개량시 급속 탈수 및 장기강도 향상을 발현할 수 있어(예)생석회 말뚝공법) 안정화제에 적정량 첨가시 효과적일 것으로 판단됨
- 본 사에서는 제강슬래그 중 전기로슬래그에 비해 발생량이 많고 연구가 상대적으로 미미한 전로슬래그를 자원재활용, CO₂절감, 신사업창출을 위해 연약지반 안정화제의 혼화재로 활용하여 고부가가치화 하는 원천기술개발을 진행함

3) 굴폐각



<그림 1.4> 굴폐각의 발생



<그림 1.5> 국내 굴폐각 처리 비율(2010년)

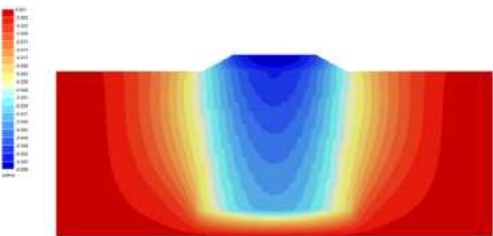
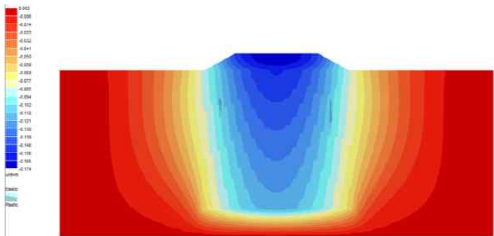
- 굴폐각 배출업체 및 자가 박신장은 364개소로서 연간 280,000톤의 폐각이 발생되고 있으며, 이 중 180,000톤은 채묘기, 폐화석 비료 등으로 재활용되고, 미처리된 10만톤은 사업장 주변 야적 및 인근 농지 등에 방치 되고 있는 실정임
- 본 연구과제에서는 상기에 언급한 전로 제강슬래그 이외에 굴폐각을 소성/파분쇄 공정을 통한 가공으로 연약지반 안정화제의 혼화재로 활용하는 원천기술개발을 진행코자함

2. 연구개발과제의 중요성

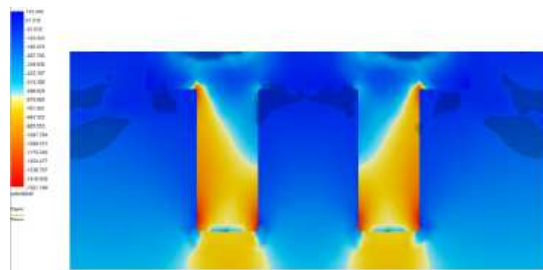
가. 연약지반 안정화 공법

- 본 연구과제에서 개발하고자 하는 연약지반 대책공법은 심층혼합처리 심도를 줄이고 간격을 넓히는 측면에서 일본 독립행정 법인 토목연구소에서 개발한 ALiCC 공법과 유사
- 본 공법은 ALiCC공법과 달리 지오그리드와 고정유닛을 표층처리지반 내에 포설함으로써 아칭효과를 극대화시켜, 최대침하와 부등침하를 줄일 수 있는 것으로 나타남(토목섬유와 고정유닛을 활용한 부상형 연약지반 개량공법 해석적 연구, 2014)
- 무처리부와 개량체 사이의 침하를 표층처리 및 고정유닛에 의해 일체화된 지오그리드 보강으로 상부 하중분산을 통해 낮은 개량율을 실현하기 위한 공법임

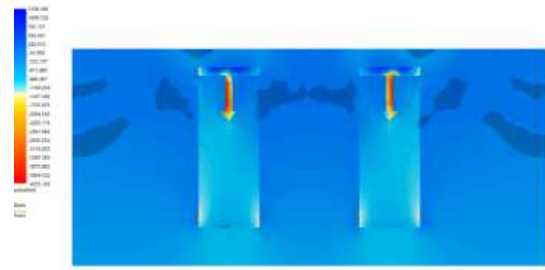
<표 1.2.> 토목섬유와 고정유닛을 활용한 부상형 연약지반 개량공법 해석적 연구,
2014 한국지반공학회 학술발표회

구 분	토목섬유와 고정유닛을 이용한 연약지반 안정화 공법		ALiCC 공법	
침하				
침하량	최대침하량	부등침하량	최대침하량	부등침하량
	5mm	1.5mm	13mm	8mm

- 혼합처리된 개량체와 지오그리드 내에 강성이 큰 고정유닛을 삽입시, 표층 및 심층처리 지반을 일체화시켜 부상형 Raft형 기초의 역할을 기대할 수 있고 동시에 수직응력이 고정유닛을 통해 심층개량부로 전이<그림 1.6>되어 아칭효과를 극대화 시킬 수 있음



(a) 일반 개량체

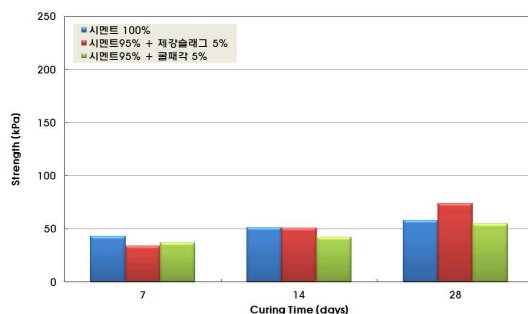


(b) 고정유닛 삽입 개량체

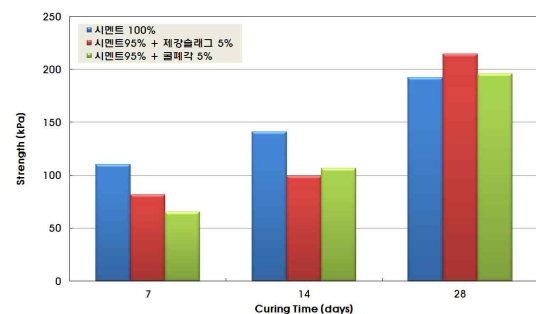
<그림 1.6> 하중재하시 개량체의 수직응력 분포(예시)

나. 연약지반 안정화제

- 탄소 배출권 거래제에 대비하여 2013년부터 시행되고 있는 자원순환을 통한 에너지와 자원효율을 증대시키기 위해 다양한 산업부산물을 효율적으로 활용할 수 있는 기술개발에 대한 시대적 요구가 증대되고 있음
- 본 연구 과제에서는 상기의 대심도 연약지반 안정화공법에 선별 및 파분쇄로 가공된 순환자원과 시멘트를 혼합한 친환경 안정화제를 사용함으로써 경제성 제고
- 순환자원과 시멘트를 혼합하여 해성점토에 적용한 파일럿 테스트결과(그림 1.7), 제강 전로슬래그 미분말을 혼합한 안정화제의 경우 점토광물은 초기 수화반응 후 포졸란반응이 활성화되어 장기강도 발현특성을 보이고, 안정화제와 점토광물의 반응에 의해서 생성되는 수화물인 에트린자이트에 의해서 함수비 저하효과를 보임
- 또한 기존에 제강슬래그의 재활용에 있어서 문제가 되었던 CaO 성분에 의한 팽창성은, 연약지반 안정화제로 적용시 생석회 말뚝처럼 탈수, 팽창작용을 하므로 개량체 형성시 구조적으로 유리한 점을 갖추고 있음
- 굴폐각의 경우 다량의 유기물이 혼합되어있고, 시멘트의 주 성분인 CaO와 유사한 특성을 보이며, 파일럿 테스트 결과 소량 혼합시 시멘트 100%만을 사용하였을 때와 그 강도가 유사한 것으로 나타나 시멘트 혼화재로서의 가능성을 기대할 수 있음
- 본 과제에서는 자력선별을 통하여 제강슬래그의 CaO 성분을 증가시킴으로서 기존의 제강슬래그가 갖고 있던 CaO 팽창 문제를 연약지반에 유리한 조건으로 활용하고, 이러한 제강슬래그와 이미 CaO 성분이 주성분인 굴폐각을 소성 및 파/분쇄 공정을 통한 최적화된 가공으로 시멘트 혼화재로써 활용하고자 함
- 추가적으로 반응물질의 활성화를 촉진하기 위해 순환자원인 폐석고와 시멘트 사용량 감소에 따른 조기강도 저하를 막기 위하여 조정제 및 촉진제를 추가함으로써 친환경성/경제성을 갖춘 안정화제를 개발하고자 함



(a) 해성점토 중량대비 혼합비 5%



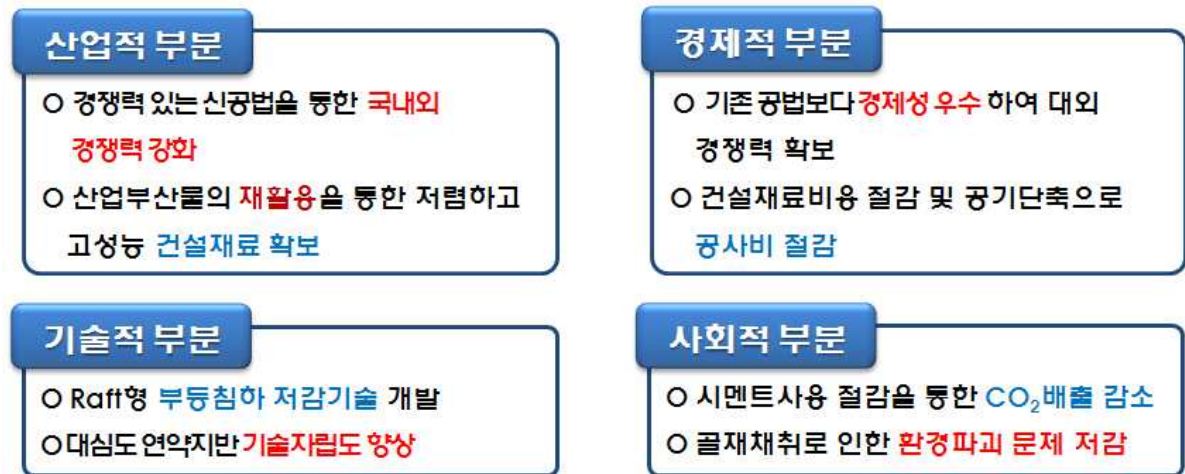
(b) 해성점토 중량대비 혼합비 10%

<그림 1.7> 시멘트 100%와 순환자원 혼합 안정화제의 해성점토에 대한 적용성 비교
(경상대학교, 2013)

3. 경제 산업적/사회 문화적 필요성

가. 경제 산업적/사회 문화적 필요성

- 본 과제에서 개발하고자 하는 공법은 기존 공법보다 경제성이 우수하여 국내외 연약지반 시장에서의 경쟁력 및 기술자립도를 향상시킬 수 있음
- 공법에 적용할 안정화제에 순환자원을 재활용하여 시멘트 혼화제로 적용함으로써 시멘트 사용절감과 골재채취로 인한 환경파괴 문제를 저감시킬 수 있음



<그림 1.8> 경제 산업적/사회 문화적 필요성

나. 공법 및 재료의 경제성

- 수치해석결과 본 연구과제에서 개발하고자하는 공법은 유사 공법인 ALiCC 공법과 비교해보았을 때, 침하량 및 부등침하량을 40% 이상 줄일 수 있는 것으로 나타났으며, 이에 따른 표층 및 심층 처리량 감소로 기존 공법 대비 10~15%의 공사비 절감효과를 발휘 할 수 있을 것으로 예상됨
- 본 연구과제에서 개발하고자하는 안정화제의 가격은 톤당 65,000원으로 예상(표 3, 시멘트 사용량 40%대체시 예상금액)되며 기존 시멘트나 고로슬래그 시멘트에 비하여 경제적이며, 시멘트 사용량 감소에 따른 재료비 감소 및 CO₂배출량 감소효과를 기대할 수 있음

<표 1.3> 안정화제 가격 비교(2014년 물가정보 기준)

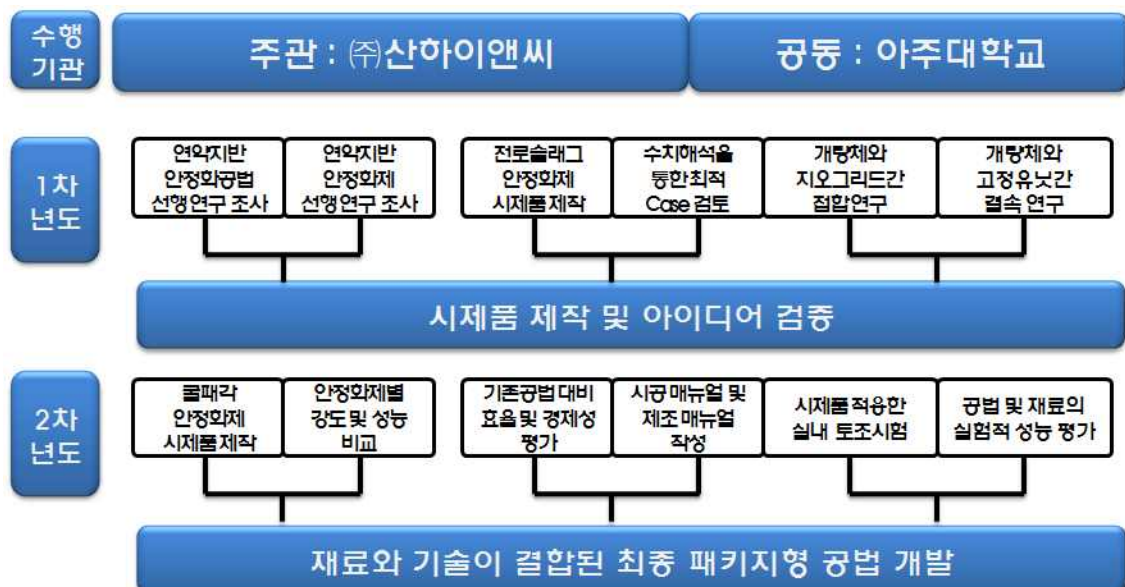
제품명	포틀랜드 시멘트	고로슬래그 시멘트	순환자원을 활용한 안정화제(예상금액)
가격(톤당)	78,500원	71,400원	65,000원

제3절. 연구개발 범위

- 본 연구는 공법과 재료에 대한 연구로 개발 공법의 성능을 실내시험을 통해 증명하고, 실내 배합시험을 통해 공법에 적절한 재료와 배합비를 선정하는 것이 목표임
- 최종적으로는 공법과 재료가 혼합된 패키지형 공법을 제시함으로써 향후 사업화 과제를 진행함에 있어서의 기초연구를 수행하고자 하였음

<표 1.4> 연구개발 범위

연구 범위	연구 수행 방법	구체적인 내용
연약지반 처리 공법 연구	실험적 접근방법	-수치해석을 통해 지반 및 개량깊이, 간격, 직경과 표층두께 등 조건에 따른 연약지반 안정화 공법의 거동 특성 분석 -실내시험을 통한 지오그리드 및 고정유닛에 의한 일체화 효과 검증과 지지력 증가 메커니즘 규명 -모형지반에서 하중재하 실험을 통해 실내시험 규모에서의 공법 효과 증명 -연구 결과를 바탕으로 특허 출원 및 시공매뉴얼 작성
연약지반 처리 재료 연구	실험적 접근방법	-전로 제강슬래그는 자력선별 및 파분쇄를 실시하고, 굴패각은 소성 및 파분쇄를 함으로서 재료를 가공하여, 생산성을 고려한 최적의 생산조건을 도출 -재료 가공 실험결과 도출된 조건으로 생산된 친환경 연약지반 안정화제와 시멘트, 탈황 석고, 조경제 등을 혼합하여 배합비에 따른 연약지반 고화효과 검증 -재료의 종류, 배합비, 재령일수에 따른 일축압축강도 비교하여 연약지반에 특화된 안정화제 선정 -연구 결과를 바탕으로 특허 출원 및 제조매뉴얼 작성



<그림 1.10> 연차별 연구개발 범위

제2장. 국내외 기술 개발 현황

제1절. 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과

1. 국가 연구개발사업 유사연구 실적

가. 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사 및 검토결과

<표 2.1> 연약지반관련 국가연구개발사업

부처명	사업명	과제명	예산(천원)
국토교통부	창의도전연구	환경친화적 준설토 확보 및 매립기술 개발	1,395,000
산업통상 자원부	산학연공동 기술개발사업	굴폐각과 석탄회를 이용한 무다짐 처리공법용 친환경 고화제 개발	68,000
환경부	폐금속 유용자원 재활용 기술개발 사업단	제강 환원슬래그의 고효율 급냉 재활용 기술개발	940,000
산업통상 자원부	산업소재핵심기술 개발사업	에코 철강슬래그 제조를 위한 그린 프로세스 개발	1,904,000
건설교통부	건설교통기술 지역특성화사업	동남권 산업부산물을 이용한 에코산업단지용 친환경 복토재 및 건설재료 개발	1,801,000
국토해양부	건설기술 혁신사업	미생물을 이용한 친환경 지반고결제 개발	961,000
국토해양부	건설기술 혁신사업	순환골재를 재활용한 친환경 지반개량공법 개발	752,000
건설교통부	건설핵심기술 연구개발사업	초연약지반 표층처리를 위한 최적 설계기법 연구	1,293,000
건설교통부	건설핵심기술 연구개발사업	대심도 연약지반개량을 위한 석션드레인공법과 설계기법의 개발	510,000
건설교통부	건설핵심기술 연구개발사업	연약지반 측방유동 판정기법 및 토목섬유/말뚝 복합보강공법 개발	1,286,000

- 검토결과 본 연구에서 개발하고자 하는 공법과 중복되는 부분은 수행되었거나 수행중에 있지 않으며, 재료적인 측면에서만 일부 유사할 수 있는 것으로 조사됨

나. 연구개발과제의 차별화 방안

- 순환자원을 활용하는 재료적인 측면에서 굴폐각과 석탄회를 이용한 무다짐 처리공법용 친환경 고화제 개발, 전기로 슬래그 준설토 혼합 특성연구, 에코 철강슬래그 제조를 위한 그린 프로세스 개발, 전기로 환원슬래그의 고효율 급냉 재활용 기술개발과제와 유사할 수 있지만, ① 제강슬래그 중 발생량이 많은 전로슬래그를 활용한다는 점, ② 연약지반 안정화에 있어서 혼화재로서의 역할을 수행할 수 있는 재료를 개발한다는 점, ③ 다양한 순환자원을 활용하여 비교/분석 개발한다는 점에서 기존 과제와 차별화된 과제를 수행할 계획임

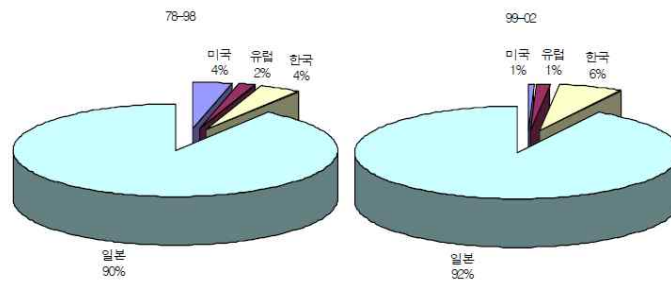
2. 관련분야의 국내외 연구동향 및 학술적 흐름 분석

- 국내 연약지반 관련 기술은 새로운 공법개발보다 주로 선진외국에서 개발된 기술을 국내 여건에 맞도록 재료 및 시공장비 개선 측면으로만 연구개발이 진행되고 있는 실정이며, 특히 폐기, 매립처리되고 있는 순환자원을 재활용한 재료의 개발에 대한 연구가 최근 많이 진행되고 있음
- 제강슬래그와 관련하여, 국내외에서 제강슬래그를 자력선별, 냉각, 파쇄 등 가공하는 기술이 존재하나 자력선별에 의해 철이 회수되고 남은 전로 제강슬래그를 시멘트 혼화제로 활용하는 연구는 진행된바 없으며, 특히 전로 제강슬래그에 대한 연구는 고로슬래그 및 전기로슬래그에 비하여 미미한 것으로 분석됨
- 굴폐각의 경우 소성 및 파분쇄 공정과 플라이 애쉬, 고로슬래그 등과 혼합한 콘크리트용 재료나 고화제가 개발된바 있으며, 본 연구과제에서는 대상 목표를 연약지반용 안정화제로 한정하고, 앞서 언급한 전로 제강슬래그 및 폐석고 등과의 혼합/비교분석을 통하여 개발하고자 하는 연약지반 공법에 특화된 안정화제를 개발하고자 함
- 보다 구체적으로 윤길립(2014), 신재원(2011)은 풍화토와 점토에 전기로 환원슬래그 혼합시 양생에 따라 강도 발현이 되는 것을 확인하였으며, 고인용(2003)은 환원/개질/수쇄한 제강슬래그를 혼화제로 30% 활용하였을 때 시멘트 모르타르 강도가 증가하는 것을 확인하였고, 이와 관련하여 에코 철강슬래그 제조를 위한 그린 프로세스 개발(산업통상자원부), 제강 환원슬래그의 고효율 급냉 재활용 기술개발(환경부) 등에서 전기로 환원 제강슬래그를 시멘트 대체재로 활용하고자 하는 과제가 진행됨
- 김순호(2002), 고정우(2010) 등은 굴폐각을 시멘트 혼화제로 활용하였을 때 장기강도 측면에서 시멘트만을 활용하였을 때보다 장기강도 측면에서 유리한 것으로 나타났으며, 윤길립(2006) 등은 소성 및 파분쇄공정을 통하여 개발한 굴폐각 고화제의 성능을 확인하고 특허를 출원한바 있음
- 해외의 경우 중동, 동남아시아와 같은 개발대상국가의 대규모 항만개발, 산업단지 조성, 신도시개발에 의한 해안개발의 필요성이 증대됨에 따라 연약지반 개량기술관련 개발이 증가하는 추세로 국내 연구동향과 동일하게 시공장비 및 친환경 재료의 개발, 합리적이고 실용적인 설계/시공/특성시험방법 개발 등의 방향으로 진행됨

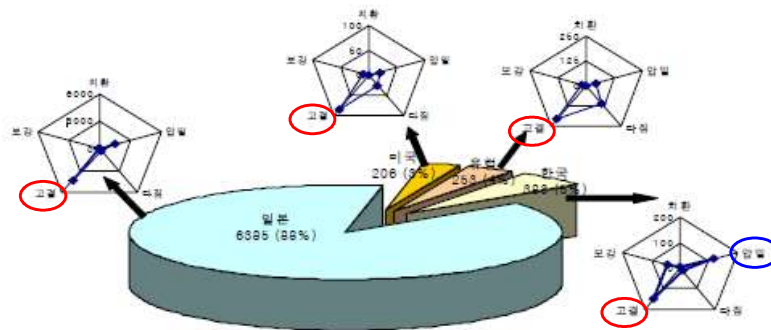
제2절. 국내외 관련 기술 동향

1. 국내외 혼합처리 공법 기술 특허

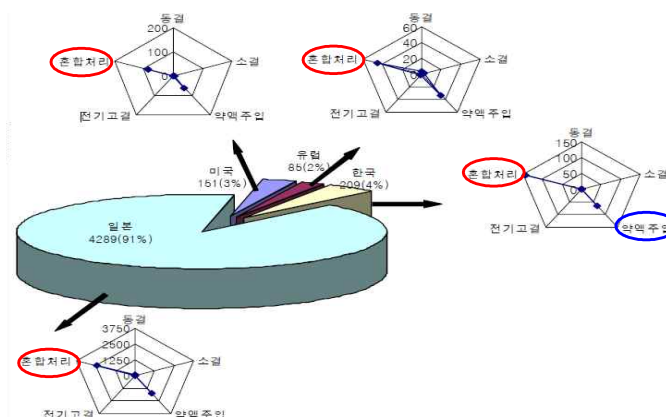
- 혼합처리 공법은 전통적으로 일본이 중요 기술력 보유하고 있는 현황임(그림 2.1)
- 연약지반 관련 특허출원경향을 보면 대상기술과 관련이 있는 지반고결에 대한 출원비를 가장 높고(그림 2.2), 이중 혼합처리 공법의 비율이 가장 높게 나타나고 있으며(그림 2.3) 이는 연약지반상에 구조물 건설이 증가하고 있음을 의미함



<그림 2.1> 혼합처리공법의 국가별 출원비율 (연약지반개량기술 PM 보고서, 특허청)



<그림 2.2> 국가별 공법 기술특성 분포 (연약지반개량기술 PM 보고서, 특허청)



<그림 2.3> 국가별 고결공법 상세 특성(연약지반개량기술 PM 보고서, 특허청)

2. 국내외 혼합처리 특허 기술 비교

- 국내의 경우 최근 연약지반이 깊게 형성되어 있는 서남해안 지역에서의 항만, 산업단지, 주택단지, 공항 등의 대규모 건설공사가 활발히 수행되고 있어 연약지반 개량기술에 대한 관심 고조
- 본 과제에서 개발하고자하는 하는 공법과 유사한 공법으로 국내의 (주)스키너스에서 개발한 PE공법과 일본 독립행정법인 연구소에서 개발한 ALiCC 공법이 있으며, 이들 모두 공법 및 재료에 대한 특허가 존재
- 이는 혼합처리 공법의 특성상 경제성을 위하여 치환율을 줄여야 하고, 치환율을 줄이기 위해서는 고강도의 연약지반 안정화제가 필요함을 의미함
- 본 과제에서 개발하고자 하는 공법 또한 기존 특허기술과 치환율을 저감하는 목적을 같이 하나 이를 고강도 안정화제에만 의존하지 않고 공법의 구조상의 이점을 활용하고자 하고, 안정화제에 있어서 순환자원을 활용한다는데 기존 공법에 비해 발전성이 있음

<표 2.3> 기존 특허기술과의 비교

명칭	안정화제와 토목섬유를 이용한 연약지반 안정화 공법 및 그 구조	ALiCC	Point Foundation (PE 공법)
출원인	(주)산하이앤씨	독립행정법인 토목연구소	(주)스키너스
개요도			
개요	-연약한 지반 표층부에 안정화제 혼합한 개량층과 지오그리드를 사용하여 강성을 가지는 판상구조를 형성시키고, 일정심도까지 심층개량 후 고정유닛으로 연결시키는 공법	-고강도 고화제를 사용하여 개량심도를 감소시키고 간격을 넓힘으로서 치환율을 15%까지 낮추는 기술 -성토재의 종류가 한정적으로 적용됨(성토재 종류에 대한 특허 등록)	-(주)스키너스 개발 제품 바인더스를 적용하여 상부에 높은 치환율로 Head를 형성하고 하부에 비교적 적은 치환율에 의한 Tail로 지지층까지 고화

3. 국내외 연약지반 안정화제 특허 동향

가. 국내 연약지반 안정화제 특허 동향

- 최근 국내에서 연약지반 안정용 시멘트 전용제품에 대한 특허출원 및 제품개발이 증가하는 추세로서 특허 순환자원을 사용한 친환경적인 안정화제 개발이 이루어짐

<표 2.2> 국내 안정화제 특허

회사	배합비
지○○ (2011년)	-포졸란 물질 10~90% , 포틀랜드시멘트 5~50% , 무수석고 1~50% , 칼슘실포네이트계 화합물 1~10% , 표면장력 저감제 0.1~4.5% , 강도 증진용 화합물 0.1~10% , 유동화제 0.01~5%
씨○○ (2011년)	-고로슬래그 미분말 100 중량부 , 트롤 코우크스 탈황석고 20~50중량부 , 팽창제 40~100 중량부
동○○ (2008년)	-포틀랜드시멘트 60~65% , 포졸란 물질 10~15% , 조강제 10~15% , 분산제 10~15%
스○○ (2012년)	-시멘트 30~40 중량부 , 슬래그 또는 플라이애쉬 50~60 중량부 , 석고 5~15 중량부
에○○○ (2012년)	-고로슬래그 미분말 45~65% , C급 플라이애쉬 10~40% , 탈황석고 5~30% , 부산 소석회 1.5~10 %
대○○ (2013년)	-삼산화황 0.65~0.85% , 조강성 클링커 시멘트 35~60% , 고로슬래그 미분말 20~30 % , 플라이애시 5~10% , 제강·정유공정 부산물 15~25%
용○○ (2012년)	-고로슬래그 파우더 100 중량부 , 팽창성 자극제 10~20중량부
청○○ (2006년)	-플라이애시 30~60중량부 , 고로슬래그 10~40중량부 , 생석회 5~20중량부 , 무수석고 5~20중량부 , 시멘트 10~40중량부
원○○ (2008년)	- 고로슬래그 시멘트 95~99% , 무수석고 0.1~4.8%
동○○ (2007년)	- 시멘트 60~65% , 포졸란물질 10~15% , 분산제 10~15%
손○○ (2007년)	- CSA 계 혼화제 5~30% , 석회 1~10% , 고로슬래그 20~50% , 감수제 0.1~10% , 불규화염 0.1~10% , 천연무수석고 10~20%
김○○ (2008년)	- 제강 슬래그 55~95 중량 , 이수석고 5~40 중량 , 석회석 0~30 중량

- 국내 특허는 <표 2.2>와 같이 대부분 시멘트를 주성분으로 하고 포졸란 물질 및 기타 첨가제를 혼합한 지반개량제가 많이 개발되어 사용됨

나. 국외 연약지반 안정화제 특허 동향

- 1978년부터 2009년까지 한국, 일본, 미국, 유럽에서 출원(등록)된 특허를 분석한 결과 일본이 90% 이상의 특허를 출원하고 있어 이 분야의 기술흐름을 주도(중소기업청, 2009)
- <표 2.3>와 같이 국외 연약지반 안정화제 또한 고로슬래그, 생석회, 석고, 석탄회 등의 재료를 혼합하는 방식으로 시멘트 사용량을 줄이는 형태의 안정화제가 개발, 사용되고 있음

<표 2.3> 국외 안정화제 특허(중소기업청, 2009)

공법이름	회사	지역	지반개량제
DSM	Ceocon	북미	시멘트 그라우트±벤토나이트 및 기타 첨가제
SMW	SMW Seiko	동남아시아, 미국	시멘트 그라우트±벤토나이트 및 기타 첨가제
Trevimix(multimix) Trevisani	Rodio	이탈리아	시멘트 그라우트±벤토나이트 및 기타 첨가제
CDM	CDM 공법연구회	일본, 중국	시멘트, 벤토나이트, 석탄회, 고로슬래그 등
SCC	SCC Technology	미국, 일본	주로 시멘트, 석탄회, 벤토나이트 등 첨가 가능
HBM	Hayward Baker & Keller	미국 토질조건에 따라 변화	(시멘트가 주성분)
JACSMAN	Chemical Grout & Fudo	일본	시멘트
GeoJet	Codon Johnson Association	미국 서부	시멘트, 첨가제
Dry Jet Mixing	DJM Association	일본	주로 시멘트, 고함수비 점토에서 생석회
Lime-Cement Columns	Stabilator	스칸디나비아, 극동, 미국	시멘트, 석회의 다양한 혼합비(50:50 또는 75:25)

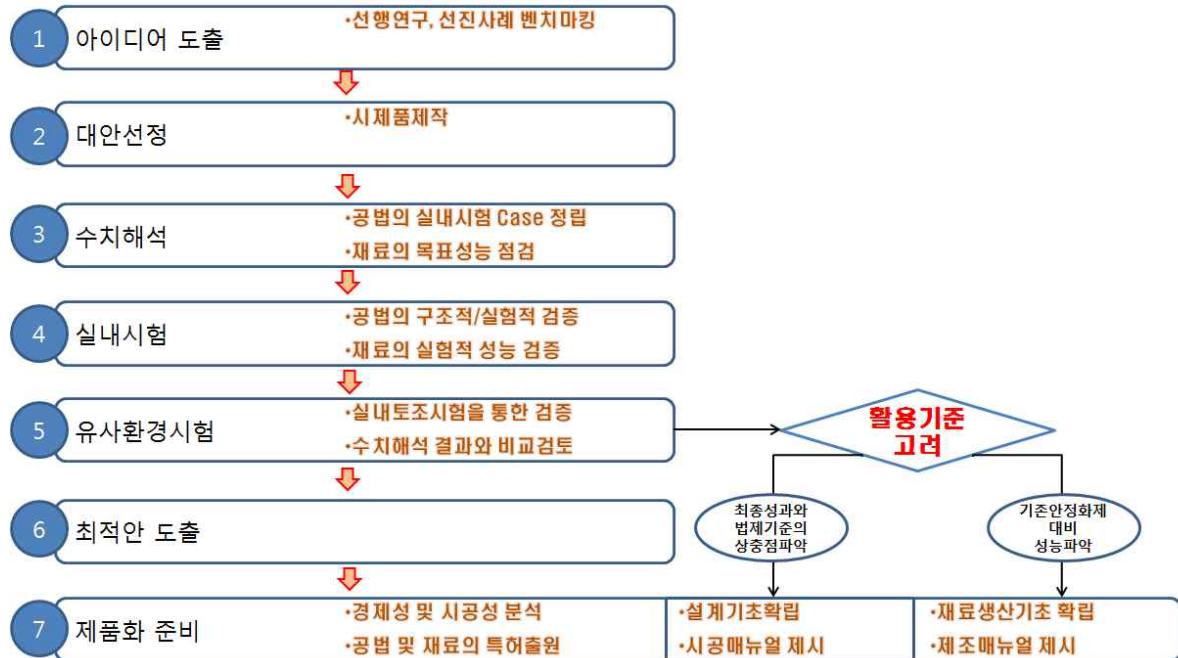
다. 기존 기술의 한계

- 국내외 기술은 대부분 고로 슬래그나 Fly Ash, 벤토나이트와 같은 기 연구된 재료의 비율을 바꾸고 기타 첨가제를 혼합하는데 그 한계가 있음
- 시멘트 대체재로 산업부산물의 활용이 저조한 이유는 산업부산물 활용에 관한 체계적 이고 지속적인 연구개발의 부진과 산업부산물의 품질 불균질성이 원인이 된 것으로 판단되며 이를 개선한 기술이 필요한 시점임

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

제1절. 세부 추진내용

1. 연구개발 흐름도



<그림 3.1> 연구개발 흐름도

2. 연구개발 단계에 따른 세부 연구 내용

<표 3.1> 단계별 주요 연구 활동

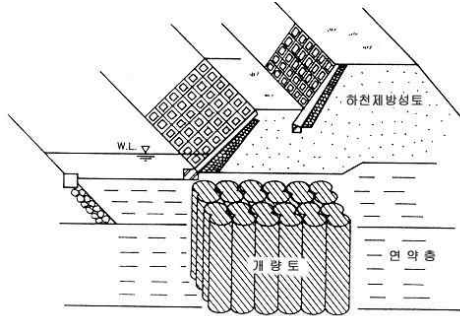
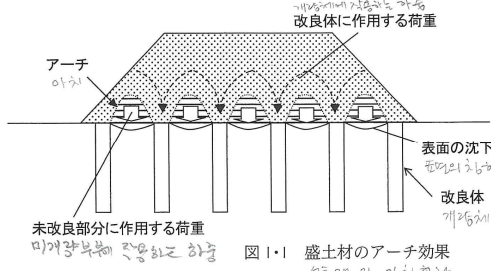
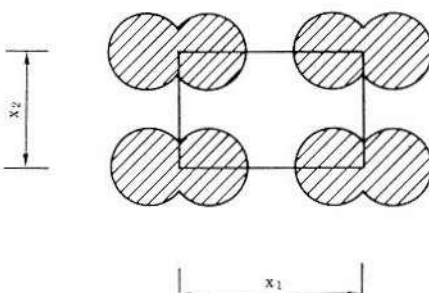
기간	단계별 주요 연구활동	세부추진내용
1단계 (‘15.06~’ 16.07)	■ 선행연구 사례조사	- 유사공법 설계자료 검토 - 안정화제 배합비 검토
	■ 목표성능 설정	- 목표 치환율 결정 - 안정화제 목표강도 결정
2단계 (‘15.07~’ 16.12)	■ 시제품 제작	- 안정화제 제작 및 배합비 실험 - 지오그리드 및 고정유닛 디자인
	■ 수치 해석	- Case 별 수치해석 실시
	■ 실내 시험	- 지오그리드, 고정유닛을 이용한 실내 시험
	■ 안정화제 성능 평가	- 기존 안정화제와의 성능 비교 - 제작된 안정화제간의 성능비교
3단계 (‘16.06~’ 17.06)	■ 실내 모형시험	- 실내 모형시험 - 공법 성능의 실험적 확인
	■ 매뉴얼 작성	- 시공 매뉴얼 및 안정화제 제조 매뉴얼 작성 - 기초 설계기술 확보
	■ 특허 등록	- 안정화제 특허 출원 - 지오그리드 및 고정유닛 실용신안 신청

제2절. 연약지반 처리 공법 연구

1. 유사공법 설계자료 검토

- 본 연구에서 개발하고자 하는 공법과 유사한 공법으로는 DCM공법(DSM공법)과 일본의 ALiCC 공법이 있으며, 각각의 설계조건에 대한 검토를 실시함(표 3.2)

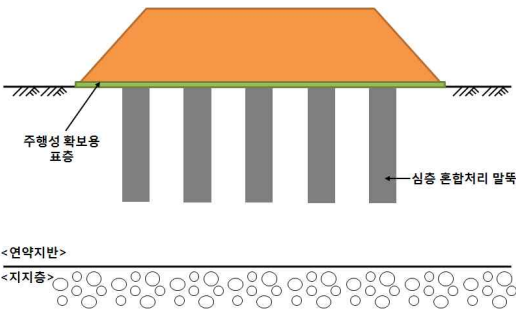
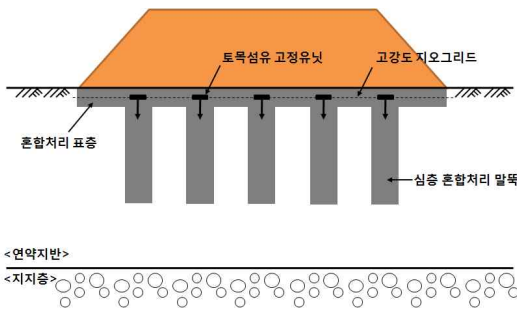
<표 3.2> 유사공법 검토

구분	DCM공법(DSM공법)	ALiCC
내용	 <출처 : DCM 설계와 시공 매뉴얼> -시멘트와 물을 혼합한 안정처리재를 저압으로 토출하면서 특수교반기를 회전시켜 교반혼합함으로써 원지반내에 원주형 말뚝체를 조성하는 공법	 <출처 : 土木研究所(2006), 地盤改良のためのALiCC工マニュアル> -성토재의 아칭효과를 고려하여 심층 혼합처리등에 의한 시멘트계 개량체를 종래보다도 낮은 개량률로 성토 아래층에 전면적으로 배치하여 연약지반의 압밀침하경감을 꾀하는 공법
개량률 산정방법	$a_p = \frac{A_p}{x_1 \cdot x_2}$ a_p : 개량률 A_p : 말뚝체 1본의 개량면적 $x_1 \cdot x_2$: 그림 참조 	
설계조건	-개량폭 : 개량심도의 1/2이상 -개량률 : 50% 이상	-개량폭 : 1.0~2.5m -개량률 : 10~30%
목표성능 검토결과	-지지층까지 시공을 하지 않고 지오그리드 및 고정유닛을 사용함으로써 ALiCC 공법 개량률에 대하여 20%이상 저감을 목표성능으로 설정	

2. ALiCC 공법과의 비교

- 유사공법 중 본 개발공법과 기본개념이 유사한 ALiCC 공법과의 상세 비교는 <표3.3>과 같음

<표 3.3> ALiCC 공법과의 비교

구분	ALiCC 공법	본 공법
개요도	 주행성 확보용 표층 심층 혼합처리 말뚝 <연약지반> <지지층>	 토목섬유 고정유닛 고강도 지오그리드 혼합처리 표층 심층 혼합처리 말뚝 <연약지반> <지지층>
표층처리	-표층을 안정화제로 고화하거나 모래포설 실시 -현장 조건에 따라 실시하며 장비 주행성을 확보하는 것이 주목적	-표층을 안정화제로 고화 -심층 말뚝과 연결되어, 주행성 확보 뿐만 아니라 하중을 분산하는 구조적인 역할 수행
지오그리드	-현장 조건에 따라 설치하며, 일반적인 연약지반에서 활용하는 방식과 동일하게 재료 분리 및 배수 역할을 위해 원지반 상부에 설치	-표층 처리층 내부에 설치되어 철근과 같이 표층내에서 인발력과 전단력을 증가시키는 보강재 역할
고정유닛	-사용하지 않음	-표층과 심층말뚝을 연결시켜 일체화 거동을 하도록 함
심층처리	-말뚝형태로 시공되며 고강도 연약지반 안정화제를 활용하여 간격을 넓히고 보강심도를 감소시킬 수 있음	-말뚝형태로 시공되며 고강도 연약지반 안정화제의 적용과 지오그리드 및 고정유닛에 의해 표층과 하나의 구조체로 거동함으로서 보강 간격을 넓히고 보강심도를 감소시킬 수 있음

3. 수치해석 : 공법 성능 검토

가. 수치해석 조건

- DCM공법, ALiCC공법과 비교를 위해 Visual FEA 프로그램에 의한 수치해석을 실시하였으며, 수치해석 조건은 <표 3.4>~<표 3.6>, <그림 3.2> 와 같음

<표 3.4> 성토재 및 지반 입력조건

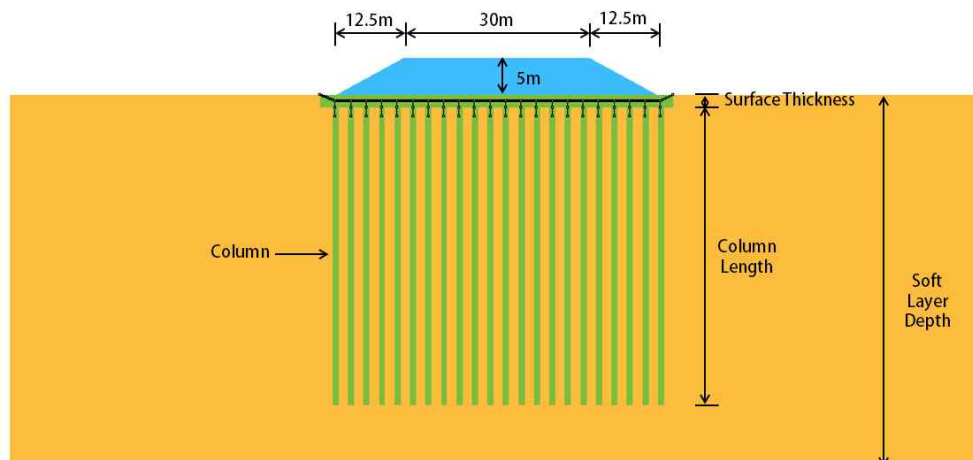
성토재			지반			
단위중량, γ (kN/m ³)	성토고 H (m)	내부마찰각 ϕ (deg)	심도 D (m)	단위중량, γ (kN/m ³)	점착력 c (kN/m ²)	탄성계수 E (kPa)
19	5	30	60	16	15	5,000

<표 3.5> 개량체, 지오그리드 및 고정유닛 입력조건

개량체				지오그리드			고정유닛	
개량체 직경, D (m)	간격 λ (m)	점착력 c (kN/m ²)	탄성계수 E (kPa)	탄성계수 E (kPa)	폭 B (m)	높이 H (m)	탄성계수 E (kPa)	길이 L (m)
1.0	2.5	350	150,000	2,500,000	0.1	0.02	200,000,000	6.5

<표 3.6> 수치해석 Case

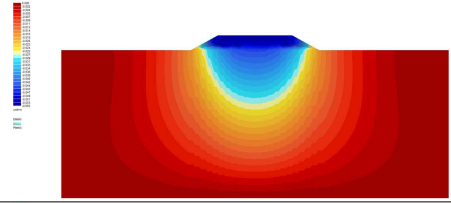
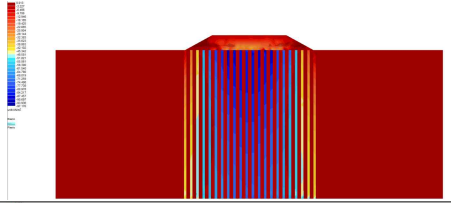
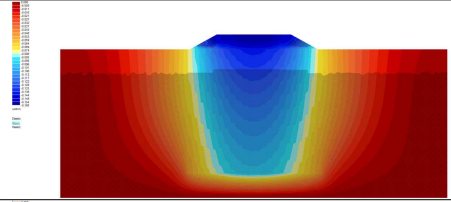
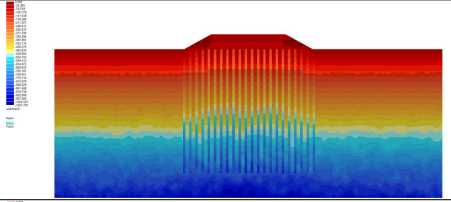
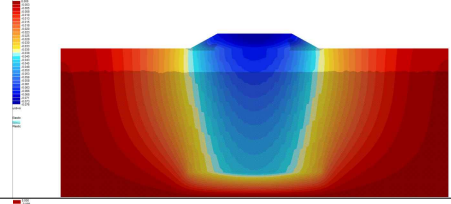
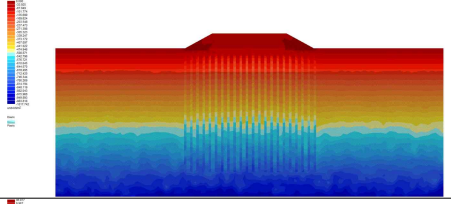
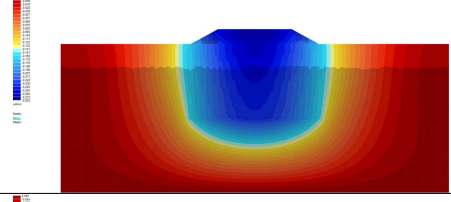
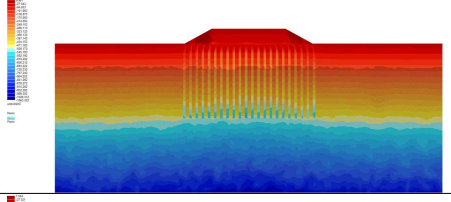
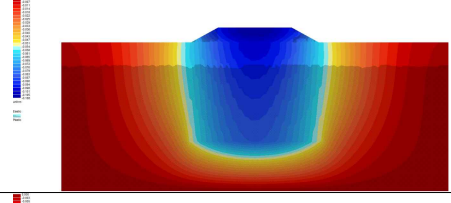
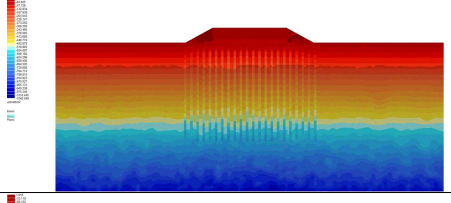
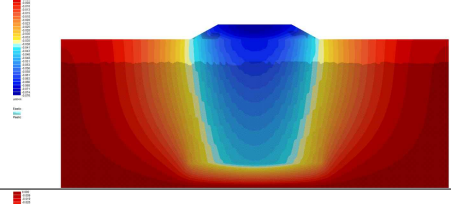
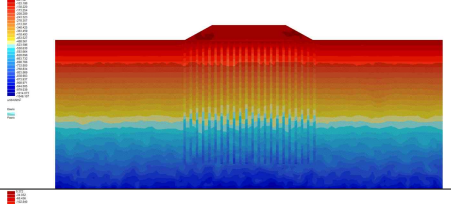
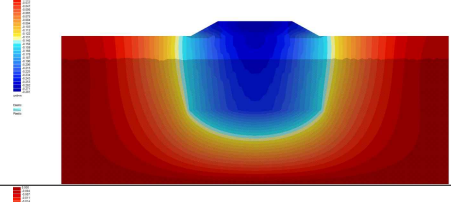
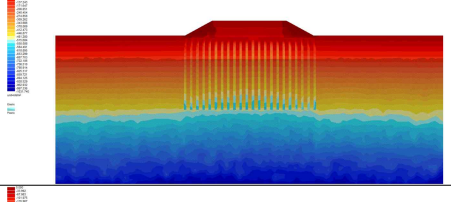
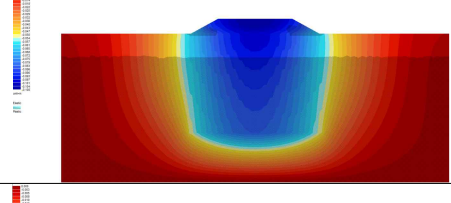
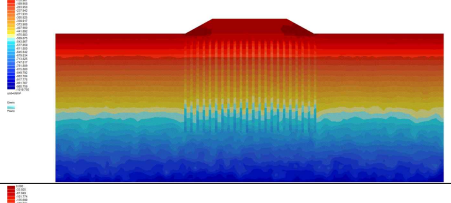
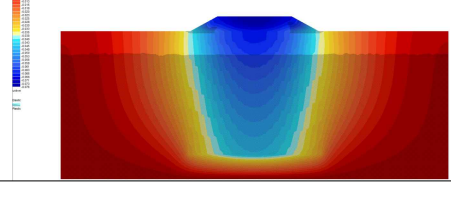
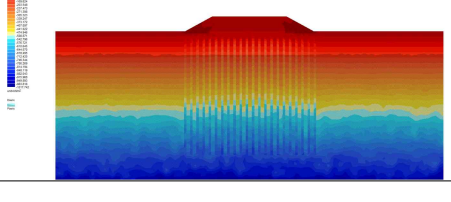
구분									
표층개량심도 (m)	0	0	2	1			2		
심층개량심도 (m)	60	50	50	30	40	50	30	40	50
지오그리드 및 고정유닛 유무	×	×	○	○	○	○	○	○	○
Case	1 (DCM)	2 (ALiCC)	3 (본공법)	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	3-6



<그림 3.2> 수치해석 모델

나. 수치해석 결과

<표 3.7> Case 별 수직변위 및 수직응력

Case	수직변위	수직응력
Case1		
Case2		
Case3		
Case3-1		
Case3-2		
Case3-3		
Case3-4		
Case3-5		
Case3-6		

<표 3.8> Case 별 침하량 및 부등침하량

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 3-1	Case 3-2	Case 3-3	Case 3-4	Case 3-5	Case 3-6
침하량 (cm)	3.7	16.0	7.6	28.3	10.8	7.6	28.1	10.8	7.6
부등 침하량 (cm)	2.1	5.6	2.5	9.3	3.4	2.5	9.1	3.3	2.5

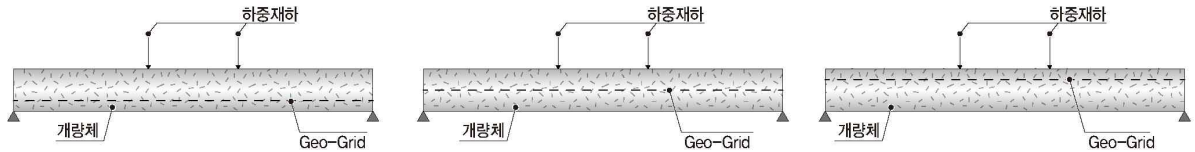
*Case3, Case3-6은 동일 조건임

- DCM공법, ALiCC공법과의 비교 결과 본 공법(Case 3)의 경우 침하량은 DCM(Case1)에 비하여 상대적으로 크지만 부등침하량은 유사하게 나타났으며, 지오그리드 및 고정유닛을 설치하지 않은 ALiCC공법(Case2)과 비교하였을 때에는 침하 및 부등침하량 약 40% 이상 감소함이 나타났다. 이는 지오그리드의 하중분산효과와 고정유닛으로의 상부하중집중효과로 인하여 하중이 말뚝 개량체까지 효과적으로 전달됨에 따라 나타난 결과로 판단됨
- 표층 심도 1m(Case3-1~3-3), 2m(Case3-4~3-5)에 대한 Case를 비교하였을 때에는 최대침하량 및 부등침하량이 심도에 따라 차이가 미미한 것으로 나타나 표층의 판상구조의 심도는 구조에 기인하는 하중의 분산역할 이외에 침하량 감소 및 지지력증가와 같은 역할은 하지 못하거나 그 영향이 미미한것으로 판단됨
- 심층개량 심도 30m, 40m, 50m에 대한 Case를 비교하였을 때에는 개량심도가 감소할수록 최대침하량 및 부등침하량이 증가하였고, 특히 심층개량심도가 40m에서 30m로 줄었을 때 최대침하량 및 부등침하량이 급격하게 증가하였으므로 본 공법에 의하여 침하감소효과를 볼 수 있는 심층개량심도범위는 60m의 심도의 연약지반의 경우 약 40m~50m, 총 개량심도대비 66%~83% 내외일 것으로 판단됨

4. 실내 모형실험 : 지오그리드 최적 설치 위치

가. 실험 조건

- 모형실험을 수행하여 지오그리드의 최적 설치위치를 찾고 지오그리드 보강 개량체에서 지오그리드의 보강효과를 규명함
- 시멘트-점토 비율, 컨시스턴시 지수, 지오그리드 위치를 다르게 하며 공시체를 제작 후 개량체의 보강효과와 최적 설치 위치를 파악하고자 함



<그림 3.3> 실험 개요

- 실험에 적용된 모형지반의 종류와 지오그리드 포설위치에 대한 조건은 <표 3.9>와 같으며, 총 24개의 Case에 대한 실험을 실시함

<표 3.9> 실내모형실험 실험조건

시멘트/점토 비율 (CM)	컨시스턴시 지수 (C)	지오그리드 위치 (G)
25%	0.4, 0.5, 0.6	각 컨시스턴시 지수별 무보강, 하부로부터 0.25H, 0.50H, 0.75H (H:표층 두께)
50%		

- 실험은 KS F 2325를 준용하여 지오그리드가 보강된 개량체에 대한 휨강도시험 수행
- 실험순서는 <그림 3.4>와 같음



(a) 공시체 제작



(b) 하중 재하

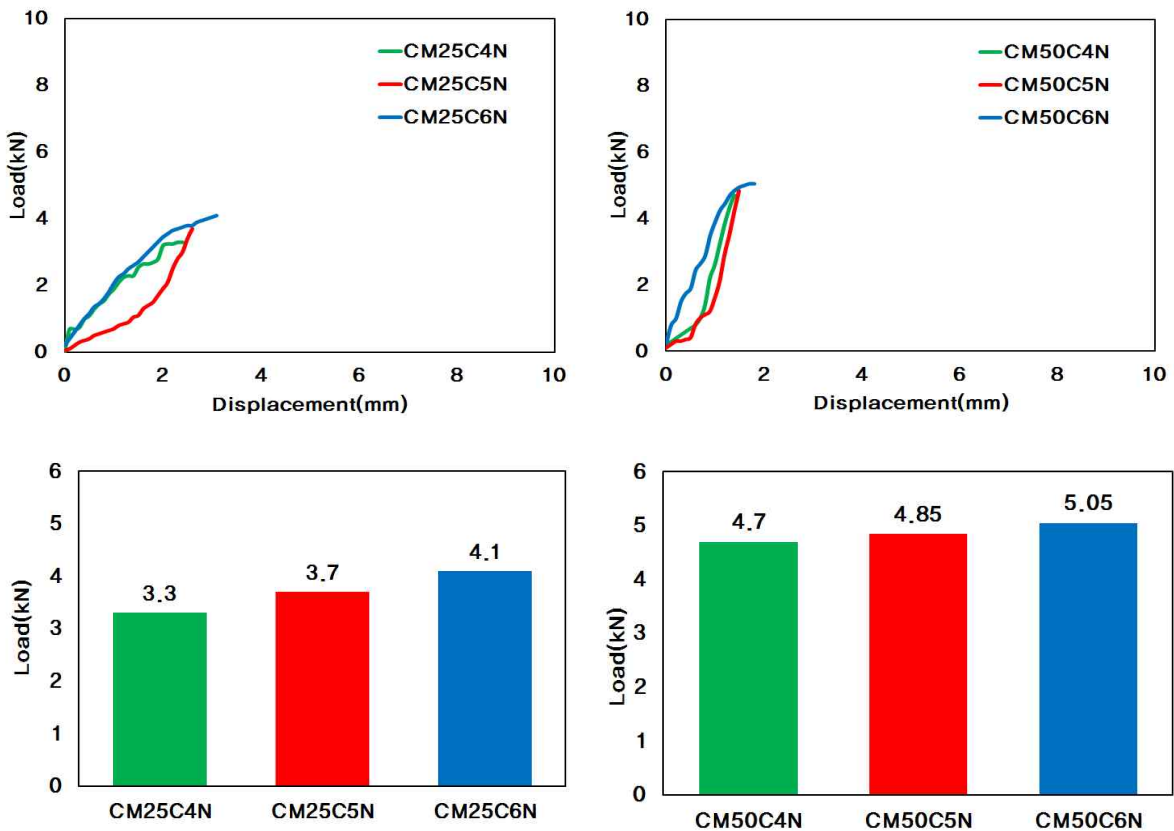


(c) 실험 완료

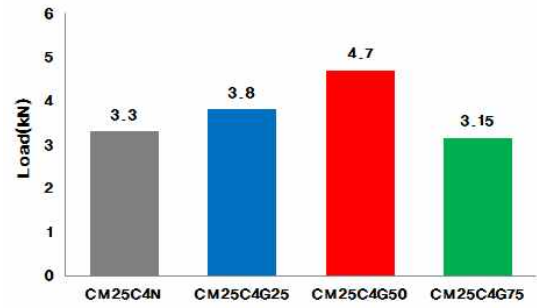
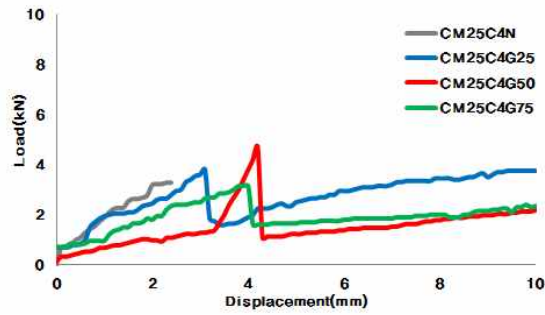
<그림 3.4> 실험방법

나. 실험 결과

- <그림3.5>~<그림 3.7>에 시멘트 함유량 25%일 때와 50%일 때 컨시스턴스지수 변화와 지오그리드의 위치 변화에 따른 실험 결과를 도식화함
- 무보강시 컨시스턴스 지수에 따른 최대 강도는 시멘트 함유량 25%인 경우가 50%인 함유한 경우보다 변위가 약 1.5배 크며, 컨시스턴스 지수가 커질수록 최대 강도가 증가하는 경향이 나타남
- 보강시는 지오그리드를 보강하지 않은 경우와 달리 최대 20%까지의 강도 증진 효과가 나타났다. 개량지반의 파괴 이후에도 연성거동을 발휘하여 개량지반의 급격한 파괴 방지로 개량체의 강도증진과 장기적인 안정성 확보에 유리할 것으로 판단됨
- 지오그리드의 최적 보강위치는 개량체 중앙에서 하부에 위치할수록 개량체의 강도증진과 장기 안정성에 유리할 것으로 분석됨

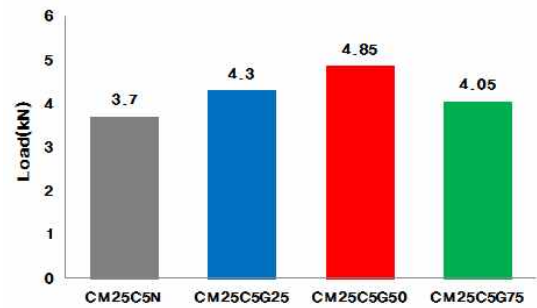
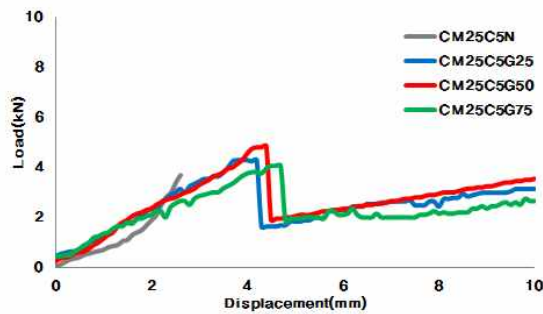


<그림 3.5> 무보강시 컨시스턴스 지수에 따른 최대 휨강도



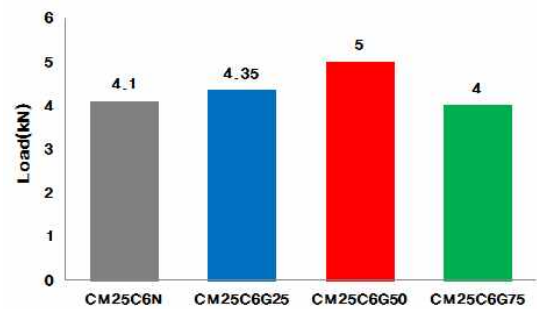
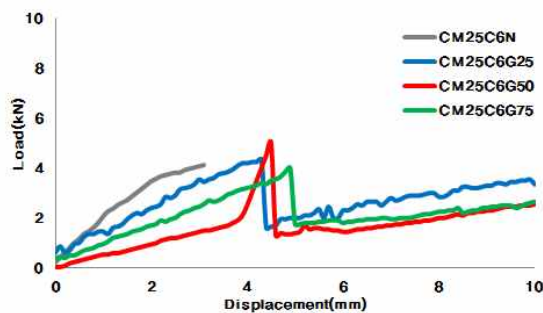
(a) 지오그리드 무보시, 보강위치 0.25H, 0.5H, 0.75H 에 따른 휨강도 실험 결과
(시멘트 함유량 25%, 컨시스턴시 지수 0.4)

(b) 지오그리드 무보시, 보강위치 0.25H, 0.5H, 0.75H 에 따른 최대 휨강도
(시멘트 함유량 25%, 컨시스턴시 지수 0.4)



(b) 지오그리드 무보시, 보강위치 0.25H, 0.5H, 0.75H 에 따른 휨강도 실험 결과
(시멘트 함유량 25%, 컨시스턴시 지수 0.5)

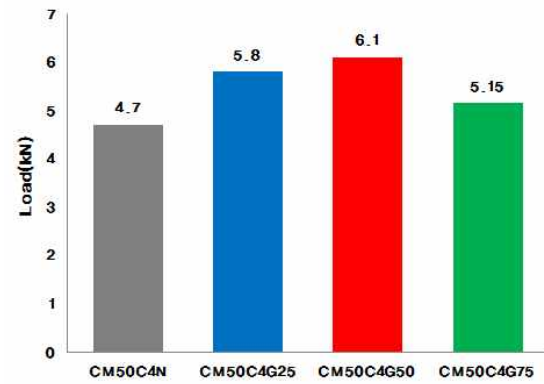
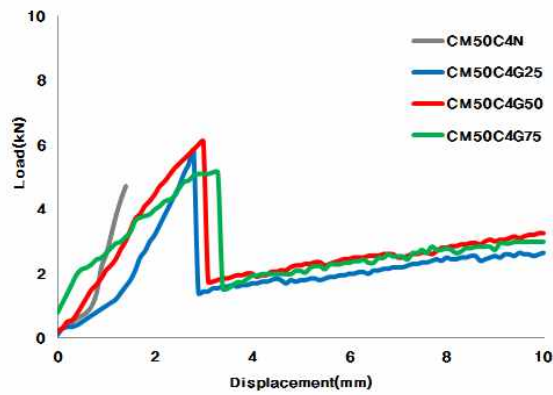
(c) 지오그리드 무보시, 보강위치 0.25H, 0.5H, 0.75H 에 따른 최대 휨강도
(시멘트 함유량 25%, 컨시스턴시 지수 0.5)



(d) 지오그리드 무보시, 보강위치 0.25H, 0.5H, 0.75H 에 따른 휨강도 실험 결과
(시멘트 함유량 25%, 컨시스턴시 지수 0.6)

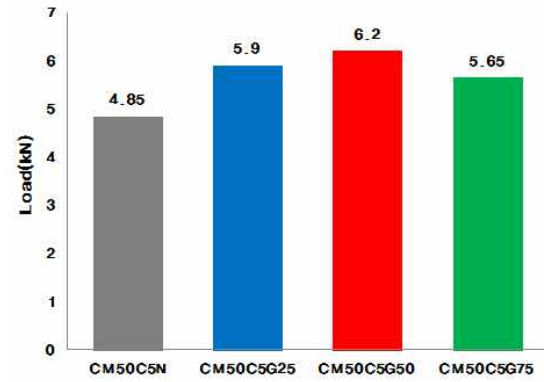
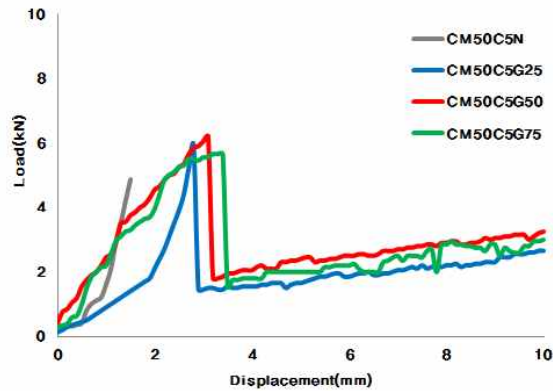
(e) 지오그리드 무보시, 보강위치 0.25H, 0.5H, 0.75H 에 따른 최대 휨강도
(시멘트 함유량 25%, 컨시스턴시 지수 0.6)

<그림 3.6> 지오그리드 위치 변화에 따른 개량체 강도(시멘트 함유량 25%)



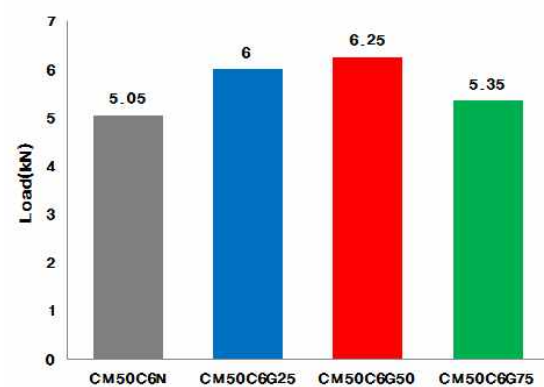
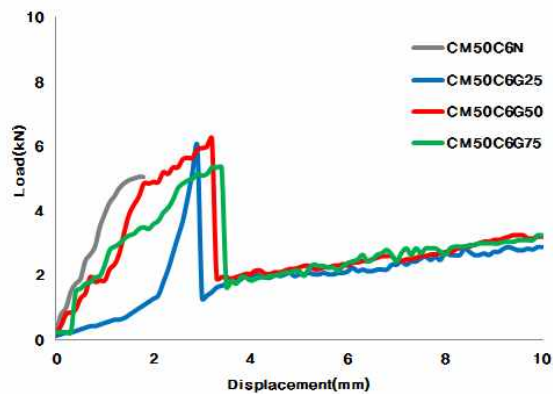
(a) 지오그리드 무보시, 보강위치 0.25H, 0.5H, 0.75H 에 따른 휨강도 실험 결과
(시멘트 함유량 50%, 컨시스턴시 지수 0.4)

(b) 지오그리드 무보시, 보강위치 0.25H, 0.5H, 0.75H 에 따른 최대 휨강도
(시멘트 함유량 50%, 컨시스턴시 지수 0.4)



(b) 지오그리드 무보시, 보강위치 0.25H, 0.5H, 0.75H 에 따른 휨강도 실험 결과
(시멘트 함유량 50%, 컨시스턴시 지수 0.5)

(c) 지오그리드 무보시, 보강위치 0.25H, 0.5H, 0.75H 에 따른 최대 휨강도
(시멘트 함유량 50%, 컨시스턴시 지수 0.5)



(d) 지오그리드 무보시, 보강위치 0.25H, 0.5H, 0.75H 에 따른 휨강도 실험 결과
(시멘트 함유량 50%, 컨시스턴시 지수 0.6)

(e) 지오그리드 무보시, 보강위치 0.25H, 0.5H, 0.75H 에 따른 최대 휨강도
(시멘트 함유량 50%, 컨시스턴시 지수 0.6)

<그림 3.7> 지오그리드 위치 변화에 따른 개량체 강도(시멘트 함유량 50%)

5. 수치해석 : 표층개량체와 심층개량체 보강효과 선검증

가. 해석 조건

- 표층개량부와 심층개량부의 상관관계를 파악하기 위하여 수치해석을 수행하였으며 수치해석 Case는 <표 3.10>와 같음

<표 3.10> 수치해석 Case

보강유무	표층개량부 두께	심층개량부 직경	심층개량부 길이
무보강	50, 100, 150, 300mm	표층개량부 두께와 동일	200, 250, 500, 750, 1000mm
지오그리드보강			

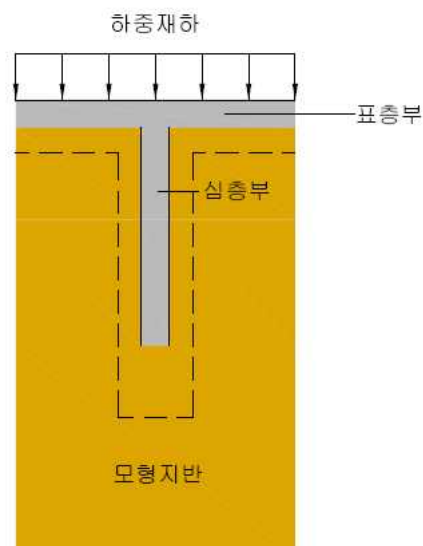
- 표층부개량부의 두께, 심층개량부 직경 및 길이를 변화시켜 해석을 수행하였으며, 수치해석에 적용된 물성치는 <표 3.11>, <표 3.12>과 같음

<표 3.11> 수치해석 적용 물성치 - 개량체, 지오그리드 및 고정유닛

개량체		지오그리드	고정유닛	
점착력 c (kN/m ²)	탄성계수 E (kPa)	탄성계수 E (kPa)	탄성계수 E (kPa)	길이 L (m)
350	150,000	2,500,000	200,000,000	0.1

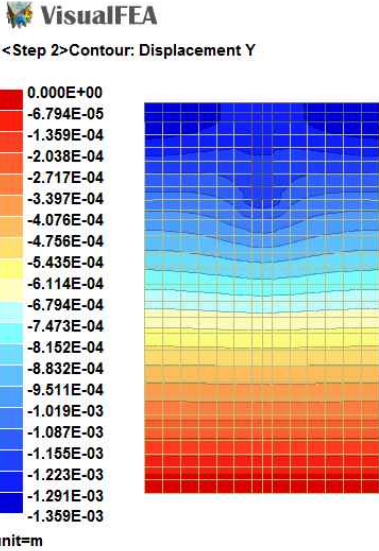
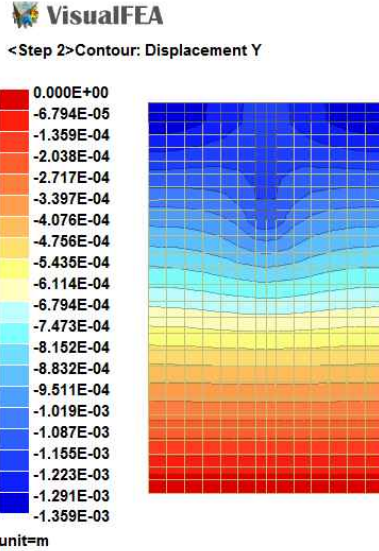
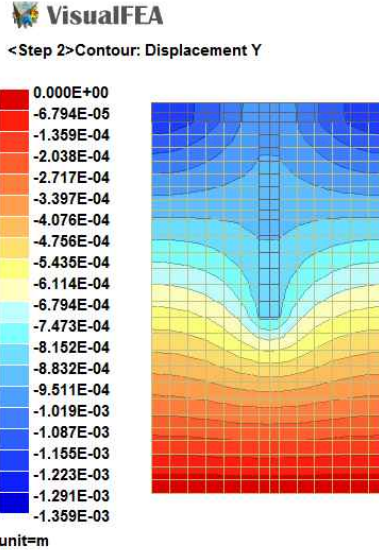
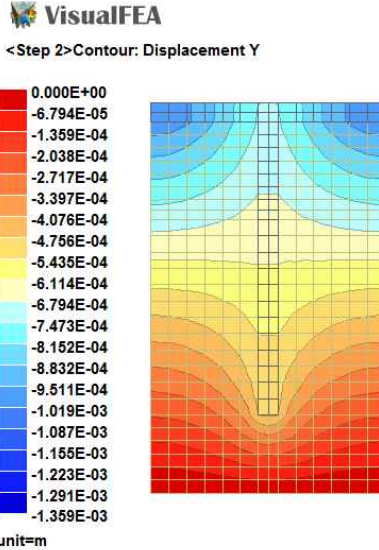
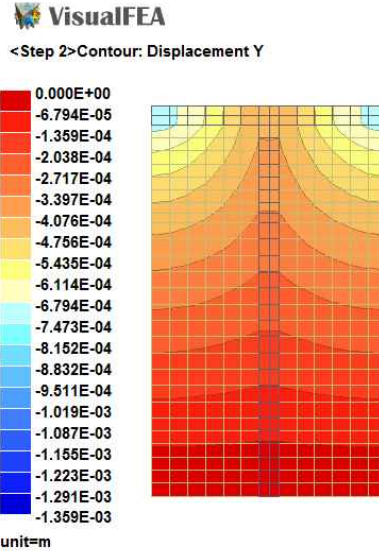
<표 3.12> 수치해석 적용물성치 - 지반정수

지반 정수		
단위중량 γ (kN/m ³)	점착력 c (kN/m ²)	탄성계수 E (kPa)
16	15	5,000

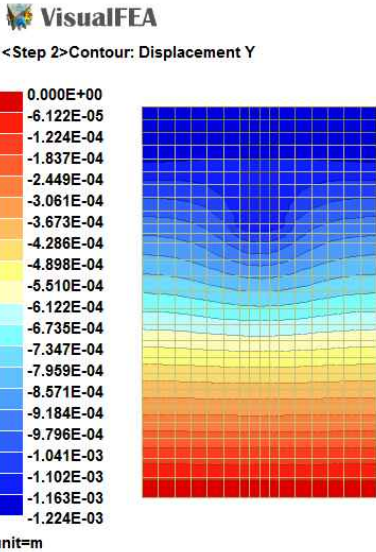
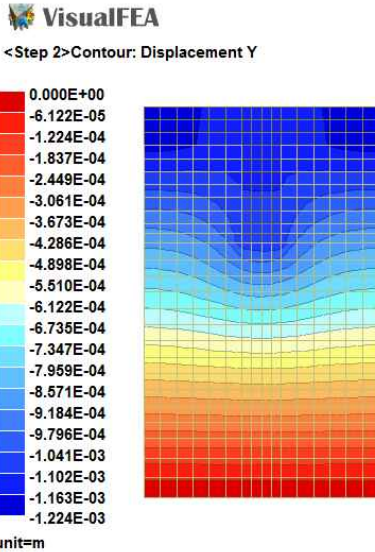
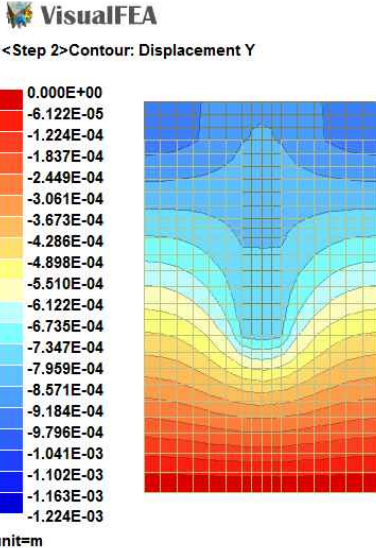
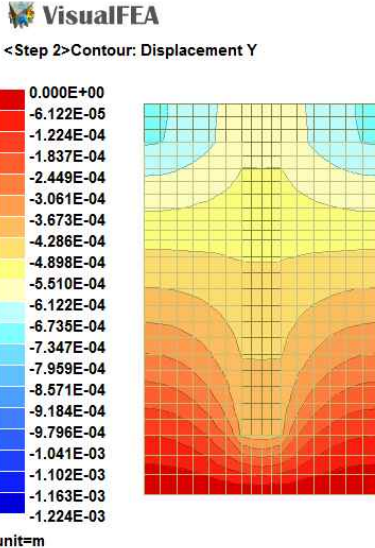
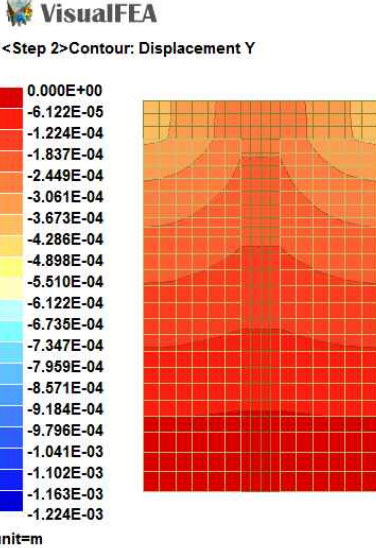


<그림 3.8> 수치해석 개요

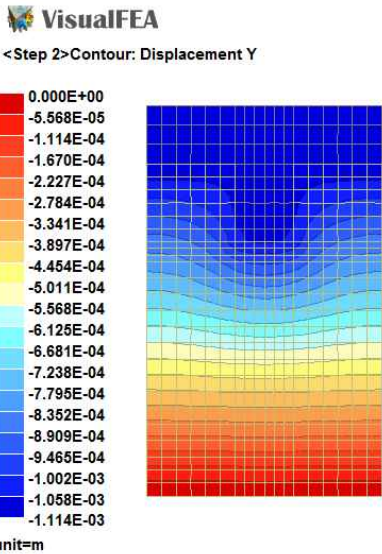
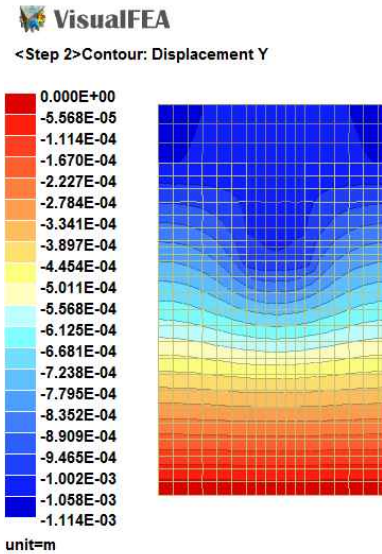
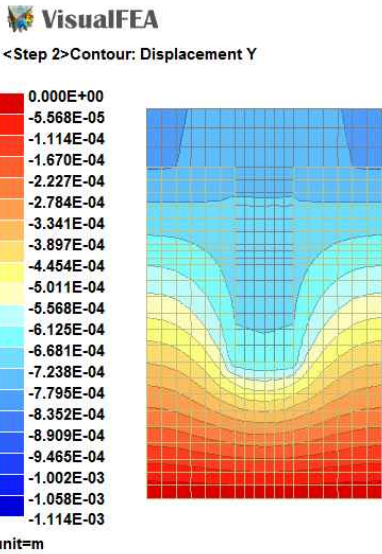
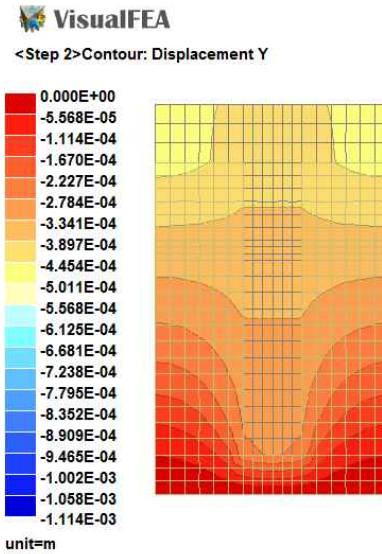
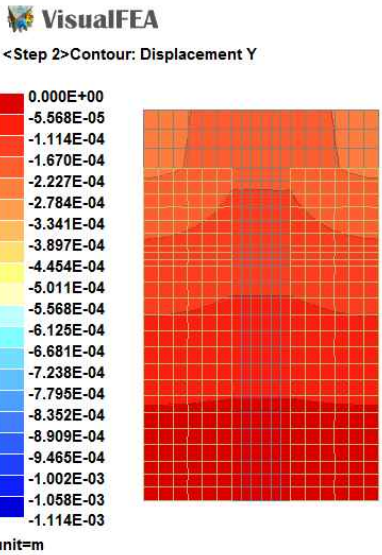
나. 해석 결과

Case	수직변위	
두께 50mm	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -6.794E-05 -1.359E-04 -2.038E-04 -2.717E-04 -3.397E-04 -4.076E-04 -4.756E-04 -5.435E-04 -6.114E-04 -6.794E-04 -7.473E-04 -8.152E-04 -8.832E-04 -9.511E-04 -1.019E-03 -1.087E-03 -1.155E-03 -1.223E-03 -1.291E-03 -1.359E-03 unit=m	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -6.794E-05 -1.359E-04 -2.038E-04 -2.717E-04 -3.397E-04 -4.076E-04 -4.756E-04 -5.435E-04 -6.114E-04 -6.794E-04 -7.473E-04 -8.152E-04 -8.832E-04 -9.511E-04 -1.019E-03 -1.087E-03 -1.155E-03 -1.223E-03 -1.291E-03 -1.359E-03 unit=m
	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -6.794E-05 -1.359E-04 -2.038E-04 -2.717E-04 -3.397E-04 -4.076E-04 -4.756E-04 -5.435E-04 -6.114E-04 -6.794E-04 -7.473E-04 -8.152E-04 -8.832E-04 -9.511E-04 -1.019E-03 -1.087E-03 -1.155E-03 -1.223E-03 -1.291E-03 -1.359E-03 unit=m	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -6.794E-05 -1.359E-04 -2.038E-04 -2.717E-04 -3.397E-04 -4.076E-04 -4.756E-04 -5.435E-04 -6.114E-04 -6.794E-04 -7.473E-04 -8.152E-04 -8.832E-04 -9.511E-04 -1.019E-03 -1.087E-03 -1.155E-03 -1.223E-03 -1.291E-03 -1.359E-03 unit=m
	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -6.794E-05 -1.359E-04 -2.038E-04 -2.717E-04 -3.397E-04 -4.076E-04 -4.756E-04 -5.435E-04 -6.114E-04 -6.794E-04 -7.473E-04 -8.152E-04 -8.832E-04 -9.511E-04 -1.019E-03 -1.087E-03 -1.155E-03 -1.223E-03 -1.291E-03 -1.359E-03 unit=m	

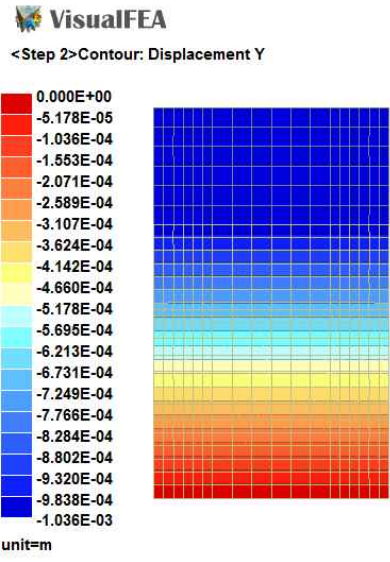
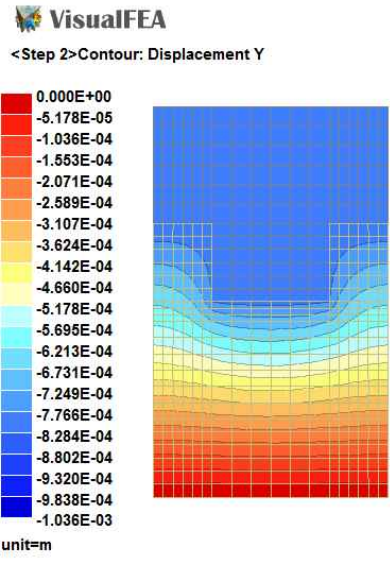
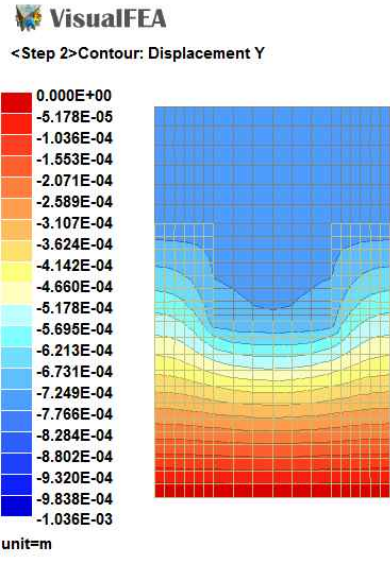
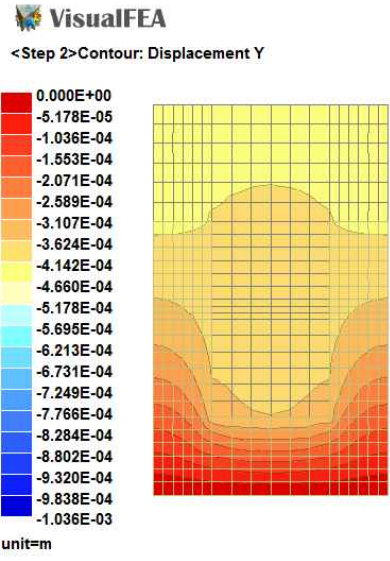
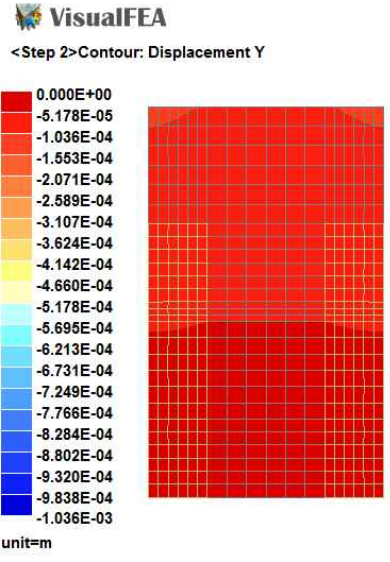
<그림 3.9> 수치해석 결과(직경 50mm)

Case	수직변위	
두께 100mm	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -6.122E-05 -1.224E-04 -1.837E-04 -2.449E-04 -3.061E-04 -3.673E-04 -4.286E-04 -4.898E-04 -5.510E-04 -6.122E-04 -6.735E-04 -7.347E-04 -7.959E-04 -8.571E-04 -9.184E-04 -9.796E-04 -1.041E-03 -1.102E-03 -1.163E-03 -1.224E-03 unit=m	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -6.122E-05 -1.224E-04 -1.837E-04 -2.449E-04 -3.061E-04 -3.673E-04 -4.286E-04 -4.898E-04 -5.510E-04 -6.122E-04 -6.735E-04 -7.347E-04 -7.959E-04 -8.571E-04 -9.184E-04 -9.796E-04 -1.041E-03 -1.102E-03 -1.163E-03 -1.224E-03 unit=m
	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -6.122E-05 -1.224E-04 -1.837E-04 -2.449E-04 -3.061E-04 -3.673E-04 -4.286E-04 -4.898E-04 -5.510E-04 -6.122E-04 -6.735E-04 -7.347E-04 -7.959E-04 -8.571E-04 -9.184E-04 -9.796E-04 -1.041E-03 -1.102E-03 -1.163E-03 -1.224E-03 unit=m	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -6.122E-05 -1.224E-04 -1.837E-04 -2.449E-04 -3.061E-04 -3.673E-04 -4.286E-04 -4.898E-04 -5.510E-04 -6.122E-04 -6.735E-04 -7.347E-04 -7.959E-04 -8.571E-04 -9.184E-04 -9.796E-04 -1.041E-03 -1.102E-03 -1.163E-03 -1.224E-03 unit=m
	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -6.122E-05 -1.224E-04 -1.837E-04 -2.449E-04 -3.061E-04 -3.673E-04 -4.286E-04 -4.898E-04 -5.510E-04 -6.122E-04 -6.735E-04 -7.347E-04 -7.959E-04 -8.571E-04 -9.184E-04 -9.796E-04 -1.041E-03 -1.102E-03 -1.163E-03 -1.224E-03 unit=m	

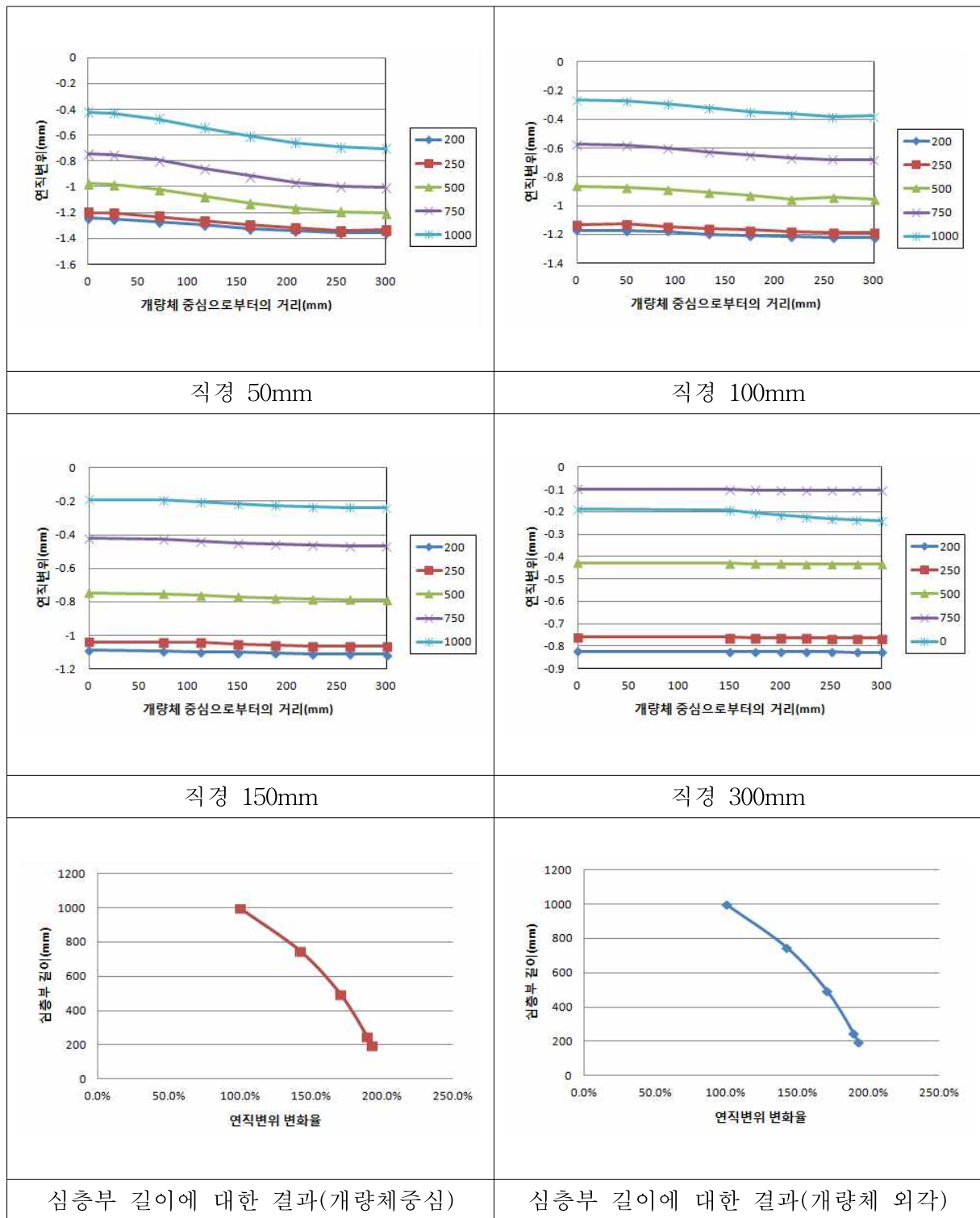
<그림 3.10> 수치해석 결과(직경 100mm)

Case	수직변위	
두께 150mm	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -5.568E-05 -1.114E-04 -1.670E-04 -2.227E-04 -2.784E-04 -3.341E-04 -3.897E-04 -4.454E-04 -5.011E-04 -5.568E-04 -6.125E-04 -6.681E-04 -7.238E-04 -7.795E-04 -8.352E-04 -8.909E-04 -9.465E-04 -1.002E-03 -1.058E-03 -1.114E-03 unit=m	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -5.568E-05 -1.114E-04 -1.670E-04 -2.227E-04 -2.784E-04 -3.341E-04 -3.897E-04 -4.454E-04 -5.011E-04 -5.568E-04 -6.125E-04 -6.681E-04 -7.238E-04 -7.795E-04 -8.352E-04 -8.909E-04 -9.465E-04 -1.002E-03 -1.058E-03 -1.114E-03 unit=m
	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -5.568E-05 -1.114E-04 -1.670E-04 -2.227E-04 -2.784E-04 -3.341E-04 -3.897E-04 -4.454E-04 -5.011E-04 -5.568E-04 -6.125E-04 -6.681E-04 -7.238E-04 -7.795E-04 -8.352E-04 -8.909E-04 -9.465E-04 -1.002E-03 -1.058E-03 -1.114E-03 unit=m	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -5.568E-05 -1.114E-04 -1.670E-04 -2.227E-04 -2.784E-04 -3.341E-04 -3.897E-04 -4.454E-04 -5.011E-04 -5.568E-04 -6.125E-04 -6.681E-04 -7.238E-04 -7.795E-04 -8.352E-04 -8.909E-04 -9.465E-04 -1.002E-03 -1.058E-03 -1.114E-03 unit=m
	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -5.568E-05 -1.114E-04 -1.670E-04 -2.227E-04 -2.784E-04 -3.341E-04 -3.897E-04 -4.454E-04 -5.011E-04 -5.568E-04 -6.125E-04 -6.681E-04 -7.238E-04 -7.795E-04 -8.352E-04 -8.909E-04 -9.465E-04 -1.002E-03 -1.058E-03 -1.114E-03 unit=m	

<그림 3.11> 수치해석 결과(직경 150mm)

Case	수직변위	
두께 300mm	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -5.178E-05 -1.036E-04 -1.553E-04 -2.071E-04 -2.589E-04 -3.107E-04 -3.624E-04 -4.142E-04 -4.660E-04 -5.178E-04 -5.695E-04 -6.213E-04 -6.731E-04 -7.249E-04 -7.766E-04 -8.284E-04 -8.802E-04 -9.320E-04 -9.838E-04 -1.036E-03 unit=m	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -5.178E-05 -1.036E-04 -1.553E-04 -2.071E-04 -2.589E-04 -3.107E-04 -3.624E-04 -4.142E-04 -4.660E-04 -5.178E-04 -5.695E-04 -6.213E-04 -6.731E-04 -7.249E-04 -7.766E-04 -8.284E-04 -8.802E-04 -9.320E-04 -9.838E-04 -1.036E-03 unit=m
	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -5.178E-05 -1.036E-04 -1.553E-04 -2.071E-04 -2.589E-04 -3.107E-04 -3.624E-04 -4.142E-04 -4.660E-04 -5.178E-04 -5.695E-04 -6.213E-04 -6.731E-04 -7.249E-04 -7.766E-04 -8.284E-04 -8.802E-04 -9.320E-04 -9.838E-04 -1.036E-03 unit=m	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -5.178E-05 -1.036E-04 -1.553E-04 -2.071E-04 -2.589E-04 -3.107E-04 -3.624E-04 -4.142E-04 -4.660E-04 -5.178E-04 -5.695E-04 -6.213E-04 -6.731E-04 -7.249E-04 -7.766E-04 -8.284E-04 -8.802E-04 -9.320E-04 -9.838E-04 -1.036E-03 unit=m
	 VisualFEA <Step 2>Contour: Displacement Y 0.000E+00 -5.178E-05 -1.036E-04 -1.553E-04 -2.071E-04 -2.589E-04 -3.107E-04 -3.624E-04 -4.142E-04 -4.660E-04 -5.178E-04 -5.695E-04 -6.213E-04 -6.731E-04 -7.249E-04 -7.766E-04 -8.284E-04 -8.802E-04 -9.320E-04 -9.838E-04 -1.036E-03 unit=m	

<그림 3.12> 수치해석 결과(직경 300mm)



<그림 3.13> 수치해석 결과

- 검토결과 표층개량체는 개량체 중심으로부터 2D~3D내외로 이격되어진 위치부터 개량체 중심으로 부터의 거리-연직변위 곡선의 변곡점이 나타났음
- 개량체 중심으로부터 이격거리는 C.T.C로 환산시 동일한 수치 이며, 이에 따라 심층개량체의 C.T.C 범위는 2D~3D가 적정할 것으로 판단됨
- 심층개량체의 설치 깊이는 최소 15D 이상 설치되어야 침하에 대한 안정성을 확보하는 것으로 판단됨

6. 실내 모형 실험 : 모형실험에 의한 표층개량체와 심층개량체 보강효과 검증

가. 실험 조건

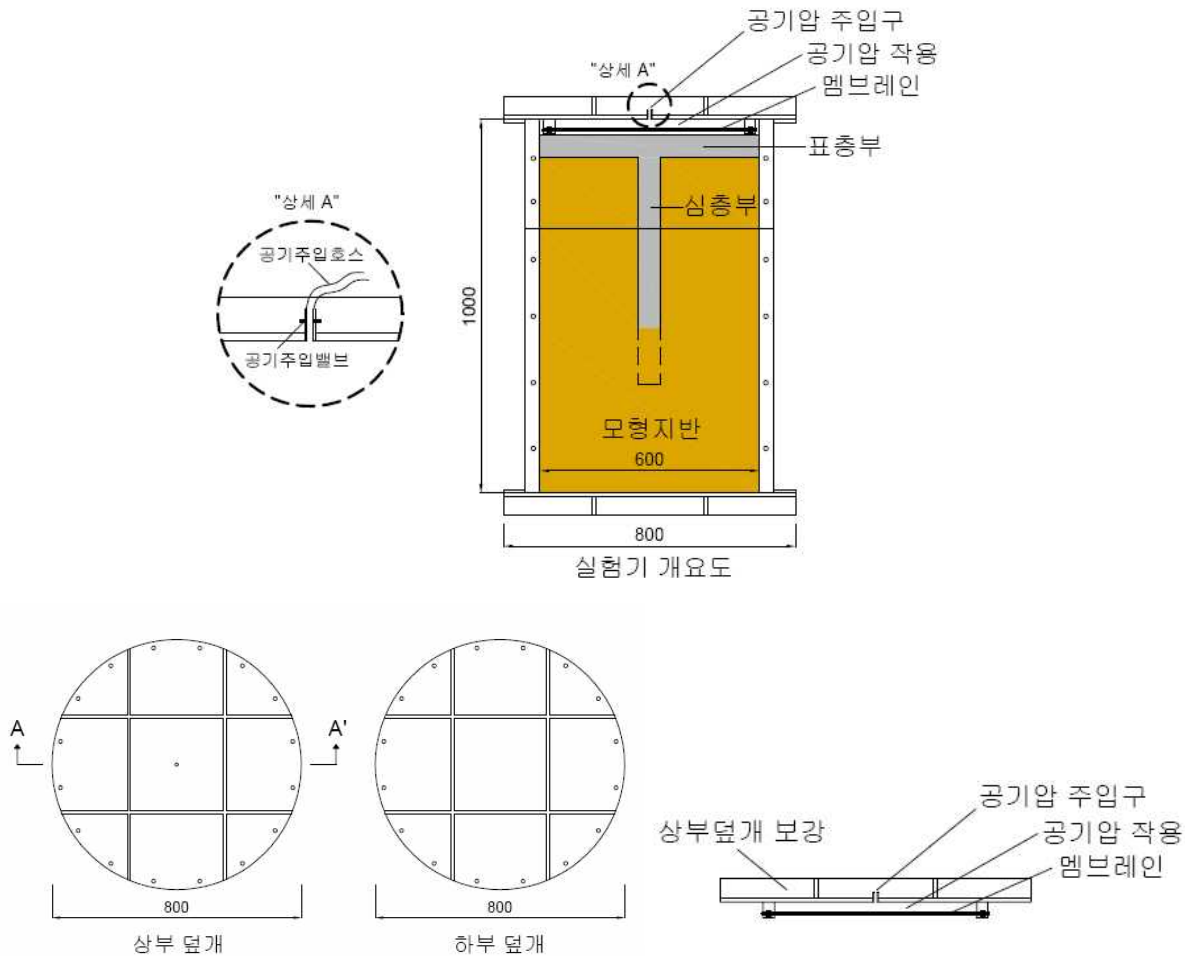
- 표층개량부와 심층개량부의 상관관계를 파악하기 위하여 실내 모형실험을 수행하였으며 모형실험 CASE는 다음 <표 3.13>와 같다.

<표 3.13> 실내모형실험 실험조건

구 분	표층개량부 두께 (T, mm)	심층개량부 직경 (D, mm)	심층개량부 길이 (L, mm)
무보강	25, 50	25, 50	200, 250, 500, 750, 1000
지오그리드 보강			

나. 모형 실험기

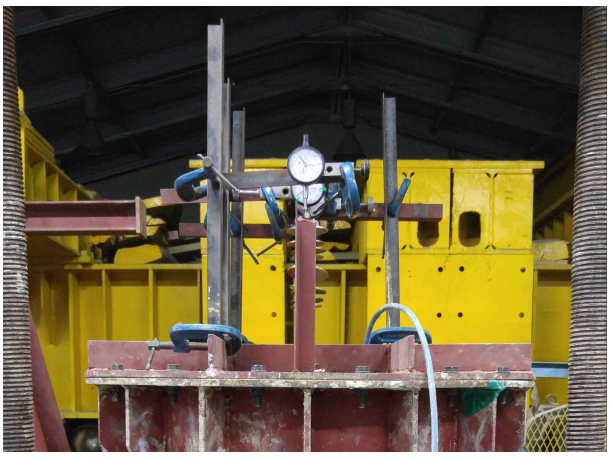
- 실험장치는 강체로 제작하여 상·하부 덮개와 중간 원통부로 구성되며 상부 덮개는 멤브레인을 장착하여 공기압으로 등분포하중이 재하될 수 있도록 하였다.



<그림 3.14> 실험기 개요

다. 실험 방법

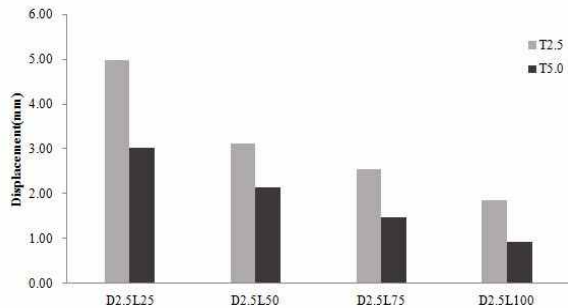
- 모형지반은 점토와 유사한 بنت나이트를 사용하여 조성하고 표층개랑부와 심층개랑체는 점토와 시멘트를 혼합하여 모사하였다.
- 실험 순서는 ①모형지반을 조성, ②심층개랑체가 타설될 위치에 홀 조성, ③개랑체 타설, ④가압판 조립, ⑤변위계 설치 및 하중재하, ⑥개랑체 확인의 순서로 진행하였다.

	
① 모형지반 조성	② 개랑체 타설 준비
	
③ 개랑체 타설	④ 가압판 조립 및 변위계 설치
	
⑤ 하중재하	⑥ 개랑체 확인

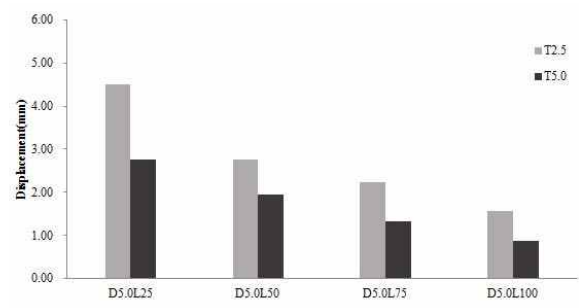
<그림 3.15> 모형실험 순서

라. 실험 결과

- <그림 3.16>에서 지오그리드 무보강시 표층부 두께에 따른 거동은 표층부 두께가 증가할수록 변위가 감소하고 심층 개량부의 심도가 증가함에 따라 선형적으로 침하량이 감소였고, <그림 3.17>와 같이 심층부 직경에 따른 거동은 표층부의 두께가 동일하고 심층부의 직경이 증가할 경우 침하량이 감소하는 것을 확인

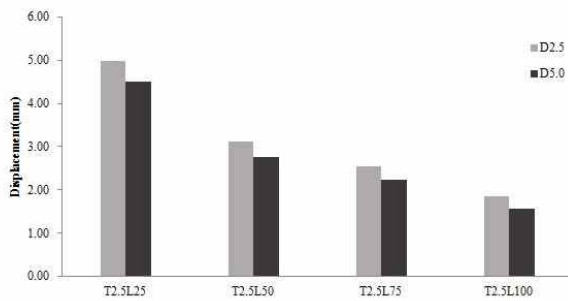


(a) 심층 개량부 직경 25mm

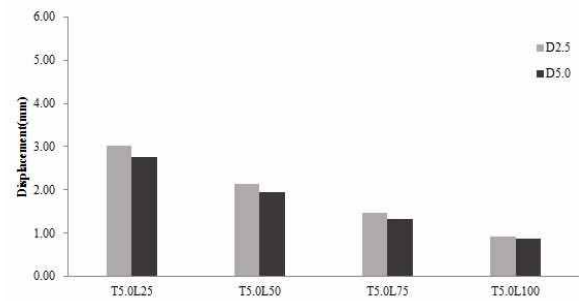


(b) 심층 개량부 직경 50mm

<그림 3.16> 표층부 두께에 따른 침하 경향



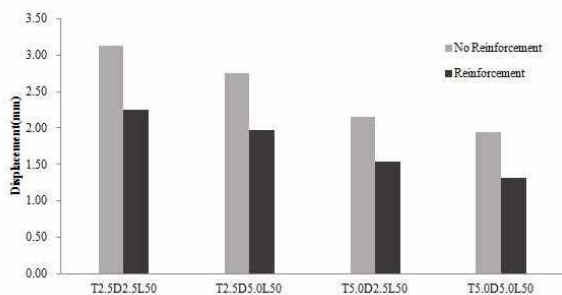
(a) 표층부 두께 25mm



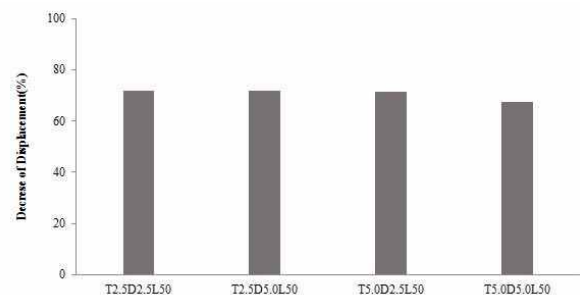
(b) 표층부 두께 50mm

<그림 3.17> 심층부 직경에 따른 침하 경향

- 지오그리드를 보강할 경우(그림 3.18) 모든 Case에서 무보강시보다 침하량이 약 28~32% 저감하는 것을 확인하였으며, 이는 하중재하에 의해 표층부에 설치한 모형지오그리드의 인장저항력이 발생되고 모형지반 및 개량체에 구속응력으로 작용하여 강도 및 강성이 증가한 것으로 판단됨



(a) 지오그리드 무보강 및 보강시 침하경향



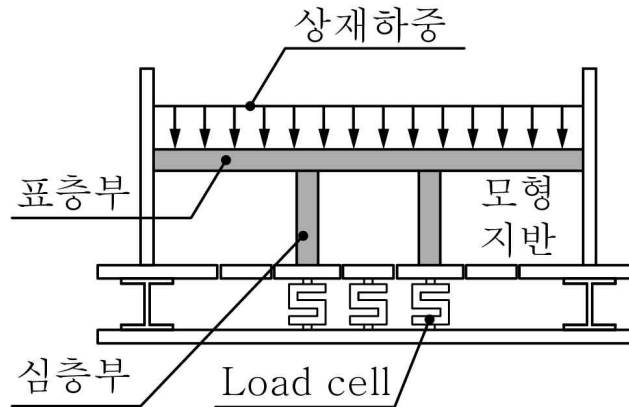
(b) 지오그리드 보강/무보강 비율

<그림 3.18> 지오그리드 보강에 따른 침하 경향

7. 실내 모형 실험 : 심층개량체의 하중분담을 확인을 위한 거동특성 분석

가. 실험 목적

- 본 실내 모형실험의 목적은 표층부와 심층부 보강에 대한 상관관계 및 심층부의 하중 분담에 관한 거동을 확인하기 위함으로 <그림 3.19>와 같이 개량체를 조성한 모형지반에 표층부에 하중재하를 통하여 심층개량부에서 작용하는 하중을 측정 한 후 이에 대한 하중분담 효과를 규명함.



<그림 3.19> 실내 모형 실험 개요도

나. 실험 조건

- 표층개량부와 심층개량부의 상관관계를 파악하기 위하여 실내 모형실험을 수행하였으며 모형실험 CASE는 <표 3.14>와 같음

<표 3.14> 실내모형실험 실험조건

구 분	모형지반 심도 (mm)	심층개량부 길이 (mm)	표층두께 및 심층개량부 직경 (mm)	심층개량부 간격 (mm)
지오그리드 보강	800	500	100, 150, 200	400

- 하중재하 방법은 공기압을 상부에 주입하는 방식으로 크기는 0.02MPa씩 증가시켜 최대 0.1MPa까지 재하 하였음(표 3.15)
- 하중분담율에 대한 산정은 상부 재하 하중에서 하부 로드셀에 측정되는 하중을 기준으로 심층 개량부 및 모형지반이 부담하는 하중과 표층부가 부담하는 하중으로 구분함

<표 3.15> 하중재하 조건

구 분	단계별 재하	최대 하중
하중	20kN/m ²	100kN/m ²

다. 모형 실험기

- 모형실험기는 모형지반과 개량체를 확인 할 수 있도록 투명아크릴로 제작하고 공기압에 의한 변형 방지를 위하여 강재로 보강하였으며, 하부에 심층부의 하중이 전달되는 과정을 확인할 수 있도록 로드셀을 설치하였음(그림 3.20)



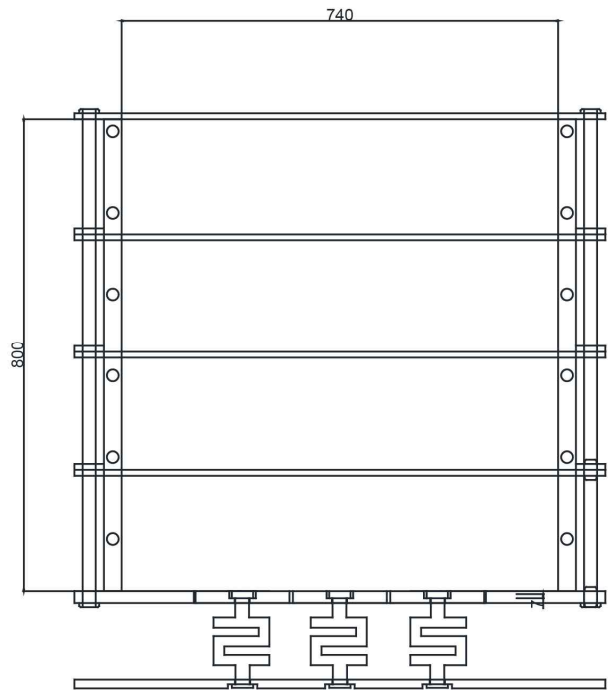
① 하부 하중측정판 제작



② 상부 아크릴 제작



③ 외부 강재 보강 및 시험기 조립



④ 시험기 개요도

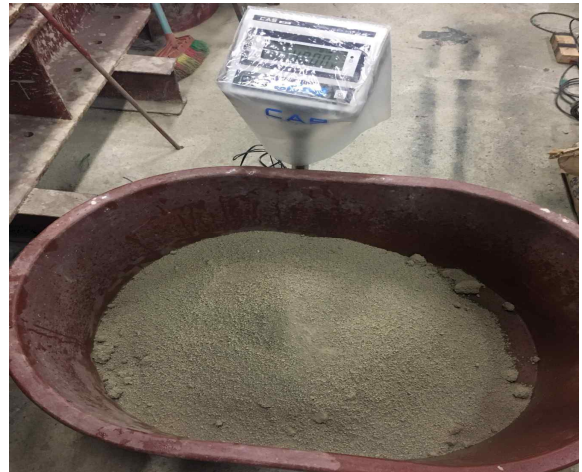
<그림 3.20> 하중분담율 실험을 위한 모형시험기

라. 실험 방법

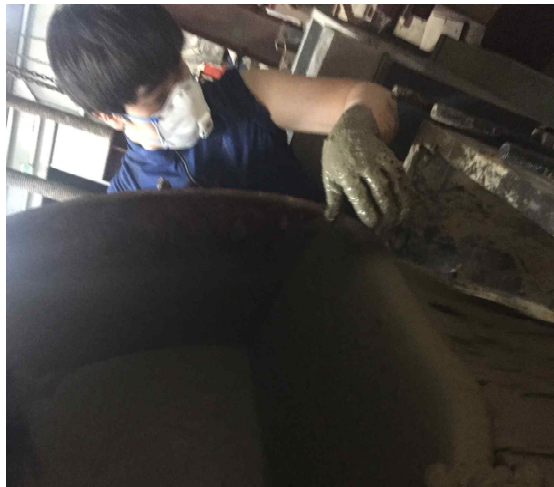
- 모형지반은 점토와 유사한 بنت나이트를 사용하여 조성하고 표층개량부와 심층개량체는 점토와 시멘트를 혼합하여 모사함
- 실험 순서는 ①모형지반을 조성, ②개량체 타설, ③가압판 조립, ④하중재하 ⑤개량체 확인의 순서로 진행



① 실험기 준비



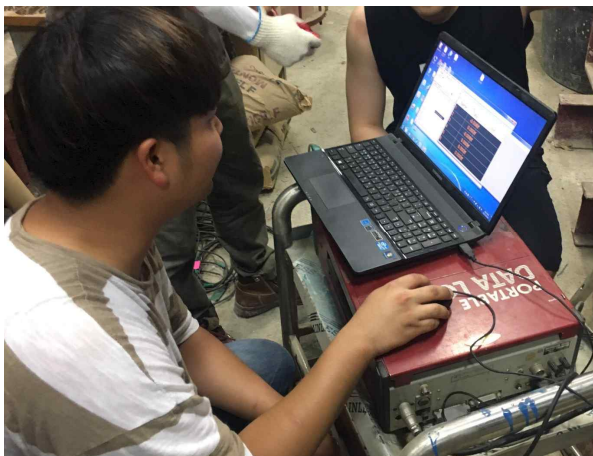
② 개량체 타설 준비



③ 모형지반 조성 및 개량체 타설



④ 가압판 조립



⑤ 하중재하

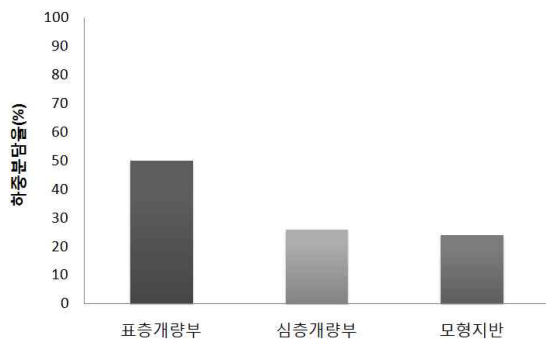


⑥ 개량체 확인

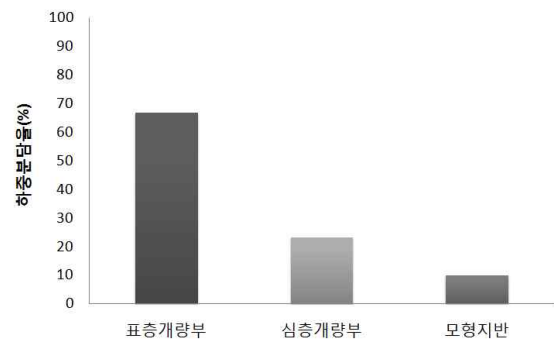
<그림 3.21> 모형실험 순서

마. 실험 결과

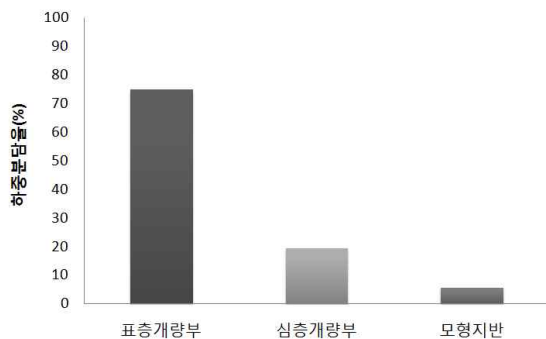
- 실험결과는 <그림 3.22>와 같으며 표층부 두께 및 심층부 개량부 직경 100mm인 경우 하중분담율은 표층부 50%, 심층부 26%, 모형지반 24%, 표층부 두께 및 심층부 개량부 직경 150mm인 경우 하중 분담율은 표층부 66.7%, 심층부 23.3%, 모형지반 10%, 표층부 두께 및 심층부 개량부 직경 200mm인 경우 하중 분담율은 표층부 75%, 심층부 19.4%, 모형지반 5.6%로 나타남
- 표층 두께 및 심층 개량부 직경이 증가함에 따라 표층개량부의 하중분담율이 커짐과 동시에 지반의 하중분담율이 작아지고, 그 값은 일정하게 수렴하는 경향인 것으로 판단됨
- 기존 혼합처리 공법과 표층 처리공법에서 실제로 적용되는 표층 두께 및 심층 개량부 직경은 1000mm 내외이며, 본 연구에서 개발한 공법 또한 기존 공법과 동일한 장비를 사용하여야 하기 때문에 표층 두께 및 심층 개량부의 직경은 기존 공법과 동일한 사이즈로 시공 되어야 함
- 모형실험의 경향으로 미루어보았을 때 모형실험의 규모보다 5배 이상 큰 실제 규모에서의 하중은 대부분 표층개량부와 심층개량부가 받고, 모형지반에 가해지는 하중은 매우 적을 것으로 판단됨



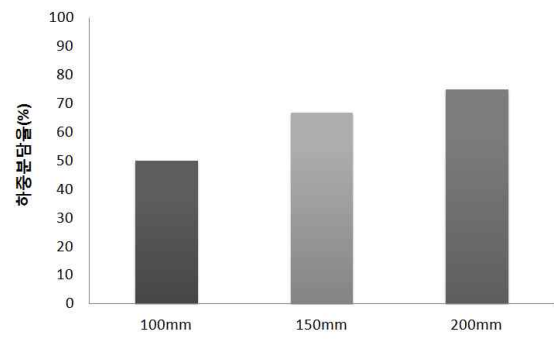
(a) 표층두께 및 심층 개량부 직경 100mm



(b) 표층두께 및 심층 개량부 직경 150mm



(c) 표층두께 및 심층 개량부 직경 200mm



(d) 표층두께 및 심층 개량부 직경에 따른 표층 개량부 하중분담율

<그림 3.22> 하중분담율 실험 결과

8. 수치해석 : 공법 Case 검토

가. 해석 목적

- 수치해석 및 모형실험으로 공법의 성능과 각 요소간의 상관관계를 파악하였으며, 향후 설계 및 시공시의 근거 확립을 위해 다양한 공법 Case 에서의 수치해석을 실시함

나. 수치해석 조건

- 해석프로그램은 (주)마이다스아이티의 Soil Works 연약지반 모듈이며, 해석 인터페이스가 간편해 다양한 Case에 대한 해석을 실시하기에 적절한 프로그램으로 이를 활용하여 해석을 실시
- 수치해석 조건은 <표 3.16>~<표 3.18> 와 같음

<표 3.16> 성토재 및 지반 입력조건

성토재			지반			
단위중량, γ (kN/m ³)	성토고 H (m)	내부마찰각 ϕ (deg)	심도 D (m)	단위중량, γ (kN/m ³)	점착력 c (kN/m ²)	탄성계수 E (kPa)
19	5	30	60	16	15	5,000

<표 3.17> 개량체, 지오그리드 및 고정유닛 입력조건

개량체				지오그리드			고정유닛	
개량체 직경, D (m)	간격 λ (m)	점착력 c (kN/m ²)	탄성계수 E (kPa)	탄성계수 E (kPa)	폭 B (m)	높이 H (m)	탄성계수 E (kPa)	길이 L (m)
1.0	2.5	350	150,000	2,500,000	0.1	0.02	200,000,000	6.5

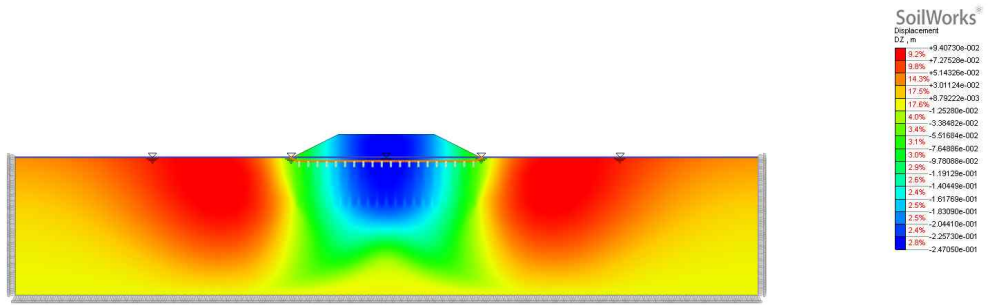
<표 3.18> 개량체, 지오그리드 및 고정유닛 입력조건

구 분	적 용
성토고	5.0m
표층 두께	1.0m
말뚝 직경	0.8m, 1.0m, 1.2m
C.T.C	2.0m, 2.5m, 3.0m
연약지반	30m
보강심도	10m, 15m, 20m, 25m
그리드 위치	0.125H(H : 표층 두께)
그리드 두께	0.02m
고정유닛 길이	1.0m
지하수위	GL. 0.0m
배수조건	비배수

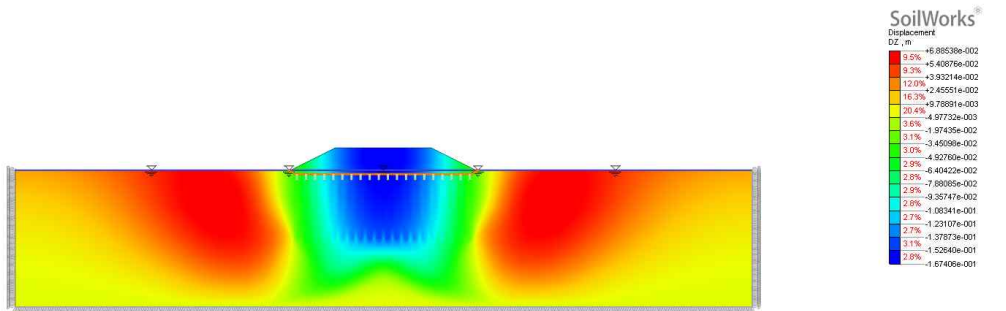
다. 해석 결과 - 직경/C.T.C/보강심도에 따른 변위

<표 3.19> 말뚝 직경/C.T.C/보강심도에 따른 변위

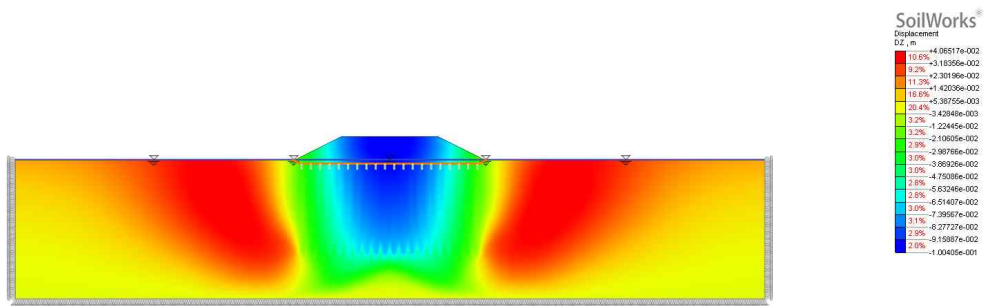
직 경(m)	C.T.C(m)	보강 심도(m)	변 위(cm)
0.8	2.0	10	24.7
		15	16.7
		20	10.0
		25	5.4
	2.5	10	27.7
		15	18.4
		20	11.7
		25	6.7
	3.0	10	30.2
		15	20.2
		20	12.9
		25	7.8
1.0	2.0	10	24.1
		15	16.3
		20	9.5
		25	4.8
	2.5	10	26.3
		15	17.7
		20	10.8
		25	5.9
	3.0	10	28.8
		15	18.8
		20	11.9
		25	6.9
1.2	2.0	10	23.7
		15	15.9
		20	9.1
		25	4.3
	2.5	10	25.5
		15	17.1
		20	10.3
		25	5.3
	3.0	10	27.9
		15	18.3
		20	11.3
		25	6.2



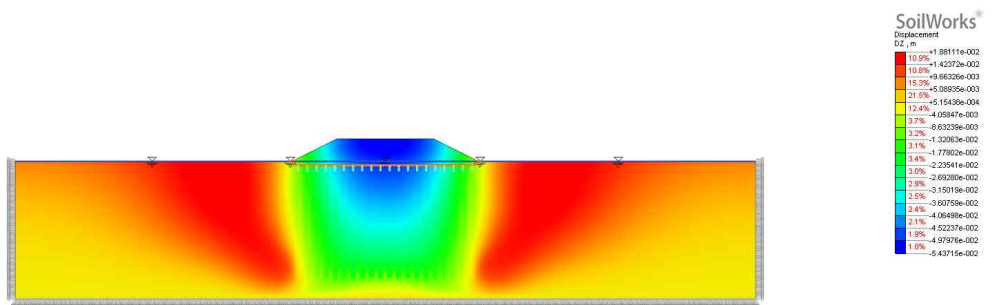
(a) 보강심도 10m



(b) 보강심도 15m

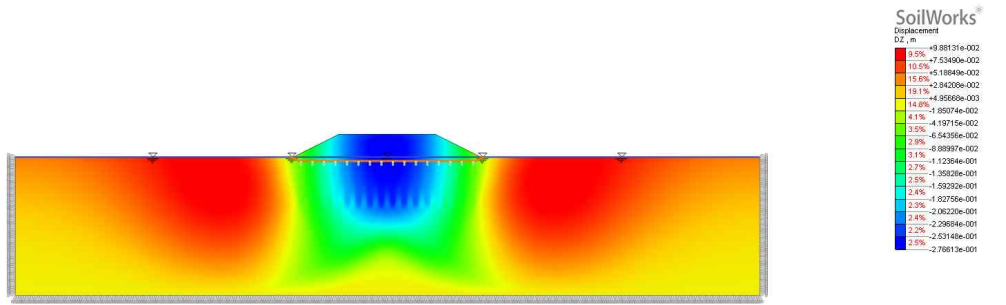


(c) 보강심도 20m

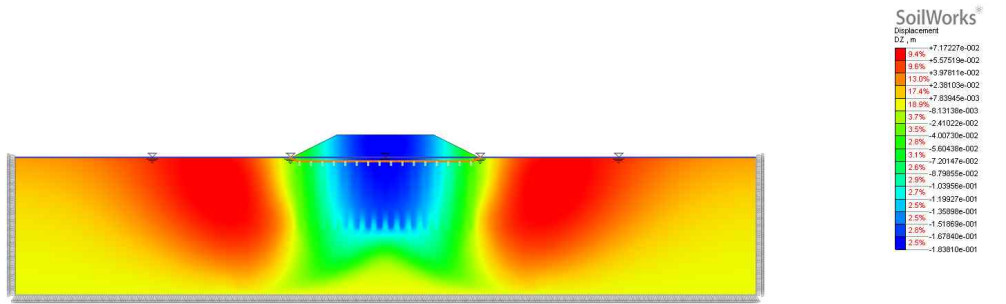


(d) 보강심도 25m

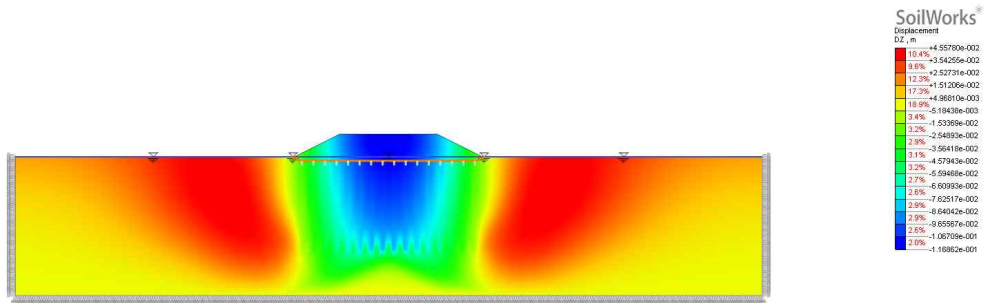
<그림 3.23> 말뚝 직경 0.8m, C.T.C 2.0m 침하 분포



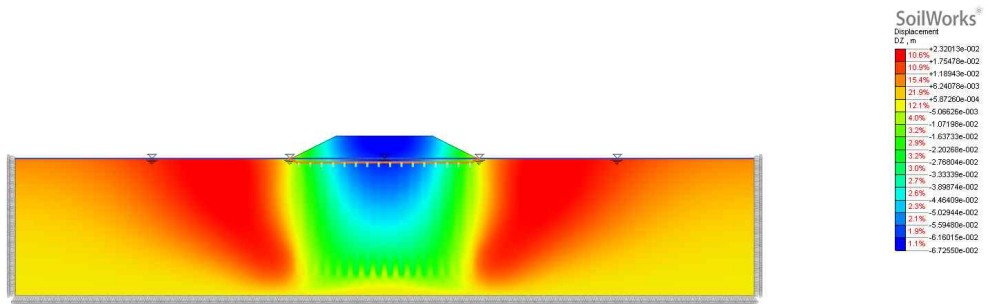
(a) 보강심도 10m



(b) 보강심도 15m

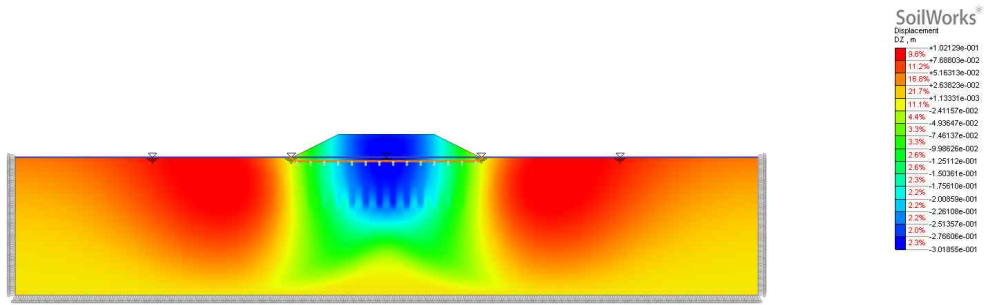


(c) 보강심도 20m

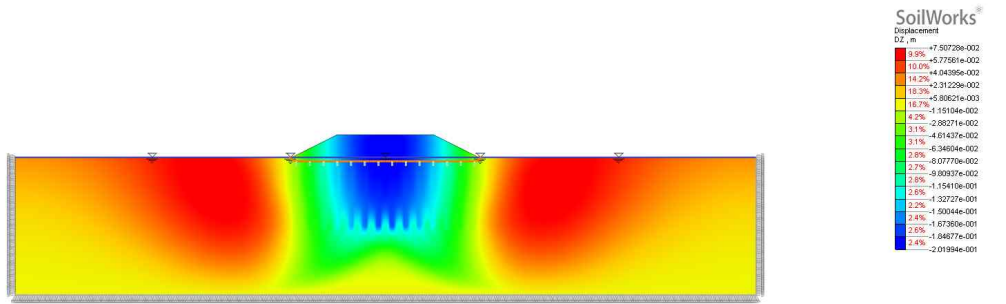


(d) 보강심도 25m

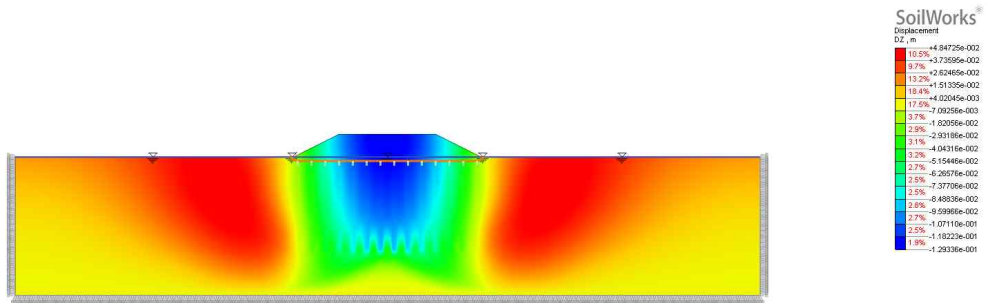
<그림 3.24> 말뚝 직경 0.8m, C.T.C 2.5m 침하 분포



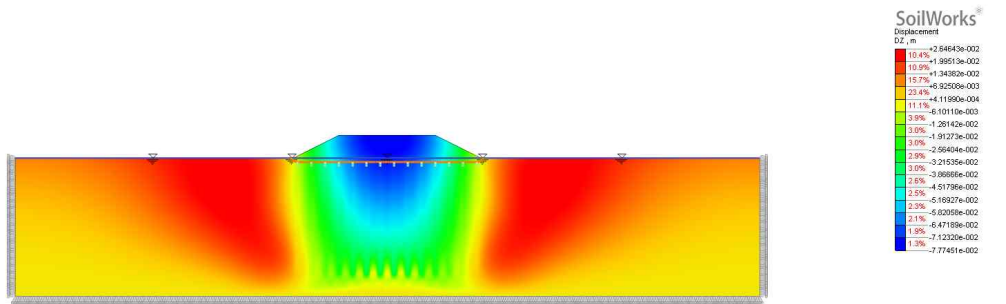
(a) 보강심도 10m



(b) 보강심도 15m

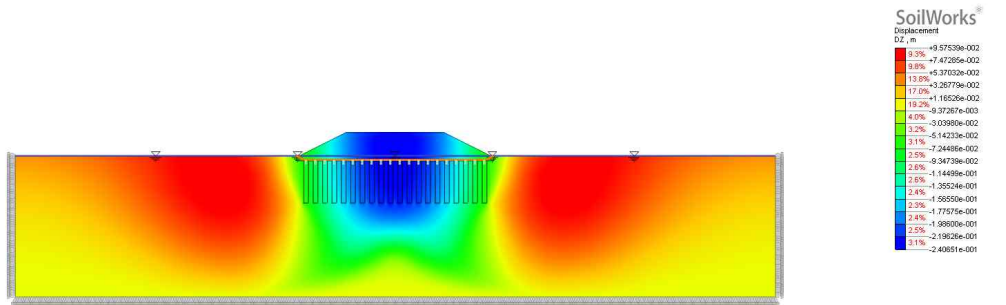


(c) 보강심도 20m

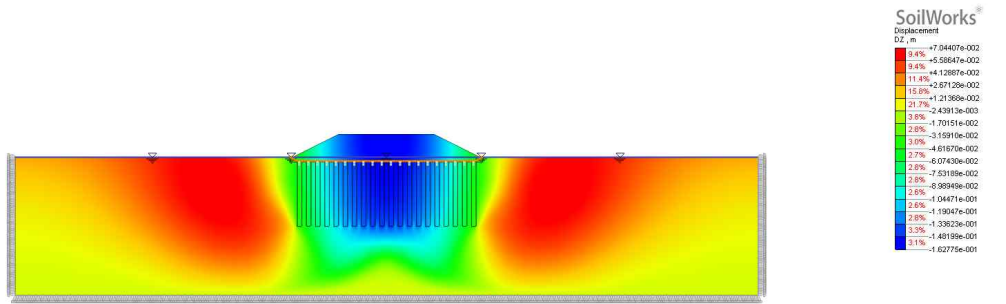


(d) 보강심도 25m

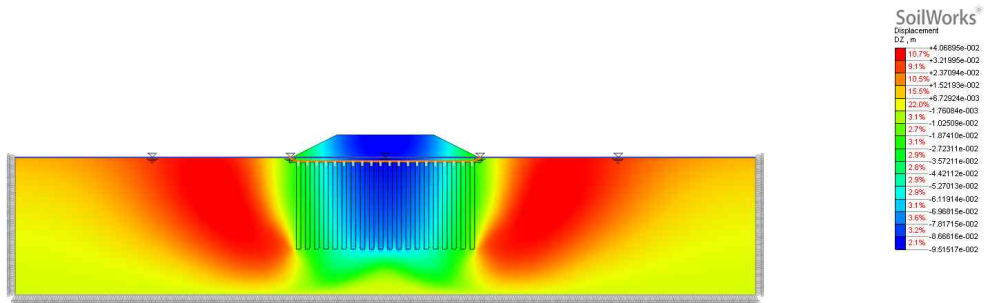
<그림 3.25> 말뚝 직경 0.8m, C.T.C 3.0m 침하 분포



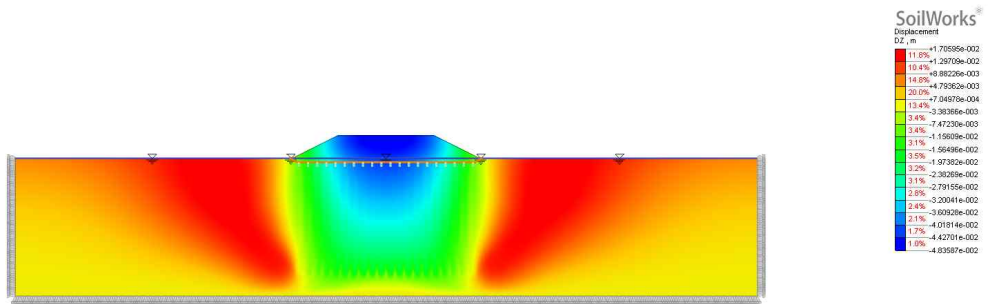
(a) 보강심도 10m



(b) 보강심도 15m

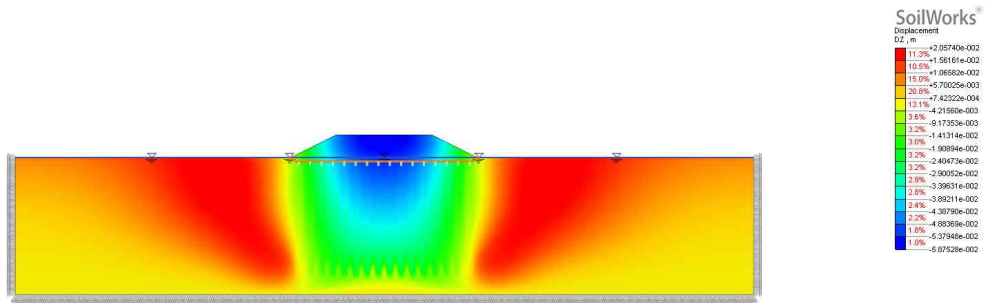


(c) 보강심도 20m

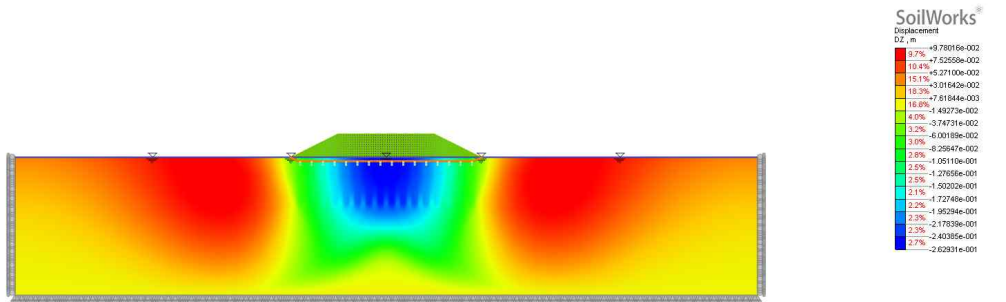


(d) 보강심도 25m

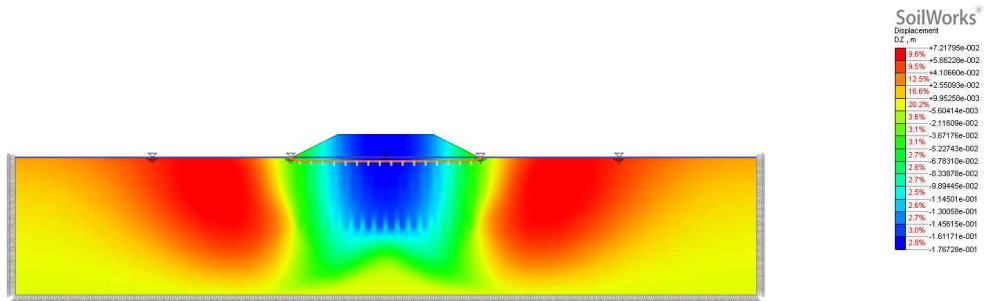
<그림 3.26> 말뚝 직경 1.0m, C.T.C 2.0m 침하 분포



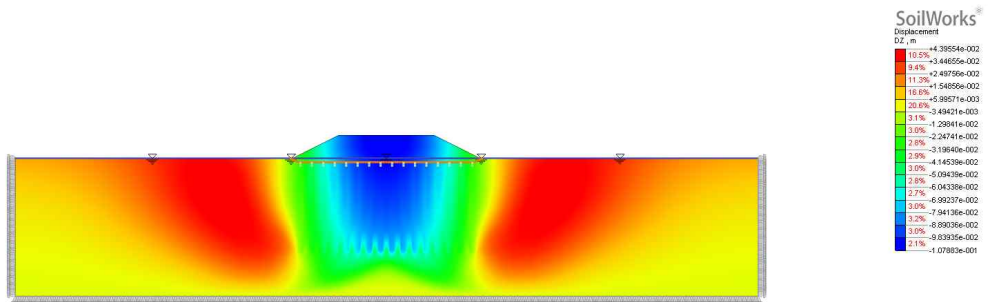
(a) 보강심도 10m



(b) 보강심도 15m

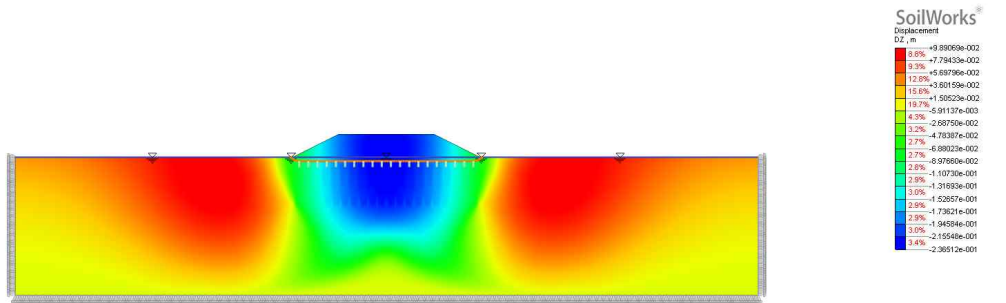


(c) 보강심도 20m

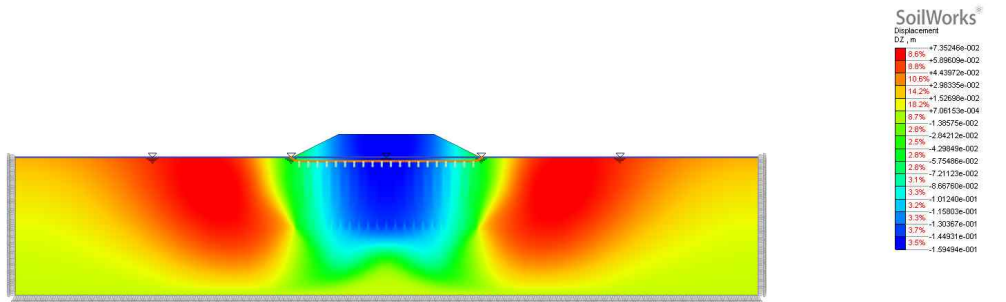


(d) 보강심도 25m

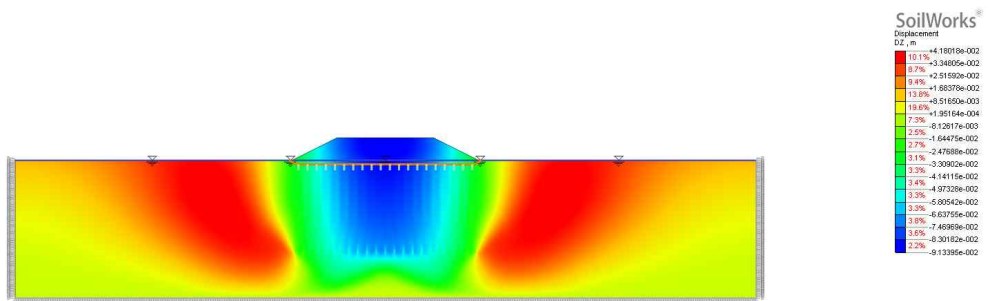
<그림 3.27> 말뚝 직경 1.0m, C.T.C 2.5m 침하 분포



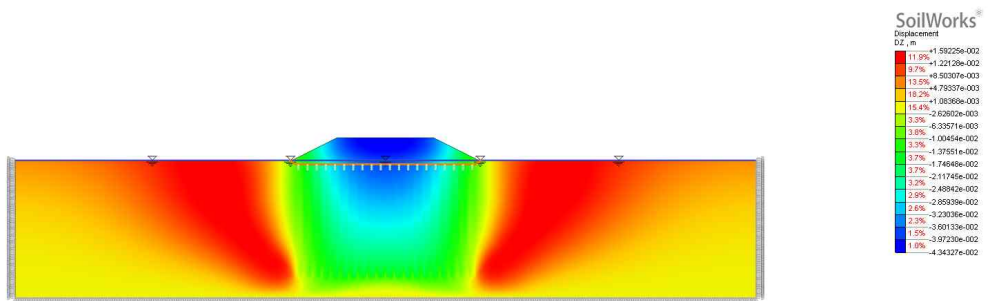
(a) 보강심도 10m



(b) 보강심도 15m

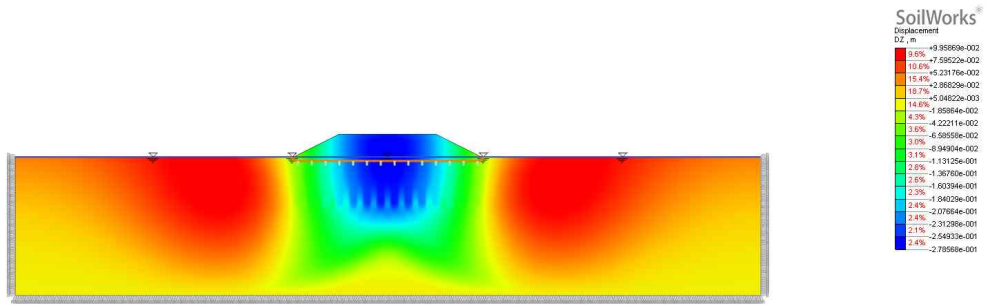


(c) 보강심도 20m

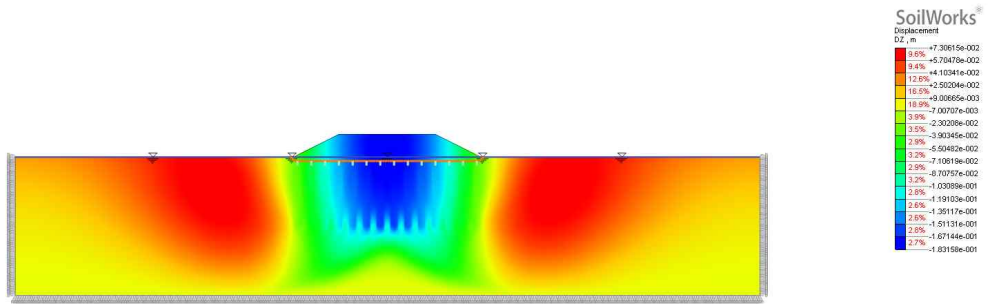


(d) 보강심도 25m

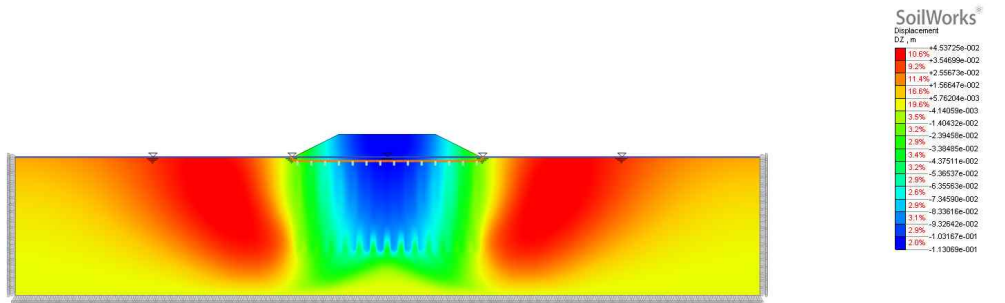
<그림 3.29> 말뚝 직경 1.2m, C.T.C 2.0m 침하 분포



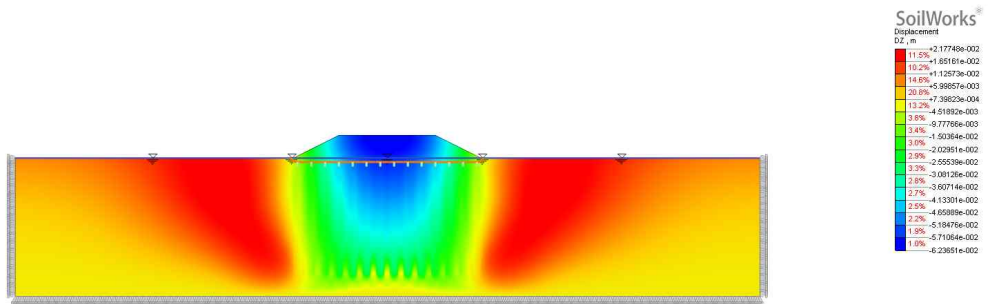
(a) 보강심도 10m



(b) 보강심도 15m



(c) 보강심도 20m

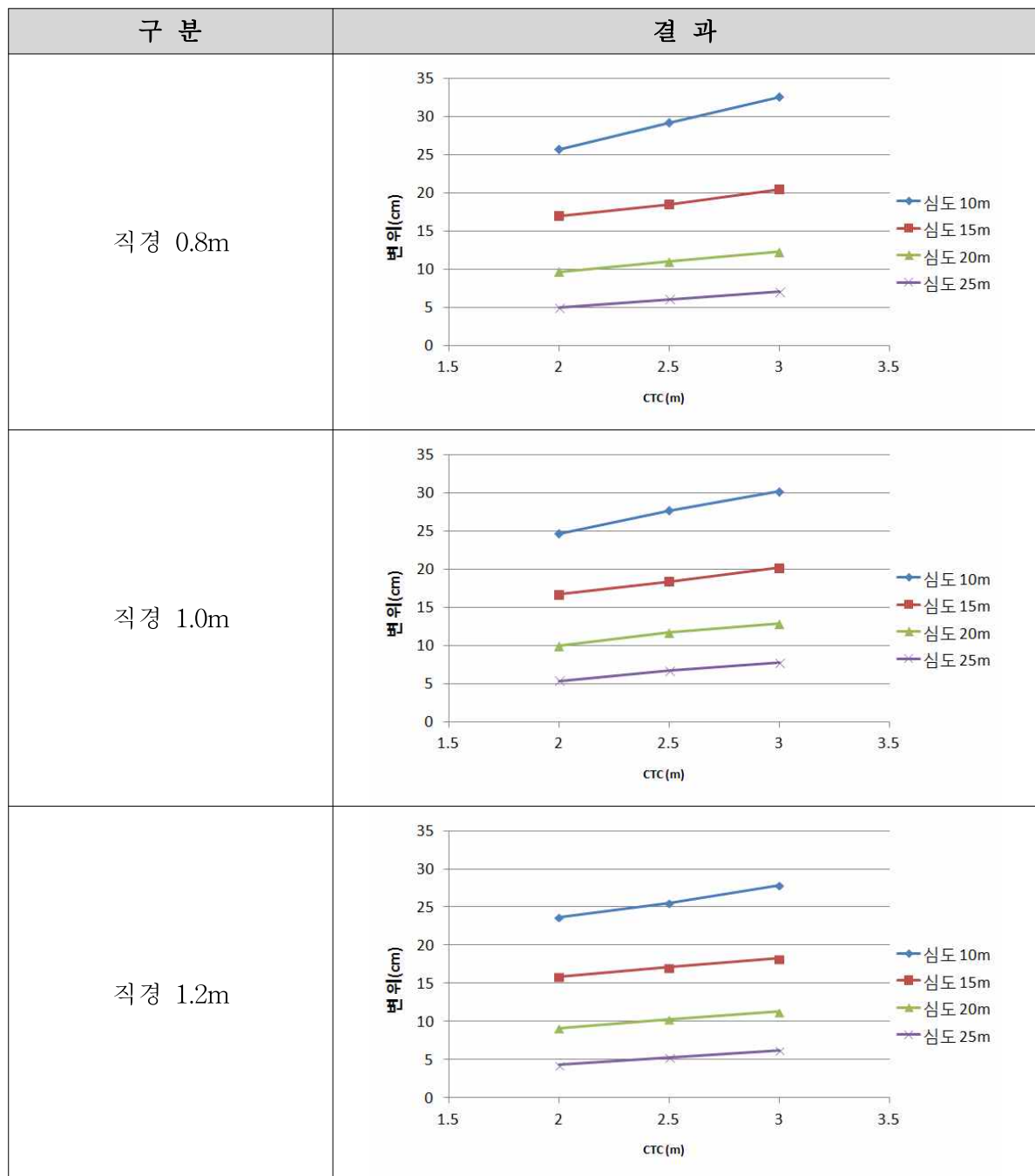


(d) 보강심도 25m

<그림 3.31> 말뚝 직경 0.8m, C.T.C 2.5m 침하 분포

라. 결과 분석

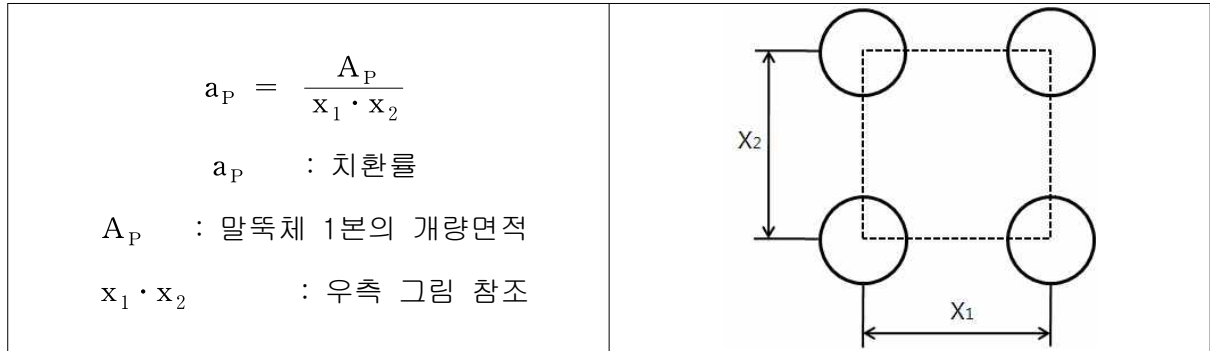
- 해석 결과 직경이 증가할수록 침하량은 감소하나 그 차이는 미미하므로 DCM 공법에
서 일반적으로 쓰이는 장비를 적용하여도 문제가 없을 것으로 판단됨
- 개량심도가 증가할수록 침하량은 감소하는 경향이며 변곡점은 연약지반 심도 대비 약
60%~80%(그래프상 20m~25m)에서 발생
- C.T.C가 증가함에 따라 침하량은 증가하며 C.T.C는 2~2.5 사이가 적절할 것으로 판
단됨



<그림 3.32> 직경/C.T.C/보강심도에 따른 변위

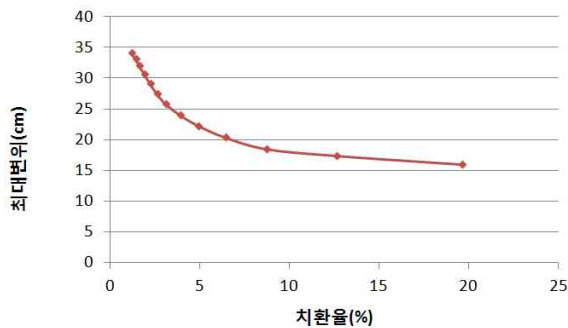
마. 치환율에 따른 변위

- 혼합처리 공법에서의 성능 및 경제성 검토는 일반적으로 치환율로 표현됨
- 치환율에 따른 침하량 및 각변위 확인하기 위하여 말뚝 직경을 1.0m, 심층 개량심도를 연약지반 심도 대비 66%로 고정하고 C.T.C 변화에 따른 치환율을 계산(그림 3.33)

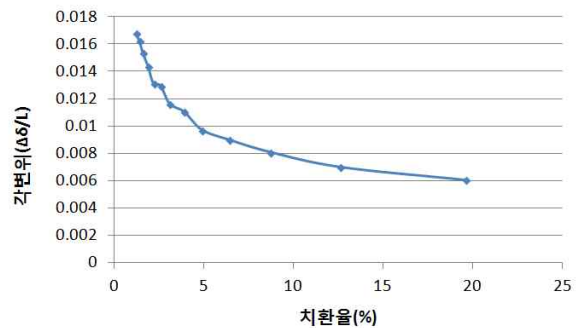


<그림 3.33> 치환율 계산 방법

- 해석결과(그림 3.34) 치환율에 따라 최대 변위 및 각변위는 감소하는 경향이며, 변곡점은 치환율 1.2%~19.6%에서 발생



(a) 치환율에 따른 최대 변위



(b) 치환율에 따른 각변위

<그림 3.34> 치환율에 따른 최대 변위 및 각변위

바. 결론

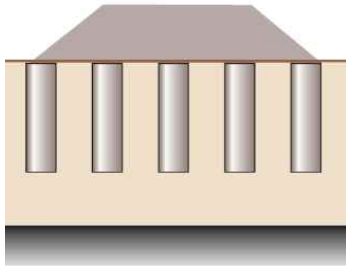
- 본 공법의 시공순서와 개량범위를 요약하면 아래와 같으며 이를 특히 청구항에 반영함
- 시공순서 및 개량범위 : 연약지반 표층 0.25~0.5m의 지반을 시멘트계 안정화제와 혼합처리 후 장비 주행성을 우선적으로 확보하고, 말뚝형태의 심층 개량체를 C.T.C 2.0~2.5m, 직경 0.8~1.2m, 연약지반 심도의 60~80%까지 심층개량 시공후 표층 개량부에 지오토크 및 고정유닛으로 심층 말뚝구조에 고정 후 그 상부에 개량토를 0.25~0.5m 두께로 다짐

제3절. 연약지반 안정화제 연구

1. 목표 성능 검토

- 기존 혼합처리 공법인 DCM 공법과 ALiCC공법에서 쓰이는 안정화제에 대한 검토를 실시하고, 이를 기준으로 본 연구에서 개발하고자 하는 안정화제의 목표 성능을 결정 (표 3.19)

<표 3.20> DCM공법과 ALiCC 공법의 안정화제 검토

구분	DCM공법(DSM공법)	ALiCC
안정화제		
	-시멘트와 물을 혼합한 안정처리제 사용 -일반적으로 고로슬래그시멘트가 사용됨	-고강도 고화제를 사용하여 개량심도를 감소시키고 간격을 넓힘으로써 개량률을 10~30%까지 낮춤
설계강도	100~400kPa	600~1,500kPa
설계강도 산정방법	$\text{설계강도 } q_{\text{ck}} = \frac{1}{4} \overline{q_{\text{ul}}} \text{ (실내시험배합강도)}$	
목표성능 검토결과	ALiCC 수준 설계강도 600~1000kPa 를 목표 성능으로 설정 (계획서상 목표 500kPa에서 변경) ⇒ 실내시험 배합강도 2400~4000kPa	

2. 안정화제 재료

가. 전로슬래그

- 제강 과정 중 전로에서는 고 온의 용융선철에 산소랜스로 고압의 산소를 불어넣어 선철에 포함된 탄소, 규소, 인 등을 산화시켜 제거하는데 이때 일부 철 성분도 함께 산화가 되며, 전로슬래그는 이 과정에서 용제로 추가된 생석회(CaO), 탄산칼슘(CaCO₃) 및 dolomite(MgCO₃·CaCO₃) 등과 규산질 원소가 결합한 재료임
- 발생 과정에 따라 전로슬래그는 다량의 Free CaO 가 포함되어 있으며, Free CaO의 팽창성 문제로 일반적인 토목용 재료로는 부적합하지만 연약지반용 안정화제에는 적합할 것으로 판단됨

나. 굴폐각

- 남해 청정 해역과 서해 연안등에서 대규모로 조성된 굴양식 사업의 부산물로 발생되고 굴폐각은 방해석구조의 탄산칼슘으로 이루어져 있어 주성분과 광물상이 천연 석회석과 동일하기 때문에 전처리단계를 거쳐 고화제로 이용 가능한 것으로 알려져 있음
- 굴폐각 전처리 단계란 굴폐각을 수집하여 물에 세척함으로써 염소 음이온 및 악취와 분진을 제거하고 굴폐각을 약 900℃의 상압하에서 가열함으로써 흡열반응을 일으켜 이산화탄소가 방출시켜 산화칼슘을 만드는 단계임

다. Fly Ash

- Fly Ash는 화력발전소에서 미분탄을 고온으로 연소할 때 발생하는 회분을 집진장치에서 포집한 것으로서 인공 Pozzolan의 일종이므로 콘크리트용 시멘트 혼화재로써 범용적으로 사용됨 재료임
- Fly Ash는 콘크리트의 수화열의 감소, 장기 강도의 증가, 내구성 향상 등의 역할을 하며, 전로 슬래그와 혼합시 전로 슬래그의 Free CaO로 인한 수화열을 저감시키는 효과가 있을 것으로 판단됨

라. 탈황석고

- 탈황의 산성을 석회로에서 중화시켜 화학반응 공정에서 발생하는 부산물을 탈황석고라 하며, 현재 탈황시설과 인산제조 공정에서 다량으로 발생되고 있는 부산물인 탈황석고는 천연석고처럼 수화반응에 의해 자경성을 가지지 못하므로 시멘트의 원료 등 제한적으로 활용되고 있음
- 탈황석고는 팽창성이 있는 황산칼슘의 농도는 높고 불순물은 적은편으로 연약지반 안정화제의 재료로써 재활용가능성이 매우 높을 것으로 판단됨

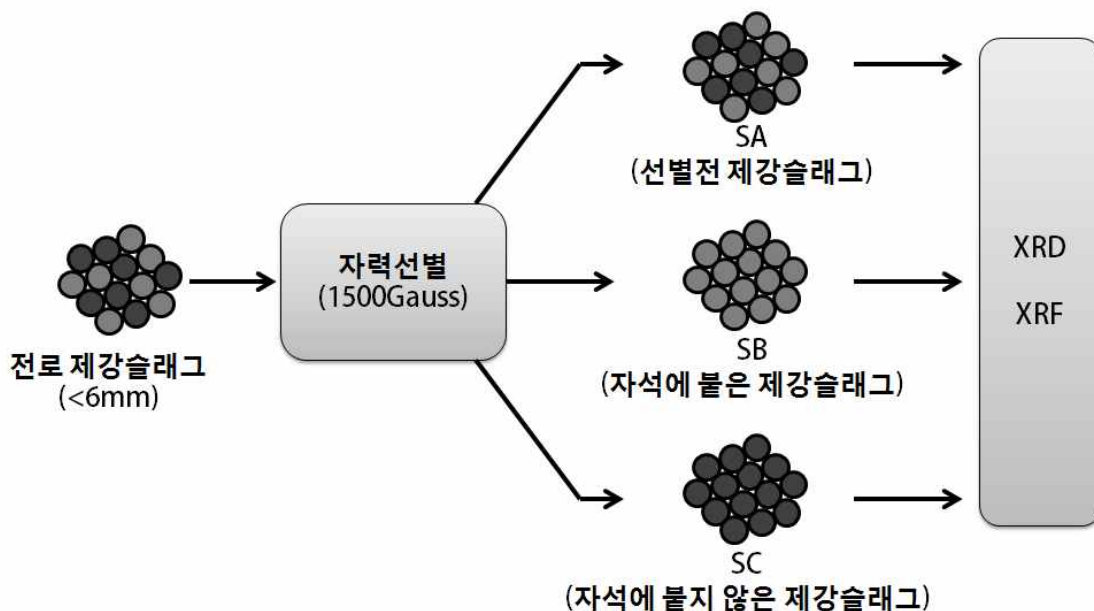
3. 전로 제강슬래그 자력선별 실험

가. 실험목적

- 자력선별 결과(선별전, 자석에 의해 선별된 제강슬래그, 선별되지 않고 남은 제강슬래그) 발생하는 제강슬래그의 활용성 확인 및 안정화제 배합 실험에 적용할 제강슬래그를 선정함

나. 실험방법

- 중금속-비소 복합오염 토양 및 광산 폐기물 처리를 위한 무해화 소재 및 공정 개발 (2015, 중소기업청 산학협력기술개발사업) 결과에 따라 토양오염안정화제 생산을 위한 자력 선별 공정에 따라 발생하는 입경 6mm이하의 제강슬래그를 활용 (자력선별기 운전조건 : 30rpm/1500G)
- 자력선별전 제강슬래그(SA), 자석에 붙은 제강슬래그(SB), 자력선별 후 남은 제강슬래그(SC)로 분류하여, 자력선별에 따른 XRF, XRD 시험 실시
- 기존 연구(중금속-비소 복합오염 토양 및 광산 폐기물 처리를 위한 무해화 소재 및 공정개발, 2015)에서 자석에 붙은 제강슬래그(SB)는 Fe 성분이 증가하고 Ca 성분이 감소함이 확인되었으므로 자석에 붙지 않은 제강슬래그(SC)는 Fe 성분이 감소하고 Ca 성분이 증가할 것으로 예상하고 실험을 실시함



<그림 3.35> 자력선별 실험 방법

다. XRF 실험결과

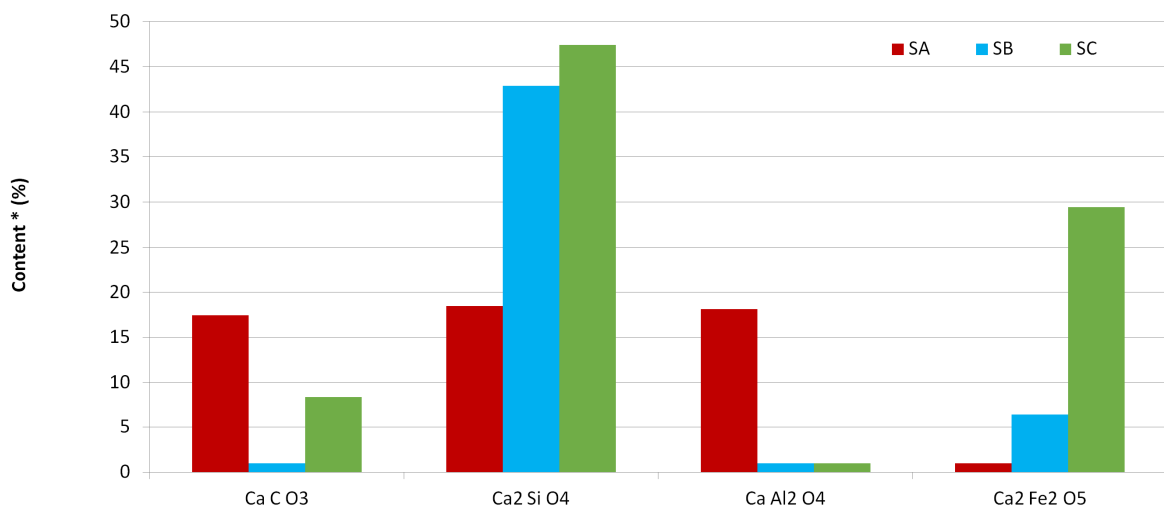
- XRF 결과 자력선별된 제강슬래그(SB)는 Fe함량이 증가하고, 자력선별 후 남은 제강슬래그(SC)는 Ca 및 Al 함량이 증가하는 것으로 나타남
- Ca 성분은 수화반응에 기여하는 대표적인 화학성분이고 특히 제강슬래그의 경우 대부분 반응성이 높은 Free-CaO로 이루어져 있기 때문에 Ca 성분이 상대적으로 높은 자력선별 후 남은 제강슬래그(SC)가 시멘트 혼화제로써 더 효과적일 것으로 판단됨

<표 3.21> 전로제강슬래그 XRF 결과

Slag	XRF analysis(%)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	기타
SA	19.27	4.43	31.18	32.03	0.12	4.79	0.54	3.25	2.57	0.85	0.97
SB	18.89	3.72	34.37	30.18	-	4.44	0.52	3.32	2.65	0.88	1.04
SC	19.59	5.25	27.70	33.95	0.14	5.41	0.53	3.15	2.48	0.80	0.98

다. XRD 분석

- 전로 제강슬래그 내 Ca의 존재형태를 판단하기 위하여 XRD 분석을 실시함
- 수화반응에 기여하는 Ca 형태는 규산칼슘(CS)과 철칼슘(CF)로서 규산칼슘(CS)는 초기 강도에 주로 영향을 미치고 철칼슘(CF)는 장기강도에 영향을 미침
- XRD 분석결과 자력선별 후 남은 제강슬래그(SC)는 선별전 제강슬래그(SA)나 자석에 붙은 제강슬래그(SB)에 비하여 반응이 완료되어 수화반응에 기여하지 못하는 탄산칼슘 함량이 줄어들고 장기강도 발현에 기여하는 규산칼슘(CS) 및 철칼슘(CF) 함량이 증가하는 것으로 나타나 자력선별 후 남은 제강슬래그(SC)가 시멘트 혼화제로써의 역할을 기대할 수 있을 것으로 판단됨



<그림 3.36> 자력선별 전후의 전로 제강슬래그의 XRD 분석 결과

4. 전로 제강슬래그 파분쇄 실험

가. 실험목적

- 제강슬래그(SC)에 대하여 배합시험에 쓰일 균질한 재료 생산을 위해 햄머크러셔(파쇄)와 롤러밀(분쇄)를 활용하여 파분쇄 실험을 실시함
- 분쇄된 재료에 대하여 입도 측정 후 적정 분쇄 회차를 선정하여 일정하게 파분쇄된 전로 제강슬래그를 안정화제 배합시험에 활용하고자 함

나. 실험방법

- 6mm이하의 선별된 전로 제강슬래그(SC)를 햄머 크러셔에 의한 1차 파쇄 후 롤러밀 간격을 달리하면서 분쇄하여 분쇄 회차별로 입도 측정을 실시함(표 3.22)

<표 3.22> 파분쇄 실험 조건

구 분	내 용
실험 재료	- 자력선별 후 남은 제강슬래그(SC)
실험 장비	- 햄머크러셔(파쇄), 롤러밀(분쇄), 시크니스게이지(롤러밀 간격 측정)
실험 방법	- 파쇄 : 1회 - 분쇄 롤러밀 간격 : 1.0mm, 0.5mm, 0.2mm, 0.1mm, 0.05mm - 분쇄 : 1~10회(1.0~0.1mm 각 1회씩, 0.05mm 6회) - 입도 측정 : Malvern



Hammer Crusher



Roller mill

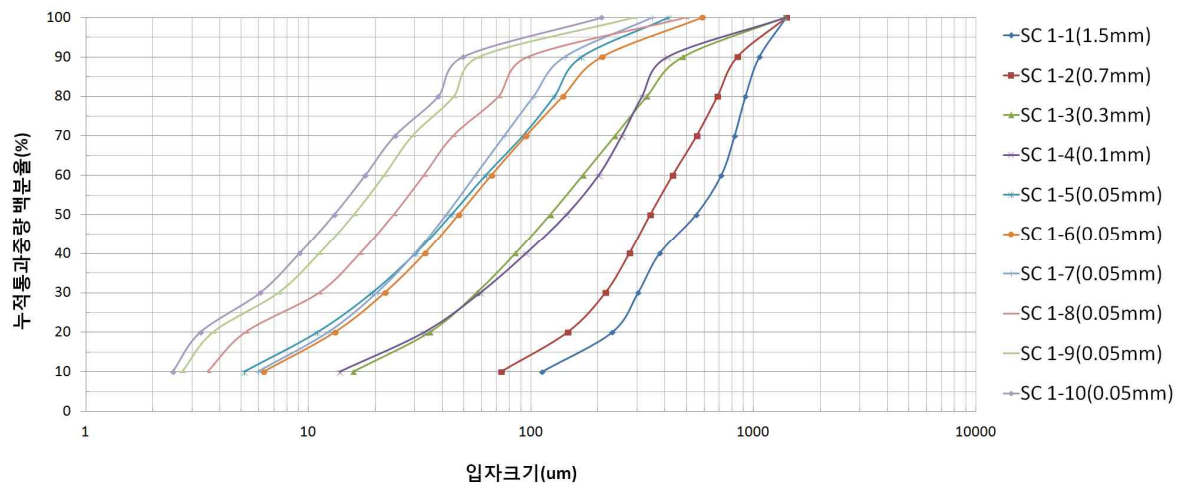


시크니스 게이지
(0.01mm~1.0mm)

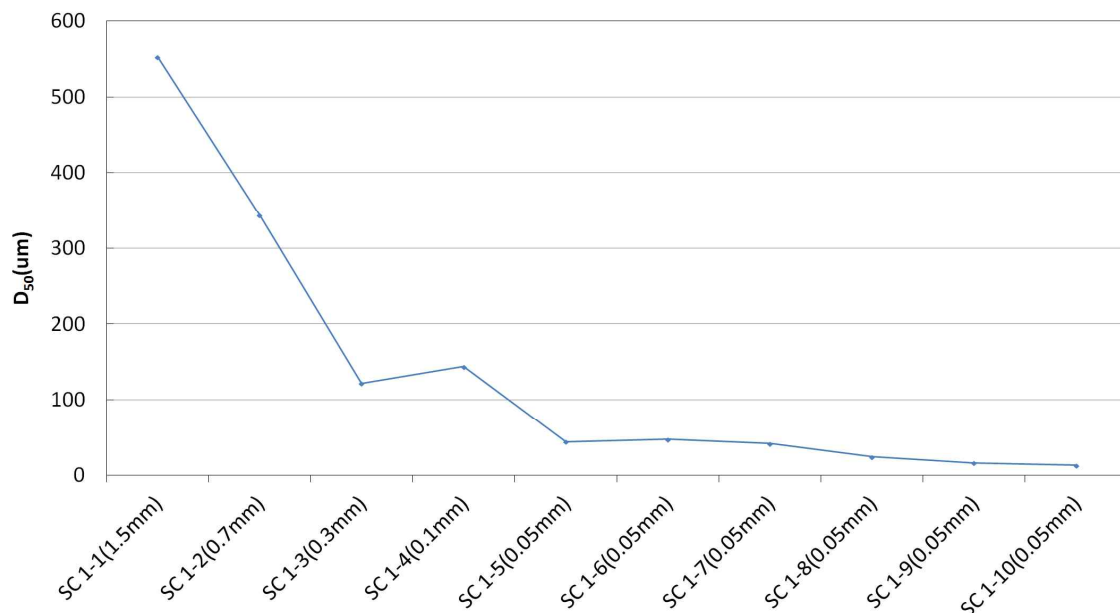
<그림 3.37> 파분쇄 실험장비

다. 실험결과

- 파분쇄 시험결과 분쇄횟수에 따라 전체 입도에서 입자크기가 감소하는 경향이 나타남
- 최대 입경은 롤러밀 간격보다 크게 나타났는데 이것은 입자의 형상을 측정하는 Malvern장비의 특징이 원인이 된 것으로 판단되며, 실제로 롤러밀 간격 0.05mm로 1회 이상 파쇄한 재료는 표준체 No. 200체에서 모두 통과함을 확인함
- 평균입경(D50)은 총 분쇄 횟수 8회(롤러밀 간격 0.05mm 분쇄 4회)에서부터 일정해지는 경향임을 확인함
- 제강슬래그(SC) 파/분쇄 방법은 전체 입도에서 입경이 가장 작게 나타난 파쇄1회 후 롤러밀 분쇄 10회(1.0~0.1mm 각 1회씩, 0.05mm 6회)를 적용하는 것이 효과적일 것으로 판단됨



<그림 3.38> 제강슬래그 분쇄에 따른 입도분포



<그림 3.39> 제강슬래그 분쇄에 따른 평균입경(D50)

5. 전로 제강슬래그 안정화제 배합 시험 - 파일럿 테스트

가. 실험목적

- 안정화제 배합시험 배합비 산정을 위하여 파일럿 테스트 실시
- 시멘트와 제강슬래그 배합비를 고정하고 보조재료인 탈황석고, Fly ash의 배합비 경향을 확인하고자함

나. 실험 방법 및 배합조건

- 파일럿테스트 시험방법 및 배합조건은 <표 3.23>, <표 3.24> 과 같음
- 실험에 사용된 제강슬래그와 탈황석고는 광양 제철소 내의 재처리 업체로부터 구입하였으며, Fly Ash는 보령 석탄발전소 내의 재처리 업체로부터 구매함

<표 3.23> 파일럿 테스트 시험방법

혼합재료		시멘트, 제강슬래그(SC), Fly Ash, 탈황 석고
해성점토		전라남도 해성점토
시험규준		KSF 2328, KSF 2329
다짐방법	다짐에너지	5.63 kg • cm ³ (다짐방법 A)
	다짐층수	6층
	1층당 다짐횟수	9회
양생조건	습윤 양생	온도 23℃(±2), 상대습도 95%이상
양생일수		14일, 28일

<표 3.24> 파일럿테스트 배합조건

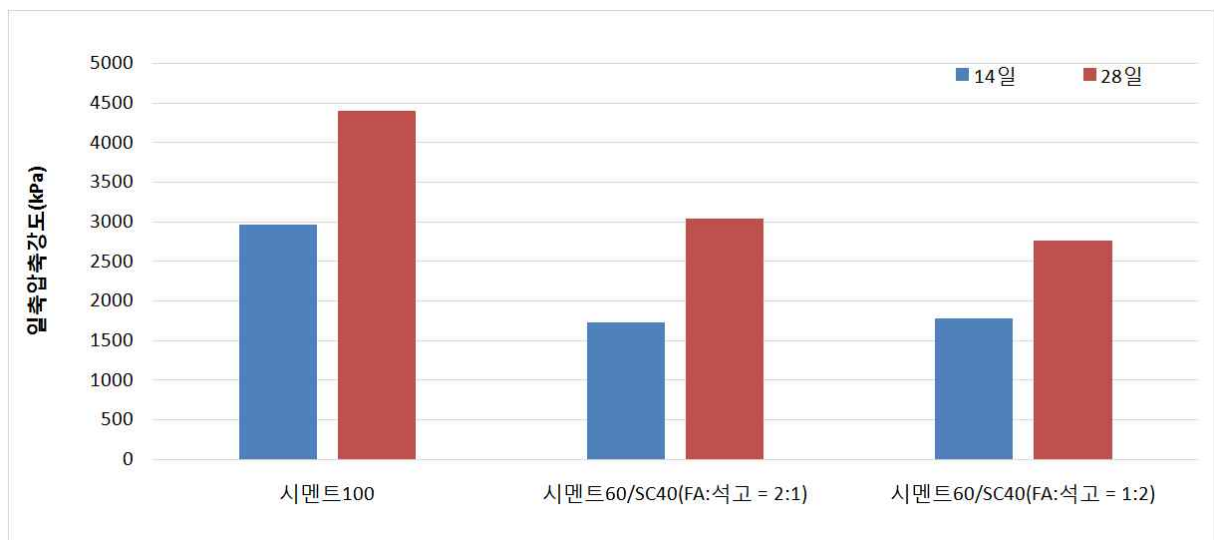
구분	배합조건(g)							
	해성점토(A)	시멘트(C)	제강슬래그(SC)	탈황석고(G)	Fly Ash(FA)	조경재(D)	물(W)	W/C
C100	5000	750	0	0	0	7	700	1
C60-SC40		300	200	80	170			
C60-SC40		300	200	170	80			



<그림 3.40> 파일럿 테스트 전경

다. 실험결과

- 파일럿 테스트 결과 상대적으로 석고에 비해 Fly Ash 함유량이 많은 경우 강도가 높게 나타남
- 제강슬래그를 혼합하였을 경우 14일 강도와 28일 강도 모두 시멘트만을 100% 사용하였을 때 강도보다 상대적으로 낮게 나타남
- 최종 배합비에 대하여는 SC 제강슬래그와 시멘트, Fly Ash를 혼합하고 석고 및 강도증진제를 소량 혼합하는 배합으로 배합비 Case를 선정



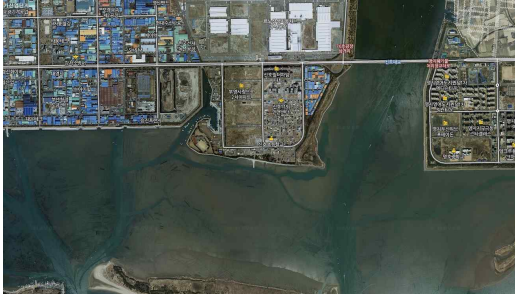
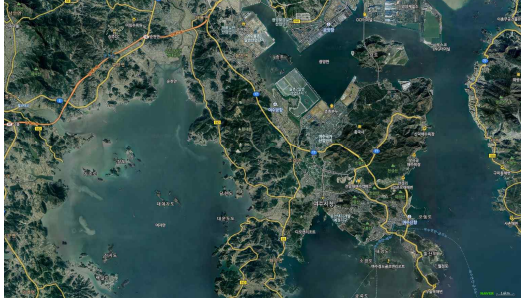
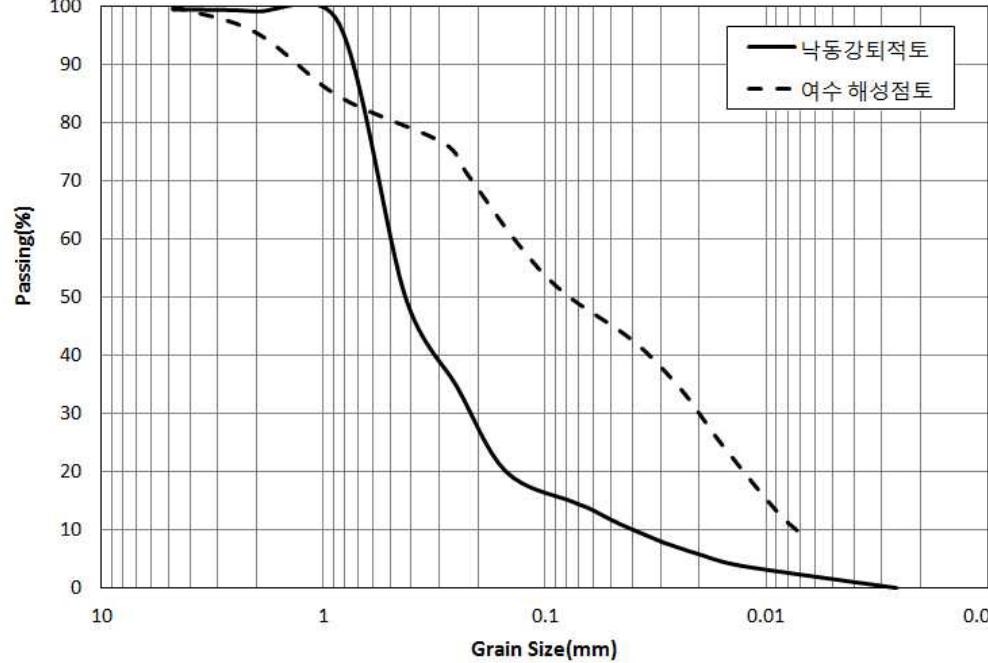
<그림 3.41> 파일럿 테스트 결과

6. 전로 제강슬래그 안정화제 배합 시험

가. 대상시료 채취

- 배합시험에 적용할 대상시료는 낙동강 퇴적토와 여수 해성점으로 위치와 시료 물성 실험 결과는 <표 3.25>, <그림 3.42>, <표 3.26>와 같음

<표 3.25> 대상 시료

구 분	시료 A (낙동강 퇴적토)	시료 B (여수 해성점토)
채취 위치	 경상남도 부산 신호대교 인근 해안보호구역 바깥 지역	 전라남도 여수 여자만 갯벌
채취 전경		
입도 분포	 <그림 3.42> 낙동강 퇴적토 및 여수해성점토 입도분포	

<표 3.26> 대상시료 기초물성 시험결과

구분	Gs	4.75mm체 통과율(%)	0.075mm체 통과율(%)	LL(%)	PL(%)	USC S	W _{field} (%)
A	2.72	99.5	14.8	-	-	SM	32.5
B	2.69	99.985	51.0	30.3	18.7	CL	49.4

나. 시험 방법 및 시험 조건

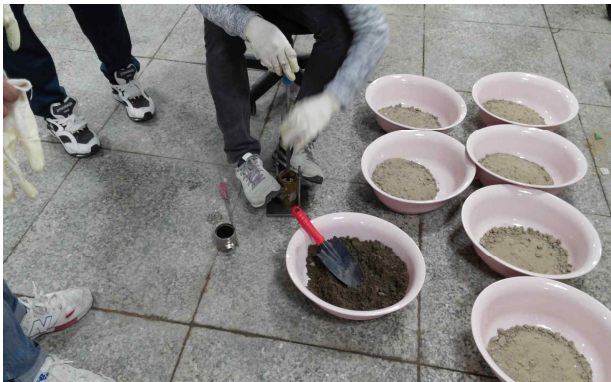
- 배합조건은 파일럿 테스트를 기초로 하여 시멘트와 제강슬래그비 각각 5:5, 6:4, 7:3 기준으로 Fly Ash와 탈황석고 비율을 조절한 21개의 Case 에 대하여 실험을 실시함

<표 3.27> 안정화제 배합시험 시험방법

혼합재료		시멘트, 제강슬래그(SC), Fly Ash, 탈황 석고
해성점토		낙동강 퇴적토, 전라도 해성점토
시험규준		KSF 2328, KSF 2329
다짐방법	다짐에너지	5.63 kg • cm ³ (다짐방법 A)
	다짐층수	6층
	1층당 다짐횟수	9회
양생조건	습윤 양생	온도 23℃(±2), 상대습도 95%이상
양생일수		7일, 28일, 60일

<표 3.28> 안정화제 배합시험 배합조건

구분	배합조건(g)								
	시멘트	제강 슬래그	탈황 석고	Fly Ash	NO.	강도 증진제	대상 시료	물	W/ C
C100	180	0	0	0	1	0	1200	180	1
C50- SC50	90	90	0	0	2	1			
	72	72	3.6	32.4	3				
			7.2	28.8	4				
			10.8	25.2	5				
	60	60	6	54	6				
			12	48	7				
			18	42	8				
C60- SC40	108	72	0	0	9				
	86.4	57.6	3.6	32.4	10				
			7.2	28.8	11				
			10.8	25.2	12				
	72	48	6	54	13				
			12	48	14				
			18	42	15				
C70- SC30	126	54	0	0	16				
	100.8	43.2	3.6	32.4	17				
			7.2	28.8	18				
			10.8	25.2	19				
	84	36	6	54	20				
			12	48	21				
			18	42	22				

	
1. 시료준비	2.재료 계량
	
3. 시료 배합	4. 공시체 제작
	
5. 공시체 제작 완료	6. 항온항습기 (습도 95%, 23°) 세팅
	
7. 양생(7일, 28일, 60일, 90일)	8. 일축압축시험

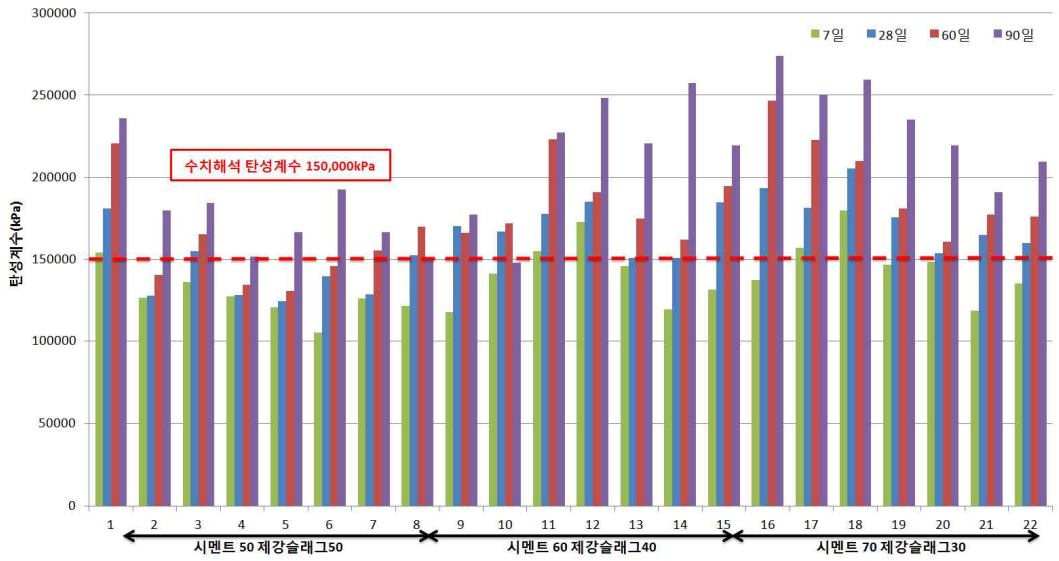
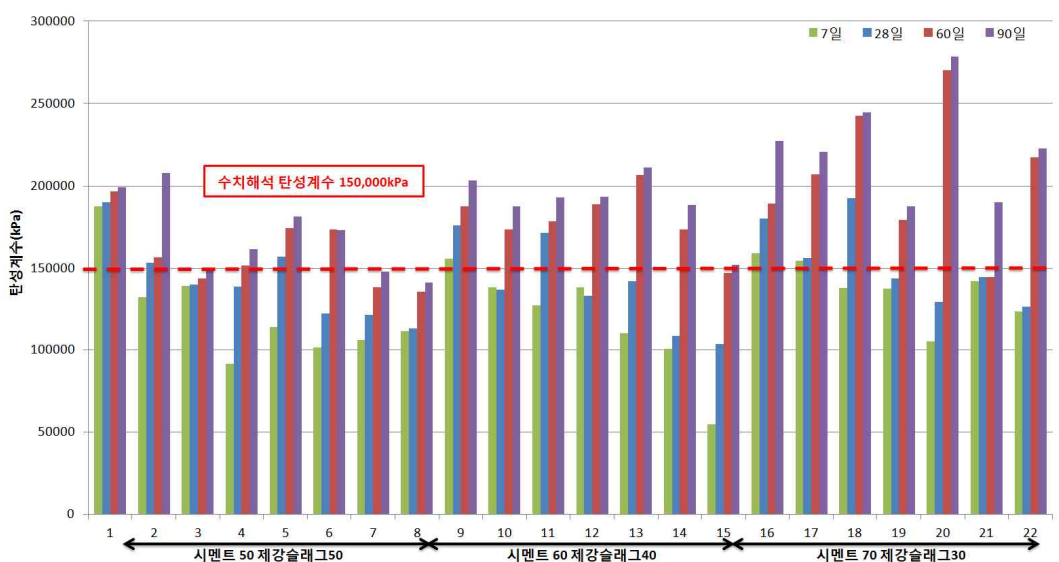
<그림 3.43> 안정화제 배합 시험 순서

다. 시험 결과

1) 배합비에 따른 강도

낙동강 퇴적토	강도 (MPa) 7일 28일 60일 90일 설계강도 2400kPa 시멘트 50 제강슬래그50 시멘트 60 제강슬래그40 시멘트 70 제강슬래그30
	-낙동강 퇴적토 공시체의 경우 대부분 장기강도가 4,000kPa 미만으로 이는 실트 질 모래로 분류되는 낙동강 퇴적토의 경우 공시체 다짐이 상대적으로 어려운것에 기인한 것으로 판단되며 이에 따라 실내시험 배합강도 2,400kPa(설계강도 600kPa)로 설정하여 적정배합비를 판단함 -28일 강도 기준으로 시멘트만 사용한 경우(No.1)와 No.2, No.9~No.12, No.14~No.19 배합비에서 기준강도를 초과하였으며, No.11, No.14, No.16, No.17 배합비에서 장기양생(60일, 90일)에 따라 강도가 크게 증가하여 시멘트만 사용한 경우(No.1)와 유사하거나 초과하는 강도가 나타남
여수 해성점토	강도 (MPa) 7일 28일 60일 90일 설계강도 3000kPa 시멘트 50 제강슬래그50 시멘트 60 제강슬래그40 시멘트 70 제강슬래그30
	-여수 해성점토의 경우 공시체 제작시 다짐이 수월한 점토로 이루어져있으며, 이에 따라서 실내시험 배합강도 3,000kPa(설계강도 750kPa)로 설정하여 적정배합비를 판단함 -28일 강도 기준으로 시멘트만 사용한 경우(No.1)에서만 기준강도를 초과하는 것으로 나타났지만 No.5, No.9~13, No.16~No.20, No.22 배합비에서 장기양생(60일, 90일)에 따라 강도가 크게 증가하여 기준강도를 초과하고, 시멘트만 사용한 경우(No.1)와 유사하거나 더 높은 강도가 나타남

2) 배합비별 탄성 계수

낙동강 퇴적토	 탄성계수(kPa) 수치해석 탄성계수 150,000kPa 7일 28일 60일 90일 시멘트 50 제강슬래그50 시멘트 60 제강슬래그40 시멘트 70 제강슬래그30
	-60일, 90일 탄성계수 기준으로 시멘트만 사용한 경우(No.1)와 No.3, No.5~No.22 배합비에서 수치해석시 적용된 탄성계수(150,000kPa)를 초과하였으며, No.11, No.14, No.16, No.17 배합비의 탄성계수는 시멘트만 사용한 경우(No.1)의 탄성계수를 초과하는것으로 나타남
여수 해성 점토	 탄성계수(kPa) 수치해석 탄성계수 150,000kPa 7일 28일 60일 90일 시멘트 50 제강슬래그50 시멘트 60 제강슬래그40 시멘트 70 제강슬래그30
	-60일, 90일 탄성계수 기준으로 시멘트만 사용한 경우(No.1)와 No.2, No.4~No.6, No.9~14, No.15~No.20, No.21 배합비에서 수치해석시 적용된 탄성계수 (150,000kPa)를 초과하였으며, No.2, No.9, No.13, No.17, No.18, No.21, No.22 배합비의 탄성계수는 시멘트만 사용한 경우(No.1)의 탄성계수를 초과하는것으로 나타남

7. 굴폐각 소성 실험

가. 실험목적

- 연구기관이 보유한 소성로를 활용하여 굴폐각 소성중 소성로 내부에서 굴폐각의 염분과 유기질 문제로 인해 소성로 내 부식문제 발생
- 높은 온도에서도 내구성을 유지할 수 있는 세라믹 도자기를 구입하여 도자기내에서 소성을 실시하였으며,

나. 실험 조건

- 본 연구에서는 경상남도 통영에 위치한 비료 업체로부터 75 μ m이하의 굴폐각을 구입하여 실험에 활용하였으며, 굴폐각에 대하여 XRF 실험을 실시한 결과 화학적 조성은 대부분 Ca로 이루어져 있음을 확인함<표 3.29>
- 굴폐각의 Ca 성분은 탄산칼슘(CaCO_3)으로만 구성되며, 높은 온도에서 소성을 실시하게 되면 수화반응 성분인 석회(CaO)로 변환됨
- 기존 연구에서 제시된 굴폐각 소성온도는 700°C~1000°C이며, 이에 따라 소성조건을 <표 3.30>와 같이 정하여 소성을 실시함

<표 3.29> 굴폐각 화학적 조성

Slag	XRF analysis(%)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	SrO	Cl	TiO ₂	기타
굴폐각	4.24	1.17	0.71	90.40	0.27	0.50	1.70	0.40	0.27	0.15	0.17

<표 3.30> 굴폐각 소성 조건

소성 조건	장 비	소성 사진
750°C, 4시간	400~1000°C 소성로, 세라믹 도자기	
900°C, 4시간		

다. 실험 결과

- 소성 후 굴패각에 대한 XRD 분석 결과 750°C에서 4시간 소성한 굴패각은 거의 대부분 탄산칼슘(CaCO_3) 상태로 남아있음이 확인됨
- 900°C에서 4시간 소성한 굴패각은 거의 약 78%가 석회(CaO)로 환원되었으며, 이를 활용하여 배합시험을 실시하고자 함

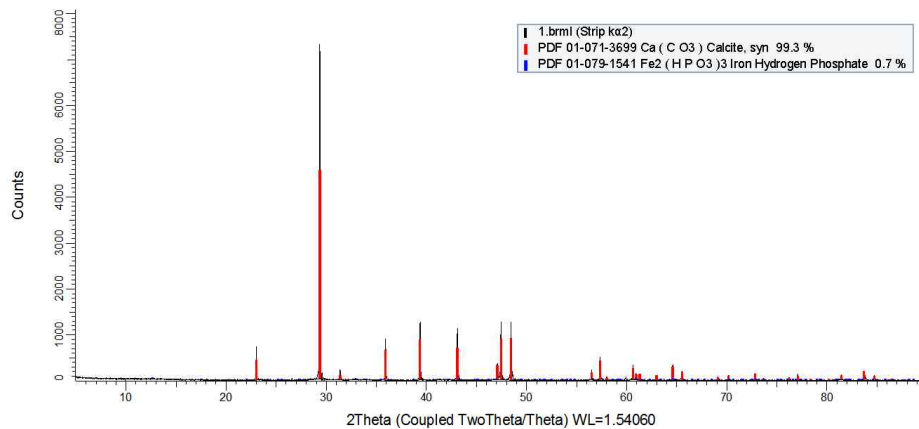


(a)소성 전 굴패각

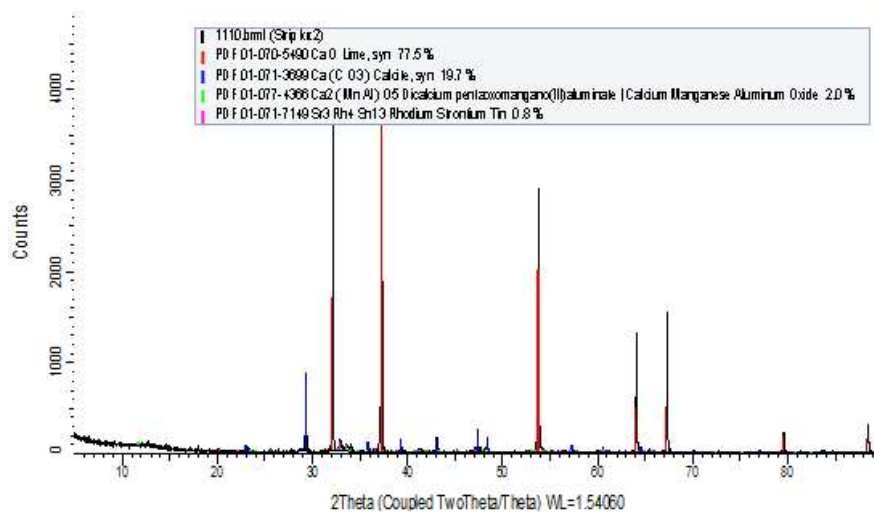


(b)소성 후 굴패각

<그림 3.44> 소성 전후 굴패각



<그림 3.45> 750°C, 4시간 소성 후 굴패각 XRD 실험결과



<그림 3.46> 900°C, 4시간 소성 후 굴패각 XRD 실험결과

8. 굴폐각 안정화제 배합시험

가. 대상 시료 및 시험방법

- 대상시료는 전로 제강슬래그 안정화제 시험에서 사용한 여수 해성점토이며, 배합비를 제외한 공시체 제작 방법 및 양생조건 등의 시험방법은 전로 제강슬래그 안정화제 시험과 동일함

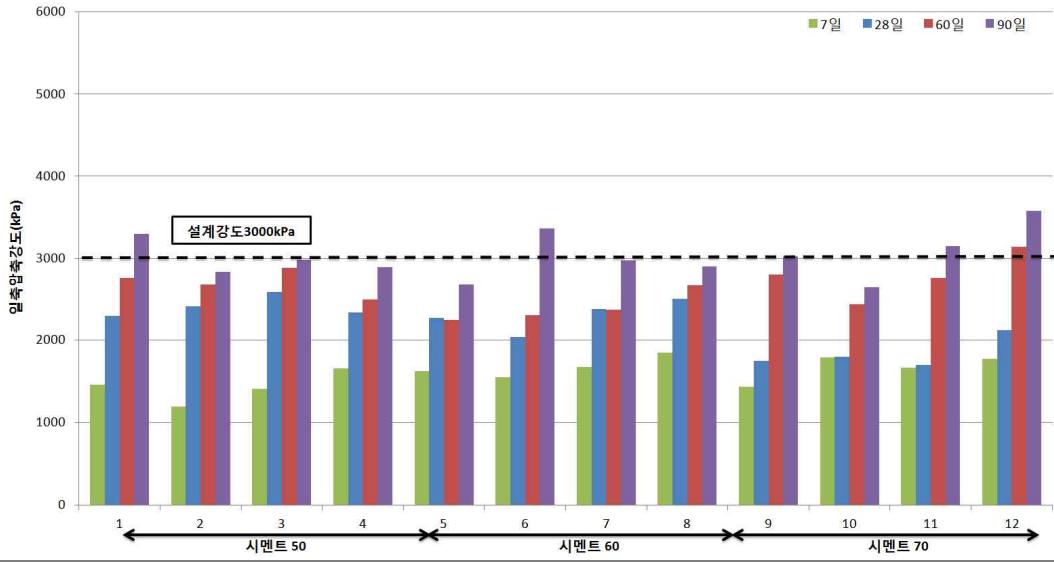
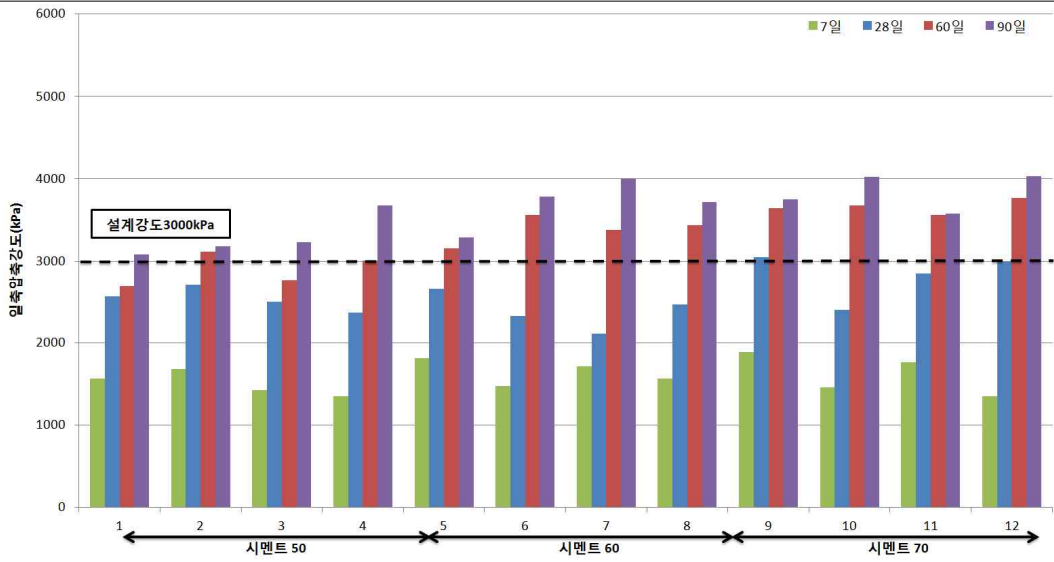
나. 배합비

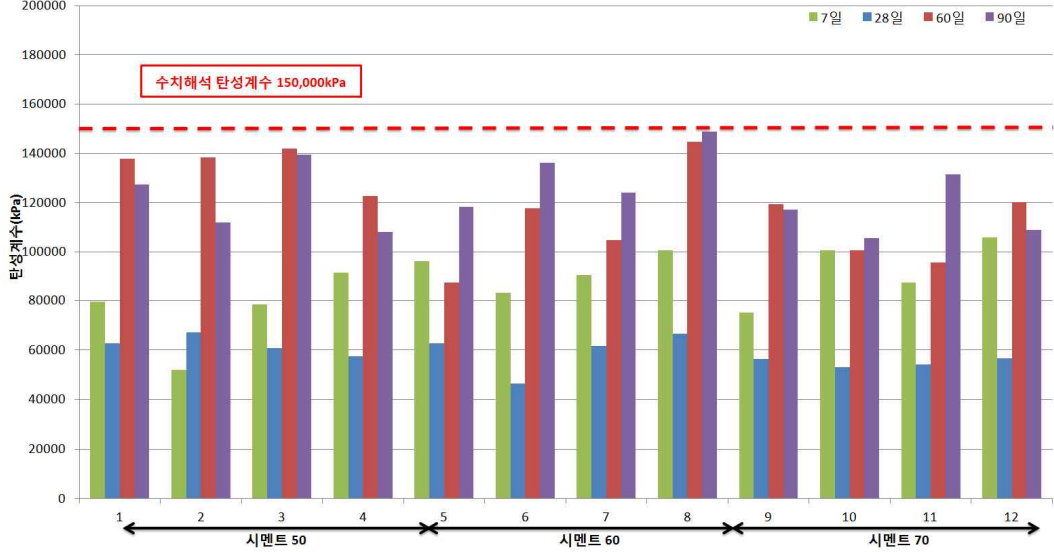
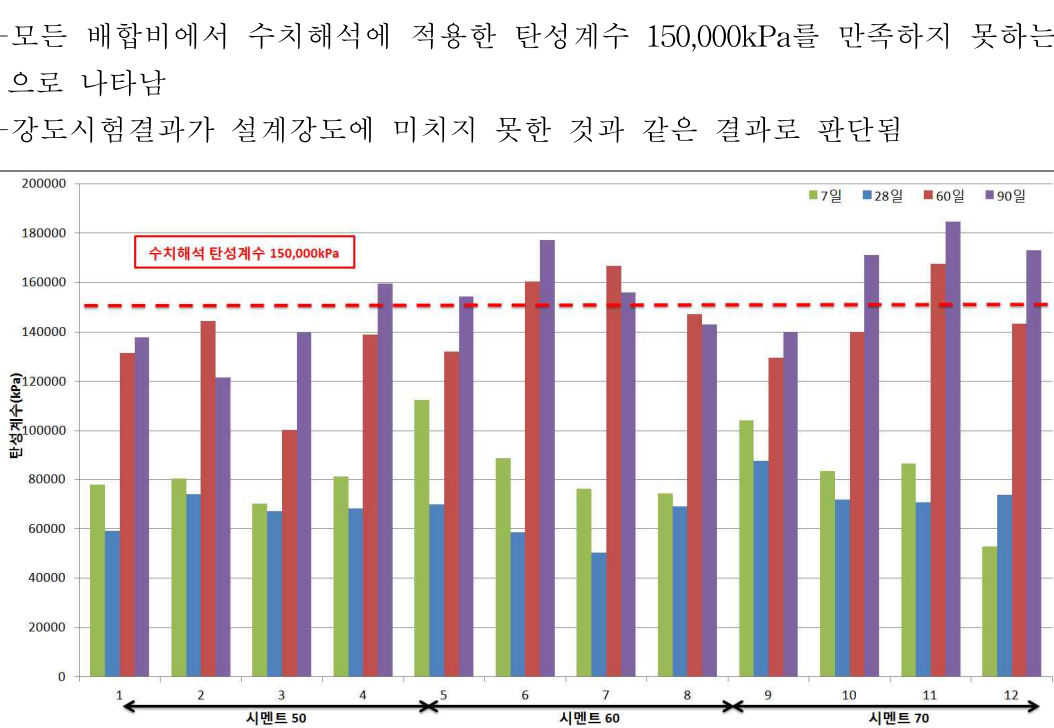
- ZHONG Bin-Yan(2012)에 따르면 시멘트에 미소성 굴폐각 5~10% 혼합시 강도가 증진되는 것을 확인함
- 정민수(2007)는 소성 굴폐각만으로 공시체를 제작한 경우보다 고로슬래그나 Fly Ash를 혼합시 강도가 증진되며, 굴폐각 중량 비율을 1이라고 봤을 때 고로 슬래그는 1이상, Fly ash의 비율은 0.8~1 이 적정한 것으로 나타남
- 따라서 앞서 확인된 자력선별된 전로 제강슬래그와 Fly Ash를 굴폐각과 혼합하는 방향으로 배합비를 선정하였으며, 굴폐각의 경우는 소성 굴폐각과 비소성 굴폐각으로 구분하여 각각 12Case 씩 총 24가지 Case에 대하여 배합시험을 실시함

<표 3.31> 굴폐각 안정화제 배합비

구 분	배합조건(g)							
	시멘트 (C)	제강 슬래그 (SC)	굴폐각 (O)	FlyAsh (FA)	강도 증진제 (D)	물 (W)	W/C	배합 번호
C50	90	5.00	47.2	37.8	1	180	1	1
	90	20.00	38.9	31.1				2
	90	35.00	30.6	24.4				3
	90	50.00	22.2	17.8				4
C60	108	4.00	37.8	30.2	1	180	1	5
	108	16.00	31.1	24.9				6
	108	28.00	24.4	19.6				7
	108	40.00	17.8	14.2				8
C70	126	3.00	28.3	22.7	1	180	1	9
	126	12.00	23.3	18.7				10
	126	21.00	18.3	14.7				11
	126	30.00	13.3	10.7				12

다. 실험 결과

소성	 설계강도 3000kPa 7일 28일 60일 90일 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 시멘트 50 시멘트 60 시멘트 70 인장강도(MPa) -No.1, No.6, No. 11, No. 12 배합비를 제외한 모든 배합비에서 제강슬래그 안정화제 배합시험에 적용한 설계강도 3,000kPa를 만족하지 못하는 것으로 나타남 -No.9~No.12 배합비의 경우, 번호가 커질수록 제강슬래그 비율이 증가하고 굴패각 비율이 감소하며, 이에 따라 강도가 증가하는 경향으로 보아 굴패각보다 제강슬래그의 효과가 더 높은 것으로 판단됨
비소성	 설계강도 3000kPa 7일 28일 60일 90일 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 시멘트 50 시멘트 60 시멘트 70 인장강도(MPa) -모든 배합비의 60일 이상 장기강도에서 제강슬래그 안정화제 배합시험에 적용한 설계강도 3,000kPa를 만족하는 것으로 나타남 -No.1~No.4, No.5~No.8, No.9~No.12, 각각에서 번호가 커질수록 제강슬래그 비율이 증가하고 굴패각 비율이 감소하며, 이에 따라 강도가 증가하는 것으로 보아 굴패각보다 제강슬래그의 효과가 더 높은 것으로 판단됨 -전반적인 강도값은 소성굴패각을 혼합하였을 때 보다 더 크게 나타나, 본 연구 결과에서는 소성 굴패각은 시멘트 혼화제로써 비소성 굴패각이나 제강슬래그에 비하여 적절하지 못한 것으로 판단됨

소성	 수치해석 탄성계수 150,000kPa 탄성계수(MPa) 7일 28일 60일 90일 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 시멘트 50 시멘트 60 시멘트 70 -모든 배합비에서 수치해석에 적용한 탄성계수 150,000kPa를 만족하지 못하는 것으로 나타남 -강도시험결과가 설계강도에 미치지 못한 것과 같은 결과로 판단됨
비소성	 수치해석 탄성계수 150,000kPa 탄성계수(MPa) 7일 28일 60일 90일 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 시멘트 50 시멘트 60 시멘트 70 -60일, 90일 탄성계수 기준 No. 4~No.7, No.10~No. 12 배합비에서 수치해석에 적용한 탄성계수 150,000kPa를 만족하는 것으로 나타남 -이는 강도시험결과가 설계강도를 만족시키지 못하였으나 유사하게 나타난 것과 같은 결과로 판단되며, 탄성계수에서도 비소성 굴패각을 혼합한 경우가 소성굴패각을 혼합한 경우보다 탄성계수가 더 높게 나타남

9. 안정화제 선정

가. 결과의 비교

- 1차년도와 2차년도에 실시한 안정화제 배합시험의 결과를 요약하면 <표 3.32> 와 같음

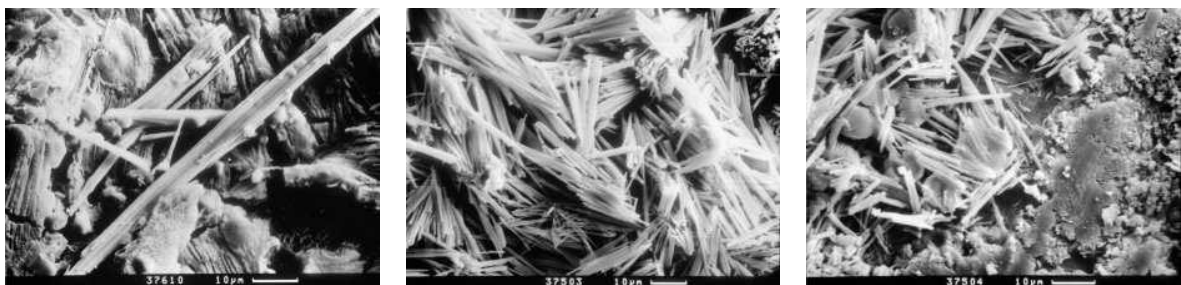
<표 3.32> 안정화제 배합시험 결과 요약(여수 해성점토 기준)

구 분	시멘트	제강슬래그 혼합 안정화제	굴폐각 혼합 안정화제
장기 강도	4,500 kPa	3,100 ~ 5,200 kPa	3,100 ~ 4,000 kPa
탄성 계수	200,000 kPa	150,000 ~ 280,000kPa	110,000 ~ 185,000kPa

- 굴폐각 혼합 안정화제의 경우 60일, 90일 장기강도 및 탄성계수에서 시멘트보다 유사하거나 강도가 낮게 나타나 고강도가 요구되지 않는 혼합처리에서의 활용은 가능하겠으나 본 연구에서 목표로 하는 수준의 강도는 미치지 못함
- 제강슬래그 혼합 안정화제의 경우 60일, 90일 장기강도 및 탄성계수에서 일정 배합비에서 시멘트보다 우수하게 나타났으므로 제강슬래그 혼합 안정화제만을 특정하여 90일 양생한 수화반응물의 SEM 촬영을 실시함
- 또한 제강슬래그 혼합 안정화제의 공시체 수침 후 시간 경과에 따른 팽창률을 확인하고, 팽창률과 강도에 대한 경향분석 실시하여 적절한 배합비를 제시하고자 함

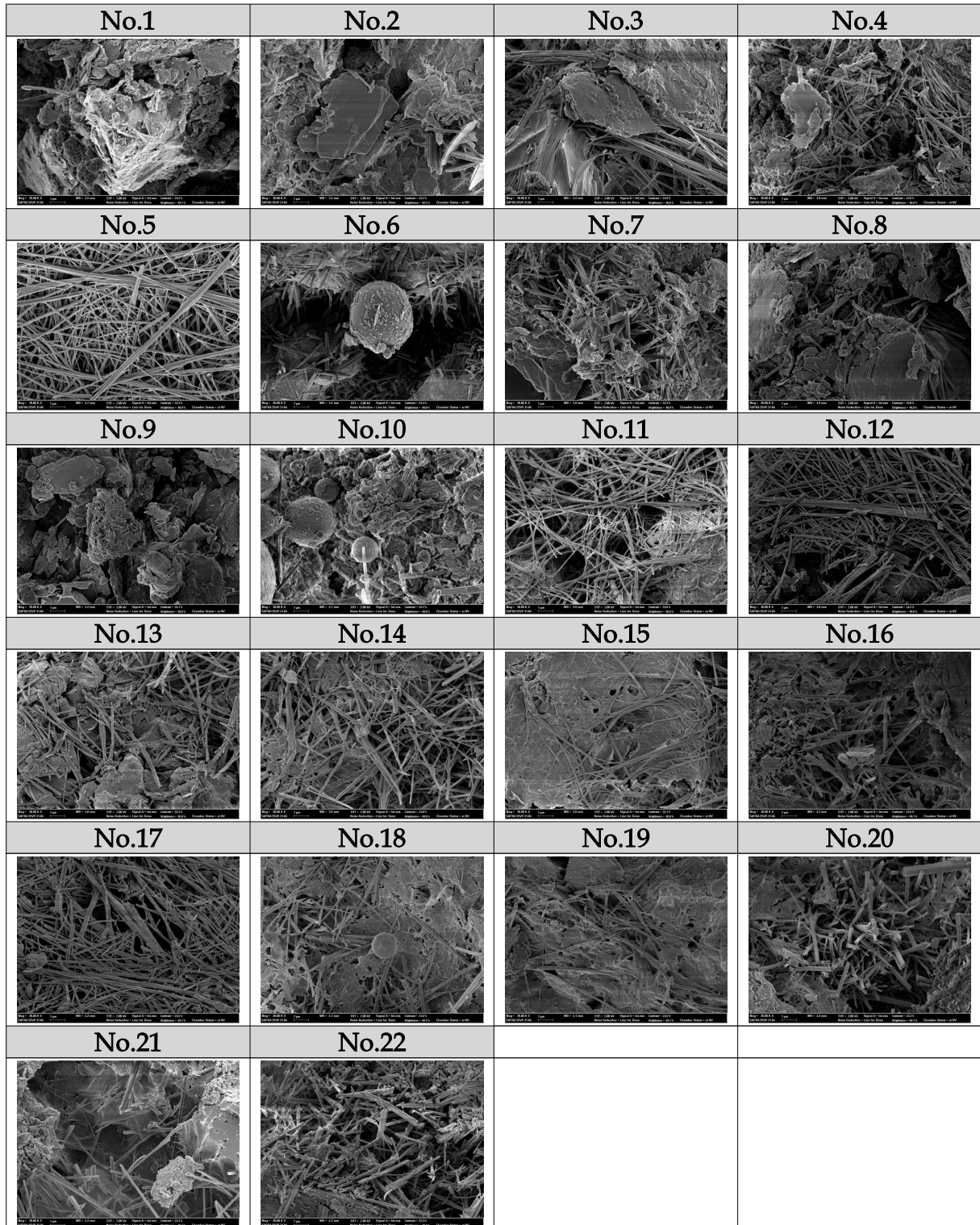
나. SEM 촬영

- 주사형 전자현미경(Scanning Electron Microscope : SEM)은 가느다란 전자빔을 시료 표면에 주사시켜 2차 전자를 발생하게 하여 입체감 있는 시료의 표면상(象)을 얻기 위한 장치로 시료의 표면상을 관찰하면 시료의 구성원소 및 조직의 치밀성 등을 평가할 수 있음
- 예를 들어 수화 반응물의 경우 <그림 3.47>와 같은 Ettringite가 시료 표면상에서 확인되며, Ettringite와 같은 표면상의 치밀성이 강도 증진의 주 원인이 될 수 있음



<그림 3.47>Ettringite 예시(출처 : Google 이미지 검색)

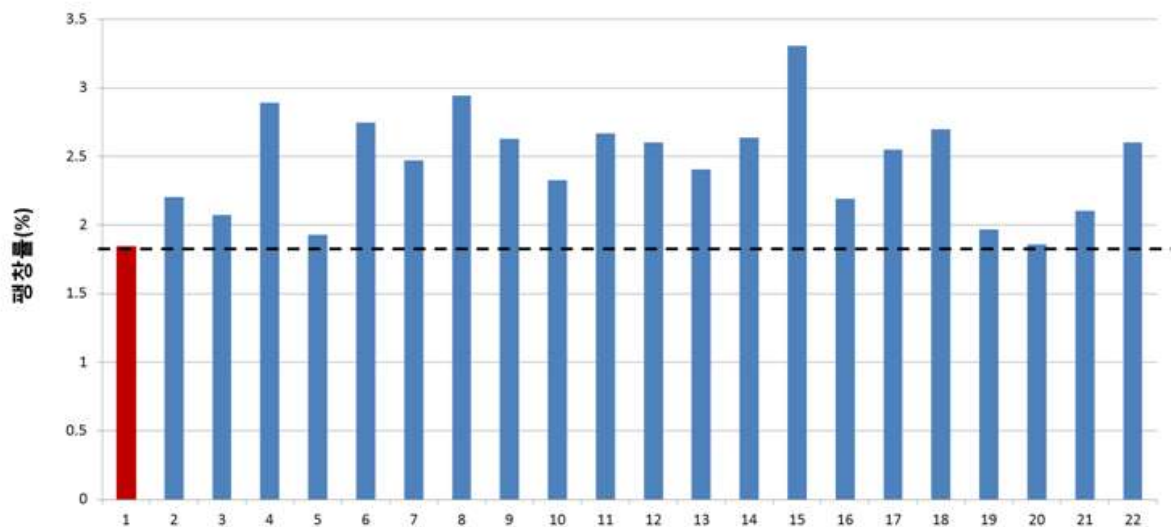
- <그림 3.48>에 시멘트 공시체(No.1)와 제강슬래그 혼합 안정화제 공시체(No.2~No.22)의 SEM촬영 결과를 나타내며, No.1에서는 Ettringite 형태의 표면상이 관찰됨을 확인함
- No.2~No.22에서는 Ettringite 형태의 표면상 짧은 막대구조 외에도 Anthophyllite(철, 규산광물) 형태인 긴 막대구조가 촘촘히 나타는 것이 확인되었으며, 제강슬래그 혼합 안정화제의 장기강도 발현은 Ettringite와 Anthophyllite가 복합적으로 치밀한 구성을 이루면서 강도를 증진시킨 것으로 판단됨



<그림 3.48> SEM 촬영 결과

라. 팽창률 측정

- 시멘트 공시체(No.1)와 제강슬래그 혼합 안정화제의 각 Case별(No.2~No.22)공시체를 수침시켜 항온수조에서 양생하면서 7일, 28일, 60일, 90일마다 부피를 측정함
- 공시체의 부피변화는 매우 미세하여 측정할 때마다 조금씩 달라지기 때문에 Case별로 3개의 공시체를 제작 하였으며, 시기별로 측정된 값을 평균하여 팽창률을 계산함
- 팽창률 계산 결과 시멘트 공시체의 팽창률은 약 1.7%, 제강슬래그 혼합 안정화제의 공시체의 팽창률은 약 1.7~3.4%로 시멘트 대비 최대 200% 증가하는 것으로 확인됨



<그림 3.49> SEM 촬영 결과

라. 강도시험 경향 분석(SPSS)

- SPSS는 변수들 간에 상관관계가 있는지, 상관관계가 있으면 어느 정도인지, 정(+)의 관계인지, 혹은 음(-)의 관계인지를 분석하는 툴로써 배합에 사용된 재료의 비율에 따른 강도, 탄성계수, 팽창률에 대한 영향을 알아보기 위해 상관관계 분석을 실시함



<그림 3.50> SPSS 상관관계분석(출처 : 네이버)

- 강도시험에 대한 SPSS 분석결과(표 3.33~ 표 3.35), 강도 및 탄성계수의 경우 시멘트에서 양의 상관성이, 혼합 재료들의 경우 음의 상관성이 나타남을 확인
- 시멘트, Fly Ash, 탈황석고는 상관계수의 절대값이 장기양생(60일, 90일)시 7일, 28일에 비하여 상관계수의 절대값이 큰 폭으로 떨어지며, 제강슬래그의 상관계수는 상대적으로 일정하게 유지됨
- 시멘트의 비율이 강도 및 탄성계수의 값의 크기에 있어서 지배적인 역할을 하며, 나머지 재료는 대체적으로 비율에 따라 강도가 감소되는 경향이지만 장기양생(60일, 90일)에 따라 그 영향이 줄어드는 것으로 판단됨
- 특정 배합비에서 시멘트만 사용한 경우의 강도 및 배합비와 유사하거나 이를 초과하는 값이 나타나는 것으로 보았을 때, 배합비에 따라 혼합재료들 간의 상호 복합적인 작용에 의하여 강도가 증진되는 것으로 판단됨
- 팽창률의 경우 탈황석고를 제외한 나머지 재료들에 대한 상관성이 대부분 0.5이하로 각 재료의 배합비에 대한 상관성이 떨어지는 것으로 나타났고, 이러한 결과는 팽창성 콘크리트에 쓰이는 탈황석고의 특징과는 일치하지만 전로 슬래그내 Free CaO에 의한 팽창성 특징과는 다소 상이한 결과임

<표 3.33> 재료의 비율 및 강도의 상관계수

구분	시멘트	제강슬래그	탈황석고	Fly Ash	제강+탈황석고	제강+Fly Ash	Fly Ash+탈황석고
강도(7일)	+0.805	-0.229	-0.713	-0.724	-0.624	-0.698	-0.382
강도(28일)	+0.871	-0.355	-0.654	-0.712	-0.668	-0.782	-0.455
강도(60일)	+0.452	-0.375	-0.231	-0.210	-0.631	-0.769	-0.451
강도(90일)	+0.549	-0.213	-0.429	-0.445	-0.347	-0.505	-0.481

<표 3.34> 재료의 비율 및 탄성계수의 상관계수

구분	시멘트	제강슬래그	탈황석고	Fly Ash	제강+탈황석고	제강+Fly Ash	Fly Ash+탈황석고
탄성계수 (7일)	+0.738	-0.325	-0.557	-0.578	-0.552	-0.372	+0.125
탄성계수(28일)	+0.647	-0.056	-0.690	-0.676	-0.649	-0.595	-0.149
탄성계수(60일)	+0.347	-0.504	-0.183	+0.061	-0.437	-0.671	-0.519
탄성계수(90일)	+0.422	-0.350	-0.385	-0.133	-0.467	-0.374	-0.207

<표 3.35> 재료의 비율 및 팽창률의 상관계수

구분	시멘트	제강슬래그	탈황석고	Fly Ash	제강+탈황석고	제강+Fly Ash	Fly Ash+탈황석고
팽창률	-0.311	-0.073	+0.543	+0.360	+0.096	+0.215	+0.441

마. 결론

- 배합비 및 양생기간에 따른 강도시험결과, 강도 및 탄성계수에 가장 큰 영향을 미치는 것은 시멘트의 비율이지만 특정범위의 배합비에서 강도 및 탄성계수가 기준치를 만족함과 동시에 비교 대상군인 시멘트의 강도 및 탄성계수를 초과하는 것으로 나타나, 이에 따른 적정 배합비 No.2, No.5, No.9~15, No.16~20을 선정함
- 적정 배합비에서의 팽창률 또한 시멘트 대비 최대 200% 증가하였고, SEM촬영 결과에서 표면 구조의 치밀성을 확인함
- 재료별 영향을 고려할 때 강도 및 탄성계수는 시멘트와 나머지 재료의 상호 복합적인 작용에 의해 결정되는 것으로 판단됨
- 팽창률 증가는 당초 예상한 결과와 달리 탈황석고의 비율 증가가 주된 요인으로 나타났지만, 시멘트와 순환자원과의 차이점은 순환자원에 의한 팽창률 감소는 없거나 오히려 팽창성을 증가시킨다는 점으로 미루어 볼 때 시멘트를 일부 대체하여 연약지반 안정화제로 활용하기에 적합할 것으로 사료됨
- 적정 배합비를 중량%로 환산하였을 때 적용할 수 있는 중량%범위는 전로 제강슬래그 미분말 20~50 중량%, F급 플라이 애쉬 0~30 중량%, 탈황석고 0~7 중량%, 시멘트 40~70 중량%, 알칼리 활성화제 0~0.5중량%임
- 연구 결과를 기초로 한 배합비 범위를 근거로 연약지반 안정화제에 관한 특허를 출원
- 적정 배합비의 범위는 현장에서의 재료 수급상황에 따라 다양하게 적용 가능하며, 본 연구의 시발점이라고 할 수 있는 전로 제강슬래그의 고부가가치화라는 것에 초점을 맞췄을 때도 시멘트와 전로 제강슬래그만을 가지고도 현장에 적용이 가능할 것으로 보임
- 이에 따라 제 4절에서 시멘트와 전로 제강슬래그의 혼합에 따른 CO₂ 발생량 산정을 통해 환경성 평가를 실시함

제4절. 안정화제 환경성 평가

1. 분석 목적

- 전과정 평가 방법을 이용한 이산화탄소 배출량 산정을 통해 산업 부산물인 제강 슬래그를 연약지반 안정화제의 혼화재로 활용하였을 때 저감되는 환경 영향을 정량적으로 평가하는 것이 목적임

2. 분석 대상

- 본 분석에서는 시멘트만을 사용한 연약지반 안정화제와 제강 슬래그와 시멘트를 혼합한 연약지반 안정화제의 혼합비에 따른 이산화탄소 배출량을 분석하며, 분석대상 재료와 혼합비는 <표 3.36>과 같음

<표 3.36> 안정화제 혼합비

구분	시멘트	제강슬래그
1	100%	0%
2	80%	20%
3	70%	30%
4	60%	40%
5	50%	50%
6	40%	60%
7	30%	70%
8	20%	80%

- 적용한 혼합비는 본 연구의 주재료인 제강슬래그와 시멘트의 혼합비만을 하였으며, Fly Ash나 폐석고는 현장수급상황에 따라 배합여부가 결정되기 때문에 본 절에서는 다루지 아니하였음
- 제강슬래그 비율에 따른 경향을 보기위해 총 8가지 Case에 대하여 분석을 실시하였으며, 이중 Case 4, Case 5, Case 6이 본 연구에서 실험을 실시한 배합비임

3. 분석 방법

가. 전과정 평가

- 전과정 평가 (Life-cycle assessment, LCA)는 생산품, 공정 및 활동 등이 환경에 미치는 영향을 평가하기 위하여 에너지 및 원료 물질 획득에서부터 폐기에 이르는 전과정에 거쳐 환경적 부담을 식별하고 정량하는 방법임
- 건설 분야에서는 건축물의 사용과 폐기시 투입 및 발생하는 물질을 정량화 하기 어려우므로 생산(제작)단계를 주로 다루왔으며, 본 분석에서는 범위를 연약지반 안정화제의 생산단계까지로 한정
- 연약지반 안정화제 생산시 이산화탄소 배출량은 안정화제 생산시 사용된 각각 원료의 이산화탄소 배출 원단위에 배합에 사용된 질량을 곱하여 안정화제 생산시 사용된 모든 재료의 이산화탄소 배출량을 합산하여 산정함

나. 이산화 탄소 배출량 산정방법

- 이산화 탄소 배출량 산정식은 다음과 같음

$$E_{CO_2} = \sum_{i=1}^n e_{mat} \times W_{mat}$$

여기서, E_{CO_2} = 연약지반안정화제 제작시 배출되는이산화탄소총량(kg-CO₂)

e_{mat} = 각 원료의 이산화탄소 배출 원단위(kg-CO₂/kg)

W_{mat} = 단위 연약지반안정화제 제작시 사용되는 각원료의 질량(kg)

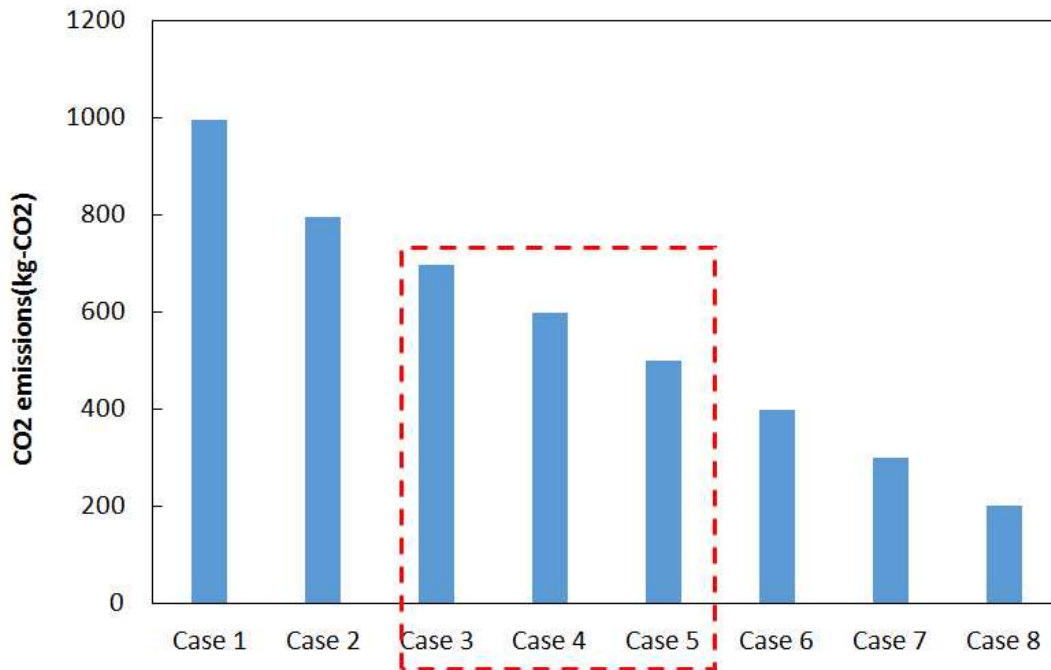
- 국가 LCI database에서는 기본적인 건설 자재에 대한 이산화탄소 배출량을 제공하고 있지만 제강 슬래그의 배출 원단위는 국가 LCI database에서 제공하지 않기 때문에 기존 논문 결과를 활용함(표 3.37)

<표 3.37> 원재료 이산화탄소 배출 원단위

재료	이산화탄소 배출 원단위 (kg-CO ₂ /kg)	참고자료
시멘트	9.94×10 ⁻¹ kg-CO ₂ /kg	국가 LCI DB
제강 슬래그	9.39×10 ⁻⁴ kg-CO ₂ /kg	논문(Chun, 2007)*

*건설 분야의 환경 영향 평가를 위한 전과정평가 적용 방법에 관한 연구(2007)

4. 분석 결과



<그림 3.51> 혼합비에 따른 이산화탄소 배출량

- 제강 슬래그의 혼합비가 증가함에 따라 비례적으로 이산화탄소 배출량이 감소하는 것으로 나타남
- 제강 슬래그의 이산화탄소 배출 원단위는 시멘트에 비하여 약 1/1000수준으로 제강 슬래그의 함유량이 높아질수록 이산화탄소 배출량은 선형적으로 줄어들게 됨을 확인
- 연약지반 안정화제 제작시 혼합재료 총 무게를 1 ton 가정하였을 때, 시멘트만을 사용할 때는 이산화 탄소 배출량이 994kg-CO₂이고, 본 연구에서 제시한 범위인 제강 슬래그 비율을 50%까지 높일 경우(Case 5) 이산화 탄소 배출량은 약 500 kg-CO₂로 시멘트를 100% 사용할 경우 보다 약 50% 이산화 탄소 배출량이 감소하는 것으로 분석됨

제5절. 최종 공법 경제성 평가

1. 개요

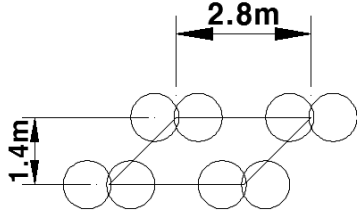
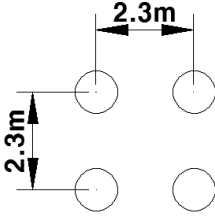
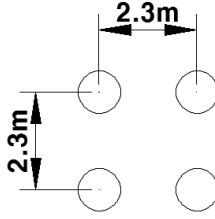
- 개발 공법 및 안정화제의 경제성 비교를 실시하기 위하여 연약지반 상의 성토공사에 적용할 경우에 대한 경제성 검토를 실시함
- 비교 대상은 DCM공법과 유사 특허로 검토된 일본 ALiCC공법을 선정
- 해외 자료 수집으로 확인한 ALiCC 공법의 실제 설계사례 단면에 대하여 DCM 공법과 개발 공법을 적용하여 수량을 결정하고 공사비를 산출함

2. 경제성 검토 조건

가. 검토 조건

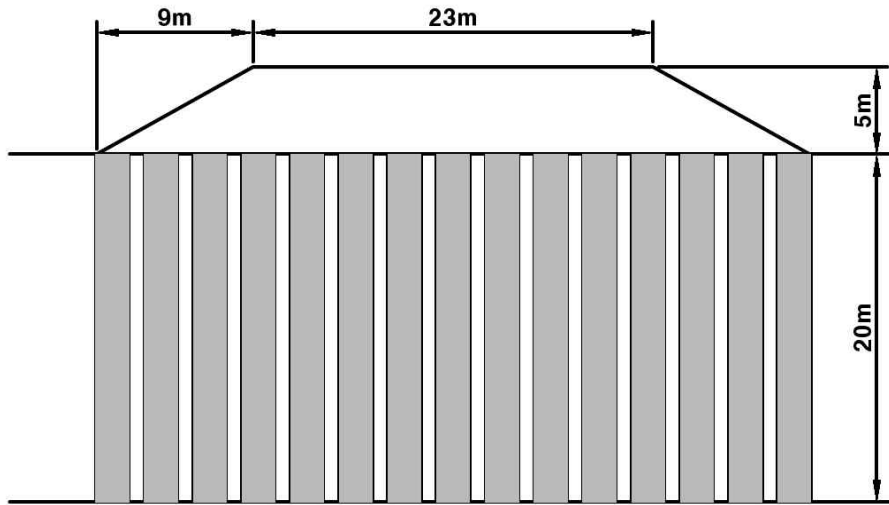
- 검토 조건은 ALiCC 설계사례 (地盤改良のためのALiCC工マニュアル, 2006)를 참조하였으며, 공법별 조건과 검토 단면은 <표 3.38>, <그림 3.52>~<그림 3.57>와 같음

<표 3.38> 경제성 검토 조건

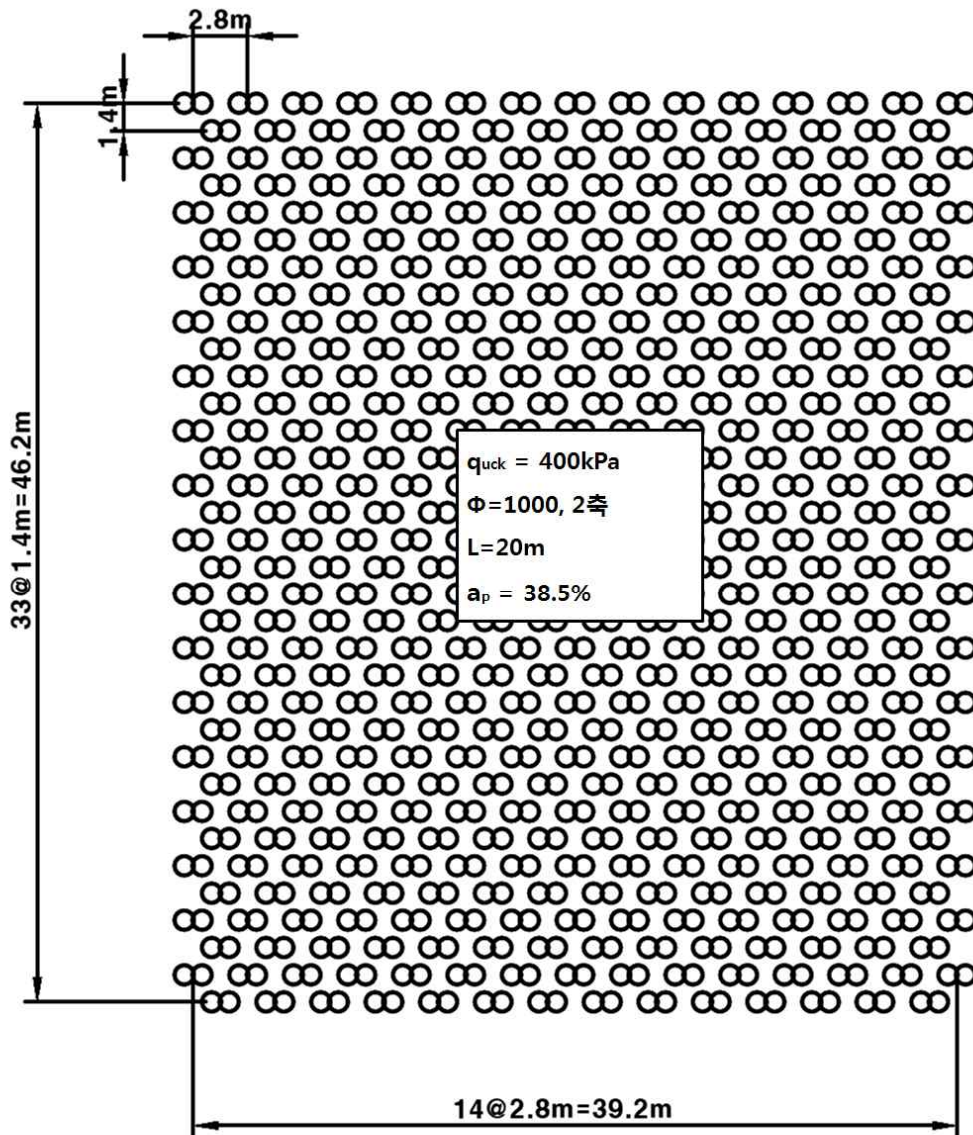
구 분	DCM	ALiCC	개발 공법
말뚝 직경 및 간격	 φ1000mm, 2층	 φ1000mm, 1층	 φ1000mm, 1층
개량률 (면적)	38.5%	14.9%	14.9%
지반심도/ 개량심도	20m/ 20m	20m/ 20m	20m/ 12m*
표층 처리	X	X	표층 처리 1m
안정화제	시멘트	시멘트	제강슬래그 혼화재 혼합 시멘트**
설계 강도	$q_{\text{uck}} = 400 \text{ kPa}$	$q_{\text{uck}} = 600 \text{ kPa}$	$q_{\text{uck}} = 800 \text{ kPa}$
상부 구조물	연약 지반, 도로 성토		
개량 면적	$41\text{m} \times 47\text{m} = 1927\text{m}^2$		

* 나. 수치해석에 의한 개량심도 산정 결과

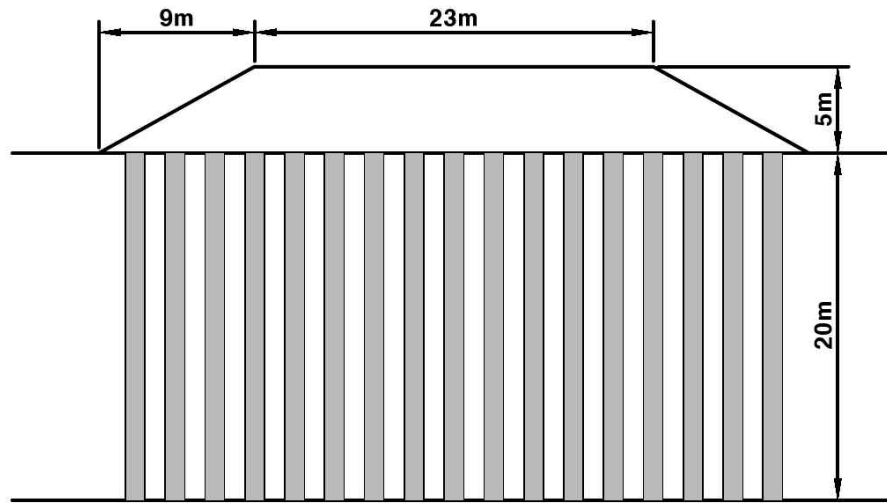
** 제강슬래그 혼화재 재료비 : 55,000원/ton(슬래그 가공업체 문의, 원가 50,000원/ton, 가공비 5,000원/ton)



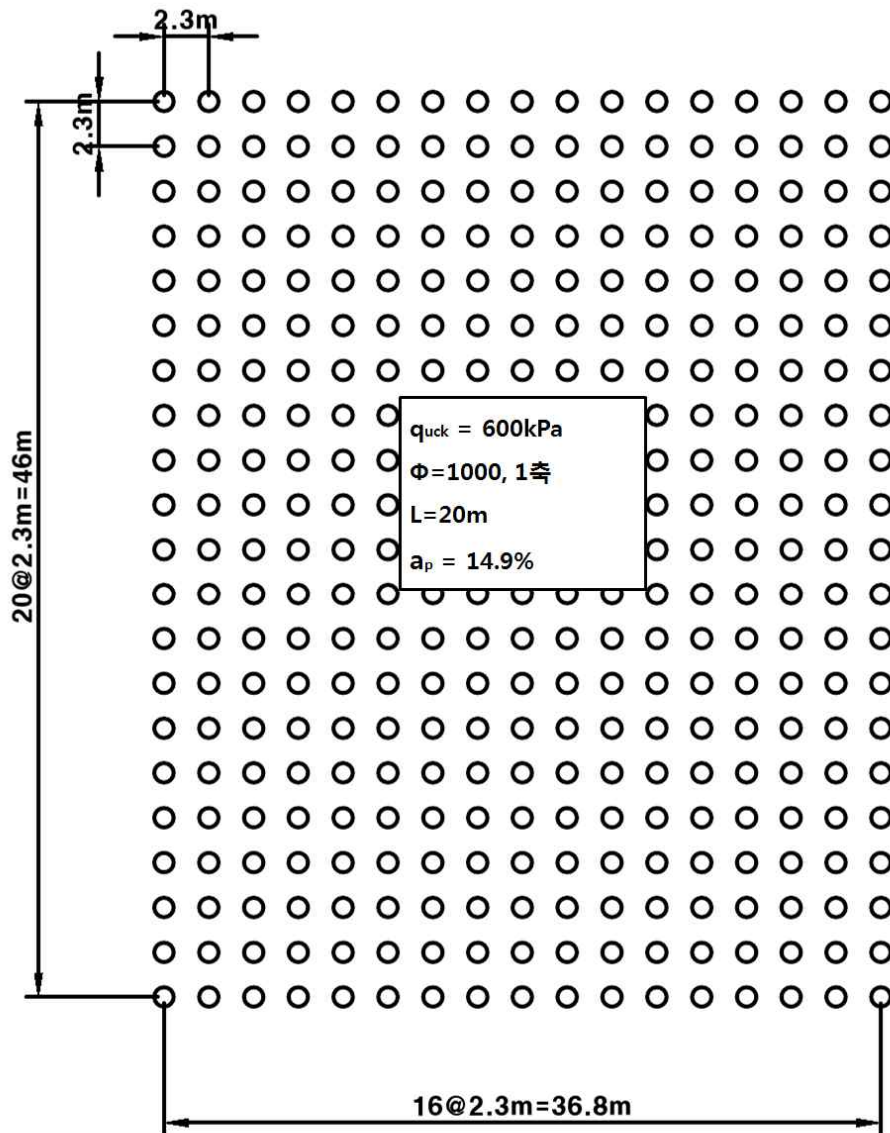
<그림 3.52> DCM공법 경제성 검토 단면



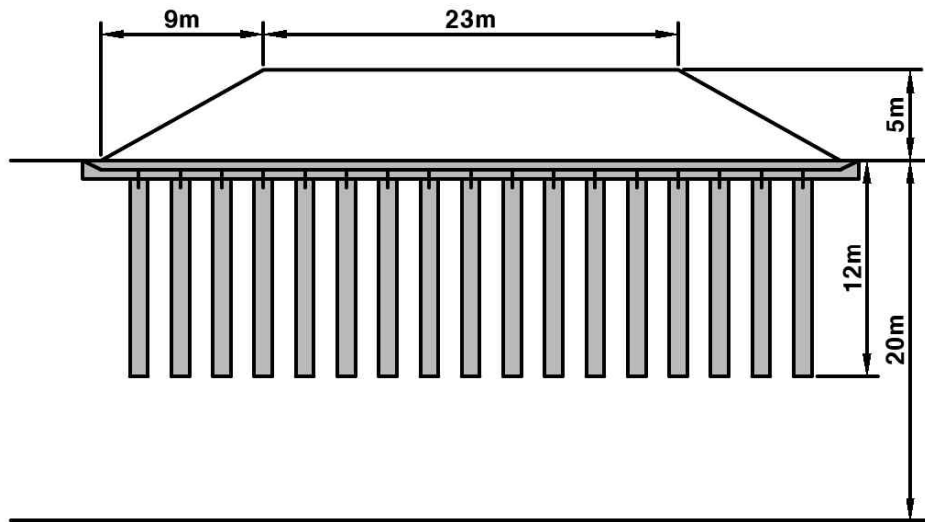
<그림 3.53> DCM 공법 경제성 검토 평면



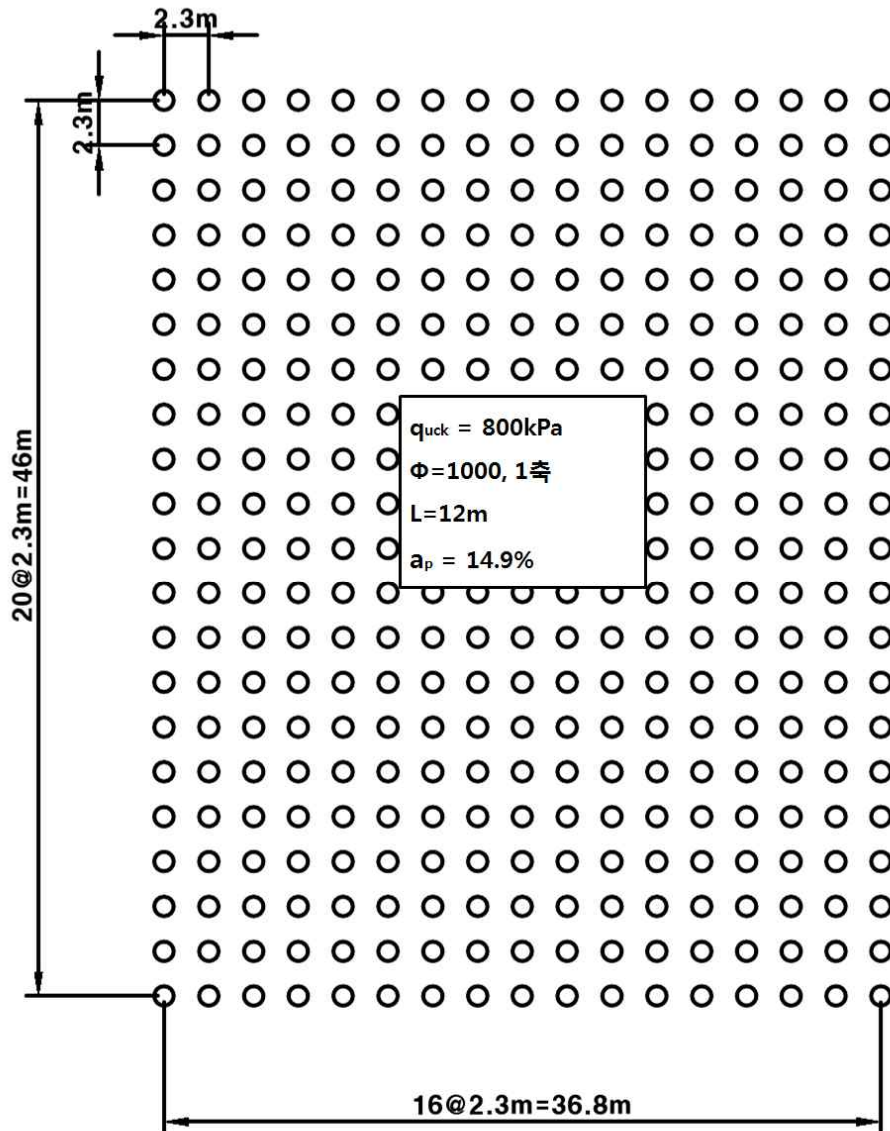
<그림 3.54> ALiCC 공법 경제성 검토 단면



<그림 3.55> ALiCC 공법 경제성 검토 평면



<그림 3.56> 개발 공법 경제성 검토 단면



<그림 3.57> 개발 공법 경제성 검토 평면

나. 수치 해석에 의한 개량심도 산정

- 개발 공법의 심층 개량 심도(12m)는 공법의 심층 개량 심도별 부등침하량을 DCM공법과 ALiCC 공법의 부등침하량과 비교함으로써 산정하였으며, 산정근거인 수치해석 결과는 <표 3.39>와 같음

<표 3.39> 수치해석에 의한 개량심도 산정 근거

구 분	해석 결과	성토부 부등 침하량
DCM		68mm
ALiCC		79mm
개발공법 =개량심도 12m		80mm

3. 경제성 검토 결과

- 각 공법에 대한 단가는 <표 3.40>와 같으며, 건설 표준품셈을 참고로 작성됨
- 경비·노무비·재료비·중기산출 기초 자료는 물가정보(2017년), 물가자료(2017)을 근거로 하였으며, 표층 처리의 경우 지오그리드 및 고정유닛을 고려하여 공법 단가를 산정함

<표 3.40> 공법 단가 및 수량

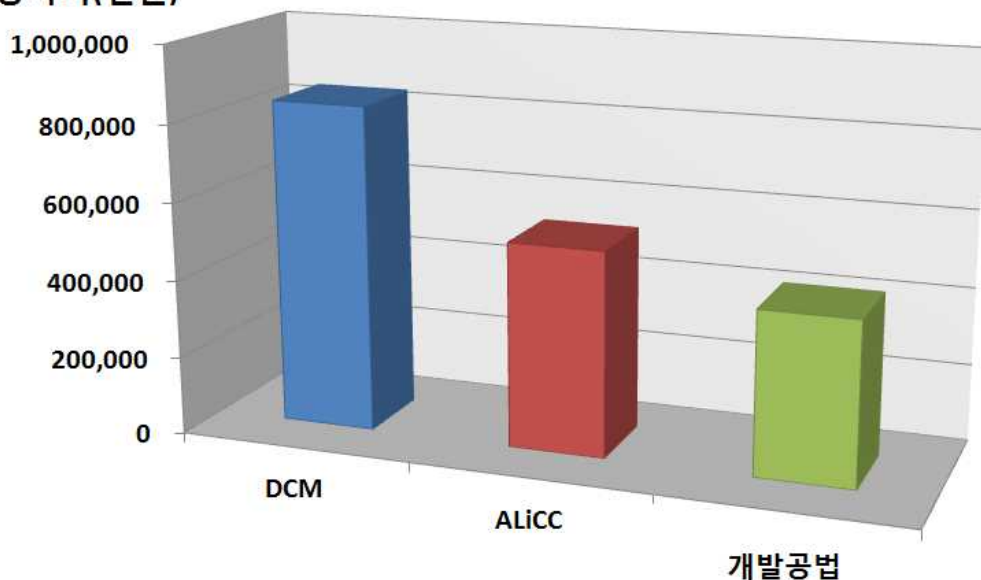
구 분		DCM	ALiCC	개발 공법
심층	단가	85,300원/m	74,000원/m	71,000원/m
	본수	493	357	357
	개량 심도	20m	20m	12m
표층	표층처리(1m) 단가	-	-	60,600원/m ²
	표층 면적	-	-	1927m ²

- 각 공법에 대한 평면 및 단면에서 수량을 계산하여 개량 공사비를 산정 결과는 <표 3.41>, <그림 3.58>와 같으며, 본 연구에서 개발한 공법은 DCM공법에 비하여 약 49% 경제적이고, 일본의 ALiCC 공법에 비해 약 20% 경제적인 것으로 나타남

<표 3.41> 경제성 검토 결과

구 분	DCM	ALiCC	개발공법
공사비(원)	841,058,000	528,360,000	420,940,200

공사비(천원)



<그림 3.58> 경제성 검토 결과

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

제1절. 목표 달성도

- 본 연구개발 과제에서는 연구개발 계획 당시 정량적 연구개발 목표를 산정한바 있으며, 각각에 대한 내용 및 성과 달성도는 <표 4.1>와 같음

<표 4.1> 최종 성과 점검

단위 성과	최종 성과 점검기준				결과	비고
	질적성과지표	목표치	측정방법	가중치		
연약지반 안정화공법	부등침하 감소	기존공법대비 20%감소	수치해석/ 모형실험	1	1	부등침하량 최대 50%감소
	지지력 증가	기존공법대비 5%증가	모형실험	1	1	강도 20%증가 침하량 30%감소
	치환율 감소	기존공법대비 20%감소	수치해석/ 모형실험	1	1	개량심도 최대 40% 감소
	경제성	15%감소	개략공사비 검토	1	1	20% 감소
	시공 매뉴얼	1건	매뉴얼 작성	1	1	부록 2.
친환경 안정화제	설계강도	500kPa →600kPa (변경)	일축압축강도	1	1	최대일축강도 1250kPa 달성
	팽창성	2%증가	팽창률	1	1	시멘트대비 200%증가
	시멘트 감소량	20%감소	순환자원의 시멘트 치환율	1	1	시멘트 최대 50%감소
	CO ₂ 감소량	20%감소	시멘트 감소량	1	1	CO ₂ 발생량 최대 50%감소
	제조 매뉴얼	1건	매뉴얼 작성	1	1	부록 1.
계				10	10	

제2절. 관련 분야 기여도

1. 기술적 측면

- 본 기술은 산업부산물을 혼합한 안정화제와 지오그리드 및 고정유닛을 사용함으로써 개량심도를 최소화하고 지반개량 치환율 저감가능
- 일본과 같은 연약지반 기술 선진국과의 경쟁에서 우위를 점할 수 있는 동시에 특허범주에서 자유로울 수 있다는 장점을 가짐
- 원지반을 그 위치에서 고화하여 이용하는 것이므로 재료수급이 용이하고 안정적인 시공관리로 지반개량 품질 향상 가능하며, 수질오염의 우려가 없고 저진동, 저소음 장비를 사용한 공법이므로 공해의 우려가 적음
- 유사공법에 비해 지반개량효과가 우수한 안정화제를 사용함으로써 공기 단축 및 공사비 절감을 통하여 국제경쟁력 향상 및 국내 기술자립도 향상

2. 경제적 · 산업적 측면

- 지오그리드와 같은 토목섬유, 슬래그 등 다른 사업분야와의 공동성장 기대 가능
- 산업부산물 대량 이용에 따른 국가 순환자원의 재활용으로 CO2 절감과 환경훼손 저감을 통해 국내산업 경쟁력 증대
- 개량된 연약지반 위에 시공되는 토목/건축 구조물에 대하여 국내 기업의 추가적인 수익이 예상되며 이에 따른 국내 건설사들의 해외시장진출시 추가적인 원동력이 되어 성과공유를 통한 동반성장이 예상됨
- 순환자원을 활용한 신사업 창출을 통해 제조업 분야 동반성장으로 창조경제 유발

3. 사회적 측면

- 심층혼합처리 및 표층혼합처리와 지오그리드 및 고정유닛을 사용함으로써 상부 하중을 효과적으로 처리하는 복합공법으로 공사비가 저렴하고 공기를 단축할 수 있어 경제적이며, 사회간접시설의 안정성을 높임으로서 국민 복지 안전 향상
- 지속적인 점유율확대와 동남아시아의 인프라 구축이라는 국내 기업 및 국가적 이미지에 대한 위상 제고로 해외에서 국가 경쟁력 향상

제5장. 연구개발성과의 활용계획

제1절. 사업화 추진 핵심

1. 사업화 추진 내용

가. 연약지반 안정화제

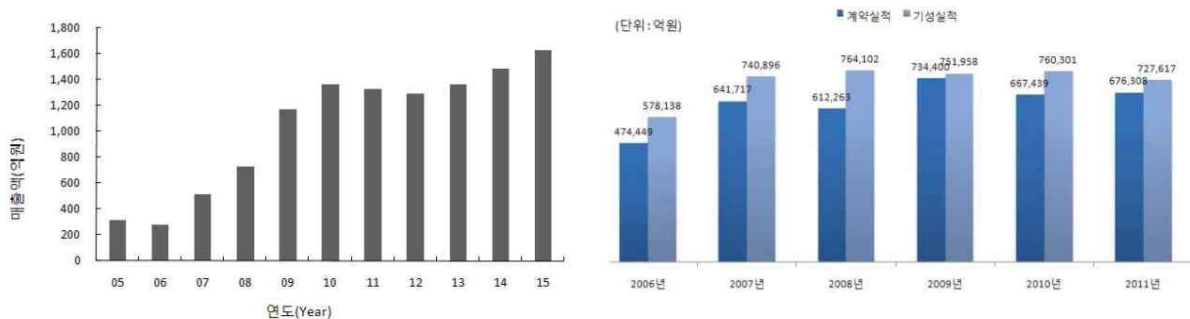
- 특허 : 10-2016-0067123(출원)
- 기술 상세 : 자력선별시 자력선별되지 아니하여 남은 철성분이 감소하고 석회 성분이 증가한 전로 제강슬래그 미분말 20~40% 중량, F급 플라이 애쉬 0~30 중량%, 탈황석고 0~7 중량%, 시멘트 40~70 중량%, 알칼리 활성화제 0~0.5중량%의 퇴적토를 포함하여; 해성점토로 이루어진 해안 연약지반을 고화시킬 수 있도록 한 것을 특징으로 하는 선별공정을 거친 제강슬래그 및 순환자원을 활용한 연약지반 개량용 안정화제.

나. 연약지반 안정화 공법

- 특허 : 10-2017-0050269(출원)
- 기술 상세 : 연약지반 표면에 안정화제 혼합층 및 지오그리드를 사용하여 강성을 가지는 판상구조를 형성시키고, 일정 심도까지의 심층부 연약지반을 말뚝형태로 개량한 후, 고정유닛으로 지오그리드와 심층개량부를 고정하여, 연약지반 표층과 심층개량부를 Raft 형태로 연결 및 일체화시킴으로써 영구적인 지반개량 목적 달성

2. 시장 규모

- 2010년 10월 동양종합금융증권 리서치센터에서 작성한 자료에 의하면 국내 및 동남아 시장을 합쳐서 2009년 이후 연간 1,000억대 이상의 심층혼합처리공법 시장이 예상되며, 연간 신규수주 및 수주잔고는 13.6%이상 증가할 것으로 예상



(a)심층혼합처리 사업 매출액 추이 및 전망 (b)보링 그라우팅 계약 및 기성실적 추이

<그림 5.1> 혼합처리 시장 규모

- 해외건설협회의 자료에 의하면 전체 건설시장 규모 중 토목분야가 약 30%를 점유하고 있으며, 그 중 연약지반개량에 필요한 공사가 30%정도 차지한다고 할 때, 국내 시공사례를 기준으로 하여 본 개발기술의 시장인 심층혼합처리 시장규모를 예측한 결과 2014년 약 12억불에서 2017년에는 약 15억불의 시장이 형성될 것으로 기대됨(씨엠디쏘일을 이용한 지반개량 심층혼합처리공법, 2014)

<표 5.1> 심층혼합처리공법 해외시장규모 예측결과 (단위:백만불,%)

구 분	2013	2014	2015	2016	2017
전체 수주액	65,207	69,393	73,300	77,412	81,910
성장률	-	6.42	5.63	5.61	5.81
토목부문 수주액	18,128	20,818	21,990	23,224	24,573
연약지반개량비	-	6,245	6,597	6,967	7,372
심층혼합처리공법	-	1,249	1,319	1,393	1,474

- 지반 안정재의 경우 업계에 따르면 보링그라우팅 시장에서 지반주입공사가 차지하는 비중은 약 60%로 추정되며, 지반주입공사 중 재료인 지반주입재가 차지하는 비중은 약 35%로 추정됨
- 국내 지반주입재 시장규모를 추산하면 2006년 996억원에서 연평균 7.35% 성장하여 2011년에는 1,420억원에 이른 것으로 추산되며, 향후 새만금 공사 등 대형 해안매립공사 등이 본격적으로 개시될 경우 수요 전망은 지속적으로 증가할 것으로 전망됨

<표 5.2> 국내 지반주입재 시장 규모 (단위:백만원)

구 분	2006년	2007년	2008년	2009년	2010년	2011년	GAGR (‘06~’11)
보링그라우팅 계약	474,449	641,717	612,263	734,400	667,439	676,308	7.35%
지반안정재	99,634	134,761	128,575	154,224	140,162	142,025	7.35%

※ 출처 - 대한전문건설협회 통계연보, 각년도

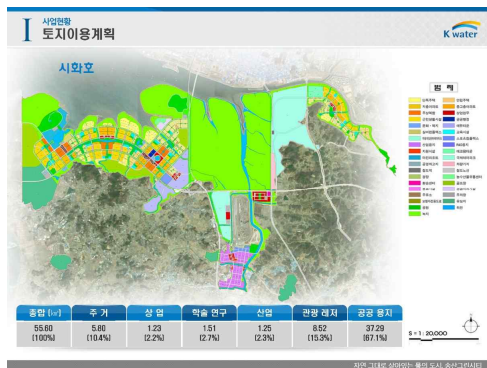
- 지구온난화 위협이 가시화되면서 이산화탄소 등 온실가스를 줄이는 ‘친환경기술’이 각광을 받고 있는 가운데 시멘트 1t을 생산하는 데 약 0.9t의 이산화탄소가 배출되어 용광로에 남는 찌꺼기인 ‘고로슬래그’와 화력발전소에서 석탄을 태고 남은 재인 ‘플라이애시’ 등 산업 부산물을 지반고화제로 이용하는 기술이 응용되고 있으며, 이 연구로 시멘트를 대체하게 되면 이산화탄소 배출량이 크게 줄어들 것으로 전망됨 (델타지역 대심도 연약지반 지반 개량 최적화 기술 연구, 2014)

3. 주요 고객

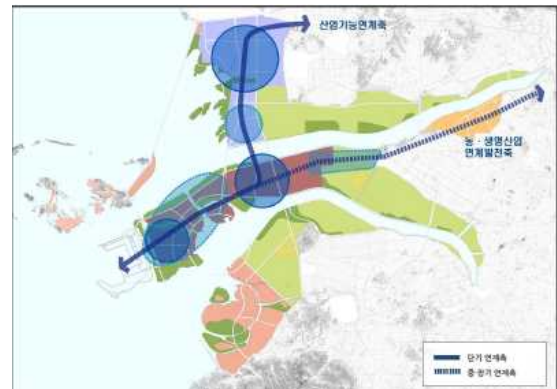
- 국내 연약지반 관련 사업은 발주처가 대부분 공공기관으로 <표 5.3>, <그림 5.2>와 같은 현황임

<표 5.3> 국내 연약지반 관련 주요 고객 현황

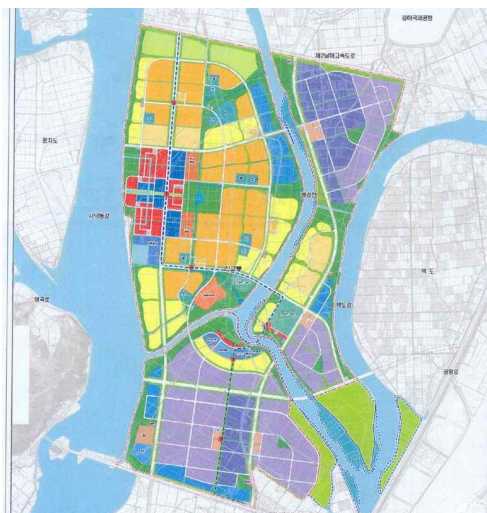
발주처	구분	위치	규모	기간
수자원공사	송산 그린시티	경기도 화성시 송산면, 남양동 일원	55.59km ²	2007 ~ 2030
농어촌공사	새만금 간척사업	전라북도 군산시, 김제시, 부안군 일원	409km ²	용지/기반시설 등 목적에 따라 다양
수자원공사 부산도시공사	에코 델타 시티	부산 광역시	-	2010~계속
국토교통부/ 한국공항공사	김해공항 확장사업	부산 광역시	미정	2017(기본설계) 2021 ~ 2026
한국 도로공사	-	-	-	-
한국 철도시설공단	-	-	-	-



(a) 송산 그린시티



(b) 새만금 간척사업



(c) 에코 델타시티



(d) 김해공항 확장 사업

<그림 5.2> 국내 연약지반 처리 사업

제2절. 추진 전략

1. 추진 계획

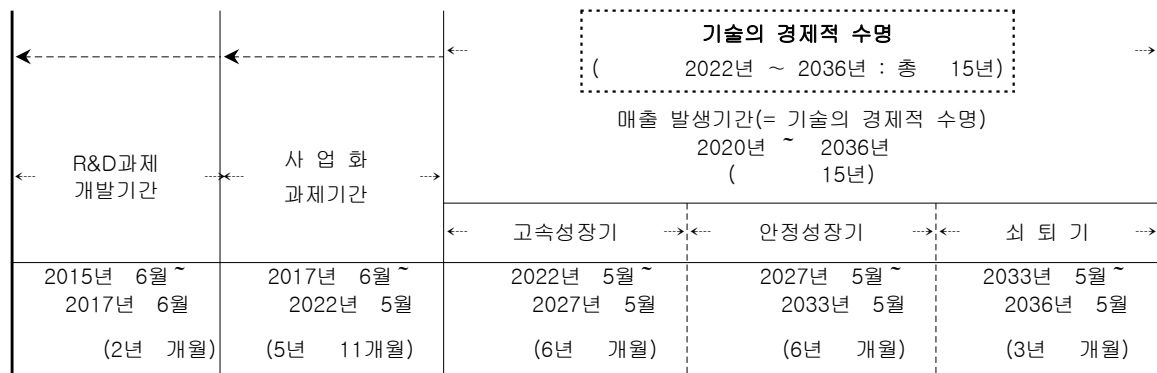
- 주관 기관은 본 연구 과제 이후 <그림 5.3>과 같은 체계로 실용화 단계를 이를 예정임

최 종 목 표		중 분 류	Raft 형태의 대심도 연약지반 안정화 공법 및 순환자원을 활용한 친환경 안정화제 개발		
환경/시장 니즈			대심도 연약지반에 적합한 경제적인 연약지반 안정화 기술 필요		
			동남아시아 건설시장 진출을 위한 국내 기업의 독자적인 기술 필요		
			재료수급이 어려운 현장에 적합한 공법 및 대체재료 필요		
			순환자원의 고부가가치화 원천 기술 필요		
Time Span			2017.06 ~ 2018.05	2018.05 ~ 2021.05	2021.05 ~ 2022.05
연도별 목표			사업화·제품화	현장적용성 시험	실용화
핵 심 기 술	순환자원을 활용한 연약지반 개량용 안정화제	재료	제품 생산라인 구축 (도양 안정화제 생산라인 활용)	특허 및 환경 마크 확보	
	표층 및 심층에 대한 보강/결합 기술 (지오그리드 및 고정유닛)	재료	지오그리드 및 고정유닛 생산 업체 선정 및 계약체결	테스트베드 시험 시공실시	건설신기술 확보
	Raft 형 연약지반 안정화 기술	공법	테스트 베드 확보 (김해공항, 새만금)		
	Raft 형 연약지반 안정화 공법 설계 기술	설계	설계 기술 매뉴얼 작성	Raft 형 연약지반 안정화 공법 설계 기술 확보	

<그림 5.3> 추진 전략

2. 기술개발 추진계획

- R&D 과제 : 국토교통과학기술진흥원 기술축진연구사업(진행중)
- 사업화 과제 : 국토교통과학기술진흥원 사업화과제(2018년 제안서 제출 목표)



<그림 5.4> 기술개발 추진 계획

3. 차별화 전략

- 연약지반 안정화제 : ① 제강슬래그 중 발생량이 많은 전로슬래그를 활용한다는 점에서 차별화 ② 연약지반 안정화에 있어서 혼화재로서의 역할을 수행할 수 있는 재료를 개발 ③ 다양한 순환자원을 활용함으로써 현장상황에 맞게 안정화제를 제시할 수 있도록 함
- 연약지반 안정화공법 : 안정화제, 지오그리드, 고정유닛이라는 재료적 측면과 공법을 패키지화하여 기존 심층혼합처리공법 및 연약지반 개량공법과 차별화

4. 수익모델

- 수익모델은 재료 / 공법 설계 및 시공으로 구분될 수 있음

<표 5.4> 수익 모델

구 분	수익모델	주요 판매처
재료(안정화제)	안정화제(고화제) 판매사업	• 토양 중금속 고형화/안정화 • DCM/SCW 용 안정화제 • 대규모 연약지반 개량 현장
연약지반 안정화 공법	공법에 대한 설계·시공	
재료(고정유닛)		

5. 시장 확보 방안

- 국내 연약지반 관련 사업은 발주처가 대부분 공공기관이므로 재료나 공법에 있어서 발주처의 우선구매/우선적용을 받을 수 있는 환경표지와 건설신기술 확보를 통한 수익창출을 기본적인 수익모델로 함
- 해외 시장의 경우 기 진출한 대기업 시공사와의 기술실시계약을 통한 연계진출을 꾀할 계획

<표 5.5> 상용화 전략

대 상	상용화 전략
국내	• 발주처 우선구매/우선적용 제도를 통한 시장점유율 확보
해외	• KOTRA, 한국도로공사, 해외건설협회 등과 같은 해외진출의 도움을 줄 수 있는 공사 및 협회와의 교류와 기존 협력업체인 GS건설, 한화건설, 포스코 등과의 동반 진출 전략수립

6. 환경마크

- 제품 전과정에서의 종합적 환경성뿐만 아니라 품질·성능이 우수한 친환경 제품(서비스 포함)을 선별하여 환경마크를 인증 (인증기간 : 취득일로부터 2년)

<표 5.6> 환경마크 인증시 지원 내용

구 분	내 용
조달청 입찰심사시 가산점 적용	• 환경마크 인증제품은 조달청 물품 구매 적격 심사의 신인도 평가에서 1.5점(최대 3점)의 가점 적용
정부포상 제도에 추천	• 환경마크 인증제품 생산 기업을 정부 포상 제도에 추천 '친환경 산업 육성 및 저탄소 녹색성장 유공' 등
인증제품 홍보 및 유통 판매처 개척지원	• 매월 뉴스레터 및 광고를 활용하여 인증제품 홍보
공공기관의 의무구매	• 공공기관은 구매하고자 하는 품목에 환경마크 등 친환경상품이 있는 경우, 의무적으로 구매
지자체 및 정부 운영제도에서 인증제품 사용 혜택	• 서울시 등 전국 지자체에서 녹색구매 기준 제정 및 공사 시방서를 통해 환경마크 인증제품을 우선 구매
기타	• 해외 환경마크 인증 지원

7. 건설신기술

- 기술개발자(개인 또는 법인)의 개발의욕을 고취시킴으로서 국내 건설기술의 발전을 도모하고 국가경쟁력을 제고하기 위한 제도 (보호기간 : 지정일로부터 3년, 7년까지 연장 가능)

<표 5.7> 건설 신기술 인증시 지원 내용

구 분	내 용
기술사용료 청구	• 국토교통부장관은 보호기간을 정하여 기술개발자(법인포함)에게 신기술에 대한 기술사용료를 받을 수 있도록 할 수 있음
기술사용협약 체결	• 발주기관은 건설공사에 있어 신기술 등을 설계에 포함하고자 하는 경우에는 입찰공고전에 기술보유자와 기술사용협약을 체결하여야 함
신기술 우선적용 권고	• 국토교통부장관은 신기술의 활용·촉진을 위하여 발주청이 시행하는 건설공사에 신기술을 우선 적용하게 할 수 있음
설계반영 의무	• 발주청은 지정·고시된 신기술이 기존 기술에 비하여 시공성 및 경제성 등에서 우수하면 그가 시행하는 건설공사의 설계에 반영하여야 하며, 건설공사를 발주하는 경우에 이를 공사계약서에 명시하여 신기술개발자로 하여금 해당 건설공사중 신기술과 관련된 공정에 참여하게 할 수 있음
시험시공의 권고	• 국토교통부장관은 발주청에게 신기술과 관련된 신기술장비등의 성능시험·시공방법등의 시험시공을 권고

8. Risk 분석 및 대책

<표 5.8> SWOT 분석

강점(Strength)	기회(Opportunity)
• 연약지반기술에 있어서 국내기업의 독자적인 기술이 부족한 상황에서 국내 현장적용이나 해외진출시 기술적 우위를 점할 수 있음 • 재료수급이 어려움 동남아시아 건설시장에 있어 순환자원을 활용한 재료를 사용하여 최소투입비용으로 높은 가치 창출 가능 • 연약지반 분포가 넓은 동남아시아에서 도로 건설시 값싼 재료를 활용한 경제적인 공법적용을 통하여 대규모 공사비 절감 가능	• 국내 순환자원 재활용 시장에 있어서 제강 슬래그의 고부가가치화에 대한 필요성 증가 • 국내외 심층혼합처리시장의 확대 • 연약지반의 심도가 깊고 분포가 넓은 동남아시아 건설시장에 있어서 연약지반 처리 기술은 시장 진출에 있어 필수 요소임 • 국내 순환자원의 동남아시아로의 수출로 인한 안정화제 공급 확대
위협(Threat)	약점(Weakness)
• 연약지반 안정화제 시장에 있어서 국내외 관련 업체와 종류가 다양함에 따라 경쟁이 치열 • 기존에 진출한 업체 혹은 진출을 시도하고 있는 국내외 업체들과의 경쟁 심화	• 중소기업의 경우 연구에 대한 투자규모의 한계로 단독 연구개발시 공법의 완성도 및 검증의 한계가 있음 • 국내 테스트 베드 및 현장 실증 부족

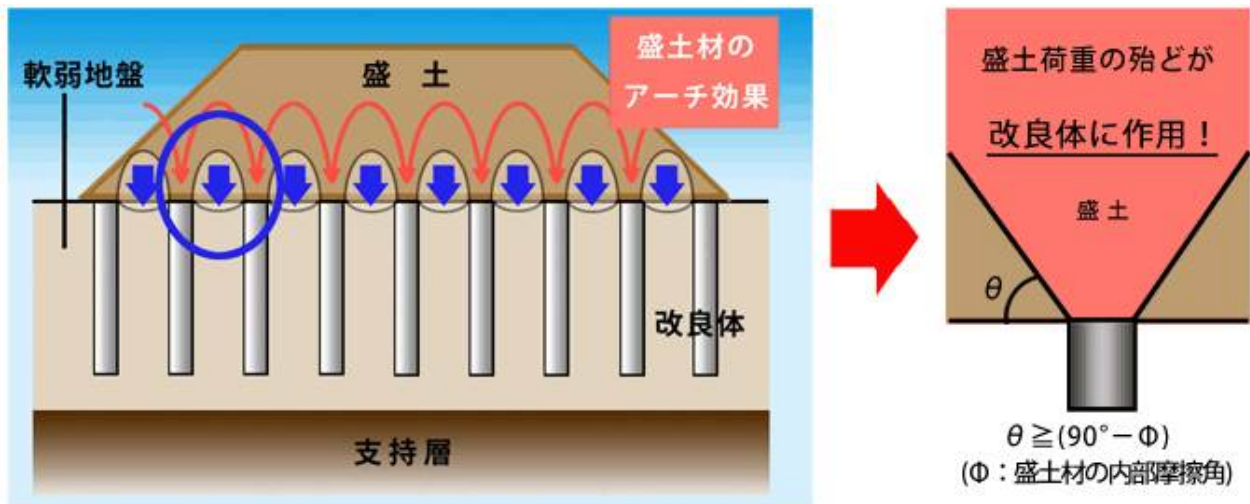
- 연약지반 처리 기술 및 재료에 있어서 국내기업의 독자적인 기술개발로 현재 활발하게 진행되고 있는 국내 항만 인프라 사업과, 재료수급이 어렵고 연약지반 분포가 넓은 동남아시아 건설시장에 진출, 대규모 공사비 절감과 국내 기업의 기술적 우위를 점할 수 있을 것으로 기대됨
- 순환자원 재활용 시장에 있어서 성토재료와 매립재료로써 제한된 용도로만 사용되고 있는 순환자원의 다른 방면으로의 활용에 대한 필요성이 증가하고 있으며, 이를 매년 확대되고 있는 국내외 심층혼합처리 시장 적용시 대량소비와 고부가가치화가 가능함
- 연약지반의 심도가 깊고 분포가 넓은 동남아시아 건설시장에 있어서 연약지반 처리 기술은 시장 진출에 있어 필수 요소이며, 현재 국내 순환자원의 동남아시아 수출과 더불어 이를 활용한 안정화제 개발시 시장 증가에 따른 수요를 맞출 수 있는 상황
- 중소기업의 경우 연구에 대한 투자규모의 한계로 단독 연구개발시 공법의 개발 및 검증의 한계가 있어 기술의 경쟁력과 완성도를 높이기 위하여 국책 연구과제를 기반으로 아이디어의 검증 및 기술화를 실시할 필요가 있음
- 이후 사업화 과제를 통하여 국내 테스트 베드 및 현장 실증을 실시함으로써 최종 설계 기술을 확립한 후 국토부 지원하에 민관파트너십형태의 해외 건설시장진출을 꾀할 계획임

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. ALiCC 공법

가. 공법 개요

- ALiCC 공법은 일본에서 개발된 공법으로 성토재의 아치효과(그림 6.1)를 고려하여 심층혼합처리등에 의한 시멘트계 개량체를 종래보다도 낮은 개량률 (단위면적당 개량체 두부 면적 비율10%~30%)로 성토 아래층 전면적으로 배치하여 연약지반의 압밀침하경감을 꾀하는 공법임



<그림 6.1> ALiCC 공법 개요

(출처 : <http://www.chemico.co.jp/02improvement/category03/alicc.html>)

나. 공법 특징

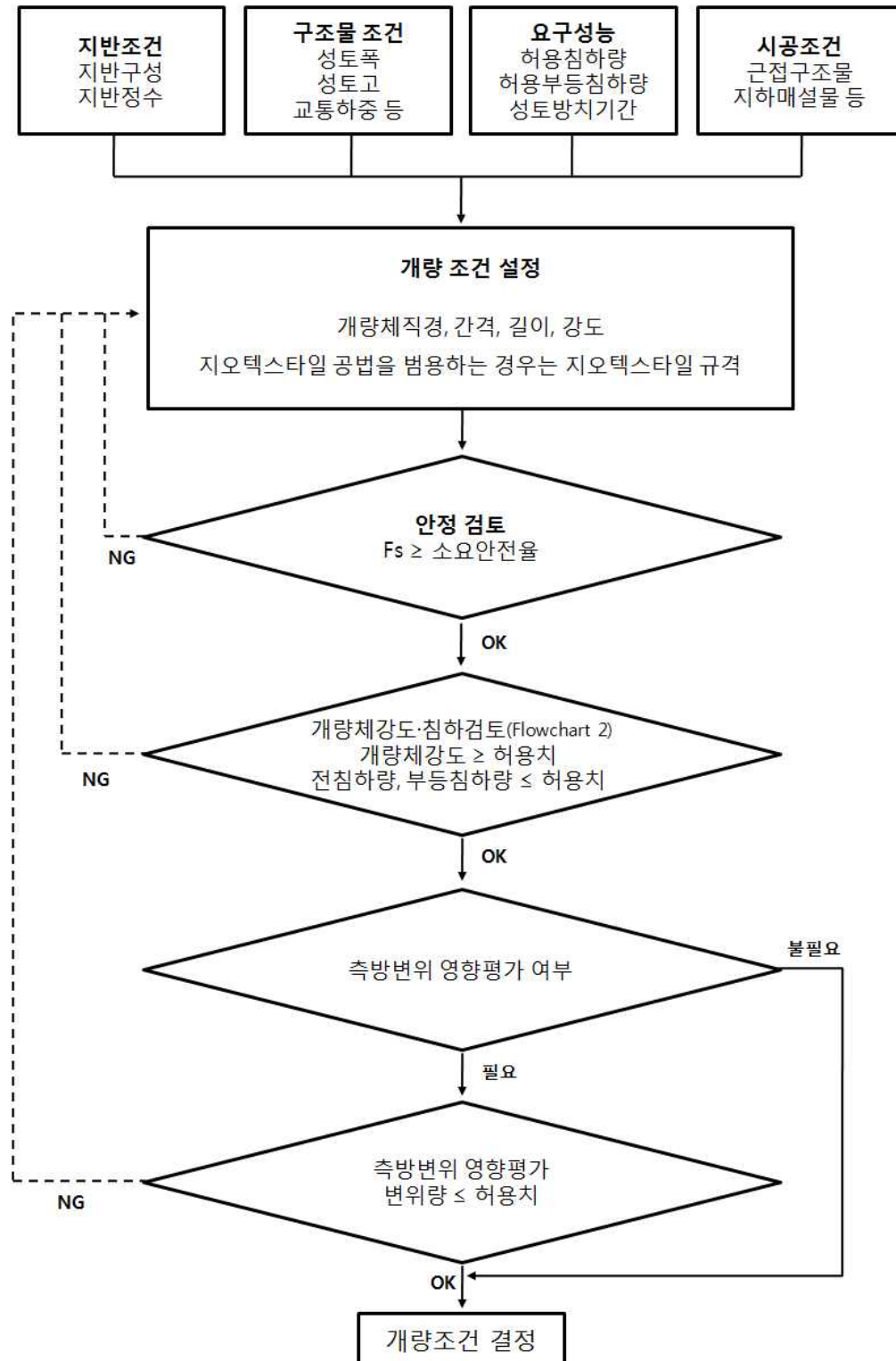
- 배수공법과 달리 압밀이 필요 없기 때문에 최대 70% 공기 단축 가능
- 개량 길이 25m의 경우로 공사비를 산출 한 경우 비용 28 % 이상의 공사비용 감소
- 공법의 기본 사양은 <표 6.1>와 같음

<표 6.1> ALiCC 공법 기본 사양

구 분	기본 사양	실시 예
설계 강도(kPa)	$q_{uk} = 600 \sim 1,500$	
개량체 직경(D, mm)	$D = 600 \sim 1,300$	
C.T.C(λ , mm)	$\lambda = 1,000 \sim 2,800$	
치환율	10 ~ 30%	

다. 공법 설계

- ALiCC 공법의 설계순서는 <그림 6.2>와 같으며, 일본 토목연구소(2006)에서 제시한 산정식에 의하여 안전율과 침하량을 계산함
- 본 연구과제 이후 사업화과제에서의 설계법 연구에 있어 ALiCC 공법에서 활용한 이론과 설계법을 참고하여 발전시키고자 함



<그림 6.2> ALiCC 공법 설계 순서(土木研究所, 2006,
地盤改良のためのALiCC工マニュアル)

2. 싱가포르 출장

- ICCESE 2016 International Conference 학술발표 참석과 현재 톰슨이스트 코스트라인 지하철공사와 관련하여 연약지반 개량공사가 활발하게 이루어지고 있는 싱가포르의 현장 답사를 위하여 출장을 다녀옴



<그림 6.3> 톰슨이스트 코스트라인 지하철공사 시공현장

- 톰슨이스트 코스트라인 지하철공사 및 지하철 차량기지 연약지반 개량공사(동아지질) 현장답사 결과 현장의 지반상태는 지표로부터 약 20m 까지 해성퇴적층이 존재하며, 그 하부에는 충적층이 존재하는 상태로 DSM(DCM) 공사 목적은 지지력 증대나 터파기 공사 시 수평변위를 제어하는데 적용됨



<그림 6.4> DSM 시공현장

- 안정화제 재료는 W/C 100% 배합의 고로슬래그 시멘트이며, 재료는 현지업체에서 조달하지만 전량 수입제품을 사용함
- 이외에도 국내의 다수의 시공사들이 싱가포르에 진출하여 있으며, 대부분의 현장에서 연약지반에 대한 대책은 필수적인 것으로 나타나 향후에 공법 및 재료에 대한 지속적인 수요가 발생할 것으로 판단됨

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안 등급 : 일반

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

없음

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 안전점검 및 정밀안전진단

- 점검목적 : 안전사고 예방 및 안전의식 고취
- 점검안내 : ①포털 공지 ②그룹 메일 ③SMS 문자 전송
- 안전점검 및 정밀 안전진단 범위 : 연구실 일반관리, 소방, 기계, 산업위생, 화학약품, 생물, 전기, 가스
- 일상안전점검 : 연구활동 종사자가 매일 점검
- 정기안전점검 : 년 1회, 4~5월 실시(유자격자 또는 업체 위탁점검)
- 특별안전점검 : 연구주체의 장이 필요하다고 인정하는 경우 실시
- 정밀안전진단 : 2년 1회, 4~5월 실시

2. 안전교육

- 교육대상자 : 연구활동 종사자
- 온라인 안전교육 : 전반기 6시간, 후반기 6시간
- 자체교육 : 실험·실습 수업 전 5분 자체 안전교육실시

3. 상해보험 가입

- 대상 : 연구활동 종사자
- 보상기준 : 연구실에서 발생한 사고로 연구활동 종사자가 부상, 질병, 신체장해, 사망 등 생명 및 신체상의 손해발생시 보상

4. 건강검진

- 대상 : 연구활동 종사자
- 시행 : 매년 3~4월

5. 추가 연구실 안전시설 안전성 확보

- 위험물 저장소 설치
- 비상샤워기 및 세안기 설치
- 가스누설경보기 설치
- 가스용기 전도방지 고정장치 설치
- 안전보호구함 제작
- 안전관리팀 전담부서 설치 검토

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

1. 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	ICCESE 2016	최우석	2016.03.03	River View Hotel	Singapore
2	2016 토목섬유학회 봄 학술발표대회	함현수	2016.04.21	대치동푸르지오밸리	Korea
3	ICCGE 2017	최우석	2017.04.27	The Westin Miyako Kyoto	Japan

2. 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				기 여 율
			출원인	출원일	출원번호	등록번호*	
1	선별공정을 거친 제강슬래그 및 순환자원을 활용한 연약지반 개량용 안정화제	대한민국	(주)산하이앤씨	2016.05.31	10-2016-0067123	-	
2	지표부 부분 가압 실험장치	대한민국	아주대학교 산학협력단	2016.06.20	10-2016-0076568		
3	고성능 연약지반 안정화제를 사용하여 형성한 판상구조와 말뚝구조를 지오그리드와 고정유닛을 사용하여 강결로 일체화한 부상형 연약지반 안정화 구축방법	대한민국	(주)산하이앤씨	2017.04.19	10-2017-0050269		

* 연구개발성과 관리·유통 전담 기관에 등록된 번호 기재

제11장. 기타 사항

1. 학술지 게재는 현재 총 2건 준비중으로 국토교통과학기술진흥원 국토교통기술촉진연구사업의 지원임을 사사로 표기하고 금년내로 제출 예정임
2. 제강슬래그 혼화재 제조매뉴얼 1건, 시공매뉴얼 1건, 고정유닛 디자인에 대하여 부록으로 첨부함

제12장. 참고 문헌

1. 土木研究所(2006), 地盤改良のためのALiCC工マニュアル
2. 고정우(2010), 굴패각을 혼합한 SoilCement의 강도특성, 동신대학교 석사논문
3. 경상대학교(2013), 범용 친환경 고화제개발 연구
4. 국토교통부(2013), 해외건설 추진계획
5. 국토교통부(2017), SMA 아스팔트를 이용한 CRCP의 덧씌우기 및 복합포장 시스템 개발 연구
6. 김병탁, 김재성, 김용진(2009), 베트남 호치민 나베지역의 연약지반 특성 소개, 한국지반공학회지 기술기사
7. 김상엽(2011), 친환경 고화제를 이용한 황토모르타르의 특성
8. 김선곤(2013), Piled Raft 기초로 지지된 연약지반 상의 제방의 거동, 한양대학교 석사논문
9. 김순호(2002), 굴 패각을 이용한 지반 개량형 고화제 개발에 관한 연구, 한국폐기물자원순환학회 논문집
10. 김승렬(2002), 연약지반 기술의 최근 연구동향
11. 김승렬(2003), 연약지반공학자의 위상제고를 위한 제언 한국지반공학회 연약지반기술위원회의 학술세미나
12. 김원기(2014), 제강슬래그의 특성과 재활용 현황
13. 김정훈(2013), 수치해석을 통한 연약지반상 시공된 Piled Raft 기초의 거동 연구, 한국지반환경공학회 논문집
14. 김진만(2012), 다양한 철강제조공정에서 부산되는 전기로 환원슬래그의 화학적 특성, 한국콘크리트 학회 봄 학술발표회
15. 김태희(2002), 제강슬래그의 재활용
16. 김홍택(2009), 말뚝지지 전면기초(Piled Raft)의 이해와 적용사례, 한진건설기술 특별기고

-
17. 권호열(2003), 굴폐각 고화재를 혼합한 준설토의 강도특성, 안동대학교 석사논문
 18. 동아지질(2010), Investor relations
 19. 배민혁(2013), 싱가포르 마리나 해안고속도로 현장탐방, 쌍용건설
 20. 백진열(2011), 대심도 연약지반상 마찰무리말뚝의 거동분석, 연세대학교 석사논문
 21. 손채영(2010), 해상 DCM공법의 개선방향에 관한 연구, 울산대학교 석사논문
 22. 신동훈(2009), 토목섬유로 보강된 슬래그 재료의 전단강도 및 변형특성
 23. 신재원(2011), 전기로 제강 환원슬래그 혼합토의 지반공학적 특성, 한국지반환경공학회 논문집
 24. 신현영(2014), 말뚝식과 블록식이 혼합된 시멘트혼합처리공법(DCM)의 구조체 해석 비교 연구, 한국지반공학회 논문집
 25. 쌍용건설(2010), 연약지반 최근 기술 동향
 26. 안병욱(2009), 유한요소해석에 의한 지오그리드 해석, 인하대학교 석사논문
 27. 연약지반(2005), 한국지반공학학회 지반공학시리즈 6
 28. 유세은(2011), 모형실험 및 수치해석에 의한 지오그리드 보강효과 분석, 인하대학교 석사논문
 29. 윤길림(2014), 준설토-슬래그 혼합토의 압축강도 특성연구, 한국지반환경공학회논문집
 30. 윤길림(2006), 표층/심층혼합처리용 굴폐각 고화재의 고화성능 평가, 한국지반공학회 논문집
 31. 이상진(2007), 굴폐각 고화재를 혼합한 준설토의 전단특성, 한국지반환경공학회 논문집
 32. 이수형(2009), 수치해석을 통한 성토지지말뚝에 대한 토목섬유 보강 효과 분석, 한국철도학회논문집
 33. 이승현(2003), 유한요소해석을 통한 Piled Raft의 하중지지능력 연구, 선문대학교 석사논문
 34. 이정훈(2011), 지오그리드로 보강된 토목용 필터재의 인발 및 파단저항 특성에 관한 연구, 부산대학교 석사논문
-

-
35. 이진형, 정상섭(2007), 연약지반에 시공된 Piled Raft 기초의 3차원 거동분석, 한국지반공학회 논문집
 36. 이창희(2008), 연약지반에 설치된 지오그리드 보강 쇄석말뚝의 거동에 대한 실험적 연구, 한양대학교 석사논문
 37. 정민수, 김현수, 김효열, 강병희(2007), 혼화재를 혼합사용한 굴폐각 미분말의 물성 연구
 38. 최우석(2014), 토목섬유와 고정유닛을 활용한 부상형 연약지반 개량공법 해석적 연구, 2014 한국지반공학회 학술발표회
 39. 최재석(2014), 전기로 환원슬래그를 이용한 CSA계 시멘트클링커, 인하대학교 박사논문
 40. 최재석(2014), 전기로 환원 슬래그 미분말의 콘크리트용 혼화재 적용성에 관한 실험적 연구, 한국산화기술학회논문지
 41. 특허청(2004), 연약지반 개량기술
 42. 한국건설산업연구원(2013). 2013년 건설경기 전망
 43. 한국전자재시험연구원(2009), 산업부산 무기질 재료를 적용한 심층혼합지반처리용 무기복합계 고화재 개발
 44. 한국도로공사 도로연구소(1993), 연약지반처리를 위한 심층혼합공법연구
 45. 한국시멘트 협회(2012), 주요 7개국 시멘트 산업 동향보고
 46. Japan Civil Engineering Research Institute (2007), ALiCC method manual for ground improvement, Kashima publication
 47. K-water연구원 기반시설연구소(2014), 델타지역 대심도 연약지반 지반개량 최적화 기술연구
 48. ZHONG B.Y. et al(2012), Structure and property Characterization of Oyster Shell Cementing Material
-

부 록 1.
제강슬래그 혼화재 제조 매뉴얼

시멘트계 연약지반 안정화제용 제강슬래그 혼화재 제조 매뉴얼



주식회사 산하이앤씨
Sanha Engineering & Construction Co.

목차

1. 총 칙	1
1.1 목적	1
1.2 적용 범위	1
1.3 적용 방법	1
1.4 용어의 정의	2
2. 재 료	5
2.1 일반사항	5
2.2 재료 선정	5
2.3 재료 관리	5
2.3.1 입도	5
2.3.2 Ca 함량	5
2.4 재료 보관	5
3. 생산관리	6
3.1 일반사항	6
3.2 혼화재 생산점검 항목	6
3.2.1 자력선별기	6
3.2.2 분쇄기	7
3.2.3 입도선별장비	7
3.3 안정화제 생산설비 운영	8
3.3.1 자력선별	8
3.3.2 분쇄	9
3.3.3 입도선별장비	9

4. 품질관리	10
4.1. 일반사항	10
4.2. 품질관리 점검 항목	10
4.2.1. 입도	10
4.2.2. Ca 함량	10
4.2.3. 생산량	11
4.2.3. 안정화제 보관	11
5. 부록	12
5.1. 입도 점검 항목	12
5.2. 화학성분 점검 항목	13

1. 총 칙

1.1. 목적

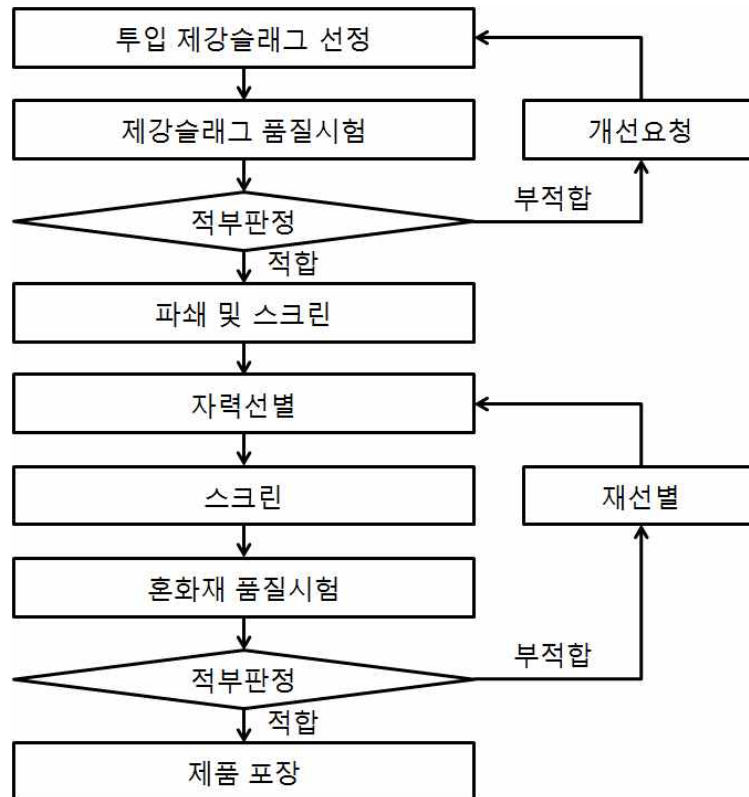
- 본 매뉴얼의 목적은 시멘트계 연약지반 안정화제에 혼합되는 제강슬래그 혼화재의 필요한 기준을 정함으로서, 혼화재 품질관리를 위한 제품의 화학적 조성비, 입경 및 시험법 등 제품의 품질 기준을 제시하는데 있다.

1.2. 적용 범위

- 본 매뉴얼은 N=4이하의 해성점토를 고화시킴으로서 연약지반을 안정화 처리하는 시멘트계 안정화제에 있어서, 시멘트 사용량을 줄임과 동시에 안정화제의 성능을 향상시키기 위해 혼합되는 제강슬래그 혼화재의 생산 중점 점검항목을 제시하였다

1.3. 적용 방법

- 중점점검 사항은 본 매뉴얼의 2장~4장까지이며, 이를 활용한 점검표 및 시험 결과표 서식은 부록에 수록되어있다.
- 「품질관리 점검 방법」 <그림1.>에 따라 점검 및 시험 후 부록의 서식에 맞게 결과를 작성한다.



<그림1.> 품질관리 점검 방법

- 점검사항 결과는 4.2 품질관리 점검 항목에서 요구하는 기준에 부합하여야 하며, 이에 부합하지 않을 시에는 2. 재료, 3. 생산관리 항목에 해당하는 시험부터 재 실시 한다.

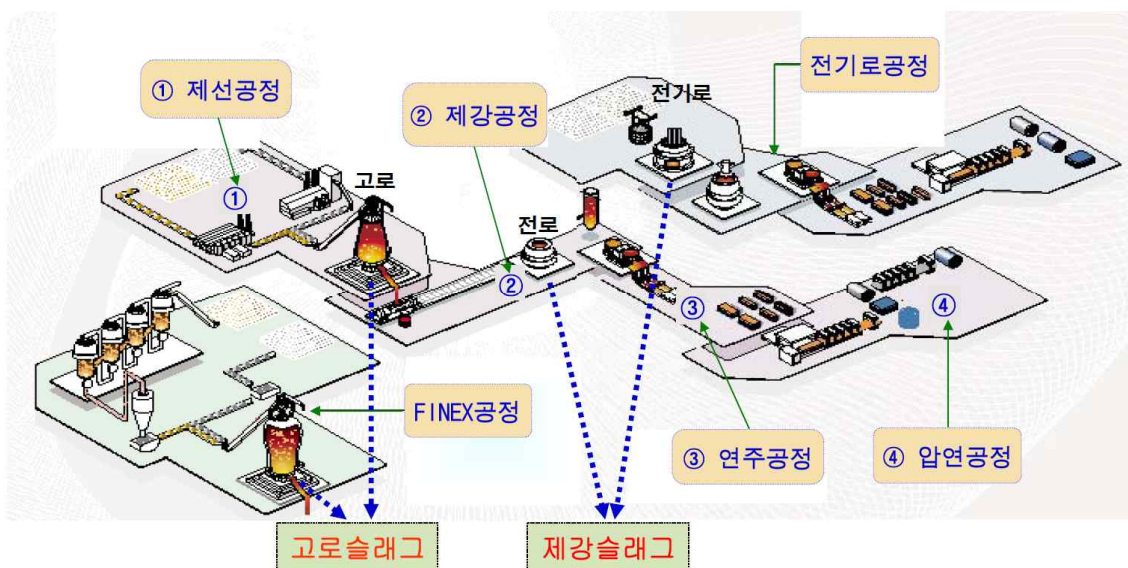
1.4. 용어의 정의

- 본 매뉴얼에 사용한 용어는 문맥상으로 보아 다른 의미로 해석되지 않는 한 다음과 같다.

① 재료

▪ 제강슬래그

제강슬래그는 제강단계에서 전로 및 전기로에서 나오는 산업부산물로서 전로슬래그, 전기로슬래그(산화슬래그, 환원슬래그)로 구분된다<그림2>. 이중 혼화재 생산시 투입되는 원재료는 전로 공정에서 발생하는 전로슬래그가 사용된다.



<그림 2.> 철 생산 제조공정과 슬래그 발생

② 자력선별 장비

▪ 자력선별기

자력선별기는 영구자석에 의하여 철성분이 높은 재료와 철성분이 낮은 재료를 분리하는 장비로 본 제조 매뉴얼에서는 1500G의 자력으로 제강슬래그를 선별하여 제강슬래그의 주 성분인 Fe 함유량을 낮춤으로서 수화반응에 기여하는 Ca함유량이 높은 제강슬래그 혼화재를 생산한다.

▪ 영구자석

영구자석은 자력선별기에 들어가는 자석으로 일정크기(1500G)의 자력세기를 유지한다.

③ 분쇄 장비

▪ 햄머 크러셔(Hammer Crusher)

햄머 크러셔는 선별된 재료를 1차로 파쇄하는 장비로 고속으로 회전하는 스윙 해머의 충격과 라이너에 의한 충돌 효과에 의하여 재료를 파쇄한다. 주로 모래 이상의 입도에 적용된다.

▪ 롤러 밀(Roller Mill)

롤러 밀은 1차 파쇄된 재료를 미분으로 분쇄하는 장비로 투입된 원재료는 회전하는 롤러사이에서 분쇄된다. 주로 실트질 이하의 입도에 적용된다.

▪ 볼 밀(Ball Mill)

볼 밀은 1차 파쇄된 재료를 미분으로 분쇄하는 장비로 투입된 원재료는 원형통 안의 쇠구슬과 부딪치고 마찰되면서 분쇄된다. 주로 실트질 이하의 입도에 적용된다.

④ 입도 선별장비

▪ 스크린(Screen)

선별전 후 재료를 분급해주는 체로 사용목적에 따라 그 치수가 달라진다.

⑤ 기타

▪ 체의 호칭치수

KS 에서 규정하는 표준망체의 실제 눈크기를 부르기 쉽도록 만든 체의 치수로서 아래의 <표 1.>와 같이 대응된다. 반드시 체눈의 실제 크기는 기준치수와 같아야한다.

<표 1.> KS 규정 표준망체

호칭 치수	#200	#100	#60	#40	#20	#10	#4	1/4in
체눈 크기	75 μ m	150 μ m	250 μ m	425 μ m	850 μ m	2.00mm	4.75mm	6.30mm*

*본 매뉴얼에서 필요로 하는 체눈 크기는 6mm 이나 규정 표준망체에 존재하지 않기 때문에 그와 인접한 크기인 6.30mm로 사용

- 말변 입도분석기

레이저 광선이 분산된 시료를 통과할 때 산란되는 빛의 세기를 측정하여 입자 크기를 구하는 장비(그림 3.)로 주로 미립자의 입자크기를 측정할 때 쓰인다.



<그림 3.> 말변 입도 분석기

- XRF/XRD 분석

시료에 X선을 부딪히게 하였을 때 여기전자가 방출하는 형광(x선 에너지)을 이용하여 함유된 원소의 종류와 함량을 조사하는 것이 XRF 분석이며, x선의 회절 각과 강도를 이용하여 함유된 결정성 물질의 종류와 양을 분석하는 것이 XRD 분석이다.



<그림 4.> XRF 측정장비(예시)



<그림 5.> XRD 측정장비(예시)

2. 재 료 관 리

2.1. 일반사항

- 혼화재의 원재료는 전로 제강슬래그로 자력선별 및 파분쇄하여 생산한다.
- 제강슬래그는 그 공정에 따라 종류가 다르고, 같은 종류의 제강슬래그라도 그 구성 성분이 발생장소와 시기에 따라 차이가 크며, 괴(massive)상태로 생산되어 분쇄과정과 야지에서 에이징(aging)과정을 거치게 되어 이에 따른 품질변동요인이 크다.
- 따라서 투입되는 전로 제강슬래그의 입도 및 XRF품질시험 성적서를 재료 입고시마다 확인하고 자력선별, 파분쇄 등을 이용한 혼화재 생산과정과 재료저장소에 대하여 중점 점검하여야 한다.

2.2. 재료 선정

- 원재료인 전로 제강슬래그는 기본적으로 정해진 업체로부터 공급받으며, 일정 로트(lot)에서 발생한 것을 사용하는 것으로 한다.

2.3. 재료 관리

2.3.1. 입도

- 원재료인 전로 제강슬래그는 입도는 6mm이하인 건조상태의 재료로, 기준 입도에 맞지 않는 재료에 대하여는 4. 품질관리 규정에 따라 재료의 선별/분리를 실시한다.

2.3.2. Ca 함량

- 원재료인 전로 제강슬래그에 대하여 XRF 실험을 각 2회 실시한다.
- XRF 실험 결과 투입 제강슬래그 내 Ca 함량이 $30\pm3\%$ 안에 들어와야 하며 기준에 맞지 않는 재료에 대하여는 4. 품질관리 규정에 따라 재료의 선별/분리를 실시한다.

2.4. 재료보관

- 전로 제강슬래그를 입도 및 화학성분 실험이 완료 후, 점검 항목을 만족한 원재료는 별도 저장하여 건조 상태로 관리하여야 한다.
- 원재료는 토분이나 기타 이물질이 섞이지 않도록 분류되어 각각 별도의 저장시설에 저장하여야 하며, 콘크리트, 목재, 블록 등을 이용한 바닥 및 칸막이 시설이 있어야 한다.
- 원재료 보관시 빗물에 의해 원재료가 젖지 않도록 지붕이나 천막시설이 있어야 하며, 배수가 원활하게 되도록 바닥에 경사가 있거나, 배수시설이 있어야 한다.

3. 생 산 관 리

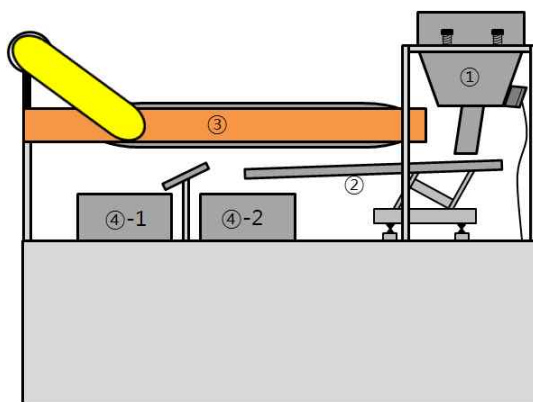
3.1. 일반사항

- 본 장은 시멘트계 연약지반 안정화제에 혼합되는 제강슬래그 혼화재 생산 공정과 그 조건에 관한 것이다.
- 투입되는 재료의 특성에 생산 조건이 적합한지 중간 점검하여야 한다.
- 혼화재 생산에 사용되는 장비는 규정대로 검·교정 하여야 한다.

3.2. 혼화재 생산점검 항목

3.2.1. 자력선별기

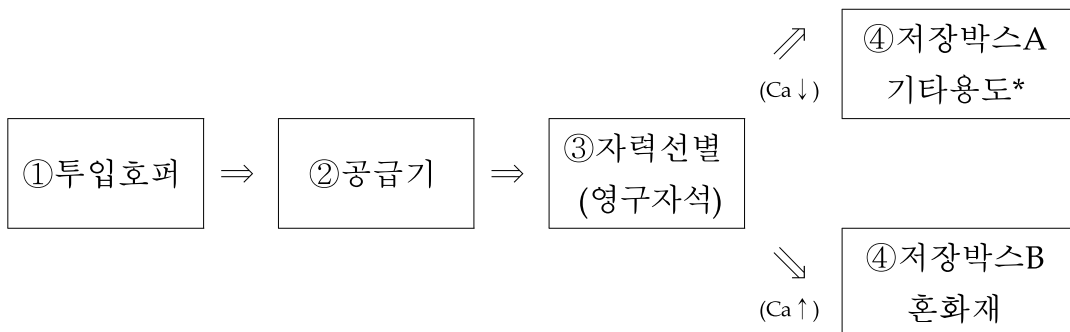
- 자력선별기는 영구자석에 의하여 철성분이 높은 재료와 철성분이 낮은 재료를 분리하는 장비(그림예) 그림 6) 이다. 본 매뉴얼에서 규정된 자력선별기는 서스펜디드형 자력선별기이며, 그 구성은 투입호퍼, 공급기, 영구자석, 서스펜디드 세퍼레이터와 선별 제강슬래그와 선별되지 않고 남은 제강슬래그를 분리하는 저장박스로 이루어진다.



- ① 투입호퍼
- ② 공급기
- ③ 영구자석 및 세퍼레이터
- ④-1 저장박스A(Ca성분 낮은 재료)
- ④-2 저장박스B(Ca성분 높은 재료)

<그림 6.> 서스펜디드형 자력선별기

- 자력선별 과정은 <그림 7.> 과 같다.



<그림 7.> 자력선별 과정

*기타 용도 : Fe 성분이 높은 제강슬래그는 중금속 오염토양 안정화제로 적합

① 투입 호퍼

- 원재료인 전로 제강슬래그를 영구자석 까지 운송하는 공급기에 투입하는 호퍼로써 바이브레이터를 장착하여 재료를 투입하게 된다.

② 공급기

- 투입 호퍼로부터 공급된 제강슬래그를 영구자석까지 운송하는 공급기로 바이브레이터를 장착하여 재료가 공급기에 골고루 퍼진 상태로 운송될 수 있도록 한다.

③ 영구자석

- 1500G의 자력으로 제강슬래그를 선별하는 자력이 영구적인 자석이다.

④ 서스펜디드 세퍼레이터(Suspended separator)

- 영구자석에 의해 끌어당겨진 제강슬래그를 분리하는 장치로 운전속도는 부록의 실험결과를 기초로 결정한다.
- 운전속도는 서스펜디드 세퍼레이터가 돌아가는 속도이며, 단위는 RPM이다.

⑤ 저장박스

- 자력 선별에 의해 회수된 Fe성분이 높은 제강슬래그와 Fe성분이 낮아지고 Ca성분이 높아진 회수되지 않은 제강슬래그가 분리되어 저장되는 박스로 구성된다.

3.2.2. 분쇄기

① 햄머 크러셔(Hammer Crusher)

- 자력선별 전의 과쇄를 통한 입도조절에 사용하며, 주로 모래질 이상의 입도의 재료에 대하여 적용한다.

② 롤러 밀(Roller Mill), 볼 밀(Ball Mill)

- 자력선별 전의 분쇄를 통한 입도조절에 사용하며, 주로 실트질 이하의 입도의 재료에 대하여 적용한다.

3.2.3. 입도선별장비

① 스크린(Screen)

- 과분쇄된 혼화재를 분급해주는 체로 6mm체를 통과하여 투입입도를 6mm이하가 되도록 분류한다.

3.3. 혼화재 생산설비 운영

3.3.1. 자력선별

① 투입 호퍼

- 투입 호퍼의 바이브레이터 Hz는 최대로 설정하여 재료 투입이 원활하게 되도록 한다.
- 최대 Hz에서의 투입 호퍼 시간당 배출량을 계산하여 공급라인의 운송속도를 결정한다.

② 공급기

- 투입 호퍼의 시간당 배출량과 동일한 속도로 공급기의 운송속도를 결정한다.
- 바이브레이터 Hz는 1차 운송 테스트 후에 생산자가 합리적으로 판단한 후 결정하도록 한다.
- 운송과정에서 분진 등이 발생할 수 있으므로 이에 대한 주의를 요한다.

③ 영구자석

- 생산가동전 매 1회 자력측정을 실시하며, 상시적으로 자력의 크기를 점검한다.
- 생산과정에서 제강슬래그 미분이 영구자석에 달라붙게 되면 생산효율이 떨어지므로 1시간 간격으로 영구자석을 청소 및 점검한다.

④ 서스펜디드 세퍼레이터(Suspended separator)

- 생산가동전 파일럿 실험을 통하여 최적 운전조건을 찾은 후, 결정된 운전조건에 따라 생산을 실시한다.
- 일반적으로 운전속도와 회수율, Ca 함량은 비례 관계이므로 운전속도를 조절해 가며 파일럿 실험을 실시한 후, 목적하는 Ca 함량에 근거하여 최적 운전속도를 결정한다.
- 파일럿 실험시 회수율은 원재료 투입량 대비 40% 이상이 되어야 한다.
- 본 매뉴얼에서는 영구자석에 의한 자력선별기 운전속도는 실험결과 기초로 하여 30RPM으로 설정하는 것을 제시하였으며, 생산자의 판단과 필요 생산량에 따라 30 ~ 53 RPM범위로 조절하여 생산을 실시한다.

⑤ 저장박스

- 생산자는 선별 박스와 미선별 박스를 생산 전후에 확인하여 재료가 섞이지 않도록 주의 한다.

3.3.2. 분쇄

① 햄머 크러셔(Hammer Crusher)

- 선별전 : 입도 분석결과 6mm 이상인 시료가 존재할 경우 스크린 후 햄머 크러셔를 통한 1차 파쇄로 투입입도를 조절한다.
- 선별후 : 선별 후 재료를 롤러밀이나 볼 밀에 적용하기 전에 1차 파쇄 하기 위해 적용한다.

② 롤러 밀(Roller Mill), 볼 밀(Ball Mill)

- 선별전 : 롤러 밀이나 볼밀은 미분인 재료에 사용하는 장비로 선별전 재료에는 적용하지 않는다.
- 선별후 : 햄머 크러셔에 의한 1차 파쇄 후 롤러밀이나 볼밀을 통한 분쇄로 입경 0.075mm 이하로 조절한다.

3.3.3. 입도선별장비

① 스크린(Screen)

- 사용목적에 따라 입도를 달리하며 선별된 혼화재를 분류한다.
- 스크린에 사용되는 바이브레이터의 진동수는 최대치로 설정하며, 분류된 입도의 오차를 최소화 한다.
- 본 매뉴얼에서 목적으로 하는 혼화재의 기준입도는 0.075mm 이하로 0.075mm체를 통과한 재료를 혼화재로 사용한다.
- 잔류한 0.075mm 이상의 시료에 대하여는 롤러밀이나 볼밀을 통해 분쇄한다.

4. 품 질 관 리

4.1. 일반사항

- 본 장은 일정한 규격 및 품질의 혼화재를 확보하기 위한 품질관리에 관한 것이다.
- 품질 관리를 위하여 투입재료인 전로 제강슬래그와 이를 선별하여 생산된 혼화재의 입도 및 화학적 성분에 대한 관리를 실시한다.
- 일정 생산량을 유지할 수 있도록 생산라인을 수시로 점검하여야 한다.
- 원재료인 전로 제강슬래그는 반응성이 높은 재료이므로, 생산된 제품의 품질 변화를 막기 위하여 제품 포장 및 보관장소에 대한 검토를 실시하여야 한다.

4.2. 품질관리 점검 항목

4.2.1. 입도

① 투입재료

- 원재료인 전로 제강슬래그의 입도는 6mm이하로 하며, 정해진 공급업체로부터 원재료에 대해 KS F 2302 규정에 따라 입도 분석 결과를 받아 확인하여야 한다.
- 스크린 후 6mm 이상인 시료가 존재할 경우 스크린 후 햄머 크리셔를 통한 1차 파쇄로 투입입도를 조절한다.

② 혼화재

- 생산된 혼화재의 입도는 0.075mm 이하로 하여야 한다.
- 혼화재 1 Ton 마다 말번 장비를 통해 입도 분석을 실시하여 0.075mm이상인 시료가 존재할 경우 롤러밀 및 볼밀을 통한 분쇄로 평균입경을 조절한다.

4.2.2. Ca 함량

① 투입재료

- 원재료인 전로 제강슬래그의 Ca함량은 $30\pm3\%$ 이내로 들어와야 하며, 정해진 공급업체로부터 원재료의 XRF 분석결과를 받아 확인하여야 한다.
- 원재료인 전로 제강슬래그의 XRF 분석 결과 Ca 함량 27% 미만인 시료에 대하여는 2000G 자력세기로 1회 자력선별 후 재료를 투입한다.

② 혼화재

- 원재료인 전로 제강슬래그에 대하여 1회/ton 기준으로 XRF/XRD 분석을 실시하여 투입 제강슬래그 내 Ca 함량 33% 미만, Ca 광물 구성에서 규산칼슘(CS), 철칼슘(CF)함량의 합이 50%이하인 시료에 대하여는 2000G 의 자력으로 1회 추가 선별을 실시한다.
- 1회 추가 선별 이후에도 본 매뉴얼에 제시된 기준을 만족시키지 못할 경우 투입 호퍼 ,공급기, 영구자석의 자력세기에 대한 점검을 실시한다.

4.2.3. 생산량

- 실제 생산 전 파일럿 생산을 1시간동안 30분 간격으로 2회 실시하여 생산효율을 점검한다.
- 파일럿 생산 중 1회는 3.3. 혼화재 생산설비 운영에서의 투입호퍼 및 공급기의 효율을 확인하기 위한 것이며, 이를 결정한 후 추가 1회 파일럿 생산을 실시하여 혼화재 생산효율을 점검한다.
- 생산효율이 기준대비 10% 이하로 떨어졌을 경우 파일럿 실험결과를 근거로 투입 호퍼 및 공급기의 공급속도와 영구자석의 운전속도를 점검한다.

4.2.4. 혼화재 보관

- 혼화재의 입도 및 XRF/XRD 분석이 완료 후, 점검 항목을 만족한 혼화재는 별도 저장하여 건조 상태로 관리하여야 한다.
- 안정화제 생산 후 원재료와 분류되어 보관이 되도록 각각 별도의 저장시설에 저장하여야 하며, 토분이나 기타 이물질이 섞이지 않도록 콘크리트, 목재, 블록 등을 이용한 바닥 및 칸막이 시설이 있어야 한다.
- 생산된 안정화제가 빗물에 의해 원재료가 젖지 않도록 지붕이나 천막시설이 있어야 하며, 배수가 원활하게 되도록 바닥에 경사가 있거나, 배수시설이 있어야 한다.

5. 부록

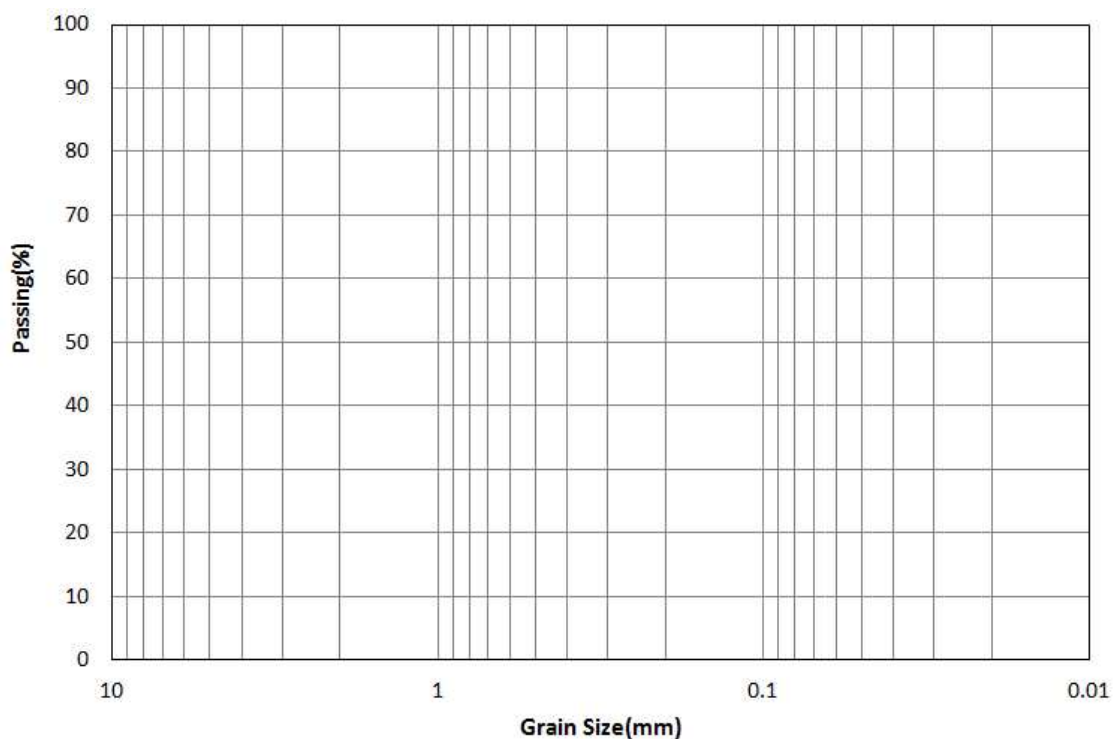
5.1. 입도 점검항목

▪ 입도 기입표

SAMPLE NO.								
Sieve No.	Grain size d, mm	Retained					Finer	Note
		Pan+ sample	pan(g)	Ri(g)	Σ Ri(g)	R(%)	P(%)	
1/4in	6.30							
4	4.75							
10	2							
20	0.85							
40	0.425							
60	0.25							
100	0.15							
200	0.075							
pan								

- 투입재료 기준 : 6.30mm 체 통과량 100% 이상
- 생산재료 기준 : 0.075mm 체 통과량 100% 이상

▪ 입도 분포 그래프



5.2. 화학성분 점검 항목

① XRF 결과

▪ 화학성분 기입표

Sample	XRF analysis(%)										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	기타
SA											

- 투입재료 기준 : CaO 함유량 30±3% 이내
- 생산재료 기준 : CaO 함유량 33% 이상

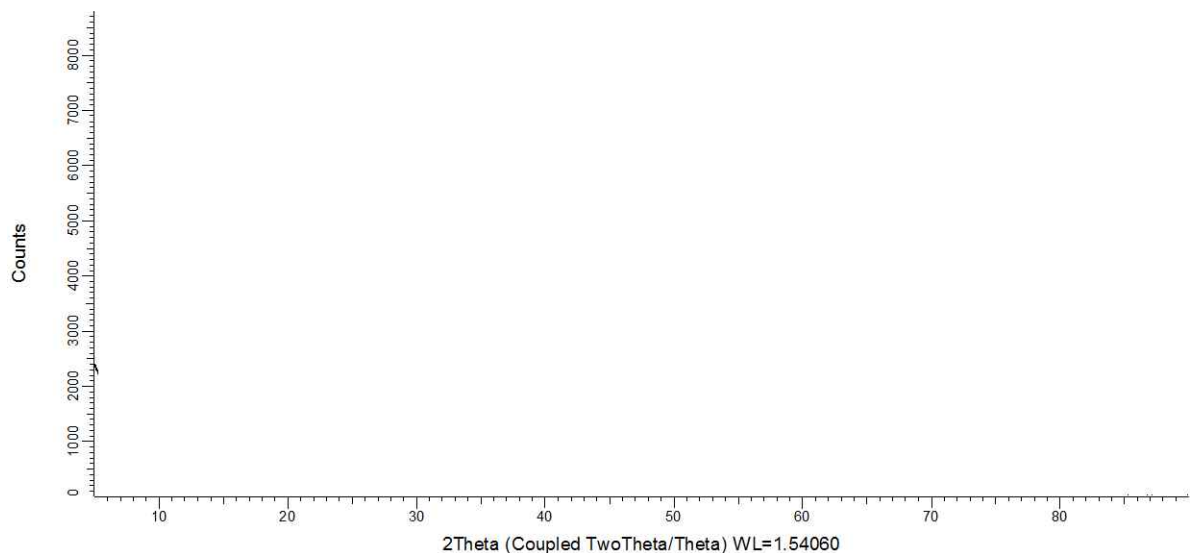
② XRD 결과

▪ 광물성분 기입표

Sample	XRD analysis(%)			
	규산 칼슘(CS)	규산 철(CF)	규산 알루미늄(CA)	기 타
SA				

- 투입재료 기준 : CS + CF 함유량 30±3% 이내
- 생산재료 기준 : CS + CF 함유량 50% 이상

▪ Intensity 그래프



부 록 2.
공법 시공 매뉴얼

제강슬래그 혼화재 혼합 안정화제를 활용한 대심도 연약지반 처리기술 시공 매뉴얼

1. 일반사항

1.1. 적용범위

1.1.1 요약

본 장은 개량 대상층에 순환자원을 활용한 연약지반 안정화제를 Cement Slurry와 주입, 교반, 혼합하여 표층은 판상구조, 심층은 말뚝 형태로 고결하고, 표층 판상구조와 심층 말뚝을 지오그리드와 고정유닛을 사용하여 보강 및 결합하는 연약지반 처리공법을 적용하여 설계기준강도 이상의 강도 및 지지력을 확보할 수 있도록 개량 대상지층을 안정시키는데 필요한 인력, 장비, 재료 및 기타 필요한 사항을 규정한다.

1.2 제출물

1.2.1 시공 계획서

- ① 공사 착수전에 시공계획서를 작성하여 감리원에게 제출한다.
- ② 계획서에는 장비동원 계획서, 안전관리 계획서가 포함되어야 한다.

1.3 일반조건

- 1.3.1 계약상대자는 시공에 앞서 현장의 각종 상황(지하매설물, 구조물, 주변건물, 지반, 노면, 교통등)을 고려한 시공계획서를 작성하여 공사감독관의 승인을 받아야 한다.
- 1.3.2 시공계획서는 상세한 위치, 사용기계, 공정, 장애물 처리방법 등을 고려하여야 한다.
- 1.3.3 계약상대자는 설계도에 의한 시공이 곤란할 때는 그 부분의 변경 시공도 및 계산서를 공사감독관에게 제출하여 승인을 받아야 한다.

2. 재료

2.1 재료

- 2.1.1 혼합처리에 사용하는 재료는 시멘트는 KSL 5201(포틀랜드 시멘트)와 자력선별된 전로 제강슬래그 파분쇄 미분을 혼합하여 사용한다.
- 2.1.2 배합에 사용되는 물은 담수 또는 해수로 사용 한다.
- 2.1.3 물-시멘트 중량비율은 시공성 및 안정성 등을 고려하여 통상 1:0.7~1:1.2 범위 내에서 결정한다.

2.2 품질 요구 조건

2.2.1 본 공사에서 규정한 표층 및 심층 개량체 제원은 다음과 같다.

<표1> 개량체 제원

시멘트 종류	시멘트 배합량 (kgf/m³)	물:시멘트 중량비	실내배합강도 q_{ul} (kPa) $q_{ul} = 4q_{uck}$	설계기준강도 q_{uck} (kPa)	허용압축응력 f_{ca} (kPa) $f_{ca} = \frac{1}{2} q_{uck}$	허용전단응력 V_a (kPa) $V_a = \frac{1}{2} f_{ca}$
제강슬래그 혼합 시멘트	250	1:0.7~1:1.2	3,200	800	400	200

2.2.2 상기에 규정된 실내배합(3,200kPa) 및 설계기준강도(800kPa)는 재령 60일 강도를 기준으로 한 것이며 시멘트 배합량, 물-시멘트 중량비는 참고사항이므로 심층혼합공 실시공전에 반드시 원지반 흙(점성토층)에 대한 시험시공 및 실내배합 시험을 실시하여 공사감독자 또는 발주자의 승인을 받은 후 최적의 시멘트 배합량, 물-시멘트 중량비를 확정하여야 한다

2.2.3 설계기준강도는 확인조사(개량체 시공후 7일이상 경과한 시점에 실시함)에서 채취된 개량체 코어의 재령 60일 일축압축강도 최소 기준값이다.

2.2.4 허용압축응력과 허용전단응력은 혼합처리공법을 1축으로 시공할 경우에 대해 설계기준 강도에 따라 정의한 것이다.

2.2.5 설계기준강도의 신뢰성을 확보하기 위해 원지반에서 시험시공을 실시하여 배합비와 시공속도를 확정하도록 한다.

2.2.6 시험시공으로 배합비와 시공속도를 확정하는 경우에는 재령 60일의 설계기준 강도를 적용하기 어려우므로 7일 강도나 28일 강도에 의한 재령 60일강도를 추정하도록 한다. 제강슬래그 혼합 시멘트에 대해서는 재령 7일의 일축압축강도에 1.6를 곱하여 재령 60일 강도를 추정하고, 재령 28일의 일축압축강도에 1.4를 곱하여 재령 60일 강도를 추정하도록 한다.

2.2.7 시험시공 개량체의 재령 7일 강도를 기준으로 본 시공을 실시하며, 추가적으로 재령 28일 강도를 확인하여 설계기준강도의 만족여부를 확인한다.

2.3 배합설계

2.3.1 강도, 시멘트, 물, 혼화재료 등의 단위 재료량의 배합설계는 시험시공을 통한 현장 강도를 통해 최종적으로 결정해야 하며, 실내배합시험은 이를 확인하기 위한 사전

준비 및 참고자료로 사용한다. (3.3 시험시공 참조)

2.3.2 배합시험은 3종 이상의 혼합비율을 선정하여 실시한다.

2.3.3 개량토의 실내배합강도는 재령 60일에서 일축압축강도를 3,200 kPa이상으로 한다.

2.3.4 재료는 중량으로 계량하고 혼합시간 등은 높은 강도를 얻을 수 있도록 한다.

2.3.5 재령에 대한 공시체의 수는 3개를 표준으로 하며 재령별 기준은 7일, 28일, 60일, 90일 4종류로 구분한다.

2.3.6 배합설계에 필요한 원지반 시료채취는 충분한 배합설계가 되도록 채취량을 결정해야 한다.

2.3.7 배합설계를 위한 시료채취 위치는 설계시 조사된 토질조사 결과치를 근거로 하여 작성된 토층단면도, 평면 위치도를 참고하여 평면상 대상 구역에서 시료를 채취하는 것을 원칙으로 하나, 공사감독원과 협의하여 재조정 될 수 있다.

2.3.8 실내 배합시험은 Sampling한 시료에 해당 소요만큼의 배합재료를 넣어 혼합한 개량토를 소요기간동안 양생한 후 일축압축강도 시험을 실시하여야 한다.

2.3.9 배합시험은 KSF 2328 (흙 시멘트의 압축강도 시험방법) 및 KSF 2329 (시험실에서 흙 시멘트의 압축 및 휨 강도 시험용 공시체를 제작하고 양생하는 방법)에 준하되 사전에 감독원과 협의하여 결정한다.

2.3.10 시험결과는 다음 항목에 대하여 정리한다.

- ① 시멘트, 물, 혼합재료 등 단위 재료량 결정
- ② 개량토의 일축압축강도
- ③ 시멘트 첨가율과 개량토의 일축압축 강도와의 관계

2.4 지오그리드

2.4.1 ASTM D 6637 지오그리드 광폭인장강도시험 방법 등을 적용한다.

2.4.2 보강재 선정에는 현장조건에 알맞은 보강재의 인장강도, 신도 등의 역학적 특성과 내구성 등을 고려하여야 하며, 지반의 토질조건(입도, 함수비), 계획된 시공장비의 종류와 시공방법 등을 고려하여야 한다.

2.4.3 지오그리드는 인장특성, 크립특성, 내충격성, 내구성, 마찰특성이 우수한 폴리에스테르(PET) 등의 고강도 섬유를 격자형으로 교차시켜 제직 또는 편직한 후 PVC 등으로 코팅하여 제조된 것이어야 한다.

2.4.4 지오그리드는 경사, 위사들이 결합점에서 견고하게 접합 강화되어 벌어짐 현상이 일어나지 않아야 한다.

2.4.5 지오그리드의 형상, 치수 및 품질규격 다음과 같다.

- ① 지오그리드 보강재의 종류별 형상, 치수, 품질은 설계도 및 설계조건을 만족시킬 수 있어야 한다.
- ② 지오그리드 보강재의 제품규격은 격자크기 2~3cm, 폭 2m 또는 4m 이상, 길이 50m 이상으로, 운반 및 시공이 용이하도록 롤(Roll) 형태로 포장되어야 한다.
- ③ 지오그리드 보강재의 제품 인장강도는 제조사에서 제시한 강도 이상이어야 한다.
- ④ 재질 (KS K0210) : 폴리염화비닐(PVC) 폴리에스테르(PET)
- ⑤ 인장강도 (ASTM D 6637) : 경사 : 100 kN/m 이상, 위사 : 100 kN/m 이상, 장기 설계인장강도 55 kN/m 이상

2.4.6 지오그리드의 운반 및 보관방법은 다음과 같다.

- ① 지오그리드 보강재의 운반은 운반도중 날카로운 것에 의해 찢리거나 찢겨지지 않도록 주의해서 운반 하차시켜야 한다.
- ② 지오그리드 보강재의 보관은 현장 여건에 따라 지형이 평탄한 곳에 쌓아서 지오그리드 보강재의 변형을 방지하고 접거나 구기지 않도록 한다.
- ③ 지오그리드 보강재는 햇빛이나 자외선에 노출되지 않도록 오랜 시간동안 방치할 때는 커다란 천막이나 마대 등으로 덮어서 보관한다.

2.5 고정 유닛

2.5.1 고정유닛은 심층 개량말뚝을 표층 관상구조 및 지오그리드와 연결하는 역할을 하며, 그 형상은 헤드부와 헤드부 반대편에 배치되는 원추형 삽입부, 헤드부와 원추형 삽입부를 연결하는 축부를 구비하는 형태이어야 한다.

2.5.2 고정유닛의 치수는 개량체의 강도와 크기를 고려하여 결정하여야 하며, 표층 및 심층에 인력으로 삽입 가능한 형상과 치수여야 한다.

2.5.3 고정유닛의 품질은 탄성계수 210 GPa 이상의 고강성을 가진 제품이어야 한다.

3. 시 공

3.1 사용장비

사용장비는 기초의 계획심도까지 시공이 가능하며 시공중 파일의 수직도 및 심도를 육안으로 확인 가능한 장치가 내장된 신뢰성 있는 장비로 한다.

3.1.1 장비구성

- ① 파일 드라이브 : 1대
- ② 교반 혼합처리기(1축): 1대
- ③ 교반용 빗트 : 1조
- ④ 슬러리(slurry)생산 및 주입 플랜트 : 1Set
- ⑤ 스테빌라이저 : 1대
- ⑥ 다짐장비(소형, 중형) : 각 1대
- ⑦ 투입되는 장비 및 기기는 항상 청결한 상태를 유지하여야 하며 파손 또는 사용할 수 없는 장비 및 기기는 즉시 수리 또는 반출하여야 한다.
- ⑧ 안전관리 책임자 및 해당 장비에 숙련된 담당자에 한하여 책임 운전하여야 하며 모든 작업자는 안전용구를 착용하여 시공 중 재해가 없도록 하여야 한다.

3.1.2 부속장비

- ① 발전기 : (교반 혼합처리기용)
- ② 발전기 : (그라우팅 믹서용)
- ③ 그라우팅 믹서
- ④ 그라우팅 펌프
- ⑤ 수중펌프
- 공기 압축기(필요에 따라)
- 시공관리계(심도기록계, 주입량 기록계, 물-시멘트 배합비 기록계)

3.2 조사 및 계획

3.2.1 조사 및 시험

시공자는 본 공사를 착수하기 전에 해당구역의 측량 및 원지반 토사를 채취하여 설계조건과의 상이 여부, 시공조건 등을 조사, 분석한 후 그 성과를 감독원에게 제출하여야 한다.

3.2.2 시공계획서

시공자는 합리적이고 효율적인 시공이 될 수 있도록 다음 사항들이 포함된 시공계획서를 제출하여 감독원의 승인을 받아야 한다.

- ① 시공계획 및 예정공정표
- ② 장비 및 인원 투입계획
- ③ 시멘트 및 제강슬래그 확보계획
- ④ 물-시멘트비 사용량
- ⑤ 장비제원 및 성능
- ⑥ Slime 처리방법

3.2.3 공사계획 변경

공사 시행중 현장조건 및 시공 상태에 따라 변경이 필요할 경우 이미 승인한 내용들을 발주처의 승인에 의해 변경할 수 있다.

3.3 시험시공

3.3.1 도급자는 조립된 심층혼합장비의 시운전 및 지지층의 상이 여부 및 AUGER의 부하량을 측정하기 위하여 시험시공을 실시하여야 한다.

3.3.2 시험시공 위치(개량대상 구간중 설계시 지질조사 또는 실내배합시험을 위한 원지반 시료채취 위치 또는 근접한곳), 심도(개량층 하부까지), 시공방법(1회왕복-굴착주입 및 선단고화 후 인발주입) 및 시공량에 대하여는 감독원과 협의하여 정한다

3.3.3 시험시공 중에 실시하는 개량체는 원지반과 혼합 교반된 개량체에 PVC pipe를 삽입하여 시료를 채취한 후 습윤 양생후 7일 일축압축강도를 확인해야 한다. (PVC Pipe사용 규격은 $\phi 75 \sim 100\text{mm}$ 내외로 한다)

3.3.4 설계기준강도의 만족여부는 재령 60일을 기준으로 하나 시험시공시에는 7일 강도

를 기준으로 재령 60일 강도를 간접적으로 추정한다. 이때, 시험시공에 의한 현장 일축압축강도는 재령 60일일 때 800 kPa 이상을 기준으로 한다.

3.3.5 도급자는 시험시공 완료와 동시에 다음과 같은 항목에 대한 분석 보고서를 공사 감독자에게 제출하여야 한다.

- ① 장비의 관입, 인발에 대한 Cycle time, 장비 위치 이동시간
- ② Slurry 주입 펌프용량
- ③ 최종개량심도 확인방법
- ④ 시멘트 Slurry 토출량 및 시간
- ⑤ 개량토의 일축압축강도
- ⑥ 기타 본 공사에서 시공관리상 필요로 하는 항목

3.4 시공

3.4.1 시공심도

- ① 표층 개량 및 심층 개량은 도면에 표기된 심도까지 시공하되 N값 30이상은 과부하로 인한 효율저하가 예상되므로 이에 해당하는 견고한 지층을 한계깊이로 한다.
- ② 개량토 말뚝의 선단부에서는 Slurry 주입량(교반시간)을 증가(2~4분)시켜 일체가 되도록 보강하여야 한다.

3.4.2 시공방법

- ① 관입 작업전에 Mixing plant 에서는 배합설계 및 시험시공에 의해 결정된 배합기준에 의하여 시멘트 Slurry와 제강슬래그를 혼합한다.
- ② 도면에 표기된 표층 개량 심도의 하부로부터 1/2~1/3만큼 표층 개량을 우선적으로 실시하여 심층 개량 장비의 주행성을 확보하도록 한다. 주행성 확보를 위한 표층 개량방법은 제강슬래그가 혼합된 시멘트 Slurry를 원 지반 토사와 혼합한 후 또는 혼합토사를 포설한 후 가벼운 다짐장비로 다지고 지지력이 허용되는 범위에서 다짐장비의 하중을 단계적으로 증가시키도록 한다. 이 경우 다짐의 시기, 다짐장비의 선정, 다짐단계, 다짐의 확인방법을 정하여야 한다.
- ③ 심층개량을 위해 Rod의 관입은 미리 준비된 시멘트 Slurry를 주입하면서 시험 시공시 정해진 속도로 굴착 관입시킨다.(지반조건에 따라 ROD관입시간이 길어져 주입량 관리가 어려울 경우 관입시 시멘트 슬러리 대신 물을 사용할 수 있다)
- ④ 소요 지층까지 관입이 완료되면 선단고화를 위해 제위치에서 2~4분 정도 주입교

반 후 Rod를 시험 시공시 정해진 속도로 주입교반 상승시켜 개량을 완료하며, 개량 길이 및 지층구성이 같을 경우 주입교반에 소요되는 시간, 주입량은 항상 일정하도록 시공관리계기의 작동을 예의 주시하여 관찰하여야 한다.

- ⑤ 시멘트 Slurry는 항상 충분한 양이 준비되어 교반 주입시 중단되는 일이 없도록 해야 한다.
- ⑥ 시공간격과 깊이는 반드시 도면에 표기된 간격에 맞춰서 시공하여야 하고, 지반조건이 설계조건과 상이할 경우 감리자와 협의하여야 한다.
- ⑦ 개량의 연직도는 장비에 부착된 수직/수평 측정기를 통해 시공중 항상 연직이 되도록 유지하여야 한다.
- ⑧ 심층 개량이 마무리 되면 표층에 지오그리드 포설 후 고정유닛으로 지오그리드, 표층, 심층을 일체화 시킨 후 시공시 발생하는 슬라임과 제강슬래그가 혼합된 시멘트 Slurry를 원 지반 토사와 혼합한 토사를 도면에 표시된 표층 개량 심도의 1/2~2/3 만큼 상부 표층에 포설하여 다짐을 실시한다. 상부 표층 개량의 시공방법은 ②에서의 하부 표층 개량 시공방법과 동일하다.
- ⑨ 지오그리드 및 고정유닛 설치 방법은 지오그리드 길이를 설계 도면대로 절단하여, 지오그리드가 접히지 않게 당겨서 펴고 고정유닛으로 표층 및 심층 개량체에 고정시키면서 포설하고 끝부분 지오그리드는 고정유닛을 사용하여 고정시키는 방식으로 실시한다. 이때 지오그리드 소요 설치위치를 준수하여 시공해야 한다.
- ⑩ 표층 및 심층 개량체의 양생은 일반 콘크리트에 준하여 실시하고 양생온도는 4℃~10℃ 이상을 유지하고 혼합완료 후 일주일 내에 장비 진입을 해서는 안된다. 제강슬래그 혼화재가 들어가는 경우 수분증발을 방지하는 대책을 세워야 한다.

3.4.3 시공관리

- ① 토사의 크기는 지름 50mm 이상의 흙덩이가 전체의 20%이하이어야 하고, 입경의 최대크기는 100mm이하이어야 한다.
- ② 교반·혼합 처리기는 지반을 개량하는 것으로 장비에 이상이 발생되었을 때는 즉시 작업을 중단하고 신속하게 보수 처리하기 위하여 현장에는 항상 예비부품을 확보하여야 한다.
- ③ 장비 Setting시 접지압이 확보되도록 필요시 굴착면의 토사를 선굴착하여 포설하고, 특히 작업난이로 인한 지반교란 등을 방지하기 위해 필요시 소요두께의 양질토사를 굴착 포설한다.

- ④ 심층 개량의 타설 위치는 오차 범위내에 정확하게 Setting된 후에야 개량작업을 할 수 있으며, 위치 오차는 10cm 이내로 하여야 한다.
- ⑤ 개량의 연직도는 장비에 부착된 수직 Gauge에 의하여 시공중 수직이 되도록 유지 하여야 한다.
- ⑥ 주입 및 승하강속도, 회전수는 시험시공시 결정된 속도 및 회전수를 기준 한다.
- ⑦ 관입심도는 부착된 심도계로 관리한다.
- ⑧ 시멘트 Slurry의 토출량은 토출량계(유량계)로 관리한다.
- ⑨ 선단부 확인은 굴착속도 및 부하량 또는 와이어 처짐으로 판단한다.
- ⑩ 지속적인 굴착 및 중장비의 가동시 주변 생태지역의 진동 및 소음에 의한 피해가 발생하지 않도록 유의한다.

3.5 확인시험, 시공기록 및 검사

3.5.1 검사 및 시료채취

- ① 본 시공시 개량체 확인시험은 개량체 조성후 7일 이상 경과한 후 실시하며, 개량체의 균일성과 시공심도를 확인하기 위하여 본 시공시 개량체 300공당 1회 시료를 채취한다. 채취된 시료에 대해서는 일축압축강도(1~3회), 단위체적중량시험 등이 수행되어야 한다. 또한 시료채취는 연속채취를 원칙으로 한다.
- ② 시공후 개량체 확인시험시 채취된 시료의 시험분석결과 60일의 설계기준강도를 만족시키지 못하였을때는 우선적으로 실내배합시험, 시공시 및 시공후 확인조사결과를 토대로 90일 강도를 예측하여 설계기준강도의 만족여부를 판단하며, 90일 강도가 만족되지 않을 경우에는 도급자는 감독원과 협의하여 적절한 대책방안을 수립한다.

3.5.2 시험결과

- ① 도급자는 시공된 각 개량토 말뚝과 상부 표층, 하부 표층에 대하여 다음과 같은 기록부를 작성하여 감독원에게 제출하여야 한다.
 - 작업 일시(시작, 종료), 작업 당시의 기상조건
 - 시멘트 Slurry등 사용재료의 배합비 및 계량치
 - 개량공변 및 개량심도
 - 일일 개량면적

- 시멘트 Slurry의 토출량 및 주입압

② 시멘트량은 실내시험 및 시험시공에 의해 결정된 시멘트 배합비에 따라 산출한다.

③ 시공오차는 다음과 같다.

- 표층 개량토 및 심층 개량 말뚝의 천단고 : (+)10cm, (-)0cm

- 심층 개량 말뚝의 위치 : ($\pm$)10cm

- 폭, 연장 : (+) 규정 없음, (-)0cm

- 개량심도 : 설계시 산정한 심도까지

부 록 3.
고정유닛 디자인



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록디자인공보(S)

(45) 공고일자

2016년03월23일

(11) 등록번호

30-0845771

(24) 등록일자

2016년03월16일

(52) 분류

L2-2129

(51) 국제분류

25-01

(21) 출원번호

30-2015-0013301

(22) 출원일자

2015년03월17일

(73) 디자인권자

주식회사 산하이앤씨

경기도 성남시 중원구 사기막골로 124, 비즈센터 1001 (상대원동, SK®테크노파크)

(72) 창작자

하은룡

서울 송파구 동남로18길 9, 6동 804호 (가락동, 극동아파트)

(74) 대리인

이기성

담당심사관 : 마태성

(54) 명칭

토목섬유용 고정유닛

디자인도면

물품류

25

디자인의 대상이 되는 물품

토목섬유용 고정유닛

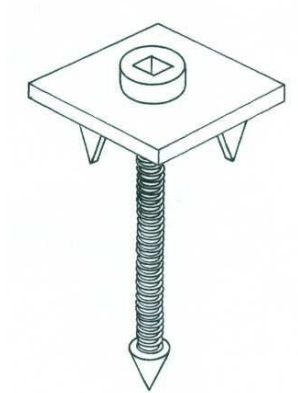
디자인의 설명

1. 재질은 금속제임.
2. 본원 디자인은 연약지반에서 관상구조의 표층부 개량부와 말뚝형태로 개량된 석회안정화 층(심층부)를 연약지반표층부에 설치된 토목섬유(지오그리드)와 토목섬유(지오그리드)용 고정유닛을 이용하여 표층 및 심층개량부를 일체화하는 공법에 사용되는 토목섬유용 고정유닛임.
3. 도면 1.1은 본원 디자인을 사시방향에서 도시한 사시도이며, 도면 1.2는 본원 디자인을 정면방향에서 도시한 정면도이고(배면도는 대칭임), 도면 1.3은 본원 디자인을 좌측면방향에서 도시한 좌측면도이며(우측면도는 대칭임), 도면 1.4는 본원 디자인을 평면방향에서 도시한 평면도이며, 도면 1.5는 본원 디자인을 저면방향에서 도시한 저면도이며, 참고도 1.1은 본원 디자인의 사용상태를 예시한 예시도임.

디자인 창작 내용의 요점

"토목섬유용 고정유닛"의 형상과 모양의 결합을 디자인창작내용의 요점으로 함.

도면 1.1



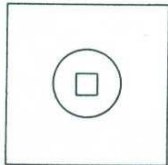
도면 1.2



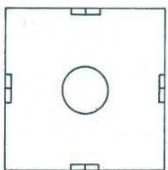
도면 1.3



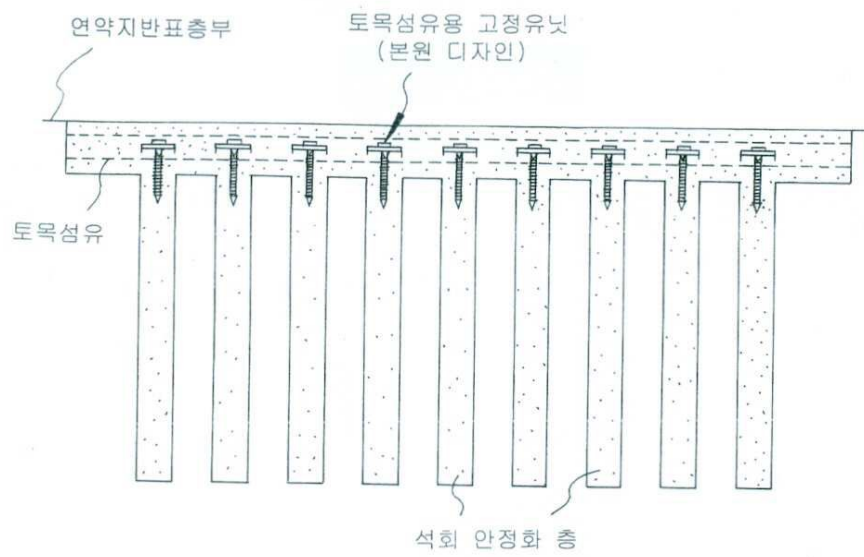
도면 1.4



도면 1.5



참고도면1.1





(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록디자인공보(S)

(45) 공고일자

2016년03월23일

(11) 등록번호

30-0845774

(24) 등록일자

2016년03월16일

(52) 분류

L2-2129

(51) 국제분류

25-01

(21) 출원번호

30-2015-0014028

(22) 출원일자

2015년03월19일

(73) 디자인권자

주식회사 산하이앤씨

경기도 성남시 중원구 사기막골로 124, 비즈센터 1001 (상대원동, SK[®]테크노파크)

(72) 창작자

하은룡

서울 송파구 동남로18길 9, 6동 804호 (가락동, 극동아파트)

(74) 대리인

이기성

담당심사관 : 마태성

(54) 명칭

토목섬유용 고정유닛

디자인도면

물품류

25

디자인의 대상이 되는 물품

토목섬유용 고정유닛

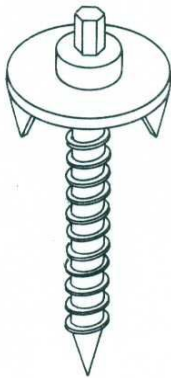
디자인의 설명

1. 재질은 금속제임.
2. 본원 디자인은 연약지반에서 관상구조의 표층부 개량부와 말뚝형태로 개량된 석회안정화 층(심층부)를 연약지반표층부에 설치된 토목섬유(지오그리드)와 토목섬유(지오그리드)용 고정유닛을 이용하여 표층 및 심층개량부를 일체화하는 공법에 사용되는 토목섬유용 고정유닛임.
3. 도면 1.1은 본원 디자인을 사시방향에서 도시한 사시도이며, 도면 1.2는 본원 디자인을 정면방향에서 도시한 정면도이고, 도면 1.3은 본원 디자인을 배면방향에서 도시한 배면도이고, 도면 1.4는 본원 디자인을 좌측방향에서 도시한 좌측면도이고, 도면 1.5는 본원 디자인을 우측방향에서 도시한 우측면도이고, 도면 1.6는 본원 디자인을 평면방향에서 도시한 평면도이며, 도면 1.7는 본원 디자인을 저면방향에서 도시한 저면도이며, 참고도면 1.1은 본원 디자인의 사용상태를 예시한 예시도임.

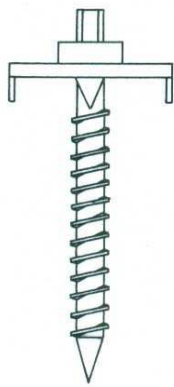
디자인 창작 내용의 요점

"토목섬유용 고정유닛"의 형상과 모양의 결합을 디자인창작내용의 요점으로 함.

도면 1.1



도면 1.2



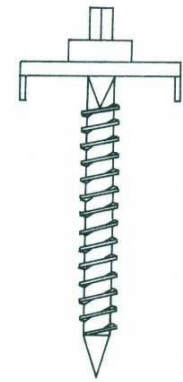
도면 1.3



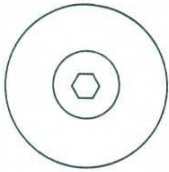
도면 1.4



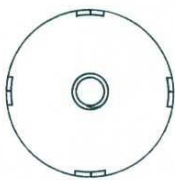
도면 1.5



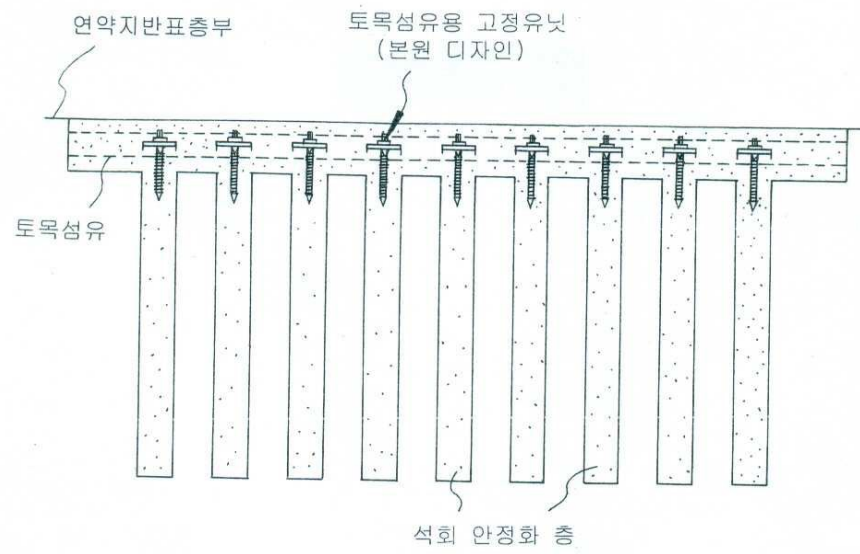
도면 1.6



도면 1.7



참고도면1.1



주 의

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