

보안 과제(), 일반 과제(○)/공개(○), 비공개()
국토교통기술사업화지원사업 최종 보고서

R&D / 16TBIP-
C111718-01

ICT 유지관리가 가능한 팽창시트를 활용한 저다짐 능동 지반함몰 긴급복구 기술

최종보고서

2019. 03. 25.

주관연구기관 / (주)골든포우
공동연구기관 / 한국건설생활환경시험연구원
공동연구기관 / 유씨아이테크(주)

국 토 교 통 부

국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘ICT 유지관리가 가능한 팽창시트를 활용한 저다짐 능동 지반함몰 긴급복구 기술’ (연구개발 기간 : 2016.04.27 ~ 2018.12.26.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 03. 25.

주관연구기관명 : (주)골든포우

(대표자) 심 진 섭

공동연구기관명 : 한국건설생활환경시험연구원 (대표자) 윤 갑 석

(인)

공동연구기관명 : 유씨아이테크(주)

(대표자) 김 기 성

주관연구기관책임자: 유 중 조

공동연구기관책임자: 정 윤 석

공동연구기관책임자: 박 정 준

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	16TBIP-C111718-01	해당 단계 연구 기간	2016.4.27.~20 18.12.26	단계구분	(3차년도)/ (3차년도)
연구사업명	중사업명	국토교통기술사업화지원사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	ICT 유지관리가 가능한 팽창시트를 활용한 저다짐 능동 지반함몰 긴급복구 기술			
	세부과제명				
연구책임자	유 중 조	해당단계 참여 연구원 수	총: 17명 내부: 17명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부: 355,000천원 기업: 236,667천원 정부 외: 천원 계: 591,667천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 20명 내부: 명 외부: 명	총 연구개발비	정부:1,173,000천원 기업: 782,067천원 정부 외: 천원 계:1,955,067천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)골든포우, 연구개발실			참여기업명 공동) 한국건설생활환경시험연구원 공동) 유씨아이테크(주)	
요약]				보고서 면수 145	
■지반공동 내부 채움 기능제의 장기 보존이 가능한 팽창매트재 개발 ■지반 공동 및 함몰구간의 보수/보강/복구에 최적화된 고결 시간 및 능력 지연형 팽창기능제 개발 ■국내여건에 적합한 지반공동 및 함몰 복구 성능평가 모델 개발 및 유지관리를 포함한 ICT 적용 표준안 마련					

요약문

연구의 목적 및 내용	도심지역에서 확인된 지반공동이나 싱크홀 내부에 지반이완영역 및 교란부위의 압축 가능한 팽창매트재와 관리가 용이하도록 표지기술을 일원화하는 효율적이고 능동적인 자가다짐 지반함몰 보수/보강/복구 기술을 개발 및 사업화				
연구개발성과	○ 지반함몰 긴급복구를 위한 팽창매트개발 및 생산설비개량 - 팽창 기능제가 지반공동 복구에 사용되기 위해 포설되기까지 제품 포장과 이송, 사용 후 저다짐 개선효과 및 지지력 개선효과를 가지고 있는 제품 개발 ○ 팽창 기능제 개량 및 유지관리기술 개발 - 기존의 벤토나이트의 팽창성능을 증대하고 강도를 개량하는 대체 팽창 기능제를 통해 지반의 함몰 및 공동에 토사와 같이 채움하여 토사의 다짐 및 이완영역의 강도복구 등을 유도하는 저다짐 복구제품의 내부 기능제를 최적화한 유지관리 기술 개발 ○ 팽창 매트재의 보수보강 실증 및 공동 및 함몰 실증모델 개발 - 실내 Mock-up 실험을 통한 다양한 지반환경조건에 따른 복구기술의 적용성 평가 - 현장실증시설(Test-bed) 구축을 통한 지반공동/함몰 복구기술의 성능 평가모델 개발				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 재료제조, 설계사 및 시공사의 긴급복구 사업뿐만 아니라, 연구개발기술 응용에 따른 효율적인 설계 및 시공방안 마련에 활용 ○ 구조물의 특성상, 정부주도의 지반공동 복구사업 및 상시 보유자 재료의 사업화 확대 ○ 긴급복구 대응 체계 마련으로 국민들의 재난 위험성에 대한 불안요소 해소 ○ 다양한 구조물의 보수/보강용 복합재료개발에 요소기술로서 응용				
핵심어 (5개 이내)	공동	긴급복구	팽창매트	저다짐	토목섬유 점토차수재

SUMMARY

Purpose & Contents	Sinkhole or identified in the ground joint urban areas, ground inside the disturbance possible compression in the region of the expansion and the relaxation area to facilitate technology and management. Ground maintenance and reinforcement of a dent in a single efficient and active parties pledge and recovery technology development and commercialization.				
Results	○ Development of expansion mat for emergency restoration of ground collapse and improvement of production facility – Development of a product that has the effect of packaging and transporting the product until it is installed to be used for underground cavity recovery ○ Development of expansion agent improvement and maintenance technology development – Internal function of low compaction restoration product which induces compaction of soil and compaction of soil and restoration of strength of relaxation area by substituting expansion function of existing bentonite and improvement of strength by filling with depressions and underground cavities in soil Development of optimized maintenance technology ○ Development of Reinforcement of Expansion Mat and Development of underground Cavity and Depression Model – Evaluation of applicability of restoration technique according to various soil environmental condition through indoor mock-up experiment – Development of performance evaluation model of underground cavity / depression restoration technology through construction of test-bed				
Expected Contribution	○ In addition to the emergency recovery business of materials manufacturing, designers and contractors, it can be used for efficient design and construction plan for R & D application ○ Due to the nature of the structure, government-led joint restoration of the ground and expansion of commercialization to always-available materials ○ Responding to the disaster risk due to the emergency response system ○ Application as element technology to the development of composite materials for repair / reinforcement of various structures				
Keywords	Underground cavity	Emergency restoration	Expansion mat	Low compaction method	Geosynthetics clay liners

Contents

1. Overview	1
2. Domestic and international technology developments	5
3. Research contents and results	9
4. Goal achievement and contributions related field	129
5. Future Plan of R & D results	132
6. Science and Technology Information Surveyed from Overseas	136
7. Research and development achievements of security level	137
8. Research Facility and Equipment	138
9. Performance of Safety Measures	139
10. Main result	140
11. Etc	141
12. Reference	142

목 차

제 1장 연구개발 과제의 개요	1
제 2장 국내외 기술 개발 현황	5
제 3장 연구 수행 내용 및 성과	9
제 4장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	129
제 5장 연구개발성과의 활용계획	132
제 6장 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	136
제 7장 연구개발성과의 보안등급	137
제 8장 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	138
제 9장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	139
제 10장 연구개발과제의 대표적 연구 실적	140
제 11장 기타 사항	141
제 12장 참고 문헌	142

제 1장 연구개발 과제의 개요

제 1절 연구개발 목적

1980년대 이후 급격한 인프라 구축을 통해 건설된 지하매설물은 현재 30년이 경과한 노후 매설물로서 안정성이나 사용성이 저하되고 있으며 이러한 문제점으로 인해 지반 함몰이 과거와는 다르게 도심지에서 발생하고 있다. 국내 역시 2014년 서울 송파구 지역의 공동 및 함몰 사건을 계기로 서울시는 연도별 지반함몰이 매년 20%이상 증가 2020년 2,000건에 육박할 것으로 추정되어 도심지역에서 확인된 지반공동이나 싱크홀 내부에 지반이완 영역 및 교란부위의 압축 가능한 팽창매트재와 관리가 용이하도록 표지기술을 일원화하는 효율적이고 능동적인 자가다짐 지반함몰 보수/보강/복구 기술을 개발하고자 한다.

1. 도심지 지하매설물 노후화 및 시공 부실에 의한 지반 함몰 피해증가

- 가. 최근 서울, 부산 등 전국 주요 도시에서 도로침하, 건물균열, 상하수도관 파손 등 지반함몰에 의한 피해 발생 사례가 증가하여 사회적 이슈로 대두
- 나. 도심지 내 주요 기반시설이 시공된 이후, 약 반세기 이상 지난 시점에서 그동안 관리가 이루어지지 않은 지하매설물의 노후화와 고밀도 도심지 지역에서의 신규 지하 매설물의 부설시공은 도심지 지반함몰 발생 가능성을 높임.
- 다. 도심지에서 발생하는 지반함몰 및 지하매설물의 훼손은 국민 안전에 직접적인 피해를 줄 수 있으며, 단전, 단수, 통신마비, 교통 혼잡 등 피해 규모를 산정하기 어려울 수준의 2차 피해를 야기할 가능성이 매우 높음

2. 도심지 지하매설물 시공 및 유지관리에 관한 기술 미흡

- 가. 최근 지반함몰 발생 신고가 잇따르는 도심지에서는 건물의 증축 및 철거, 도로포장의 유지보수 등의 지상 공사가 이루어지고 있는 실정이며, 이와 연관되어 지하매설물이 신규 설치와 재매설이 반복적으로 발생
- 나. 도심지 확장 및 재개발에 따른 지반 굴착, 도로 교통하중 증가, 지하철 운행영향 등 많은 외적 요인과 사용 연한에 따른 노후화는 지하매설물의 훼손가능성을 높이고 있음.

제 2절 연구개발의 필요성

1. 팽창매트재 개발

- 가. 팽창방향의 제어가 가능한 지하공동 보수용 팽창성 매트재(채움재) 개발
- 나. 팽창매트재의 수화/팽창 복합거동 평가
- 다. 지반공동과 섬유시트, 팽창성 채움재료의 거동연관성 분석
- 라. 지반공동 긴급복구용 팽창매트 시제품 제작



그림 2.1 긴급보수보강용 팽창매트(개념도)

2. 팽창 기능제의 특성 파악 및 성능 개선과 적용성 실증

- 가. 팽창수지의 물리·역학적 특성 확립 및 지하공동 적용성능 분석
- 나. 지반공동 유형 및 특성에 따라 적용가능한 팽창수지 결정 및 적용법 제언

3. 국내여건에 적합한 공동 및 함몰 복구 성능 평가

- 가. 국내외 조사를 통한 지반공동 및 함몰의 형상 및 인접부 조건 확립
- 나. 적용 가능성이 높은 대표 공동 및 함몰의 실증 모델 구성
- 다. 국내외 환경을 모두 적용한 제품의 성능 평가 및 인증
- 라. 개발 제품의 실대형 실증화



그림 2.2 저다짐 능동 복구 기술 개념도

4. ICT 적용 성능 개선기술의 적용 표준안 및 유지관리 플랫폼 개발

- 가. 긴급복구 설계인자 도출 및 검증
- 나. 설계 가이드라인 제시 및 소프트웨어 개발
- 다. 복구 구간의 ICT 적용 표지 기술 및 모바일 관리 기술 개발



(a) 표지기 및 유지관리기술

(b) 2차 공동 탐지기술

그림 2.3 ICT 적용 지반함물 복구 유지관리기술

제 3절 연구개발 범위

표 2.1 연구개발 범위

연구범위	연구수행방법)이론적·실험적 접근방법
팽창매트재 개발	· 팽창방향의 제어가 가능한 지하공동 보수용 팽창성 매트재(채움재)개발 · 팽창매트재의 수화/팽창 복합거동 평가 · 지하공동과 섬유매트, 팽창성 채움재료의 거동연관성 분석 · 지하공동 긴급복구용 팽창매트 시제품 제작
팽창 기능제의 특성 파악 및 성능 개선과 적용성 실증	· 팽창수지의 물리·역학적 특성 확립 및 지하공동 적용성능 분석 · 지하공동 유형 및 특성에 따라 적용 가능한 팽창수지 결정 및 적용법 제안
국내여건에 적합한 공동 및 함몰 복구 성능 평가	· 국내외 조사를 통한 지하공동 및 함몰의 형상 및 인접부 조건 확립 · 적용가능성이 높은 대표 공동 및 함몰의 실증 모델 구성 · 국내외 환경을 모두 적용한 제품의 성능 평가 및 인증 · 개발 제품의 실대형 실증화
ICT 적용 성능 개선기술의 적용 표준안 및 유지관리 플랫폼 개발	· 긴급복구 설계인자 도출 및 검증 · 설계 가이드라인 제시 및 소프트웨어 개발 · 복구 구간의 ICT 적용 표지 기술 및 모바일 관리 기술 개발

제 2장 국내외 기술 개발 현황

제 1절 관련 분야의 국내·외 연구동향

1. 국가 연구개발사업 유사연구 검토

가. 국토교통과학기술진흥원 및 국가과학기술 지식정보지식서비스 홈페이지 검색을 통해 유사연구를 검토하였으며, 유사 연구 검색 결과는 다음과 같음.

표 2.2 관련과제 유사연구 검토

부처명	사업명	과제명	예산 (백만원)	비고
국토교통부 (국토교통과학기술진흥원)	건설 기술 연구 사업	- 지반함몰 발생 및 피해 저감을 위한 지반 안정성 평가 및 굴착·복구 기술 개발 - 과제수행기관 : 한국건설기술연구원(연구단) - 총 연구기간 : 2015.12~2018.12 - 연구목표 : 도심지 굴착 공사시 지반함몰 예측을 위한 해석 및 탐사기술과 지반 변위를 최소화 하는 굴착·보강기술 개발	15,000	본 연구는 굴착시 차수성능 향상과 무기질계 혼화재를 이용한 비개착 주입기술에 중점을 둔 과제로 연구목적과 범위가 제한적임.
환경부 (한국환경산업기술원)	환경 정책 기반 공공 기술 개발 사업	- 하수관로 누수에 기인하는 지반침하 (공동)탐지 및 평가기법 개발 - 과제수행기관 : 한국건설기술연구원 - 총 연구기간 : 2014.12~2016.09 - 연구목표 : 비파괴탐사기술의 하수관거 적용성 분석과 지반 특성에 따른 보수보강 평가	235	GPR 조사와 탐지법에 중점을 둔 과제로 본 연구와 연구 목적 및 범위가 상이함
국토해양부	정부 연구 용역	- 싱크홀 예방대책 및 제도개선 방안 마련 연구	20	본 연구의 복구시스템 기반 기준 매뉴얼 개발과 목적 및 범위가 상이함.
미래창조과학부 (국가과학기술연구회)	융합 연구 사업	- 사물인터넷(IoT) 기반 도시 지하매설물 모니터링 및 관리시스템 기술 개발	36,000	상시계측 시스템을 활용한 연구로서 본 연구목적 및 범위가 상이함

2. 국내·외 연구동향

- 가. 국내에서도 지반함몰 사고 발생으로 싱크홀이 사회적 이슈로 부각되었으며 피해 방지를 위한 지하 매설물 설치기술에 관심 집중
- 나. 도심 곳곳에서 싱크홀이 지속적으로 발생하고 있어 지하매설물 설치기술, GIS(지하매설물 통합정보시스템)에 대한 설치기술에 대한 관심 집중
- 다. 미국, 일본은 지반함몰 사고에 대비한 기술개발을 활발히 수행하고 있으나 우리나라는 상대적으로 관련 기술개발이 미흡
- (1) 일본의 경우 건설 후 50년이 경과한 상하수도 시설 등에서 지반함몰 사고가 자주 발생하여 지반함몰 위치를 파악하기 위한 지반조사장비의 개량 및 신기술 개발이 이루어지고 있음
 - (2) 미국은 지반함몰 사고에 대한 데이터베이스를 축적하고 있으며, 지질조사에 따른 확률적 함몰사고 발생 가능성에 대한 정보를 시민들에게 제공하고 있음
 - (3) 국내에서는 도심형 싱크홀에 대한 구체적인 실태 관리가 미흡하며 도심지 지반함몰 저감을 위한 지하 매설물 해석, 설계 시공기술, 지하매설물 유지관리 및 복구기술에 대한 연구개발 지원이 필요

3. 국내·외 기술 특허 동향

- 가. 공동 충전과 관련된 특허에서는 그라우팅을 이용한 충전 방법에 대한 특허가 주를 이룸
- (1) 공동 충전용 주입재에 대한 개발이 이루어짐을 알 수 있음
 - (2) 충전용 주입재는 주로 시멘트계를 사용하고 있음
 - (3) 팽창성 채움재를 이용하여 공동을 채우는 것이 목적인 본 과제와는 관련이 없음
- 나. 침하복구 및 복원과 관련된 특허는 복구 장치 또는 그라우팅을 이용하는 방법이 주를 이루고 있음
- (1) 특허 제도의 침하 복구와 관련된 특허가 다수를 이루고 있음
 - (2) 연약지반에서 발생하는 침하에 대응하는 방법에 대한 특허가 주를 이룸
 - (3) 그라우팅을 이용한 구조물 복원방법에서 그라우트의 주입방식 또는 재료에 대한 특허가 등록되어 있음
 - (4) 팽창성 재료를 이용하여 구조물을 복원하는 특허(1020090090411)가 등록되어 있으나, 특수 장비를 이용하고 제한되지 않은 영역에 그라우팅재를 주입한다는 점에서 본 과제의 목적과 차이가 있다고 할 수 있음
- 다. 팽창매트 및 팽창제를 이용한 침하복구와 관련된 특허는 팽창제의 제조방법 또는 팽창제를 이용한 시공방법 중 방수공법에 대한 특허가 주를 이루고 있음
- (1) 팽창제는 주로 방수제로 이용하기 위한 목적을 갖고 있음
 - (2) 팽창제와 다른 재료의 혼합물을 이용한 건설재료의 생산에 특허가 등록되어 있음
 - (3) 팽창제를 그라우팅 재료로 사용하여 방수의 목적으로 사용하기 위한 특허가 등록되어 있음
 - (4) 팽창제 자체의 팽창력을 이용하여 지반함몰의 복구재료로 사용하기 위한 특허는 없다고 할 수 있음

표 2.3 당사 보유 기술 정보

	명칭	특허 등록정보	등록일	특허증
(주)골든포우	토목섬유 점도 차수제	028491	2000.12.18	
	토목섬유 점도 차수제	0284438	2000.12.19	
	토목섬유 점도 차수제	10-0570412	2006. 4. 5	
(주)유씨아이테크	무선 통신 태그 커넥터를 이용한 시설물 유지 관리 및 사회 안전망 구축시스템	10-1483393	2015. 1. 9	
	무선 통신 태그 커넥터를 이용한 단지 내 밸브 및 관로 유지 관리 및 사회 안전망 구축 시스템	10-1540184호	2015. 7.22	
	자가 발전 시스템을 구비한 무선 통신 모듈 및 이를 이용한 지하 매설물 탐지 및 유지 관리 시스템	10-1540186	2015. 7.22	

표 2.4 제안기술 구분에 따른 관련 특허

기술구분	특허번호	특허명
공동 충진	10200000018019	터널 대공동 충전용 경량주입재료 제조방법
	1020090059965	지하수의 흐름이 있는 공동층에 대한 친환경적인 공동 충전 공법
	1020080106232	친환경성 시멘트계 광물을 이용한 지중 공동부 그라우팅용 급결물탈 및 이를 이용한 그라우팅 방법
	1020140164092	그라우트 충전재 및 이를 이용한 그라우팅 공법
	1020027002162	화학처리된 충전재 및 이를 포함하는 중합체 조성물
	1020100004093	광산 채굴공동 충전용 저시멘트계 충전재
	1020120045272	광산 폐기물 및 친환경고화재를 활용한 저장도, 고유동성 광산 채굴적 충전재 조성물
침하 복구	1020090016221	콘크리트 궤도의 침하량 급속복구방법
	1020140038196	충격 완화층을 이용한 콘크리트궤도 노반침하 복구방법
	1020120032143	침하저감 및 형상유지형 직육면체 백
	1020140172426	철도 선로의 침하 복원 방법
	1020117005522	노면 가복구용 부재 및 노면 가복구 공법
	1020140020799	콘크리트 궤도의 침하 복원 장치
	1020070102648	천연광물이 함유된 단면복구용 모르타르 및 이를 이용한 단면복구공법
침하 복원	1020020042753	다점주입에 의한 부등침하구조물의 복원공법
	1020110037320	구조물의 부등 침하 복원 또는 말뚝 선행하중 도입을 위한 장치
	1020090029596	다중점주입에 의한 지반복원 그라우팅 공법
	1020130084150	무도상 궤도의 노반침하 복원 장치 및 그 방법
	1020090064334	지반 보강 또는 복원 방법 및 가압기구
	1020090100702	다중점주입에 의한 지반복원 그라우팅 공법
	1020090090411	우레탄 발포 조성물 및 이를 이용한 구조물 보강 복원방법
	1020150003449	침하된 구조물 인상을 위한 프리스트레스 강관파일
팽창 시트	1020130048404	스크레이퍼를 적용한 팽창시트 밸브
	1020120054705	분체 비산형 팽창 시트 밸브
	1020027000442	내열성 팽창흑연 시트 및 그 제조방법
	1020100136610	고열전도성 미립자가 복합화된 고열전도성 팽창흑연시트 및 그 제조방법
	1020060134935	복합형 수팽창 고무시트의 제조방법 및 그 고무시트를 이용한 시공방법
	1020107026413	웹, 스템퍼블 시트 및 스템퍼블 시트 팽창 성형품 그리고 이들의 제조 방법
	1020080117518	양면 부착형 점착성 수팽창 방수시트 및 이를 이용한 방수공법
	1020080080456	점착성 수팽창 방수시트 및 이를 이용한 방수공법
팽창 제 복원	1020120080121	산업부산물을 이용한 속경성 팽창제 및 이를 포함하는 시멘트 조성물
	1020040102968	또는 보수제를 이용한 흙 콘크리트 및 흙 콘크리트 블록의 제조 방법
	1020070013124	발포 팽창제를 이용한 지하수 심정의 오염을 방지하기 위한 그라우팅 장치 및 그 시공 방법
	1020090006296	합성 팽창제를 함유한 발포성 용해 및 분산제
	1020110036800	부피팽창제가 포함된 접착제를 사용한 플립 칩 패키지 및 그 접합방법
	1020100042887	시멘트 혼입 폴리머계 탄성방수제

제 3장 연구 수행 내용 및 성과

제 1절 지반공동 복구재료 개발

1. 섬유 커버재 개발

가. 수용성 섬유커버재 선정연구

(1) 배경 및 목적

- (가) 팽창매트의 팽윤거동에서 섬유커버재의 영향을 최소화하기 위해 섬유커버재의 고정 및 제한조건을 제어하는 소재가 필요
- (나) 팽창기능제의 자유팽윤(팽창, swell)을 위해 채워진 토사에 대한 다짐작용에 방향성을 제어해야할 필요성이 없는 경우를 고려한 섬유커버재 선정이 요구
- (다) 팽창매트의 제조기술중에 적용되는 니들펀칭공정에 유발되는 외력조건에 안정적인 작업이 가능한 질량(weight)과 소재 선정이 필요

(2) 수용성 커버재 선정 및 평가

- (가) 기초 조사를 통해 수용성(water soluble)을 갖는 소재와 섬유소재로 개발된 PVA(Poly Vinyl Alcohol) 부직포를 선정

- ① 국내외 제조사와 제품군을 조사
- ② 단섬유 니들펀칭 부직포와 장섬유 스펀본드 부직포, 2가지 형태의 제품 가능
- ③ 자체제조와 외부제조 중 경제적 관점과 품질관리, 수급성 등을 고려
- ④ 수용성 PVA의 수용거동의 온도 의존성을 확인 : 70℃와 25℃ 수용 온도 확인
- ⑤ 상온(room temperature)에서 수용되는 제품 선정

(나) 수용성 평가

- ① 육안 수용거동을 평가하고 이미지 촬영으로 확인
- ② 샘플에 상온 물을 추가하고 시간에 따른 수용 변화 확인
- ③ 평가된 시료는 질량 50, 80 & 100g/m²의 PVA 스펀본드 부직포
- ★ 스펀본드 부직포는 방사(spun)한 장섬유 부직포를 엠보 롤러로 점융착 결합시켜 최종 부직포를 제조한 제품을 말함

(다) 결과

- ① 그림 3.1에 수용성 확인 가능한 평가 사진을 제시함
- ② 상온의 물을 가한 후 매 20초 단위로 사진을 촬영하여 수용성을 확인함
- ③ 질량에 상관없이 60초 전후로 수용이 완료되는 것으로 확인
- ④ 수용 후 PVA 성분은 육안으로 보이지 않지만, 물에 녹아 젤 성상으로 존재하며 수분을 건조하면 투명한 얇은 막을 형성하는 잔류물이 잔존함.

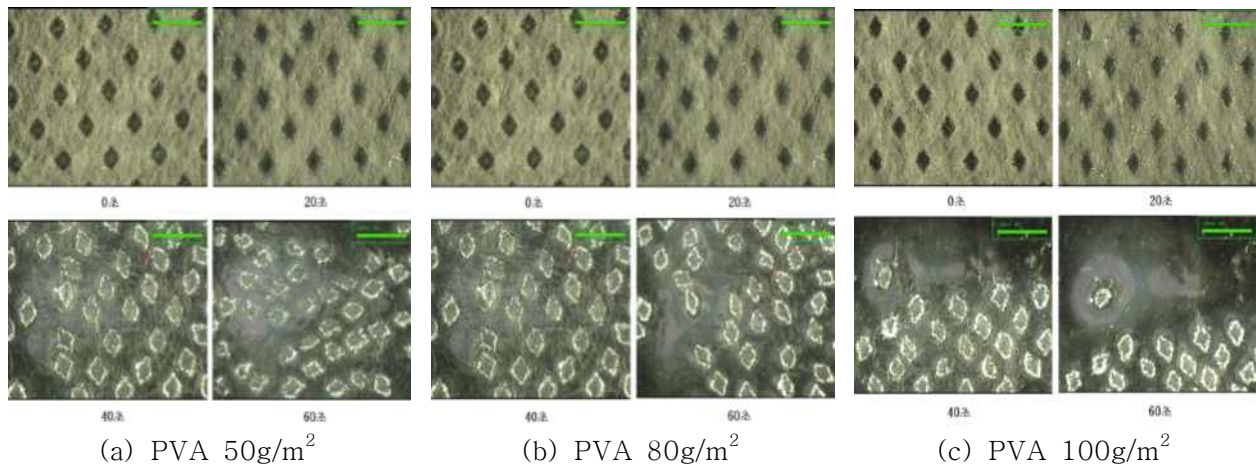


그림 3.1 PVA 부직포 수용성 평가

(3) 질량의 결정

(가) 수용성 PVA 부직포를 팽창매트에 적용하기 위해 약 3종류의 질량에 따른 부직포를 준비하여 각각의 수용성과 질량을 평가

- ① 팽창매트 제조공정상에 유발되는 공정하중에 대해 충분한 형태안정성을 확보하기 위해 3종류의 후보군을 선정
- ② 각각 공인 시험기관에서 질량 평가를 통해 제품군을 확인
- ③ 시제품에 대한 평가에서 최적 질량을 선정하여 사업화 제품으로 전개 예정

(나) FITI 시험연구원을 통해 확인된 질량은 52.1, 81.7 그리고 103.0g/m²의 결과 값 확인

- ① 그림 3.2에 시험에 사용된 수용성 PVA 부직포 샘플 사진을 제시함

(다) 수용성 PVA 부직포는 질량 80g과 100g/m²를 섬유커버재 시제품으로 선정

- ① 팽창매트 시제품 제조에 적용하여 적합성 확인 요구

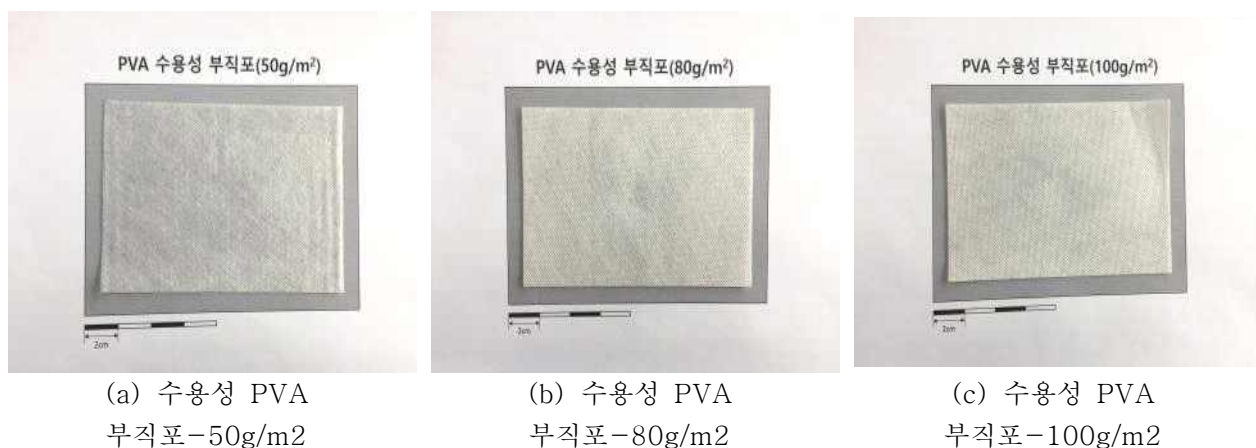


그림 3.2 수용성 PVA 부직포 샘플 사진

나. 일반 섬유커버재 연구

(1) 일반섬유 커버재의 결정

(가) 섬유커버재용 부직포에 대한 선행조사 정리 및 개요

- ① 가장 일반적인 섬유커버재로 적용되는 것이 부직포 제품이며, 부직포는 니들펀칭과 스펀본드의 기법으로 주로 제조됨
- ② 니들펀칭은 단섬유를 사용하여 니들펀칭 기계를 통해 제품을 제조하고, 스펀본드는 장섬유를 방사하여 적층된 웹 형성 후 니들펀칭이나 열융착 등으로 부직포를 제조
- ③ 스펀본드는 고비용이 소요되는 섬유방사설비의 구축이 필요한 반면 니들펀칭은 니들펀칭 장비로 저비용으로 생산설비 구축이 가능.
- ④ 스펀본드 부직포의 경우에는 저질량에서도 상대적으로 높은 인장강도를 발휘, 반면 니들펀칭 부직포는 동일한 인장강도를 위해 스펀본드 부직포에 비해 상대적으로 높은 질량이 필요

다. PP 니들펀칭 부직포

- (1) 본 과제의 정량 목표인 최소 질량 200g/m^2 기준은 스펀본드 부직포 기준으로 결정된 기준이며, 최소인장강도는 스펀본드 부직포 및 니들펀칭 부직포 공히 질량에 상관없이 최소한 확보되어야 하는 수준의 인장강도 기준
 - ✓ 스펀본드 부직포 200g/m^2 에서 발휘되는 최소 인장강도 기준값을 적용함
- (2) 폴리프로필렌 단섬유를 사용하여 정량목표를 만족하는 일반 부직포 섬유커버재를 제조
- (3) 공인시험기관을 통해 질량과 인장강도/신도를 평가함
- (4) 질량 500g/m^2 과 인장강도 1.1kN, 신도 93% 이상의 특성값을 확인
 - ✓ 추후 보다 정확한 품질관리를 통해 약 350g/m^2 정도로 질량을 제어하면 정량 목표 인장강도수준에서 과하지 않은 품질확보와 경제성 확보 가능 판단됨.



그림 3.3 PP 니들펀칭 부직포 섬유커버재 샘플 사진

라. 스펠본드 부직포

- (1) 신도(elongation)의 차이에서 오는 팽창거동의 제어를 위해 팽창매트의 상하 커버재를 달리하기 위해 니들펀칭 부직포에 비해 낮은 신도를 갖는 스펠본드 부직포를 평가함
- (2) PET(폴리에틸렌테레프탈레이트)로 방사, 열융착된 부직포로 인장신도가 20~60% 사이 이나 인장강도가 0.5kN(그랩법)으로 정량목표보다 낮은 것으로 확인됨
- (3) 인장력이 필요하지 않은 경우에 커버재로 적용 가능함. 특히 수용성 부직포와 조합을 이룰 경우 팽창방향성 제어 유리할 것으로 판단됨

마. 인장특성

- (1) 정량적 목표로 설정된 인장강도와 신도는 각각 0.7kN과 50% 이상이며, 이 기준을 만족 하는 커버재는 PP 니들펀칭 부직포
- (2) 주관기관에서 제조된 시제품(PP 니들펀칭 부직포) 커버재에 대한 제3자 공인기관 시험 의뢰 결과를 첨부함
- (3) 시험결과 질량 512g/m^2 로 기준 200g/m^2 이상을 만족하며, 인장강도 1.1kN과 인장신도 93% 이상으로 모두 기준값인 만족함. 다만 보다 정확한 품질관리를 통해 질량을 350g/m^2 수준으로 제어하여 경제성 확보 위한 추가 공정값 결정과정이 필요함

* 섬유커버재 성적서



(28115) 충북 청주시 청원구 오창읍 양정 3길 21
Tel : 043-711-8851 Fax : 043-711-8804

TEST REPORT



의뢰자 : (주)골든포우
주 소 : 충남 천안시 서북구 성환읍 안궁리 354-51
품 명 : 수용성 PVA 부직포(50g/m²)

접수번호 : M213-17-00682
발급일자 : 2017-01-18
용 도 : 연구개발용
쪽 번호 : 1/1

2017-01-16 일자로 의뢰하신 시료에 대한 시험결과는 아래와 같습니다.

■ 시험 결과 ■

01. 질량 (KS K ISO 9864 : 2007) : g/m²

	#1
	52.1

** 시험 결과 기록 완료 **

SAMPLE :



FITI 시험연구원



※ 문서 확인 번호 : DUW5-H65B-LI6A ※

(홈페이지에 접속 후 "성적서확인"메뉴에서 문서 확인 번호를 통해 위 변조 여부를 확인할 수 있습니다.)

이 성적서는 제시된 시료에 대한 시험결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 시료명은 의뢰자가 제시한 명칭입니다.
이 성적서는 FITI와 사전 서면 동의 없이 홍보, 선전, 광고 및 소송용도로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
이 성적서는 KOLAS 인정과 무관함을 알려 드립니다.



TEST REPORT

의뢰자 : (주)골든포우
주 소 : 충남 천안시 서북구 성환읍 안궁리 354-51
품 명 : 수용성 PVA 부직포(80g/m²)

접수번호 : M213-17-00683
발급일자 : 2017-01-18
용 도 : 연구관리용
쪽 번호 : 1/1

2017-01-16 일자로 의뢰하신 시료에 대한 시험결과는 아래와 같습니다.

■ 시험 결과 ■

01. 질량 (KS K ISO 9864 : 2007) : g/m²

	#1
	81.7

** 시험 결과 기록 완료 **

SAMPLE :



FITI 시험연구원



※ 문서 확인 번호 : 5BX5-CQ3Q-41Q7 ※

(홈페이지에 접속 후 "성적서확인"메뉴에서 문서 확인 번호를 통해 위 변조 여부를 확인할 수 있습니다.)

이 성적서는 제시된 시료에 대한 시험결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 시료명은 의뢰자가 제시한 명칭입니다.
이 성적서는 FITI와 사전 서면 동의 없이 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
이 성적서는 KOLAS 인정과 무관함을 알려 드립니다.



TEST REPORT



의뢰자 : (주)골든포우
주 소 : 충남 천안시 서북구 성환읍 안궁리 354-51
품 명 : 수용성 PVA 부직포(100g/m²)

접수번호 : M213-17-00684
발급일자 : 2017-01-18
용 도 : 연구개발용
쪽 번호 : 1/1

2017-01-16 일자로 의뢰하신 시료에 대한 시험결과는 아래와 같습니다.

■ 시험 결과 ■

01. 질량 (KS K ISO 9864 : 2007) : g/m²

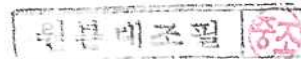
	#1
	103.0

** 시험 결과 기록 완료 **

SAMPLE :

fiti

fiti



FITI 시험연구원



※ 문서 확인 번호 : Q1J3-E7BJ-EBXC ※

(홈페이지에 접속 후 "성적서확인"메뉴에서 문서 확인 번호를 통해 위 변조 여부를 확인할 수 있습니다.)

이 성적서는 제시된 시료에 대한 시험결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 시료명은 의뢰자가 제시한 명칭입니다.
이 성적서는 FITI와 사전 서면 동의 없이 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
이 성적서는 KOLAS 인정과 무관함을 알려 드립니다.



TEST REPORT



의뢰자 : (주)골든포우
주 소 : 충남 천안시 서북구 성환읍 안궁리 354-51
품 명 : 니들펀칭 부직포

접수번호 : M213-17-00685
발급일자 : 2017-01-18
용 도 : 연구개발용
쪽 번호 : 1/1

2017-01-16 일자로 의뢰하신 시료에 대한 시험결과는 아래와 같습니다.

■ 시험 결과 ■

01. 질량 (KS K ISO 9864 : 2007) : g/m²

	#1
	512.3

02. 인장강도 (KS K 0743 : 2009, 그레브법) : kN

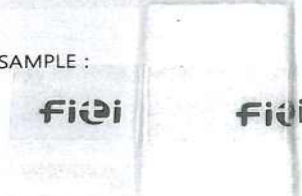
	#1
길이	1.1
폭	1.3

03. 인장신도 (KS K 0743 : 2009, 그레브법) : %

	#1
길이	96.6
폭	93.6

** 시험 결과 기록 완료 **

SAMPLE :



FITI 시험연구원



※ 문서 확인 번호 : 4MPH-4RA9-8522 ※

(홈페이지에 접속 후 "성적서확인"메뉴에서 문서 확인 번호를 통해 위 번조 여부를 확인할 수 있습니다.)

이 성적서는 제시된 시료에 대한 시험결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 시료명은 의뢰자가 제시한 명칭입니다.
이 성적서는 FITI와 사전 서면 동의 없이 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
이 성적서는 KOLAS 인정과 무관함을 알려 드립니다.



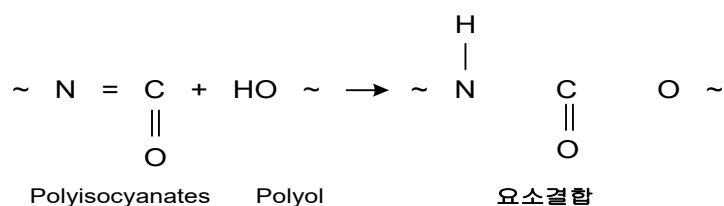
2. 팽창기능제 성능개선

가. 고결시간 최적화

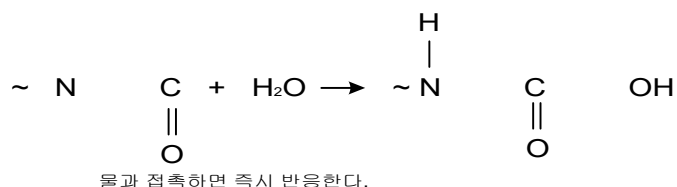
(1) 고결 메카니즘

고결 반응메카니즘은 폴리올(Polyol)의 수산기와 MDI계 이소시아네이트(Isocyanate)로 구성된 용액이 혼합교반의 과정에 의해 요소 결합하는 것으로 3차원 망상구조를 형성하며, 이런 가교 반응의 주 메카니즘은 중합반응 → 가수반응 → 발포반응 → 가교반응의 순서로 이루어지며 결합 반응식은 다음 그림과 같다.

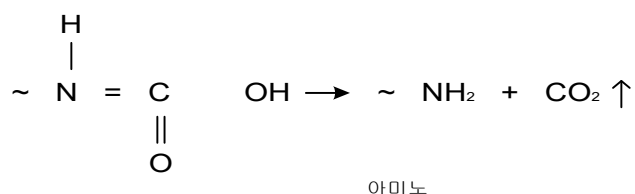
중합반응



가수반응



발포반응



가교반응

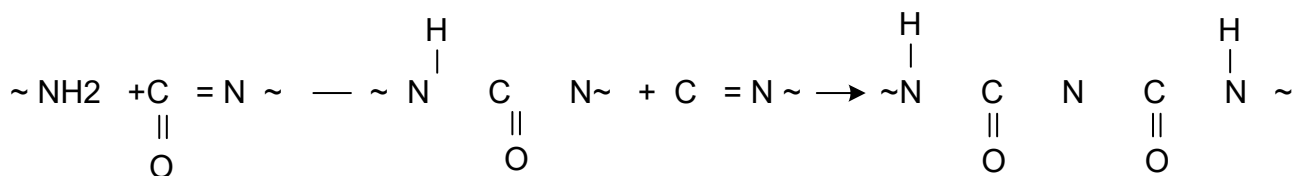


그림 3.4 고결반응 반응식

(2) 실험방법

팽창기능제의 고결시간을 확인하기 위하여 같은 양의 팽창기능제를 섬유팩에 넣고 팽창시켜 팽창이 멈추고 경화되는 시간을 확인하였다. 실험방법은 토조에 토압계를 설치하고 흙상부에 팽창기능제를 넣은 섬유팩 놓고 그 위에 재하판을 설치하였다. 팽창기능제가 팽창되면서 하부로 압력을 전달하고 그 압력이 수렴되는 시간을 고결시간으로 판단하였다. 팽창기능제는 총 4가지종류의 기능제로 각각 실험실 팽창율이 5배, 10배, 15배, 20배의 팽창기능제를 제작하여 사용하였으며 섬유팩의 크기는 250mm×180mm의 팩을 사용하였다. 실험은 팽창기능제별로 각각 3번씩 진행하여 평균값을 사용하였다.



(a) 실험용 토조 및 데이터로거



(b) 토압계설치



(c) 팽창기능제를 넣은 섬유팩

그림 3.5 고결시간 최적화 실험 전경

(3) 실험결과

다음 실험결과는 그림 3.6과 같다. 5배, 10배의 팽창기능제의 경우 약 500초 정도에서 팽창을 멈추는 것으로 확인 되었으며, 15배의 팽창기능제는 약 300초정도에서 수렴값을 나타내

기존 생산되는 발포우레탄과 큰 차이를 보이진 않았다. 20배의 팽창기능제의 경우 목표치인 600초 때 까지 발포를 진행하였고, 이후 팽창을 멈추고 경화되는 것으로 확인되었다.

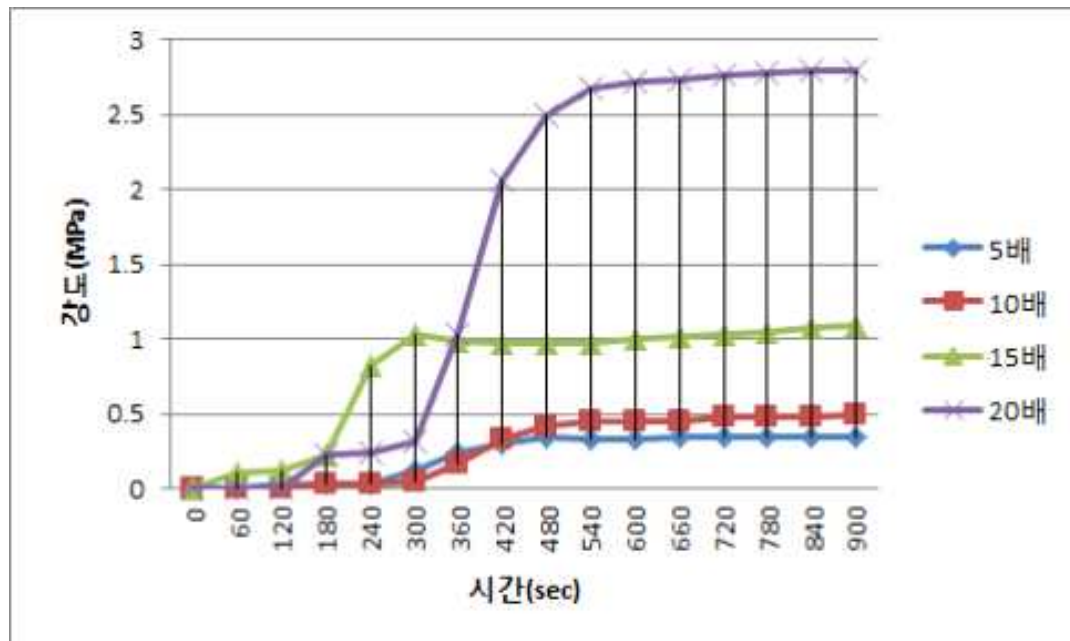


그림 3.10 팽창량별 시간에 대한 강도시험 결과

나. 강도평가

(1) 일축압축강도 시험방법

팽창시편은 팽창약액 0.9~1.1, 이소시아네이트 1.4~1.7의 중량 비율로 일정한 시간동안 혼합한 재료로 일정한 혼합비율을 교반하여 액상상태로 거꾸집을 이용하여 시편을 제작하였다. 팽창재료의 강도는 흙의 일축압축강도 시험방법(KS F 2314)으로 실시하였고, 구속압을 받지 않은 상태에서 자립하는 시험체의 일방향 일축압축강도를 구하였다. 시편의 모양은 원기둥으로 지름 50mm, 높이 100mm로 제작하였고, 측정 장비는 HS-179F로 변형제어식 압축장치와 하중계 및 변위계로 구성되었다.

표 3.1 시험계획

분류	종류		
팽창재료	A	B	C
재령시간	1시간, 72시간		
팽창량제어	10%, 20%, 30%		

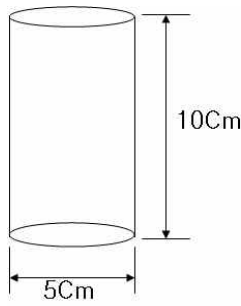


그림 3.7 일축압축강도시험을 위한 시편

시험 계획은 다음 표 3.1과 같고 일축압축강도 측정은 시편의 변형이 20%까지 압축을 하였으며, 압축재하는 일정한 속도를 유지하였다. 시험체의 높이의 $\pm 0.1\%$ 허용오차에서 압축량을 측정할 수 있도록 하였다. 압축 중에 압축량 ΔH 와 압축력 P 를 측정하고, 압축량과 압축력의 측정간격은 응력-변형곡선으로 나타내었다. 압축력의 최대값의 2/3정도로 감소하거나 압축변형이 20%에 도달하면 압축을 종료하였다. 시편의 일축압축강도는 식(3.1)에 따라 산정한다.

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H_0} \times 100(\%) \quad (3.1)$$

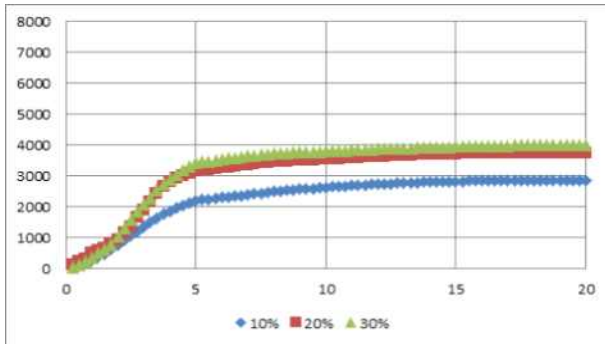
여기서, ε 는 시험체의 압축변형(%), ΔH 는 압축량, H_0 는 초기 시험체의 높이(cm)를 나타낸다. 압축변형이 ε 일 때의 압축응력은 식 (3.2)에 따라 산정한다.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \times \left(1 - \frac{\varepsilon}{100}\right) \quad (3.2)$$

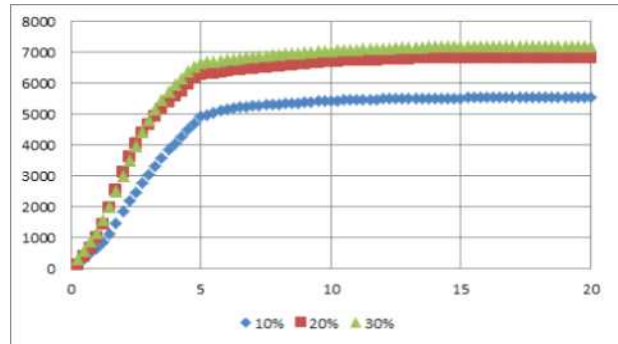
여기서, A_0 는 $(\pi D_0^2)/4$, σ 는 압축응력, P 는 압축변형이 ε 일 때 시험체에 작용된 압축력, A_0 는 초기 시험체의 단면적, D_0 는 초기 시험체의 지름을 나타낸다.

(2) 시험결과

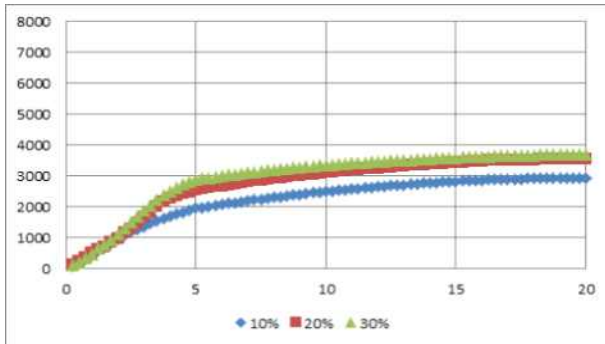
각 시험조건에 따라 제작된 공시체를 일축압축강도 시험을 시행하였다. 이와 같은 공시체의 압력에 따른 변형결과는 그림 3.8과 같이 나타났다. 강도시험을 실시한 경화초기의 강도값과 가장 장기 경화시간인 3일 강도 공시체의 결과를 나타낸 것이다. 시험결과 모든 공시체에서 완전한 파괴의 경향을 나타나진 않고 일정수준에서 수렴하는 경향이 나타난다. 압축강도결과 팽창기능제 A의 경우 경화 시간과 팽창량 구속조건에 따라 압축강도의 증가를 확인하였고, 팽창기능제 B의 경우 팽창량 제어 20%~30%의 상태에서 비슷한 압축강도가 발현되었다. 팽창기능제 C는 초기 강도가 1.55~1.73MPa 발현되었고 경화시간과 구속조건에 큰 영향을 받지 않고 비교적 일정한 최종강도가 발현되었다.



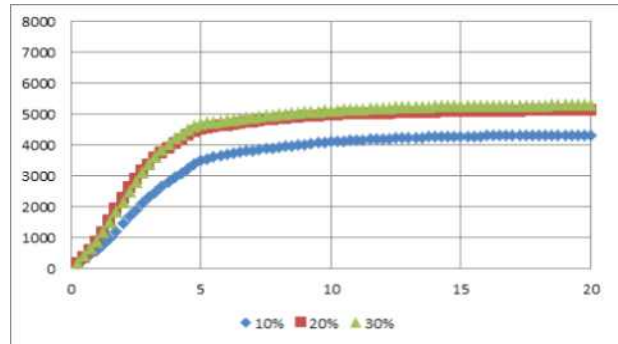
(a) A기능제 1시간



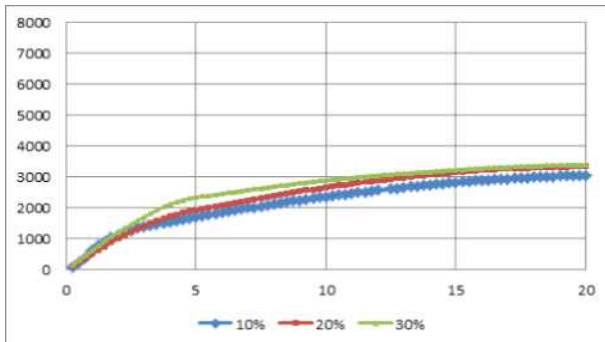
(b) A기능제 72시간



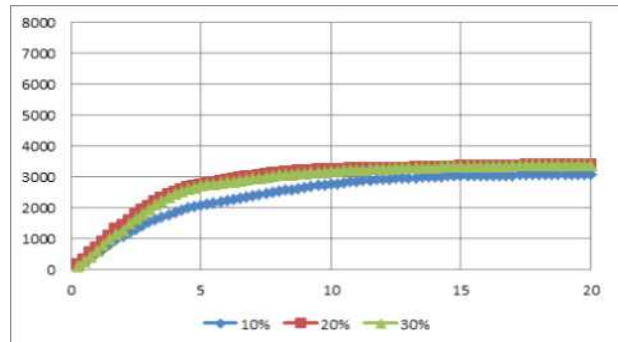
(c) B기능제 1시간



(d) B기능제 72시간



(e) C기능제 1시간



(f) C기능제 72시간

그림 3.12 기능제별 일축압축강도 시험 결과

표 3.2 일축압축강도 시험 결과

분류	종류																	
팽창 기능제	A						B						C					
제령 시간	1시간			72시간			1시간			72시간			1시간			72시간		
팽창량 제어	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%	10%	20%	30%
압축 강도 (MPa)	1.38	1.62	2.01	2.82	3.48	3.67	1.50	1.80	1.88	2.19	2.60	2.70	1.55	1.7	1.73	1.57	1.72	1.73

(3) 팽창기능제 성적서
(가) 팽창기능제 A(10배)



BEYOND ASIAN HUB, TOWARD GLOBAL WORLD

TEST REPORT

우 22829 인천광역시 서구 가재울로 68 (가좌동)

TEL (032)5709-700

FAX (032)575-5613

성적서번호 : TAS-001281

접수 일자 : 2017년 01월 17일

대표자 : 김기성

시험완료일자 : 2017년 01월 20일

업체명 : 유씨아이테크 주식회사

주소 : 인천광역시 남구 인화로 313 (주안동, 은성빌딩2층)

시험명 : 팽창기능제(A)

시험결과

시험항목	단위	시험구분	결과치	시험방법
일축압축강도	MPa	-	4.0	KS F 2314 : 2013

* 용도 : 제출용

- 비고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시험 및 시험명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 성적서의 진위확인인 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인 가능합니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 원본(등본 포함)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/파일본은 결과치 참고용입니다.

Kim Sun Hyuk

작성자 : 김선혁
E-mail: kims8033@ktr.or.kr

Kang Yeong-gwan

기술책임자 : 강영관
Tel : 1577-0091(ARS ①-④)

2017년 01월 20일

KTR

한국화학융합시험연구원장



위변조 확인용 QR code

Page : 1 of 1

전자문서본은 시험결과에 대한 참고용입니다.

전자문서본(Electronic Copy)

KTR KOREA TESTING & RESEARCH INSTITUTE

KTR-QP-T09-F01-02(07)

A4(210 X 297)

(나) 팽창기능제 B(15배)



BEYOND ASIAN HUB, TOWARD GLOBAL WORLD

TEST REPORT

우 22829 인천광역시 서구 가재울로 68 (가좌동)

TEL (032)5709-700

FAX (032)575-5613

성적서번호 : TAS-001282

접 수 일 자 : 2017년 01월 17일

대 표 자 : 김기성

시험완료일자 : 2017년 01월 20일

업 체 명 : 유씨아이테크 주식회사

주 소 : 인천광역시 남구 인하로 313 (주안동, 은성빌딩2층)

시 료 명 : 팽창기능제(B)

시험 결과

시험항목	단위	시료구분	결과치	시험방법
일축압축강도	MPa	-	2.1	KS F 2314 : 2013

★ 용 도 : 제출용

- 비 고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로써 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 성적서의 진위확인용 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인 가능합니다.
2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 원본(등본 포함)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/파일본은 결과치 참고용입니다.

Kim Sun Hyuk

작성자 : 김선혁
E-mail: kims8033@ktr.or.kr

Kang Yeong-gwan

기술책임자 : 강영관
Tel : 1577-0091(ARS ①-④)

2017년 01월 20일

KTR

한국화학융합시험연구원장



위변조 확인용 QR code

Page : 1 of 1

전자문서본은 시험결과에 대한 참고용입니다.

전자문서본(Electronic Copy)

KTR KOREA TESTING & RESEARCH INSTITUTE

KTR-QP-T09-F01-02(07)

A4(210 X 297)

(다) 팽창기능제 C(20배)



BEYOND ASIAN HUB, TOWARD GLOBAL WORLD

TEST REPORT

우 22829 인천광역시 서구 가재울로 68 (가좌동)

TEL (032)5709-700

FAX (032)575-5613

성적서번호 : TAS-001283

접 수 일 자 : 2017년 01월 17일

대 표 자 : 김가성

시험완료일자 : 2017년 01월 20일

업 체 명 : 유씨아이테크 주식회사

주 소 : 인천광역시 남구 인하로 313 (주안동,은성빌딩2층)

시 료 명 : 팽창기능제(C)

시험 결과

시험항목	단위	시험구분	결과치	시험방법
일축압축강도	MPa	-	1.7	KS F 2314 : 2013

* 용 도 : 제출용

- 비 고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로써 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 성적서의 진위확인용 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인 가능합니다.
2. 이 성적서는 홍보, 전전, 광고 및 소송용 등으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 원본(등본 포함)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/파일본은 결과치 참고용입니다.

Kim Sun-Hyuk

작성자 : 김선혁
E-mail: kims0033@ktr.or.kr

Kang Joong-gwan

기술책임자 : 강영관
Tel : 1577-0091(ARS ①-④)

2017년 01월 20일

KTR

한국화학융합시험연구원장



위변조 확인용 QR code

Page : 1 of 1

전자문서본은 시험결과에 대한 참고용입니다.

전자문서본(Electronic Copy)

KTR KOREA TESTING & RESEARCH INSTITUTE

KTR-QP-T09-F01-02(07)

A4(210 X 297)

다. 팽창압

(1) 실험방법

본 실험에서는 압축시험기 및 로드셀을 이용하여 팽창기능제의 팽창압이 로드셀에서 측정된 것을 분석하기 위해 실험을 진행하였다. 실험방법은 지름 100mm의 아크릴몰드에 팽창기능제와 MDI계 이소시아네이트를 각각 100g씩 넣어 교반하였고, 상부에 실리콘패드를 이용하여 밀폐시켜 팽창기능제가 팽창시 상부로 밀어내는 팽창압에 대해서 측정하였다. 실험은 10배, 15배, 20배 팽창 기능제를 사용하였으며, 실험은 각각 3번씩 진행하여 평균값으로 나타내었다.



(a) 로드셀 실험장비



(b) 팽창기능제 및 이소시아네이트 혼합



(c) 팽창기능제 교반



(d) 팽창압 측정

그림 3.9 팽창압 실험 절차

(2) 실험결과

각각의 팽창기능제의 압력변화는 다음 그림 3.10과 같이 나타났다. 상하로만 작용되는 팽창압을 측정한 결과는 다음 표 3.3과 같다. 팽창기능제에 따라 55~127 ton/m²(5.5~12.7kgf/cm²)까지 팽창압이 측정되었다. 모든 기능제의 액상의 양을 늘린다면 목표치인 100ton/m²을 넘을 것으로 기대된다. 또한 섬유인 신장력이 증가될수록 팽창압을 통한 이완부위의 다짐효과 역시 커질 것으로 판단된다.

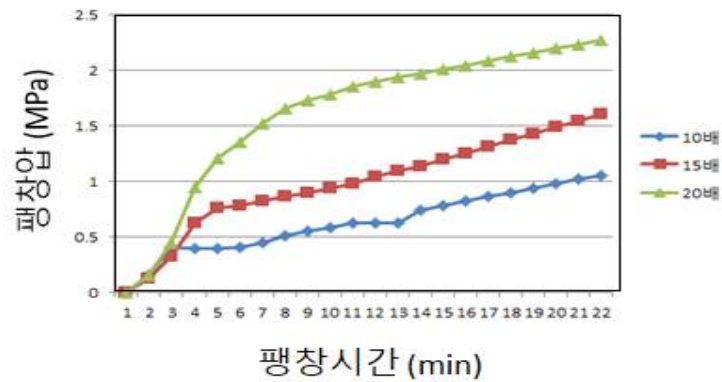


그림 3.17 팽창압 측정결과

표 3.3 팽창압 실험결과

분류	종류								
팽창 기능제	10배			15배			20배		
팽창압 kgf/cm ²	5.41	5.64	5.45	8.15	7.99	8.43	1.107	1.118	1.246
ton/m ²	55.20408	57.55102	55.61224	83.16327	81.53061	86.02041	112.9592	114.0816	127.1429
MPa	0.55	0.58	0.56	0.83	0.82	0.86	1.13	1.14	1.27

라. 팽창량

(1) 시험방법

폴리우레탄의 발포 특성 파악을 위해 일반적으로 사용되고 있는 방법은 컵발포 실험(Cup foam test)으로 상면이 개방되어 있는 컵 형상의 용기에 원재료를 혼합 반응 시켜 화합물의 발포 경향을 관찰하는 실험법이다. 본 시험에서 컵발포를 이용하여 팽창기능제별 성형 특성을 확인하였다. 4가지의 폴리올(Polyol)과 MDI(Methylene diphenylene isocyanate)를 각각 사용하였고, 실험실의 온도는 상온상태인 20℃~24℃의 온도에서 실험을 실시하였다. 자유발포 실험에 사용된 용기는 내경 100mm, 높이 340mm 원통 아크릴용기를 사용하여 시험을 진행하였다. 주재료인 폴리올과 MDI(이소시아네이트)의 양은 다음 표 3.4와 같이 혼합하여 발포율을 확인하였다.

표 3.4 팽창기능제 팽창량실험 배합표

팽창량 실험(cm ³)				
팽창기능제	5배	10배	15배	20배
혼합율	1 대 1	1 대 1	1 대 1	1 대 1.2
폴리올	55g	55g	55g	50g
경화제	55g	55g	55g	60g
초기부피	109.9	109.9	109.9	109.9



(a) 실험 준비



(b) 초반 부피



(c) 5배 팽창기능제 팽창량



(d) 5배 팽창기능제 발포형태

그림 3.11 5배 팽창기능제 팽창량



(a) 실험준비



(b) 초반 부피



(c) 10배 팽창기능제 팽창량



(d) 10배 팽창기능제 발포형태

그림 3.12 10배 팽창기능제 팽창량



(a) 실험준비



(b) 초반 부피



(c) 15배 팽창기능제 팽창량



(d) 15배 팽창기능제 발포형태

그림 3.13 15배 팽창기능제 팽창량



(a) 실험준비



(b) 초반부피



(c) 20배 팽창기능제 팽창량



(d) 20배 팽창기능제 발포형태

그림 3.14 20배 팽창기능제 팽창량

(2) 실험결과

팽창량의 경우 교반과 실험실의 온도에 따라 영향을 받는 것을 감안하였을 때 모든 팽창 기능제에 성능발현이 저조한 것을 확인할 수 있었다. 5배, 10배의 팽창기능제는 약 550~600%의 발포율을 보였고, 15배 기능제는 1,135%의 발포율, 20배 기능제는 1,535%의 발포율을 보였다.



그림 3.15 팽창기능제 팽창량 비교

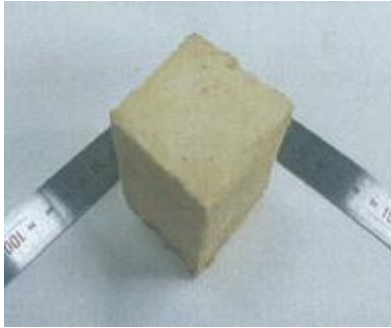
표 3.5 팽창기능제 팽창량 실험결과

팽창량 실험 (cm ³)				
발포율	5배	10배	15배	20배
초기부피	109.9	109.9	109.9	109.9
팽창부피	616.225	643.7	1248.15	1687.75
발포율	560.71%	585.71%	1135.71%	1535.71%

마. 장기성능 평가

(1) 시험방법

팽창기능제의 장기적인 압축 크리프 거동 평가를 위해 가로×세로×높이 5cm의 정육면체 모양의 공시체를 이용하였다. 이 시료는 실험실 표준상태인 KS M ISO 291, ASTM D618에 규정된 (23±2)℃, (50±10)% R.H.에서 48시간 이상 방치한 후 시험에 사용하였다. 기능성 팽창제의 압축 크리프 성능을 평가하기 위한 시험 장치는 Instron사의 모델명 5982를 사용하였고, 시험속도는 ASTM D7361에 따라 1mm/min으로 진행하였다.



(a) 압축 크리프 시험용 공시체



(b) 가속 압축 크리프 시험기

그림 3.16 팽창기능제 팽창량 실험결과

(가) 단기 크리프(Ramp & Hold Test) 시험

압축 크리프 응력은 12.4kPa를 적용하여 기준온도 20℃에서 시험을 진행하였다. 규정된 응력을 가한 상태로 1000s 동안 유지하며 압축 변형률을 측정하였다.

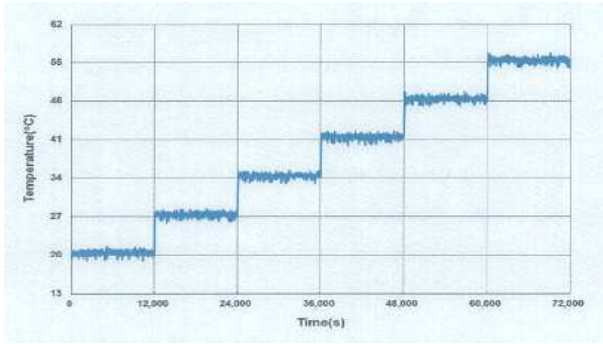
(나) 가속 압축 크리프 시험

가속 압축 크리프 시험조건은 기준온도, 승온온도, 최종온도는 각각 20℃, 7℃, 55℃이고, 전이온도를 고려하여 용점이하의 온도에서 시험온도 범위에 전이온도가 포함되지 않도록 하였다. 총 시험 시간은 60,000s로 25년 이상의 수명예측이 가능한 범위에서 설계되었다. 가속 압축 크리프 시험은 크리프 응력을 가한 상태로 7℃씩 온도를 순차적으로 가하면서 크리프 변형률을 측정하였다. 이 때 각 온도에서 12,000s 동안 유지한 후 다음 단계의 온도로 승온하였다. 규정된 응력과 온도에서 시간에 따른 시료의 변형률은 분당 2회 측정하여 연속 기록하였다. 이와 같은 시험을 통해 얻은 크리프 데이터로부터 압축 크리프 마스터 커브를 산정하였다.

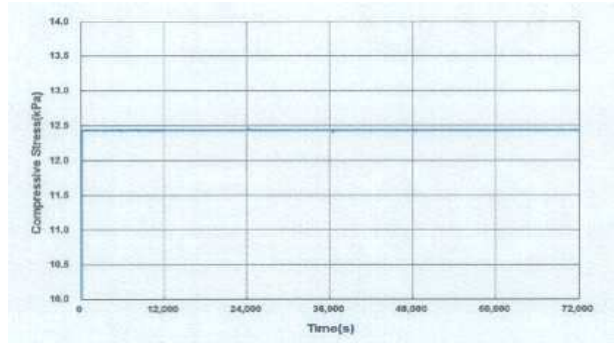
(2) 시험결과

표 3.6 기능성 팽창제의 가속 압축 크리프 시험 결과

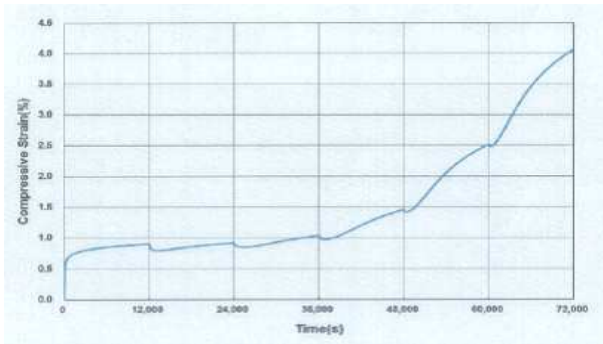
기준온도 (℃)	압축 크리프 응력 (kPa)	고장 시간 (h)	고장 시간 (log(h))	압축 크리프 변형률 (%)
20.0	12.4	100,000	5.0	5.206



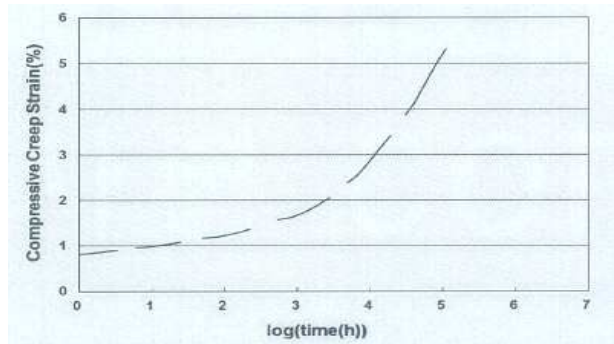
(a) 시험온도 곡선



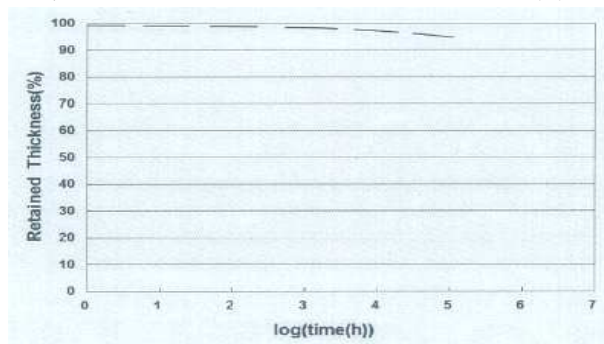
(b) 응력 곡선



(c) 변형률 곡선



(d) 마스터 커브



(e) 두께 유지율 마스터 커브

그림 3.17 팽창성 기능제의 가속 압축 시험 종합결과

3. 팽창매트 개발

가. 개발배경 및 목적

(1) 1차년도 연구를 통한 팽창매트의 팽창방향성과 팽창 수준의 제어 필요성 확인

(가) 상하다짐방향으로 팽창이 제어되는 구조의 팽창매트 제품 필요성에 대해 요구제기, 지중관로에 대한 영향 최소화, 포장층 및 주변 시스템에 영향을 줄 수 있는 수준의 팽창은 나타나지 않아야 함

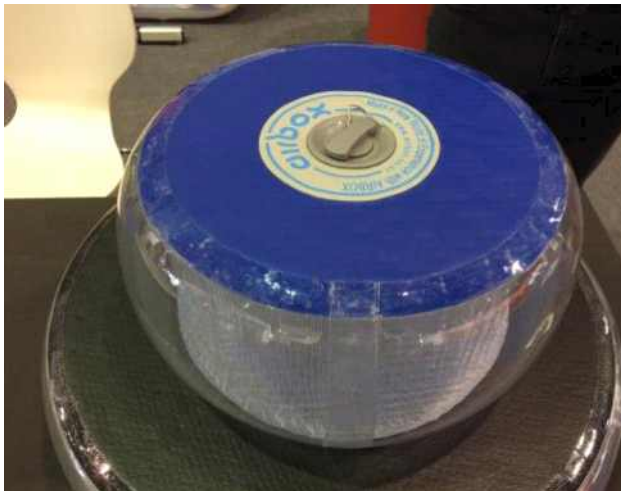
(나) 팽창매트의 제조기술중에 적용되는 니들펀칭공정에 유발되는 외력조건에 안정적인 작업이 가능한 질량(weight)과 소재 선정이 필요성 확인

(다) 액상 팽창제 선정에 따른 팽창매트 내에서 팽창제 유실 방지 가능한 불투수성의 소재로 제조된 팽창매트 필요

- (2) 일측 방향으로 팽창억제되고 나머지 방향으로는 팽창성이 확보되어 당초 팽창에 의한 주변토사의 다짐효과를 유발할 수 있는 섬유커버재의 적용을 통한 팽창매트 제조기술 확보

나. 개발내용 및 과정

- (1) 1차년도 적용공정인 니들펀칭 부직포를 통한 수용성 및 불투수성의 섬유커버재를 팽창 방향성과 팽창수준 제어 구조로 제조하기 어려움 확인. 개발 초기 정립된 단순한 팽창성의 확보로는 지중 불명확한 팽창거동과 제어되지 않은 거동이 예상
- (2) 새로운 섬유커버재 구조의 적용을 위한 기술조사 및 관련 제품조사 진행. 독일 TechTextil 전시회를 통해 3차원 드롭 스티칭 구조제품 확인(그림 3.18)
 - (가) 상하방향으로 pile yarn이 지탱하여 팽창이 억제되고 상하를 제외한 나머지 방향으로 자유로운 팽창공간이 확보되는 구조체의 적용으로 팽창매트의 팽창성과 방향성을 제어할 수 있을 것으로 판단함
 - (나) 일정 두께로 제조하여 최대 팽창수준을 제한하고 정육면체의 상하를 제외한 나머지 4면으로 자유팽창이 가능한 구조의 적용이 가능함을 확인
 - (다) 제조사와의 미팅을 통해 2차년도 요구수준의 팽창매트 커버재로 적용 가능성 확인
 - (라) 최대 팽창수준은 두께 방향으로 5 ~ 40cm까지 조절 가능
 - (마) 지속적인 시험품의 제조와 개선을 통한 지반함몰 응급복구에 적용 가능한 팽창제 담지 구조체로 개발
- (3) 드롭 스티칭을 이용한 팽창매트 시험품 제조(그림 3.19~3.20 참조)
 - (가) 다수의 규격으로 시험품을 제작하며, 개선방향을 도출하고 이에 따라 점진적인 드롭 스티칭 적용 섬유커버재의 개발 진행
 - (나) 초기 대형규격 (50×50×20cm)의 시험품부터 최소규격인 (10×10×5cm) 규격의 시험품 제작과 절곡부 형성방법에 따른 제품 등을 검토
 - (다) 팽창성과 방향성이 제어된 일반형 제품과 관로 등 선형 구조물에 영향을 최소화하며 그 하부의 채움 및 강도확보를 위한 중심부에 절곡선을 부여하여 팽창을 억제하는 관로형(가칭) 시제품 개발
 - (라) 시험품에 대한 팽창제 주입 및 팽창거동에 대한 검토를 진행하여 설정 개념의 타당성과 대상기술의 팽창수준의 제어와 팽창 방향성이 가능한 섬유커버재임을 확인
- (4) 시제품의 제조
 - (가) 일반형과 관로형에 대해 지반함몰의 크기와 팽창매트의 적용방식 등을 감안하여 시제품 규격을 결정하고 외주제작을 통한 팽창매트 시제품 2종을 제작(그림 3.20참조)
 - (나) 크기는 (25×25×5cm)로 하고 상하로 팽창이 억제되고 전후좌우 방향으로 신장성의 필름을 적용하여 자유팽창이 가능하도록 유도. 육면체의 구조로 조적이 가능하여 지반함몰규모에 따라 다수의 팽창매트를 조적하는 방식으로 시공이 가능하도록 함.
 - (다) 상하방향을 좌우로 위치하면 좌우 팽창이 억제되고 상하 전후로 자유팽창이 유도되는 방식으로 시공방향에 따라 팽창방향성이 제어되도록 함



(a) TechTextil 전시회에서 확인한 제품



(b) 드롭 스티칭 구조의 개념도

그림 3.18 드롭 스티치 제품 및 구조의 개념도



(a) 1차 시험품



(b) 2차 시험품(일반형)



(c) 2차 시험품(관로형)



(d) 3차 시험품 팽창 후 모습

그림 3.19 팽창매트 시험품 사진



(a) 시제품(일반형)



(b) 시제품(관로형)

그림 3.27 팽창매트 시제품

다. 결과

- (1) 액상 팽창제를 담지할 수 있으며, 팽창수준의 제어와 팽창방향성을 제어할 수 있는 팽창매트의 시제품을 개발
 - (가) 드롭 스티치 기술이 적용된 섬유커버재의 최종 규격을 결정
 - (나) 팽창매트의 시공기술에 따른 제품 규격의 다양화 검토 필요
 - (다) 대형 팽창매트의 大 규격의 지반함몰지에 적용가능성 검토

4. 시멘트 매트 개발

가. 개발 배경 및 목적

- (1) 개착되어 교란된 지반함몰지에 팽창매트를 적용하여 복구할 시 지반강도의 보완을 위한 보강재 적용 필요성
- (2) 일반적인 성토체체의 보강을 위해 토목섬유 보강재가 적용되고 이에 착안하여 개착 지반함몰지에도 어떤 형태의 보강재가 적용될 경우 개선된 결과를 얻을 것으로 판단
- (3) 1차년도 팽창제의 검토과정에서 검토된 발포 시멘트의 기술조사에서 확인된 고강도, 속경형 시멘트를 적용한 매트형 제품의 가능성에 착안
- (4) 팽창성은 없지만 강도(인장강도, 휨강도)를 보유한 시멘트 매트 복합소재의 개발 진행
- (5) 미국에서는 GESYNTHETICS CONCRETE COMPOSIT MAT라는 용어로 정의되어 개발되고 있음.
- (6) 추가적인 보강부재와 시멘트 적용 공정 요소기술의 확보연구 수행하기로 함

나. 니들펀칭 기법을 통한 시멘트 매트 개발

- (1) 시멘트혼화제의 담지기술(제조공정) 개발
- (2) 1차년도 확보된 입상제의 팽창매트 충전기술의 적용
- (3) 시멘트 혼화제의 적용에 따른 함량의 제어와 공정상 발생하는 분진 제어를 위한 부대설비 보완 필요
- (4) 제조공정상의 관리항의 결정 : 두께 제어와 질량제어를 실시하여 단위 면적당 질량제어를 통한 생산품질관리 기준 결정
- (5) 여러 질량별로 시험품을 제작하고 선진제품의 질량 및 특성 등을 고려하여 결정

다. 시멘트 혼화제의 결정

- (1) 초기 일반 모르타르와 조경시멘트를 적용하여 시험품을 제작하고 작업성과 수화거동에 대한 기초연구 수행
- (2) 시멘트의 강도부족 및 시멘트 매트의 인장보강 개념의 도입이 필요함을 확인
- (3) 섬유보강시멘트(Fiber Reinforced Concrete) 개념의 제품으로 전개
- (4) 지반함몰지의 복구 특성상 시간단축 효과를 위해 속경형의 개념 도입 확인
- (5) 선진제품의 시멘트 압축강도 기준 40MPa를 만족하며 속경특성을 갖는 시멘트혼화제의 적용 결정, 외주제작을 통한 요구특성을 만족하는 시멘트혼화제 개발

라. 섬유보강재의 적용 연구

- (1) FRC 개념의 적용으로 시멘트 매트에 부직포와 필름 직포만으로는 인장보강효과가 미비하여 추가적인 보강재의 적용을 결정(그림 3.22 참조)
- (2) 매트형태에 적용되는 고강도 직포와 고강도 매쉬의 형태에 대해 시험생산을 진행하고 이에 대한 수화거동 및 적용성을 시험함
- (3) 섬유보강재는 PET 직포와 매쉬, 바잘트매쉬 2종을 적용, 각 각 인장강도는 6톤/m, 3톤/m, 2톤/m 수준으로 공급자 제시 물성표 확인됨.

표 3.7 섬유보강재의 형태에 따른 보강효율 시험결과

보강재 형태	보강위치	결과
PET 직포	매트의 바닥층	보강효율 확인, 효율이 낮고 시멘트와 재료 분리현상이 발생
PET 메쉬	매트의 바닥층 및 상부층	보강효율이 낮고 바닥층에 1 layer 적용시 원만한 거동을 보이나 상하 2 layer 적용시 제품화가 어렵고 재료분리 발생. 니들펀칭 기법의 한계로 매트 전체를 단단히 잡아주는 형태안정성 부족
바잘트 메쉬 1	매트의 바닥층 및 상부층	바잘트 메쉬의 코팅의 과도로 니들펀칭공정의 어려움. 1 layer 적용성 존재
바잘트 메쉬 2	매트의 바닥층 및 상부층	상대적으로 코팅이 연하여 니들펀칭의 공정이 가능함. 별도의 니들펀칭 패턴이 필요함 생산 작업성 및 최종 수화거동도 양호함



그림 3.21 시멘트 매트 PET보강메쉬 적용(상하 2 layer) 모습

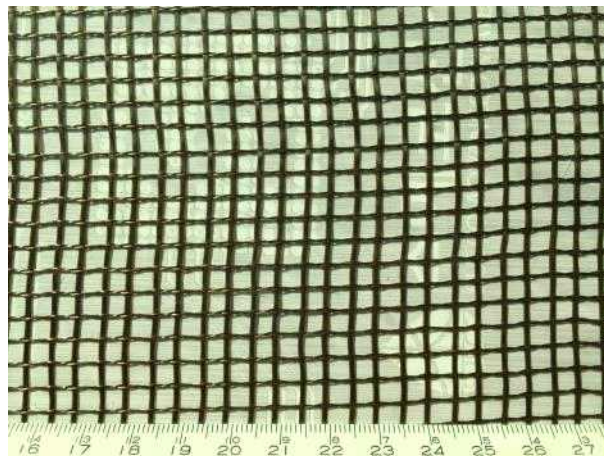


그림 3.22 바잘트 메쉬 모습



그림 3.23 시멘트 매트의 수화시험

마. 시멘트 매트 제조공정 제어기술 연구

(1) 파일럿 설비를 통해 각 공정별 제어기술 확보



(a) 시멘트 혼화제 공급



(b) 시멘트 혼화제 공급부와 직포 공급롤러



(c) 부직포 커버 공급 모습



(d) 시멘트 혼화제 도포 모습



(e) 니들 펀칭된 모습



(f) 제품 권취 모습

그림 3.24 시멘트 매트 제조공정

- (2) 부직포 결합을 위한 니들펀칭 패턴에 의한 시멘트 매트 결속 특성이 변하고, 제품의 형태안정성 및 주입된 시멘트 분말의 안정적 담지성의 확보 여부 결정
- (3) 폭 방향으로 나열된 니들펀칭 패턴이 다이아몬드 분산 패턴보다 더 안정적인 형태와 시멘트 분말의 담지성을 보이는 것으로 확인
- (4) 현장 작업성에서 시멘트 매트의 절단 및 재단에 따른 내부 분말의 유출현상도 ‘-’형 니들펀칭 패턴이 매우 안정적인 거동을 보이는 것으로 확인됨



(a) 폭방향 ‘-’형 니들펀칭 패턴



(b)다이아몬드 분산 니들펀칭 패턴

그림 3.25 니들펀칭 패턴

5. 파이로트 설비 구축

가. 팽창매트 파이로트설비 구축

(1) 팽창매트 파이로트 설비의 개념

- (가) 상하로 공급되는 시트상의 섬유커버재 사이에 팽창기능제를 담지하고, 이를 롤 형태나 제단을 통한 백 형태로 보관 가능한 제품의 제조 설비
- (나) 섬유커버재의 특성에 따라 봉재(seam)공정이나 니들펀칭(needle punching) 등의 공정으로 상하 섬유커버재를 합지(laminating)하게 됨

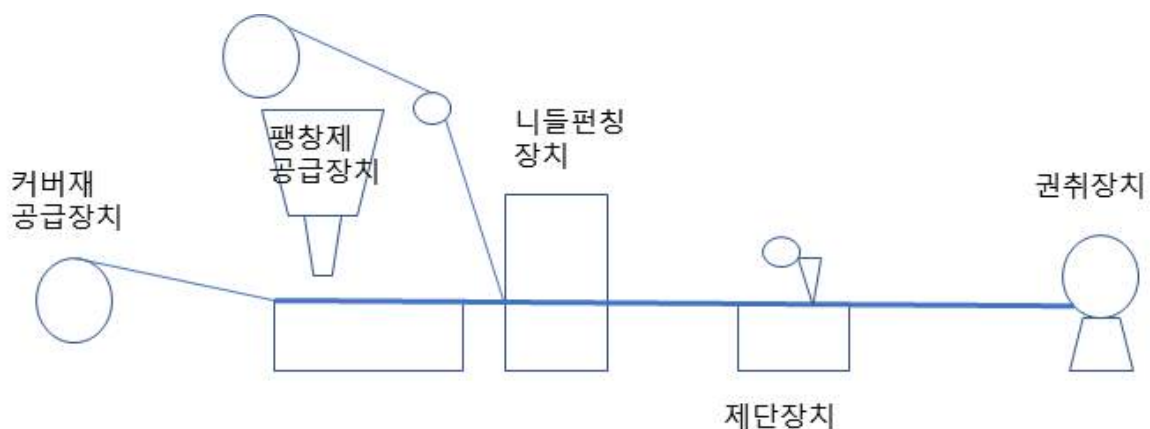


그림 3.26 팽창매트 제조 공정 개념도

- (2) 팽창매트 파이로트 설비 제조
 - (가) 시제품의 폭을 약 1.0m로 결정하고 이에 따른 파이로트 라인의 결정
 - (나) 계획서에 따라 고품 팽창제를 고려하여 팽창제 공급장치와 니들펀칭으로 합지하는 공정을 선정하여 파이로트 라인 설계 및 제조 진행
 - (다) 각 기기의 전문회사를 파악하여 2개 제조사에 분리 발주 제작함
- (3) 섬유커버재 공급물 장치
 - (가) 상하 섬유커버재를 각기 공급하는 롤러가 2개 필요하며 팽창제의 담지를 위해 상부 커버재는 팽창제 공급장치 상부에 일체화하여 별도의 프레임을 적용하지 않도록 설계
 - (나) 각각 속도 제어 가능하도록 제작
- (4) 팽창기능제 공급장치
 - (가) 호퍼(hopper) 방식으로 고품의 채움재를 담지하는 기술을 적용
 - (나) 팽창제 뿐만 아니라 추가적으로 무기첨가물을 담지하여 팽창제의 성능 개선으로 활용 부분을 고려하여 제작
- (5) 니들펀칭 장치
 - (가) 부직포류 커버재를 적용할 경우, 니들펀칭을 통해 합지 가능
 - (나) 니들조합과 배열에 따라 합지 패턴별로 합지 가능
- (6) 제단장치
 - (가) 팽창매트의 길이에 따라 롤 형태로 절단
 - (나) 소형 백형태로 제단 가능
- (7) 권취장치
 - (가) 팽창매트 권취

나. 팽창매트 타입 연구

- (1) 섬유커버재의 조합에 따른 팽창매트 타입의 거동연구
 - (가) 시험품을 수작업으로 제조하여 팽창제와 함께 모의 팽윤거동을 통해 팽창매트 형식 검토
 - (나) 기초타입으로 수용성 부직포의 조합, 일반부직포의 조합을 확인
 - (다) 팽창제로 일액형과 이액형에 대해 검토
- (2) 시험품의 제조
 - (가) 크기 : 21 × 29cm(A4 크기)
 - (나) 변부처리 : 수동 봉제기를 이용하여 봉합
 - (다) 시험품에 팽창제 주입을 위한 입구를 두어 팽창제 담지된 팩을 주입한 후 팽창제 팩을 터뜨려 팽창거동 촉발
 - (라) 팽창제 팩(pack)은 지퍼백을 사용
 - (마) 이액형은 A형 액제를 담지한 지퍼백을 더 큰 지퍼백에 넣고 B형 액제와 함께 팩에 담지시켜 팽창제 팩 제조(그림 3.28 참조)



(a) 커버재 공급장치(하면 공급)



(b) 팽창제 공급장치와 상면 커버재
공급장치



(c) 니들펀칭 장치



(d) 제단장치



(e) 권취장치

그림 3.27 팽창매트 파이로트 설비

(3) 시험품 팽창 시험 및 고찰

(가) 수용성 커버재 적용 팽창매트

- ① : 팽창거동의 방향성을 고려할 필요가 없는 경우에 적합한 것으로 확인됨
- ② : 일액형 팽창제에 적합, 수화 팽윤 거동에 적합한 것으로 확인

(나) 일반 부직포 커버재 적용 팽창매트

- ① : 팽창매트내 팽창거동 확인
- ② : 팽창거동의 촉발을 위한 메커니즘 규명과 정확한 촉발 작동 필요
- ③ : 송곳에 의한 팽창제 팩의 편칭으로 이액형의 혼합과 팽창거동은 다소 부족
- ④ 보다 효과적인 방식 필요
- ⑤ 송곳에 의한 커버재의 손상으로 액상 팽창제의 누출 발생
- ⑥ 팽창제의 유실 발생으로 팽창율 부족 확인

(다) 기타 팽창매트 타입

- ① 방상의 입체 직물을 커버재로 적용하는 경우에는 메쉬를 통해 팽창제의 유실이 커 효율적인 팽창매트의 제조에 적합하지 않음을 확인

다. 시제품 개발

(1) 섬유커버재 시제품

- (가) 1차 년도 정량목표인 섬유커버재 시제품은 수용성 커버재(그림 3.28 참조)와 일반 PP 니들편칭 부직포로 선정
- (나) 수용성 부직포는 80g/m^2 과 100g/m^2 의 제품을 선정하였으며, PP 니들편칭 부직포를 질량에 따라 조합하며 1차년도 연구를 통해 약 400g/m^2 이상 제품을 시제품으로 선정
- (다) 팽창매트 시험품 연구를 통해 수용성 부직포와 일반부직포의 조합으로 팽창 방향성의 일부 제어 가능성을 확인



(a) 시험품 기본형



(b) 이액형 구성



(c) 일액형 구성



(d) 수용성 시험품 시험전



(e) 수용성 시험품 팽창 중



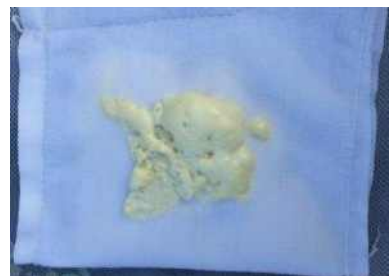
(f) 수용성 시험품 팽윤 완료



(g) 일반 일액형 시험품



(h) 송곳 관통부 확대



(i) 일액형 팽창 후

그림 3.28 팽창매트 시험품 시험 사진

제 2절 긴급복구재의 성능 평가를 위한 시험

1. 시멘트매트의 최적 보강깊이 분석

가. 시험 개요

(1) 평판재하시험

- (가) 시멘트매트의 보강깊이별 응력감소효과 분석을 위해 G.L.-10cm~30cm의 범위로 보강 깊이를 산정
- (나) 상부 재하하중으로부터 발생하는 지중의 응력특성 분석을 위한 것으로서 극한의 하중이 아닌 비교적 낮은 하중의 범위에서 하중을 상재하고, 응력의 변화를 분석
- (다) KS F 2444의 얇은기초의 지지력시험 방법을 응용하여 재하실험 수행

(2) LFWD 시험

- (가) FWD(falling weight deflectometer)시험은 평판재하시험(plate loading test)에 의한 변형률계수 산정방법보다 빠르게 지반의 강성을 평가할 수 있는 방법으로 이미 포장도로 분야에서 품질관리 방법으로 사용되고 있음.
- (나) FWD의 장비는 대형 차량을 이용한 장비이기 때문에 폭넓게 적용하기 어려움이 있어, 최근에는 이와 같은 적용성에 대한 한계를 보완하고자 활용성이 높은 LFWD(light falling weight deflectometer)가 적용되고 있음.
- (다) Choi et al.(2011)은 지반재료가 토사인 경우, LFWD 시험결과와 반복평판재하시험에서 변형률계수와 상관계수는 신뢰도 82~89%로 높은 상관성이 있는 것으로 밝힌 바 있음.
- (라) 위의 근거를 바탕으로 LFWD시험기를 이용하여 G.L.-10cm ~ G.L.-40cm의 범위에서 콘크리트 매트가 보강된 경우에 대한 실험을 수행

나. 실험 방법 및 내용

(1) 평판재하시험

- (가) 실험에 사용한 흙 시료 분석 : 애터버그시험 결과 소성이 없는 것으로 나타났고, 통일분류법에 의해 입도분포가 고르지 않은 모래인 SP로 분류된다.

표 3.8 사용 흙 시료의 물리적 특성

Specific gravity	Sieve analysis		Compaction test		U.S.C.S.
	Cu	Cg	$\gamma_{d(max)}$, kN/m ³	w_{opt} (%)	
2.61	3.75	0.98	16.2	7.8	SP

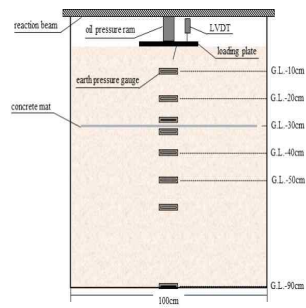
- (나) 모형지반은 최대한 조밀하도록 최적함수비 및 다짐도를 각각 7.8%와 95%이상으로 모사함. 응력발생 정도를 확인하기 위한 토압계는 토조의 중심부를 기준으로 G.L.-10cm ~ G.L.-60cm의 범위에서 10cm간격으로 설치고, 토조의 최하단부인 G.L.-90cm에도 토압계를 설치하여 하중에 따른 응력발생 최대깊이를 측정함.

- (다) 토압계는 지름 5cm로서 최대 50kPa까지 측정이 가능. 모형지반 내 계획된 심도에 토압계를 설치한 전경을 나타낸 것이며, 토조의 크기를 고려하여 정방형으로 90cm를 적용.
- (라) 시멘트매트 및 토압계 설치와 함께 모형지반 조성이 완료된 후, 하중 재하를 위하여 평판을 설치하였으며, 이 때 수평계를 이용하여 평판재하 시에 편심이 작용하지 않도록 함. 반력빔(reaction beam)과 함께 유압 램(oil pressure ram)을 거치한 후, 하중재하에 따른 지반침하를 측정하기 위한 목적으로 총 3개의 LVDT(linear variable differential transformer)를 설치. 시험종료 후, 하중재하 단계에 따른 지반침하는 3개의 침하량 측정값을 산술평균하여 분석.
- (마) 시험 종류는 시멘트매트의 적용유무에 따라 수행하였으며, 시멘트매트 적용의 경우에는 지표면으로부터 각각 G.L.-10cm, G.L.-20cm, G.L.-30cm에 설치하여 총 4종류의 시험을 실시. 지반파괴에 의한 응력감소의 영향을 배제하기 위하여 낮은 응력수준으로 시험을 수행하고자 각각 4kPa, 8kPa 및 12kPa의 재하단계를 적용.

(2) LFWD시험

- (가) 모래의 유출부가 직경 10mm인 일정 간격의 다공판으로 이루어져 있는 강사장치를 이용하여 표준사의 최소건조단위중량을 산정한 결과, 13.4kN/m³인 것으로 확인. 이를 이용하여 60cm × 60cm × 60cm의 크기의 토조에 상대밀도 80%(낙하고 70cm)의 조밀한 지반을 모사.
- (나) 50cm 크기의 정방형으로 해당 깊이에 시멘트매트를 매설하고, 토조의 중앙에 LFWD를 거치하여 시험 수행. LFWD시험은 낙하높이를 10cm ~ 50cm의 범위로 조정할 수 있으며 이 연구에서는 매우 큰 낙하에너지에 의한 지반의 교란을 방지하기 위해 10cm의 높이로 낙하고를 산정하고 낙하추의 직경은 100mm로 선정. 낙하횟수는 5번으로 하여 초기 값을 제외한 나머지 값을 평균으로 하여 지반변형계수(ELFWD)를 식 3.3을 통해 산정.

$$E_{LFWD} = \frac{2(1-\nu^2)P}{\pi rD} \quad (3.3)$$



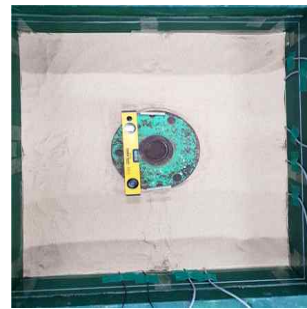
(a) Schematic



(b) Earth pressure gauge installation



(c) Concrete mat installation



(d) Loading plate installation



(e) Reaction beam installation

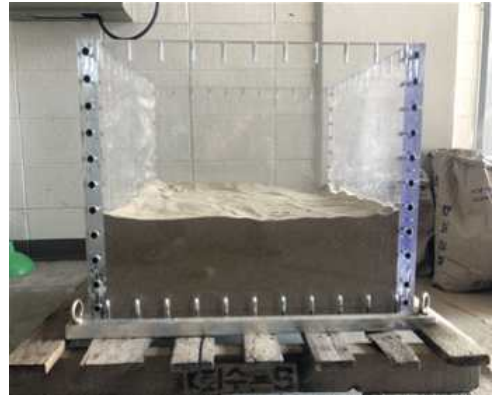


(f) LVDT installation

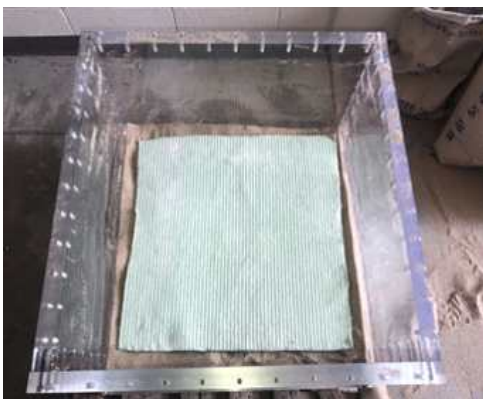
그림 3.29 시멘트매트를 이용한 평판재하시험



(a) Falling sand equipment



(b) Sand filling in small box



(c) Installation of Concrete mat



(d) LFWD test

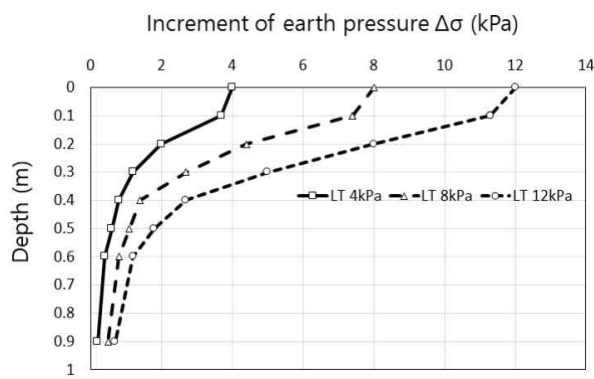
그림 3.30 LFWD 시험 과정

다. 시험결과 및 분석

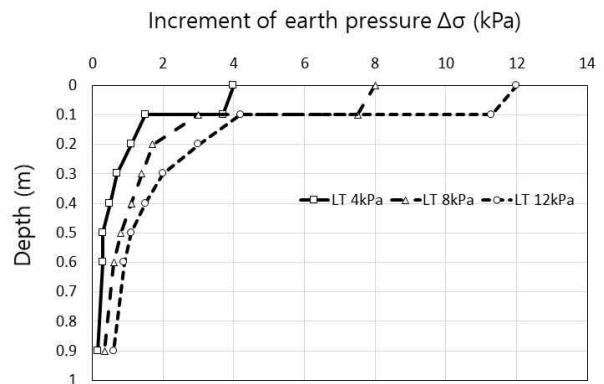
(1) 평판재하시험

(가) 응력분포 특성 분석

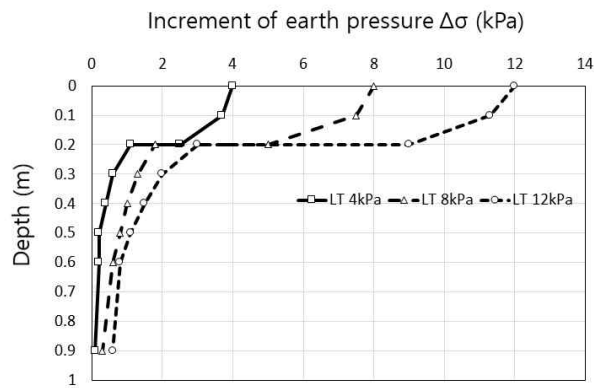
- ① 시멘트매트가 적용된 지반과의 응력발생 특성 비교를 위한 목적으로 수행된 시멘트 매트 미적용의 경우에 대한 결과로서, 깊이가 증가할수록 모든 하중단계에서 비선형적으로 응력발생량이 감소하는 결과를 확인.
- ② 응력단계가 4kPa ~ 12kPa로 증가함에 따라 깊이에 따른 응력발생량의 감소정도가 큰 것으로 나타남. 시멘트매트가 보강된 위치를 기준으로 깊이가 증가할수록 응력발생량은 현저하게 감소하는 나타남.
- ③ 하중단계에 따라 평균 61%의 감소율을 보였으며, G.L.-20cm 및 G.L.-30cm의 경우에는 각각 평균 62%와 59%의 감소율이 나타나는 것으로 분석되었다. 특히, G.L.-10cm와 G.L.-20cm에 시멘트매트가 설치된 경우에는 하중단계가 증가할수록 응력감소율이 증가하는 경향을 보였지만, 그 차이가 미소하기 때문에, 시멘트매트 설치깊이에 관계없이 약 60%의 응력감소율로 판단.



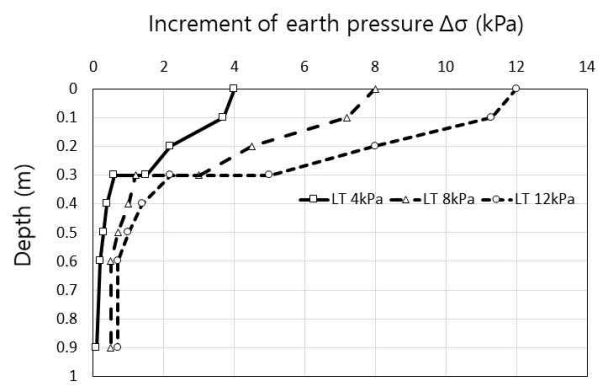
(a) Non-reinforced ground



(b) G.L. -10cm



(c) G.L. -20cm

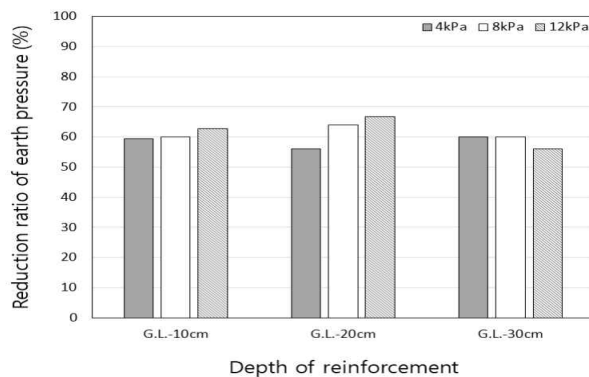


(d) G.L. -30cm

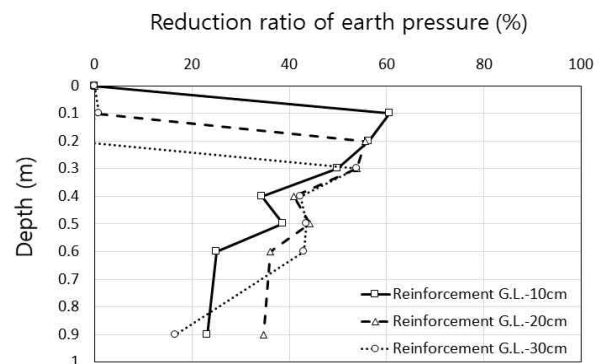
그림 3.31 하중에 따른 토압증가량 분석 결과

(나) 응력감소율 분석

- ① 지반의 응력감소율은 각각의 시멘트매트가 적용된 위치에서 61%(G.L.-10cm), 56%(G.L.-20cm), 54%(G.L.-30cm) 최대감소율을 나타냄. 이를 바탕으로 시멘트매트가 적용된 깊이가 깊어질수록 원지반과 대비하여 해당 깊이에서의 응력감소율은 감소하는 경향 나타남



(a) 콘크리트매트 보강깊이에 따른 응력 감소율



(b) 무보강 대비 응력 감소율

표 3.32 콘크리트보강 깊이에 따른 응력감소율

(다) 수치해석을 이용한 응력감소율 예측

- ① 시멘트매트의 보강효과를 분석하기 위해 시멘트매트 적용유무에 따른 실내실험을 수행하였으며, 시멘트매트에 의한 응력감소율은 약 60%인 것으로 확인됨. 시멘트매트 미적용의 경우와 비교하였을 때, 보강깊이가 깊어질수록 응력감소율이 감소하여 보강효과 또한 감소. 따라서 시멘트매트의 보강 한계 깊이를 분석하기 위해 실내실험 적용범위인 G.L.-10cm ~ G.L.-30cm 이상의 깊이에서는 수치해석을 통하여 응력감소율을 분석함.
- ② 수치해석은 유한요소해석 프로그램인 Plaxis 2D를 사용함. G.L.-40cm 이상 깊이의 시멘트매트 보강 효과를 분석하기 위하여, 먼저 실내실험을 기반으로 수치해석 모델을 구성하고, 실제 실험결과를 모사하여 수치해석 모델을 검증.
- ③ 해석모델의 검증은 시멘트매트의 미적용 지반과 G.L.-10cm에 적용한 지반에 대한 실내실험 결과에서 응력감소율 60%와 상부 발생한 지표침하량을 기준으로 설정
- ④ 해석은 평면변형률 모델을 바탕으로 응력제어법을 적용. 이 때, 평판을 모사하기 위해서는 볼륨을 가지고 있는 원형 블록으로 모델링해야 하지만, 해석조건상 이를 반영하기가 어렵기 때문에 정방형 형태로 모사. 즉, 모델링에 의한 편차를 최소화하기 위해 원형판에 재하되는 등분포하중을 정방형에 작용하는 등분포하중으로 역산하여 단계하중을 적용.
- ⑤ 시멘트매트의 재료특성은 먼저 무보강지반에 대한 실내실험결과와 해석결과를 비교하여 검증한 후, G.L.-10cm의 실험결과와 해석결과를 비교하는 과정에서 역추적한 값을 사용.
- ⑥ 수치해석에 입력한 지반과 시멘트매트의 재료특성은 표와 같고, 무보강지반과 G.L.-10cm에 보강한 지반의 실내실험결과와 해석결과를 비교함. 이 과정으로 실험과 해석결과를 비교한 결과, 수치해석을 통하여 G.L.-40cm ~ G.L.-60cm 위치에 시멘트매트를 보강한 결과에 대하여 수치해석을 통해 확인할 수 있는 것으로 판단됨

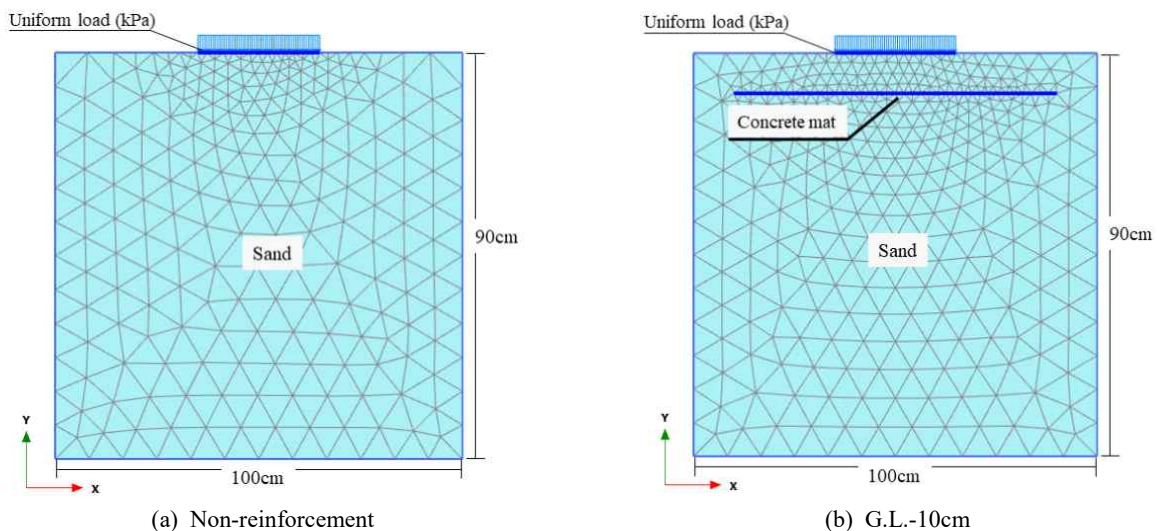


그림 3.33 수치해석 모델링

표 3.9 수치해석 물성입력 자료

Item	Sand	Concrete mat
material model	Mohr–Coulomb	Elastic
Unit weight γ_{sat} (kN/m ³)	16	—
Modulus of Elastic (E, kPa)	4000 (Hunt, 1986)	—
Poisson' s ratio (ν)	0.25	—
Cohesion (c, kPa)	0	—
Friction angle (ϕ , °)	30	—
Bending stiffness (EI, kNm ² /m)	—	300
Normal stiffness (EA, kN/m)	—	85

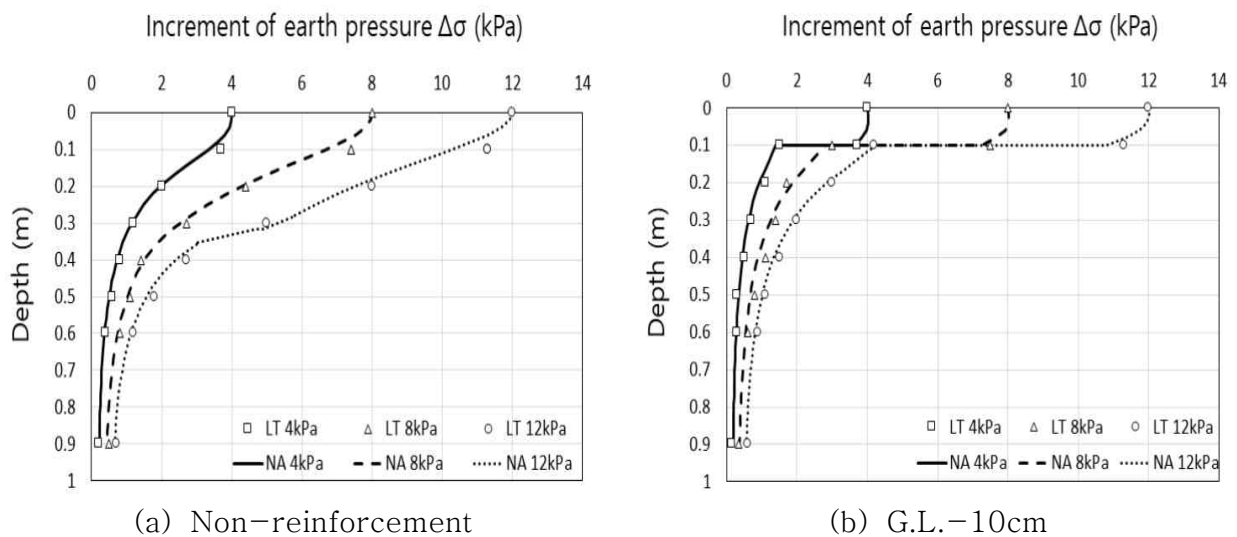
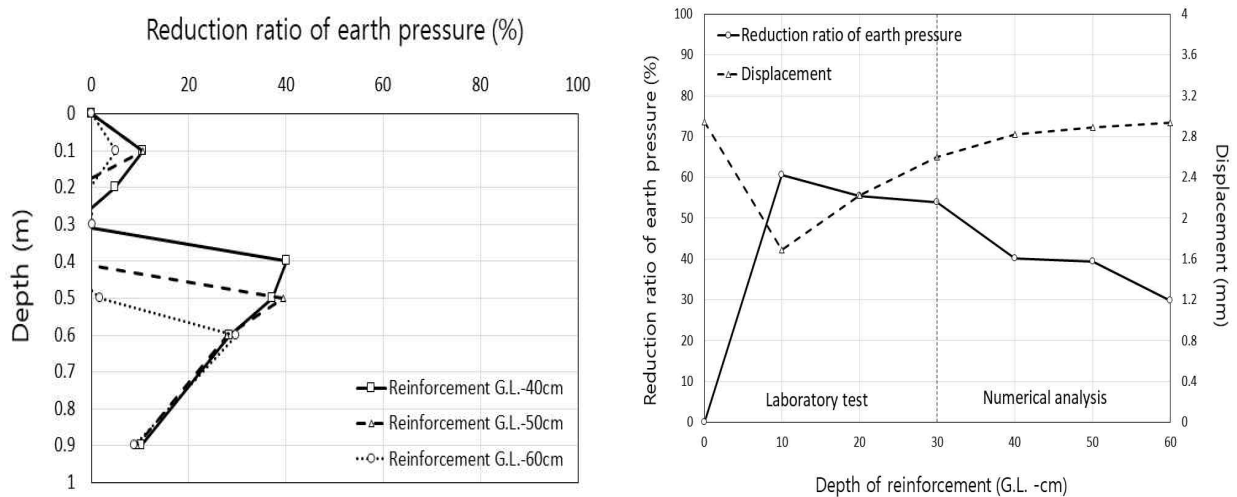


그림 3.34 실험결과와 수치해석 모델의 검증 결과



(a) Reduction ratio of earth pressure by numerical analysis (b) Displacement and reduction ratio

그림 3.35 실내실험 및 수치해석에 의한 보강 깊이별 콘크리트매트 보강효과

(2) LFWD 실험 결과

- (가) 지반변형계수의 증가율은 보강깊이가 G.L.-20cm까지 큰 폭으로 증가하는 경향을 나타냈으며, G.L.20cm보다 깊이 설치한 경우에는 증가율이 점차 감소하는 것으로 확인. 또한, 시멘트매트를 G.L.-20cm에 보강하였을 때의 지반변형계수가 약 5.44MPa로 가장 크게 나타났으며, 이는 무보강 대비 약 87%의 증가율을 보이는 것으로 분석됨

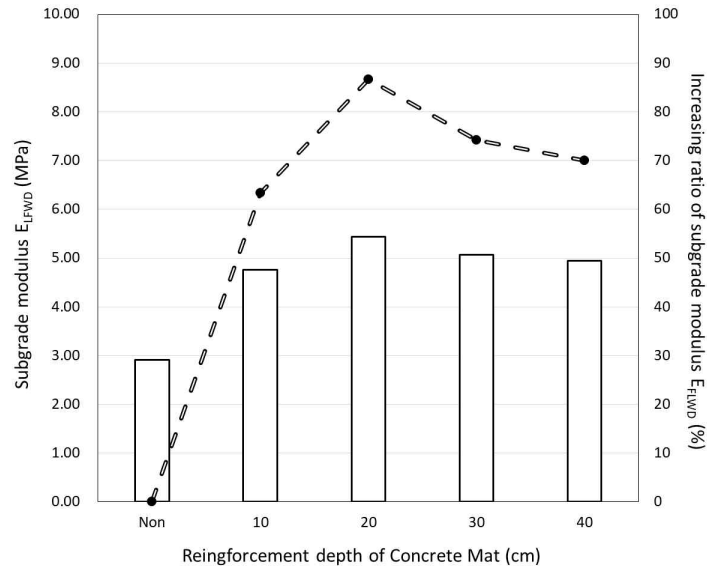


그림 3.36 LFWD 실험 결과

라. 결론

- (가) 지중에서 발생한 공동의 복구를 위하여 시멘트매트 적용유무에 따른 평판재하시험 결과, 시멘트매트의 인접지반에서 발생하는 응력은 약 60%의 감소율을 나타냈으며, 이는 보강깊이가 깊어질수록 응력감소율이 감소하는 것으로 분석되었다. 또한 실내 실험과 수치해석 결과를 바탕으로, 지반침하량과 응력감소율을 고려하면, 시멘트매트 설치깊이가 G.L.-10cm ~ G.L.-20cm일 때, 보강효과가 가장 큰 것으로 판단됨.
- (나) 시멘트매트의 보강깊이가 G.L.-50cm보다 깊은 경우의 지표 침하량은 시멘트매트 미 적용 시의 지표침하량과 유사한 것으로 확인되었으며, 이는 시멘트매트의 설치 한계 깊이를 G.L.-40cm로 적용하는 것이 합리적인 것으로 분석됨. 즉, G.L.-50cm보다 깊은 경우에 시멘트매트를 설치하게 되면, 응력감소 정도가 현저하게 작아질 것으로 판단됨.
- (다) 지반변형계수 측정을 위한 LFWD시험 결과, 시멘트매트가 G.L.-20cm에 보강되었을 때, 가장 큰 값이 나타났으며, 이를 응력감소율 및 LFWD시험 결과와 함께 고려하면 시멘트매트의 보강 최적 깊이는 G.L.-20cm가 가장 적당한 것으로 판단됨.

2. Mock-up실험을 통한 시멘트매트와 팽창매트 보강 효과 분석

가. 평가공동의 분류 및 공동 설계

(1) 일본 간선도로 공동관리기준

- (가) 석촌지하차도 일대의 대규모 공동발생(2014.08)으로 인하여 우리나라 도로실정에 맞는 체계적인 공동관리체계의 필요성은 제기되었으나, 국내 기준이 정립되어 있지 않아 일본 간선도로의 공동관리등급을 도입하게 됨
- (나) 일본 간선도로의 공동관리등급은 지표로부터의 공동의 토피고(m)와 공동의 좁은 축 폭(m)의 함수로서 A등급(긴급보수), B등급(일반보수), C등급(경과관찰)의 3단계로 분류함

A 등급 : 긴급보수

- 토피 0.3m 이내의 경우
- 토피 0.3m 이상 & 폭 1.5m 이상

B 등급 : 일반보수(우기전 조속완료)

- 토피 0.3m 이상 & 폭 0.5~1.5m
- 폭 1.5m 이상은 그래프에서 산출

C 등급 : 경과관찰

- 토피 0.3m 이상 & 폭 0.5m 이내
- 폭 0.5m 이상은 그래프에서 산출

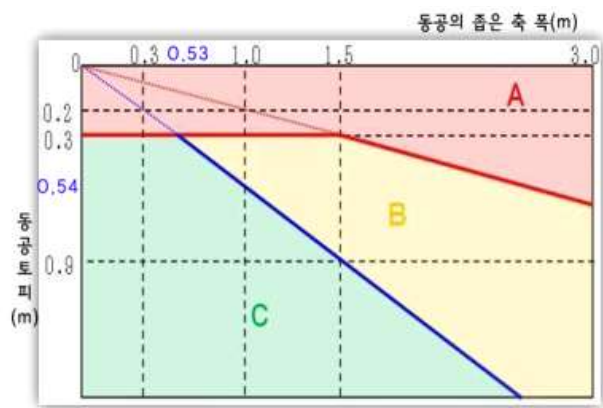


그림 3.37 공동등급 설정 및 관리기준

(2) 서울시 공동관리등급 기준

- (가) 기존 일본의 공동관리등급에 의존했던 것에서 탈피하여, 서울시(2016.11)에서는 서울의 도로 실정에 적합한 “서울형 공동관리등급”을 개발하여 탐사된 공동을 체계적으로 관리하여 도로함몰 사고를 예방위한 방안을 마련함
- (나) 실제 도로함몰 지역에 대한 과적차량 운행을 통한 파괴실험 등 다양한 연구를 거쳐 일본의 기준보다 확대된 (1)긴급복구, (2)우선복구, (3)일반복구, (4)관찰대상의 4단계로 분류함
- (다) 일본의 공동관리기준이 공동의 토피고(공동 상부지반 두께)와 공동의 좁은 폭을 기준으로 분류했다면, 서울시에서 발표한 공동관리등급은 도로 아스팔트의 상태까지 반영하여 실무자들의 현장 적용성의 폭을 확대함
- (라) 도로함몰의 개연성 정도에 따라 다음과 같이 4단계로 분류함

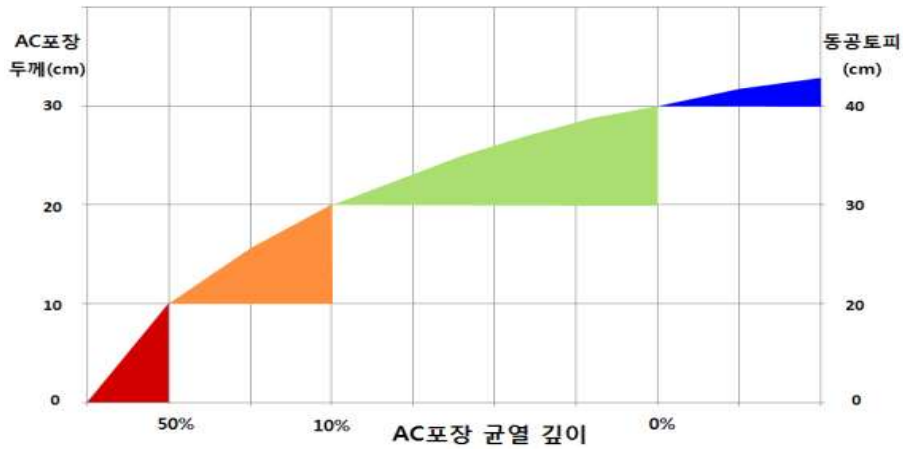


그림 3.38 서울시 공동관리등급

- ① 긴급복구(아스팔트 포장 10cm 미만/공동토피 20cm 미만)
: 함몰 가능조건이 충족된 공동
- 탐사 중 공동확인 즉시 복구(4시간내 복구)
- ② 우선복구(아스팔트 포장 10~20cm/공동토피 20~30cm 또는 공동 폭 1.5m 이상)
: 돌발 강우 등 함몰 가능조건을 만날 경우 함몰 위험성 높은 공동
- 신속한 조치계획 수립 및 복구
- ③ 일반복구(아스팔트 포장 20~30cm/공동토피 30~40cm)
: 일정기간 공동 추가 확대로 함몰 가능조건 충족시 함몰될 공동
- 우기철 이전까지 복구
- ④ (아스팔트 포장 30cm이상/공동토피 40cm이상+공동 폭 0.8m 미만)
: 공동 토피(공동 상부지반 두께)가 튼튼해 함몰될 위험이 없는 공동
- 일정기간 관찰 후 반복탐사 시작년도의 우기 이전까지 복구

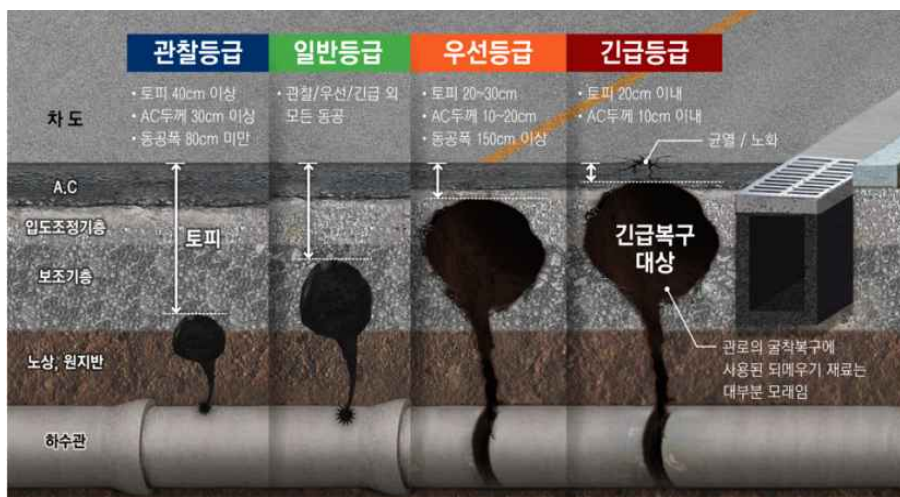


그림 3.39 공동의 확장 개념도

나. 공동설계도 (Mock-up 실험용)

(가) 공동 발생 메커니즘

① 일반적인 구조

도로함몰은 일반적으로 지중에서 흙의 유실로 생긴 빈공간이 붕괴되는 현상이며 함몰의 대부분은 물에 유실되기 쉬운 모래질 구간에서 발생함

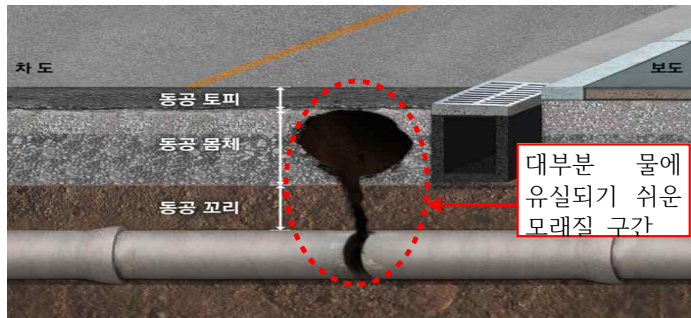


그림 3.40 공동발생 매커니즘

② 주요발생원인

매설관의 결함 : 물의 유출입 허용으로 주변 토사유실 직접 유발(67%)

굴착복구 미흡 : 깊은 빈공간에서부터 장기간 침하되면서 상부지반 함몰 유발(25%)

공사중 관리미흡 : 굴착공사장 주변지반 약화로 갑작스런 함몰 유발(8%)

③ 흙의 유실경로



그림 3.41 지하매설물 관련 유실



← 굴착규정 미준수로
+ 토사가 공사장으로 유입

굴착규정 미준수로
상부 토사가 터널굴착
공사장으로 유입 →



그림 3.42 공사장 관련 유실

다. 공동복구에 따른 지반의 응력발생 특성 평가를 위한 실내실험

(1) 실험개요

우리의 일상생활에서 생활용수의 공급, 우수나 오수를 집·배수하기 위한 목적으로 지반하부에 관로시설을 구축한다. 국내시방규정에는 관을 매설하고 관 상부에 적정 수준 이상의 상대다짐도를 적용하여 다짐할 것을 규정하고 있으나, 공사과정중 발생하는 유용토의 재활용, 시공여건등의 문제로 인하여 관 상부뿐만 아니라 관하부지반의 효율적인 다짐관리가 이루어지고 있지 않다. 이러한 상대다짐도 관리의 문제는 관의 침하를 유발하고, 관로가 노후 될수록 관의 이음부에서 파괴가 되어 지반 공동을 발생시키고, 나아가 공동이 지반 상부로 확장됨에 따라 도로가 함몰되는 등의 문제를 야기한다. 따라서 이 절에서는 실내실험 통하여 상재하중 발생 시 개발된 팽창매트와 시멘트매트의 보강에 따른 관의 변형 및 응력분포효과를 분석하는데 목적이 있음.

(2) 실험방법 및 내용

(가) 모형토조 설계 및 제작

- ① 국내의 다양한 기후/지반환경 조건에 따른 지반함몰 긴급복구 기술의 성능평가를 위한 Mock-up 실험용 모형토조 제작
 - 모형토조의 크기는 scale-effect 및 시공 편의성을 고려하여 2m(길이)×1m(폭)×1.5m(높이)로 선정
 - 모뮬채움재(흙 또는 모래)의 하중 및 토압을 고려하여 모형토조의 재료는 알루미늄(40mm)으로, 앞면은 시인성을 높이기 위해 아크릴(30mm)로 선정
 - 모양 옆면에 각각 높이별 9개의 배수밸브를 설치하여 강우 모사시 모형토조 안의 배수조건 변화 가능
 - 모모형토조의 높이를 2단, 길이를 4단으로 분할하여 실험 목적에 따라 활용도를 극대화 하기 위한 설계 반영

- o Dimension
: 2000×1000×1200 mm
- o Materials
: Aluminum(AL)
Poly carbonate(PC)

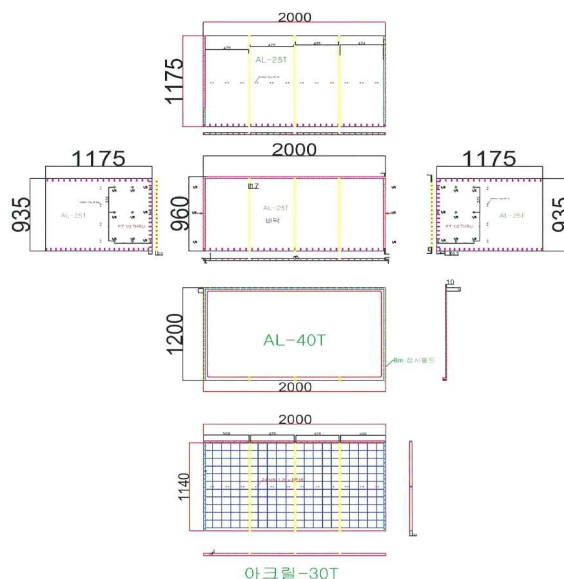


그림 3.43 모형토조 설계도

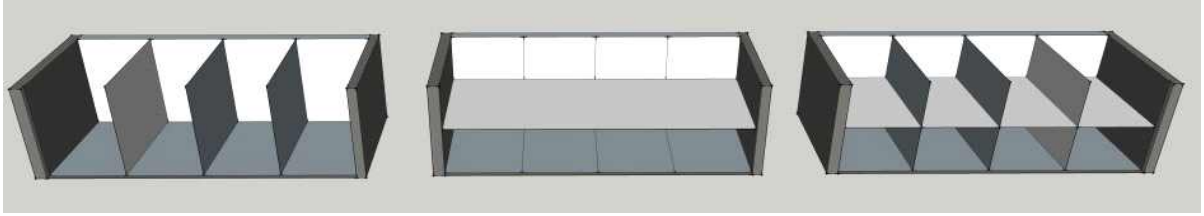


그림 3.44 모형토조의 가변성 개념도



그림 3.45 기후환경 챔버내의 모형토조

(나) 낙하고에 따른 상대밀도 시험

팽창매트와 시멘트매트의 보강효과를 분석하기 위해 지반 조성시, 표준모래를 이용. 일반적으로 표준모래를 사용할 경우 별도의 다짐장비를 이용하지 않고 낙하고를 조정함으로써 최소 건조단위중량과 최대건조단위중량의 지표로 나타나는 상대밀도개념을 적용하며 다음과 같음.

$$D_r = \frac{\gamma_d - \gamma_{d(\min)}}{\gamma_{d(\max)} - \gamma_{d(\min)}} \times \frac{\gamma_{d(\max)}}{\gamma_d} \quad (3.4)$$

그림 3.46은 낙하고에 따른 표준모래의 건조단위중량 시험 결과로, 낙하고에 따라서 표준 모래의 건조단위중량은 약 $12.8\text{kN/m}^3 \sim 13.7\text{kN/m}^3$ 의 범위를 보이며, 낙하고가 증가할수록 급격히 건조단위중량이 증가하는 경향을 보이다 일정 낙하고에서 수렴하는 경향. 이 실험에 적용한 상대밀도는 약 75%이며 표준모래의 건조단위중량은 약 13.5kN/m^3 .

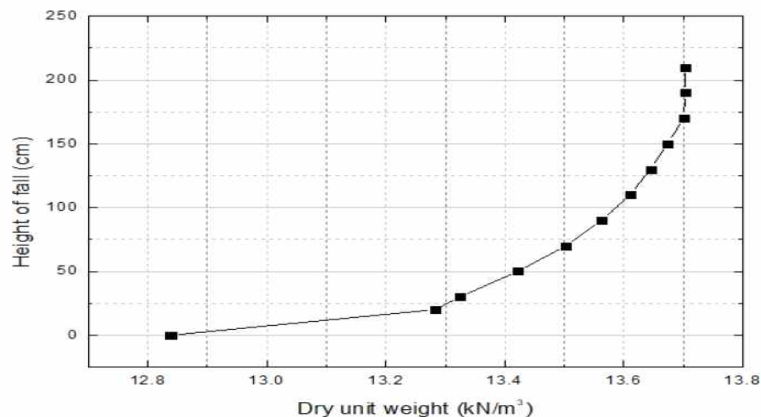
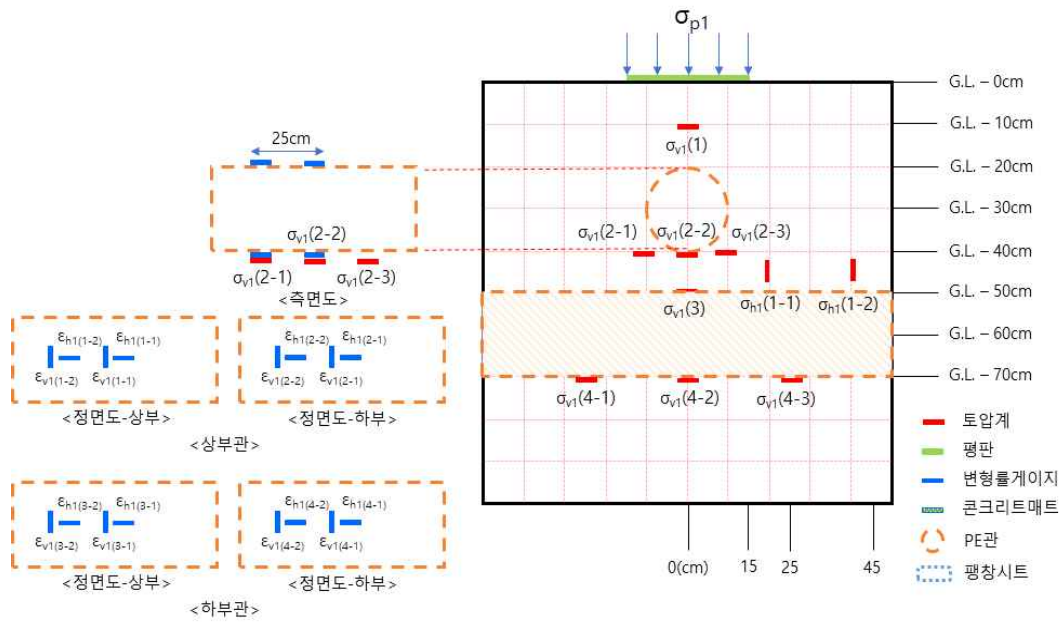


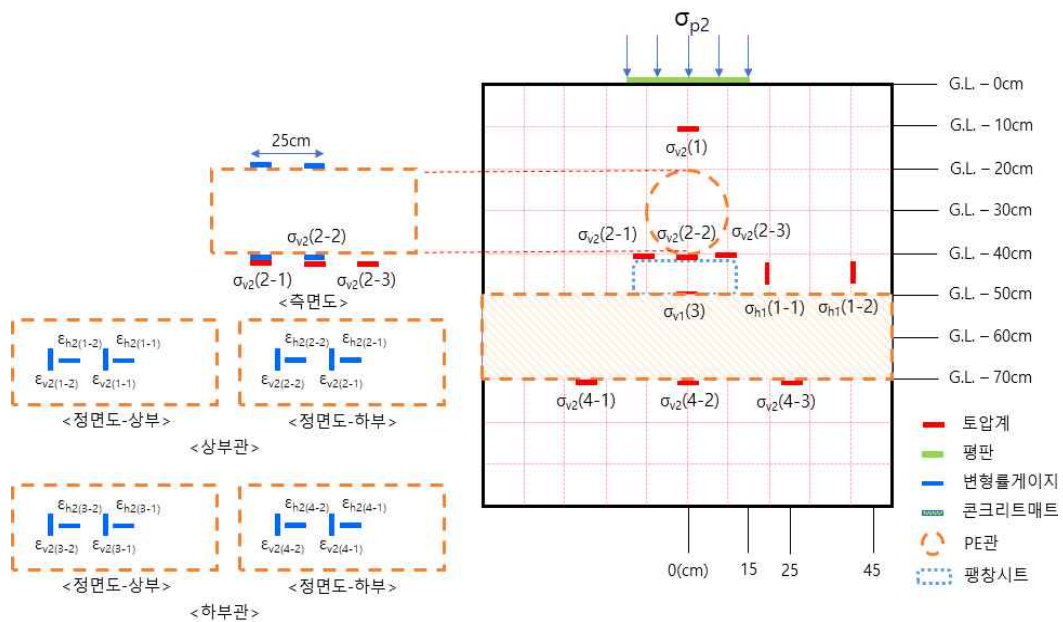
그림 3.46 낙하고에 따른 표준모래의 건조단위중량

(다) 보강방법에 따른 실험조건 및 전경

① 팽창매트 보강방법



(a) 팽창매트 보강전



(b) 팽창매트 보강후

그림 3.47 팽창매트 보강 개요



(a) 하부 토압계 설치



(b) 하부관 매설



(c) 관 사이 팽창매트 보강



(d) <팽창매트 및 토압계 설치>



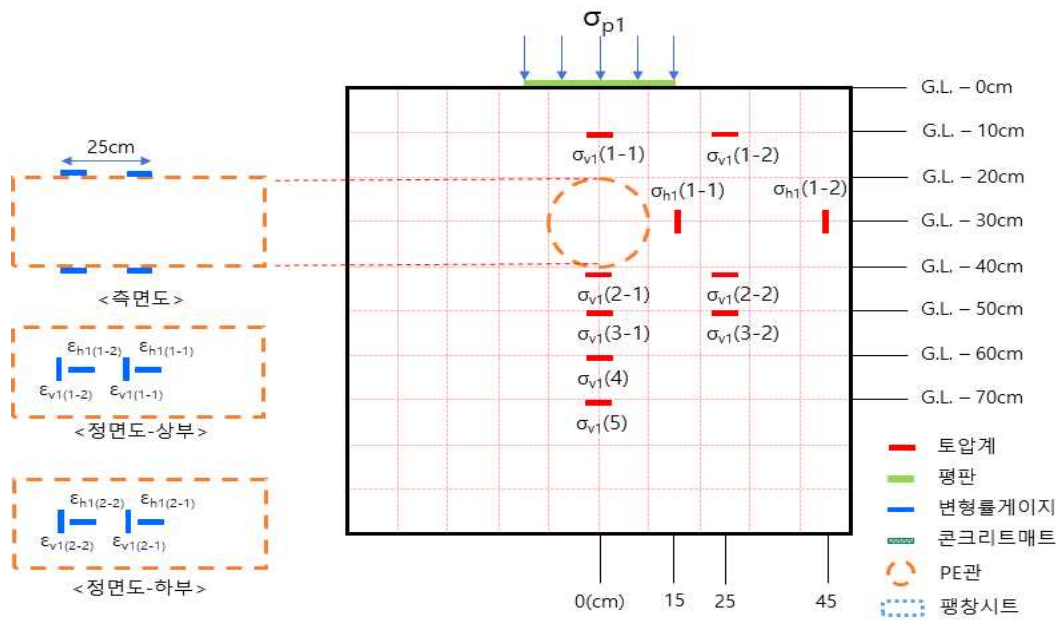
(e) 상부관 매설



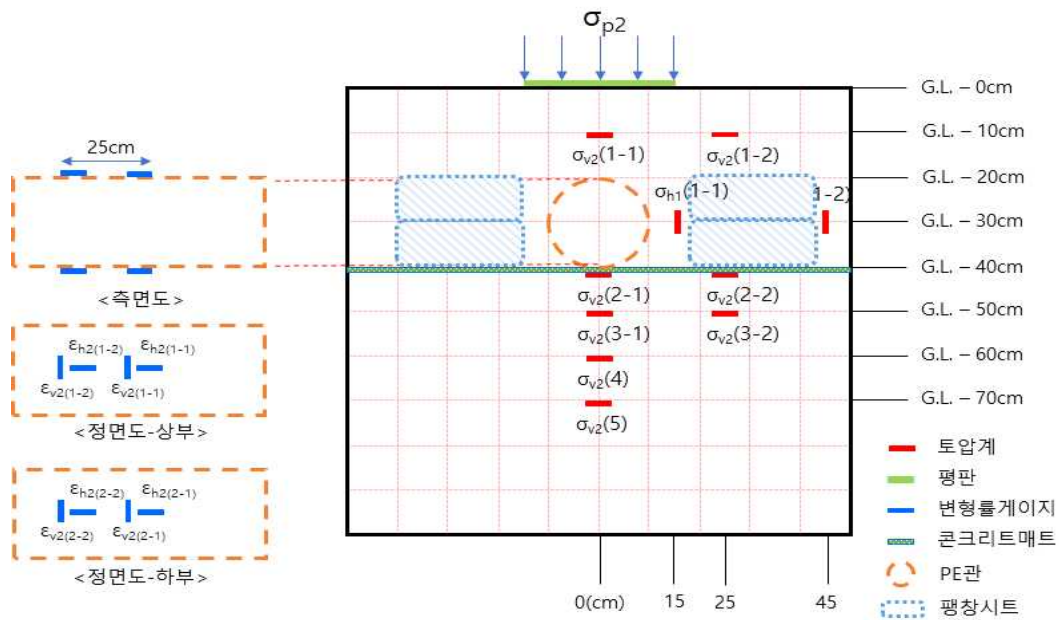
(f) 재하관 설치 및 평판재하시험

그림 3.48 팽창매트 보강 전경

② 시멘트매트 및 팽창매트 복합보강 방법



(a) 복합 보강 전



(b) 복합 보강 후

그림 3.49 시멘트매트 및 팽창매트 복합보강 개요



(a) 강사장치 상대밀도 약 75%



(b) 시멘트매트 설치



(c) 관 설치



(d) 팽창매트 설치



(e) 팽창매트 설치



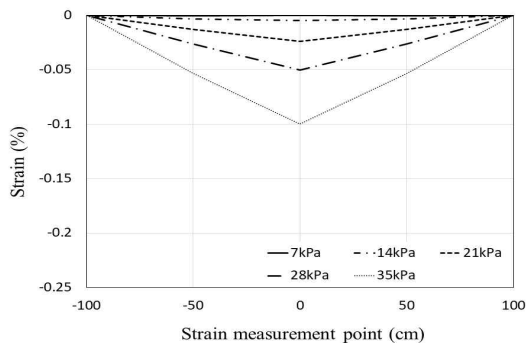
(f) 재하판 설치 및 평판재하시험

그림 3.50 시멘트매트 및 팽창매트 보강 전경

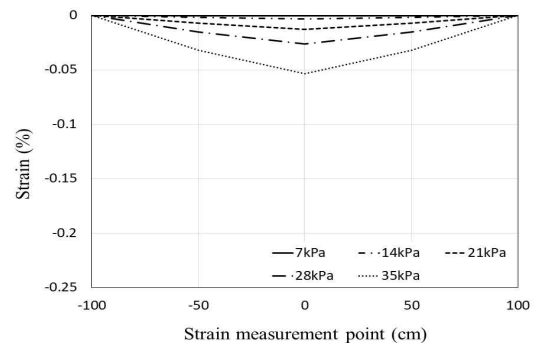
(3) 실험결과 (팽창매트 보강에 따른 토압계측결과)

(가) 1.2.1 단일관 상부에 공동이 발생한 경우

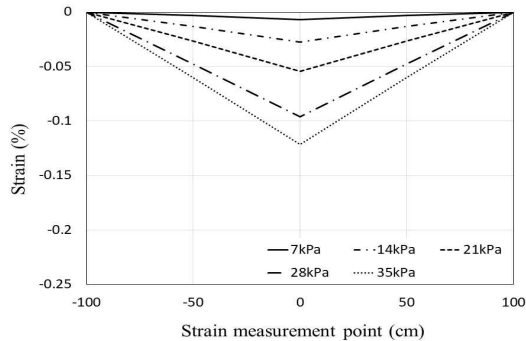
- ① 아래 그림은 시멘트매트를 보강하지 않고 통상적인 다짐작업을 통하여 관을 매설하였을 경우에 대한 변형률을 나타냄.
- ② 관의 중심부(0cm)에서 상부와 하부에서 관의 변형률이 하중단계에 따라 가장 크게 나타나며, 관의 측면으로 갈수록 점점 감소하는 경향을 나타냄. 시멘트매트를 보강하였을 경우 관의 중심부에서 하중단계에 따라 변형률이 가장 크게 발생하며 측면으로 갈수록 점점 감소하는 경향을 나타냄. 시멘트매트를 보강하였을 때 관의 상부와 하부에서 발생하는 관의 변형률이 더 크게 나타나는 것으로 나타남.
- ③ 지표에서 발생하는 상재하중으로부터 매설관과 매설관 하부의 모래지반에서는 변형이 발생하며, 상대적으로 탄성계수가 더 작은 모래지반에서의 변형이 더 크게 나타남.
- ④ 한편, 시멘트매트를 보강하였을 경우, 상재하중으로부터 매설관과 매설관 하부의 시멘트매트에서는 변형이 발생하며, 콘크리트의 탄성계수가 매설관보다 크기 때문에 매설관에서 더 큰 변형이 발생. 따라서 시멘트매트를 보강하였을 경우 매설관 하부지반에의 변형은 더 작게 나타나는 것으로 추론할 수 있으며 이는 상대다짐도 관리 미흡으로 인한 관 자체의 침하를 어느 정도 저감시켜 좀 더 안정성을 확보 시킬 수 있을 것이라 판단됨.



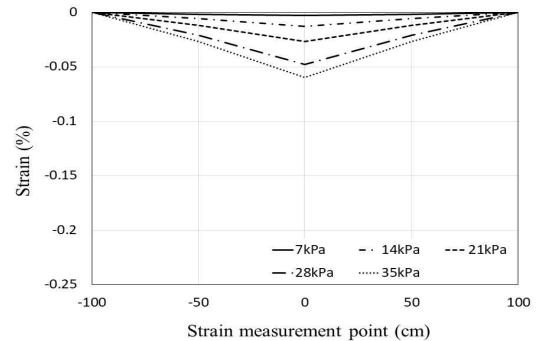
(a) 무보강 ; 관 상부



(b) 무보강 ; 관 하부



(c) 보강 ; 관 상부



(d) 보강 ; 관 하부

그림 3.51 시멘트매트 보강에 따른 관의 변형

- ⑤ 시멘트매트 무보강 지반의 깊이에 따른 응력분포는 지중 매설관이 있는 G.L. -20cm ~G.L. -40cm의 범위에서는 관 자체의 강성으로 인하여 응력이 감소함. 응력에 대한 감소율은 약 39%~42%의 범위로 나타남.
- ⑥ 시멘트매트를 관 바로 아래에 보강한 경우 깊이별 응력 특성은 매설관에 의한 응력 감소와 시멘트매트에 의한 응력감소의 특성이 나타남. 관에 의한 응력감소율은 40%~45%로 나타나며, 시멘트매트에 의한 응력감소율은 46%~48%의 범위로 나타남.

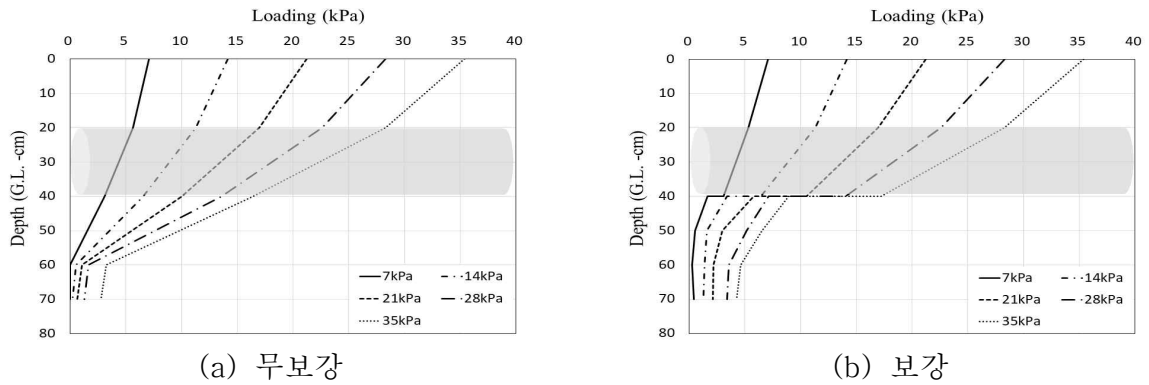


그림 3.52 하중단계에 따른 응력 증가량

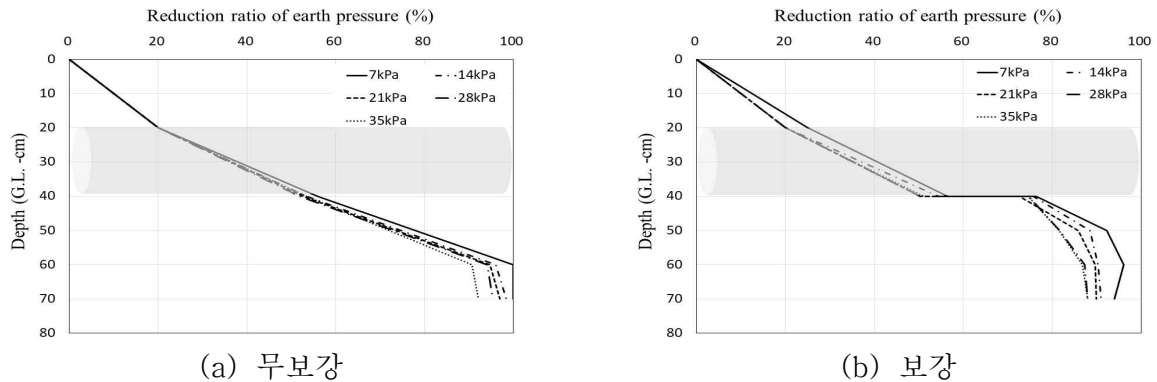
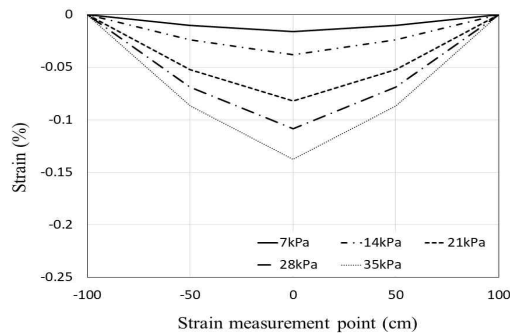


그림 3.53 보강 유무에 따른 응력감소율

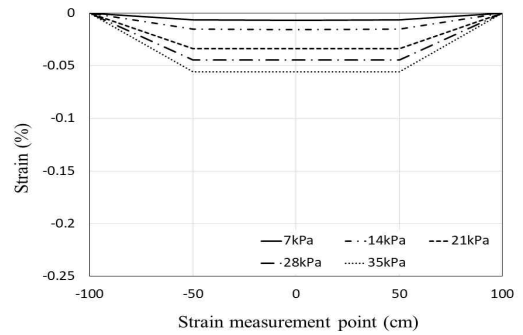
(나) 1.2.1 교차관 사이에 공동이 발생한 경우

- ① 중심부에서 하중단계에 따라 변형률이 가장 크게 나타나며, 측면으로 갈수록 관의 변형률이 작아지는 것으로 나타남.
- ② 팽창매트가 보강되었을 때 상부관의 상부와 하부의 변형률을 나타낸 것으로서 마찬가지로 중심에서 가장 큰 변형률이 나타내고 측면으로 갈수록 변형률이 작아지는 것으로 나타남.
- ③ 팽창매트를 관과 관 사이에 보강할 경우, 관의 변형은 더 크게 나타나지만 관 전체의 침하량은 감소할 것으로 예상됨으로 고품질의 상대다짐도관리가 이루어지기 어려운 경우 매우 효과적일 것으로 판단됨.

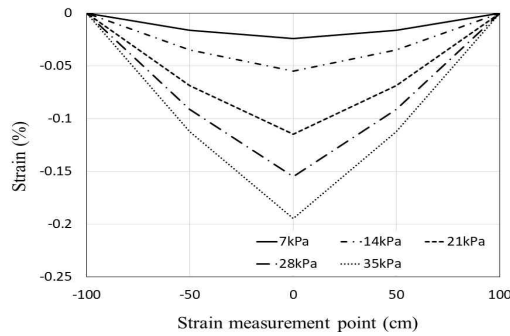
- ④ 0.01%미만으로 거의 변형이 없는 것으로 나타나 지표로부터 발생하는 하중에 대한 영향은 없는 것으로 판단됨.



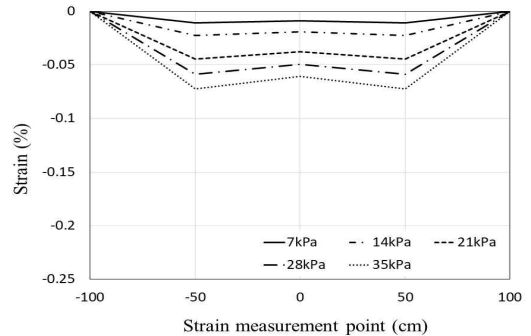
(a) 무보강 ; 관 상부



(a) 무보강 ; 관 하부

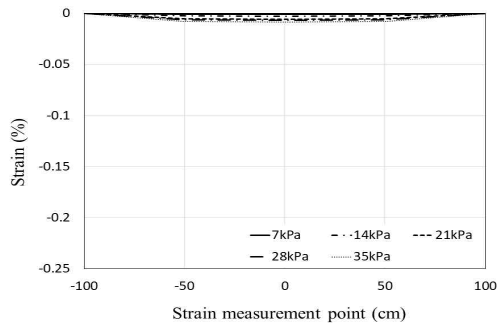


(c) 보강 ; 관 상부

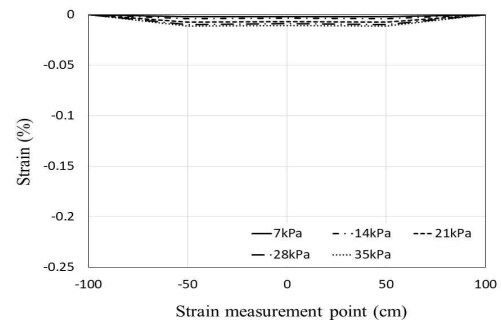


(d) 보강 ; 관 하부

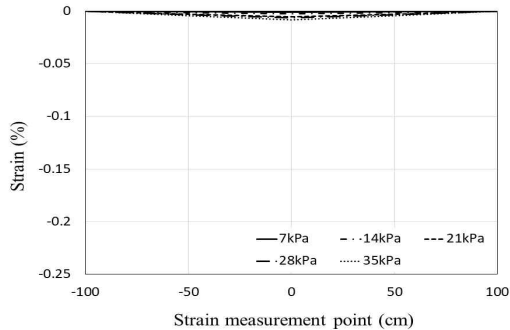
그림 3.54 팽창매트 보강에 따른 상부관의 변형률



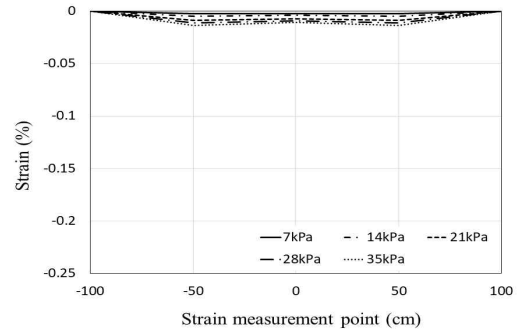
(a) 무보강 ; 관 상부



(a) 무보강 ; 관 하부



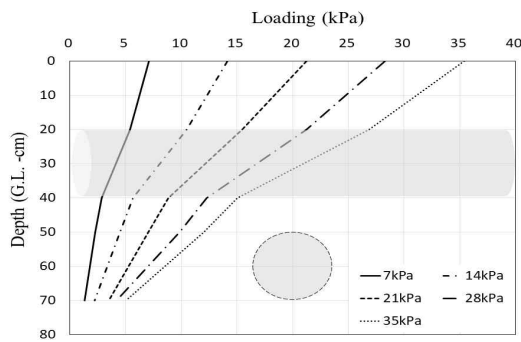
(c) 보강 ; 관 상부



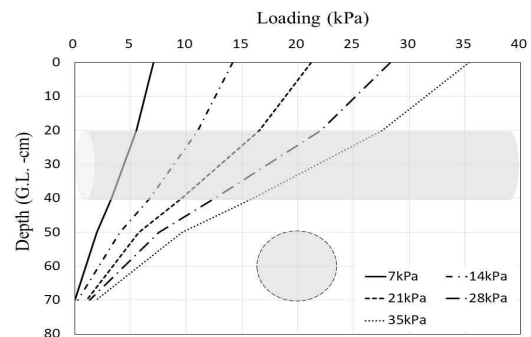
(d) 보강 ; 관 하부

그림 3.55 팽창매트 보강에 따른 하부관의 변형률

- ⑤ 지중매설관이 있는 G.L.-20cm ~ G.L.-40cm의 범위에서는 매설관 자체의 강성으로 인하여 응력이 감소하였고, 매설관 상부에 가해진 응력 대비 매설관 바로 하부에서 발생하는 응력에 대한 감소율은 약 42% ~ 47%를 나타냄.
- ⑥ 팽창매트 보강 지반의 깊이에 따른 응력분포를 나타낸 것으로서 시멘트매트를 보강하였을 때와 마찬가지로 매설관과 팽창매트에 의한 응력감소율을 나타냄.
- ⑦ 상부관에 의한 응력감소율은 40% ~ 43%로 나타나며, 팽창매트에 의한 응력감소율은 39% ~ 42%의 범위로 나타냄. 팽창매트를 보강하였을 때 매설관의 감소율이 작게 나타나는 것은 시멘트매트를 보강하였을 때 결과와 마찬가지로 원지반 보다 팽창매트의 큰 강성으로 팽창매트의 변형이 작게 나타나고, 작게 나타나는 만큼 팽창매트 상부에 매설되어 있는 매설관에서 응력이 더 크게 발생하기 때문인 것으로 분석됨.
- ⑧ 따라서 팽창매트를 보강하였을 경우, 관의 변형은 좀 더 크게 발생하지만 보강하지 않았을 때와 비교하여 매우 크게 차이 나지 않고, 하부관에 전달되는 응력을 감소시켜줌으로써 보강효과가 있는 것으로 분석됨.

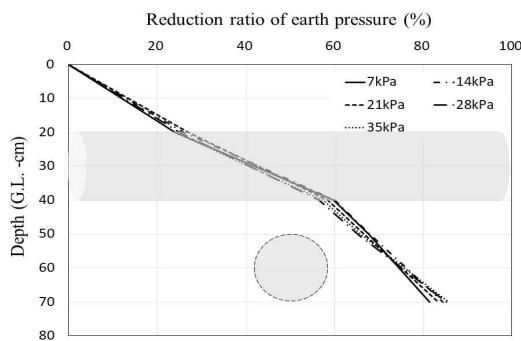


(a) 무보강

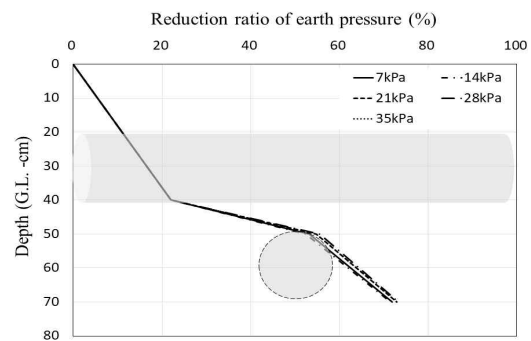


(b) 보강

그림 3.56 하중단계에 따른 응력분포



(a) 무보강



(b) 보강

그림 3.57 하중단계에 따른 응력감소율

라. 결론

- (1) 다짐이 이루어지지 않은 관로 하부의 보강을 위해 시멘트매트 적용유무에 따른 평판재하시험 결과, 시멘트매트의 응력감소율은 약 46% ~ 48%로 나타났으며, 매설관 자체의 부등침하를 감소 시키고 하부지반의 변형을 감소시키는 효과를 나타내는 것으로 판단됨.
- (2) 다짐 품질관리가 어려운 협소한 지역에 이중관이 매설된 경우에 대한 관로 하부의 보강을 위해 팽창매트 적용유무에 따른 평판재하시험결과, 팽창매트의 응력감소율은 약 39% ~ 42%의 범위로 나타났으며, 관의 부등침하와 억제와 응력을 감소시켜 하부관에 대한 영향을 감소시킬 수 있는 효과가 있는 것으로 판단됨.
- (3) 앞선 결론을 바탕으로, 시공여건상 다짐이 불가하거나 어려운 구간에 대하여 하부관로 지반에 시멘트매트를 보강한다면 시멘트매트 자체의 강성으로 인한 갑작스런 붕괴나 부등침하로 인한 피해를 방지할 수 있을 것으로 판단됨. 관로 하부지반은 지하수위의 영향을 많이 받을 수 있으므로 추후, 지하수위의 영향에 대한 분석 등을 추가적으로 수행할 필요가 있으며, 이를 통해 관로 하부에 시멘트매트 적용에 따른 보강방법에 대한 신뢰성을 확보할 수 있을 것이라 판단됨.

3. 복구지반의 지지력 평가를 위한 현장시험

가. 시험개요

- 지반복구재료를 이용한 긴급복구방법은 지반공동 및 지반함몰 발생지역을 긴급히 복구하여 도로나 보도와 같이 원래의 기능을 신속하게 발휘할 수 있도록 하는 것이 목적.
- 팽창매트 혹은 시멘트매트로 보강된 지반은 상부에 소요하중이 재하 되더라도 재차 지반함몰이 발생하지 않아야 하며, 이를 평가하기 위해 평판재하시험을 수행다.
- 그림 3.58~3.59는 현장위치 및 전경을 나타낸 것이고, 그림 3.60은 현장 지지력시험의 연구수행 흐름도.



그림 3.58 현장 위치도(송도 6·8공구)



그림 3.59 현장 전경

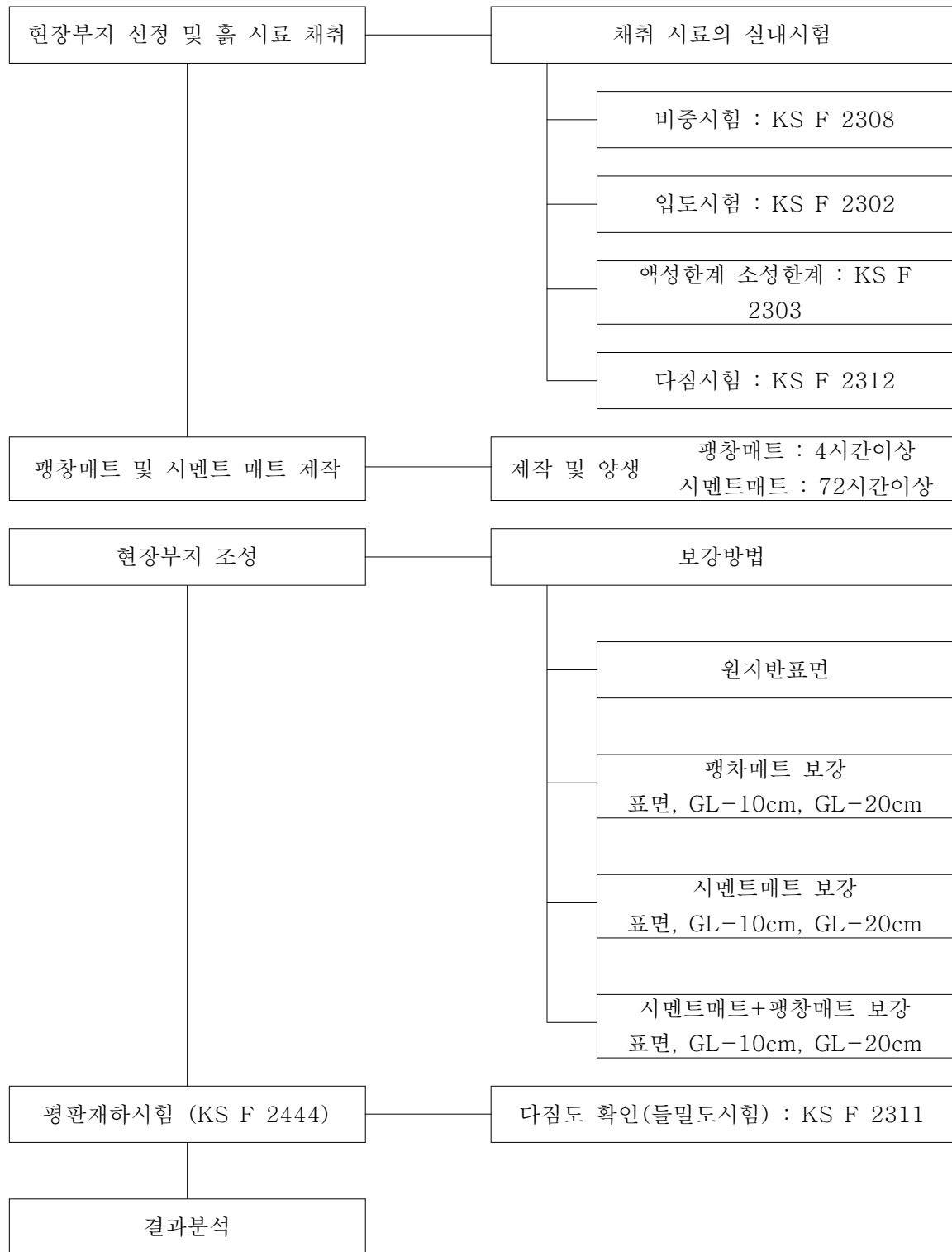


그림 3.60 팽창매트 및 시멘트매트 현장 지지력시험 평가 흐름도

나. 실험 방법 및 내용

(1) 지지력 평가방법

- 지반함몰의 긴급복구의 방안으로 팽창매트와 시멘트매트를 적용.
- 보강재를 단일 혹은 복합으로 사용하는 방법에 따라 복구된 함몰지반의 지지력평가를 위해 한국산업규격 KS F 2444의 방법(얕은 기초의 평판 재하시험 방법)을 이용
- 평판재하 시험절차와 방법, 그리고 평가방법은 다음과 같음

(가) 재하판 중심에 잭을 설치하고 하중이 경사지지 않도록 구면좌를 사용하며, 2개소의 침하계를 설치할 때에는 대각선으로 배치하고, 재하판을 안정시키기 위해 35kPa의 초기 접지압을 가한 상태를 초기치로 함.

(나) 하중의 증가는 98kPa 이하 또는 시험 목표하중의 1/6이하로 6단계로 나누고, 단계적으로 동일 하중을 흙에 가하고, 각 하중을 정확하게 측정하고 모든 하중을 충격 및 진동 또는 편심이 작용하지 않도록 정적 하중으로 지반에 전달되도록 함.

(다) 재하시간의 간격은 각단계별 하중 증가 후 최소 15분 이상 하중을 유지해야 하며, 침하가 정지하거나 침하 비율이 일정하게 될 때까지 하중을 유지하도록 하고, 이후 단계에서 동일하게 하중 유지시간이 적용되도록 함.

(라) 침하의 측정은 정밀도 0.01mm의 다이얼 게이지 또는 LVDT로 침하량을 측정하며, 모든 침하량을 계속해서 기록. 침하량 측정은 하중 재하가 된 시점에서, 그리고 하중이 일정하게 유지되는 동안 15분까지는 1, 2, 3, 5 10, 15분에 각각 침하를 측정하고 이 이후에는 동일 시간 간격으로 실시. 15분간 침하량이 0.01mm이하가 되거나, 1분간의 침하량이 누적침하량의 1%이하가 되면 침하의 진행이 정지된 것으로 판단.

(마) 시험하중이 허용하중의 3배 이상이거나 재하판 지름의 10%를 초과하는 경우, 그리고 전체 침하량이 25mm에 도달하거나 항복점을 넘으면 시험을 정지.

(바) 지지력시험시 가한 최대하중, 재하판 지름의 10%에 대응하는 하중강도의 1/3, P-S, LogP-LogS, S-logt 곡선법에 의한 항복강도의 1/2중 작은 값을 허용지지력으로 함.

(2) 지지력시험 조건

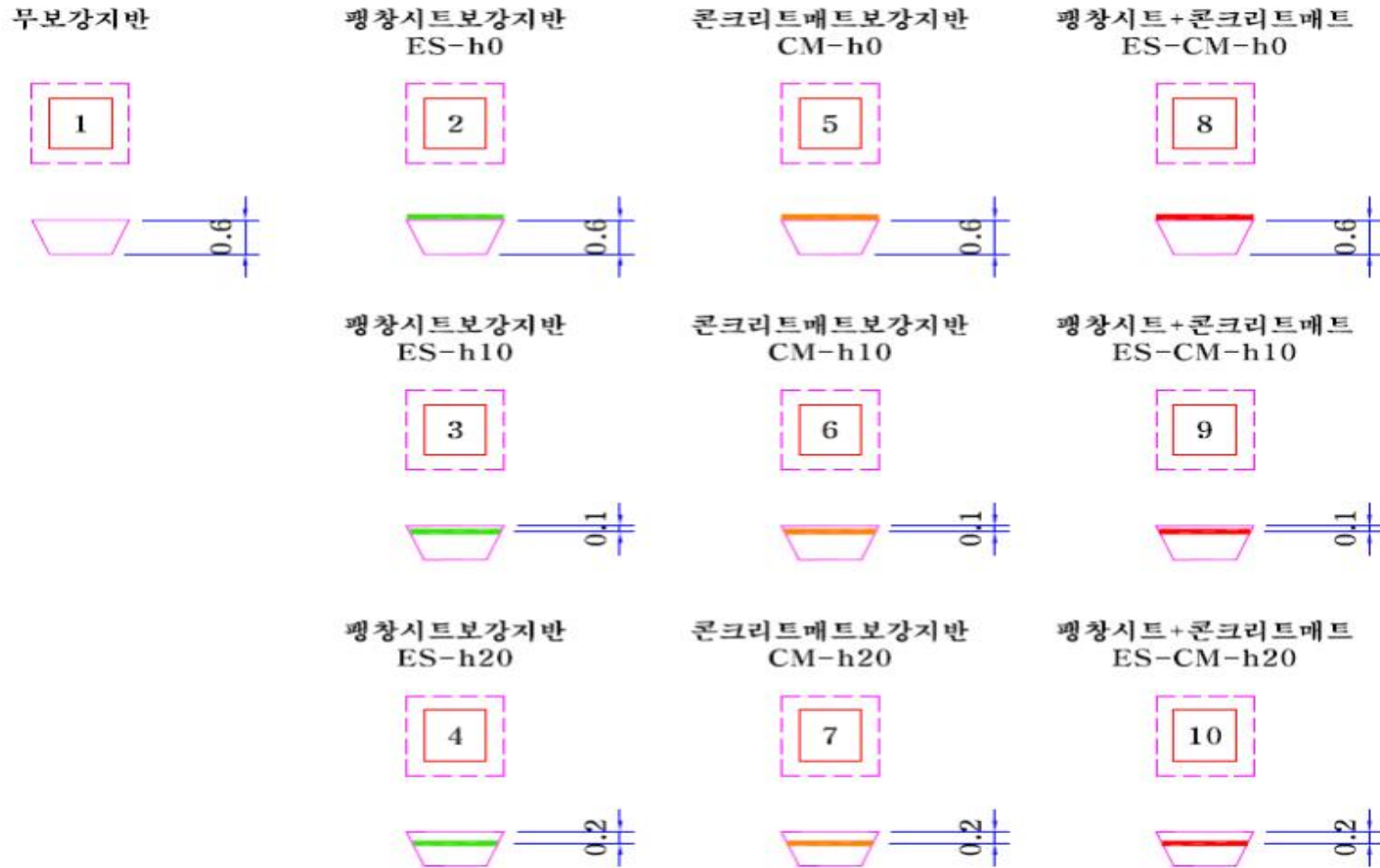


그림 3.61 현장평판재하시험 조건

(3) 현장부지 조성방법



(a) 현장시험 부지경계 표시



(b) 표층제거



(c) 굴착전경



(d) 지반조성 및 다짐



(e) 팽창매트 보강 전경



(f) 시멘트매트 보강 전경



(g) 부지조성 완료



(h) 평판재하시험 전경

그림 3.62 현장지반 모사 전경

다. 실험 결과

(1) 현장시료의 물리적 특성

팽창매트 및 시멘트매트로 긴급복구된 함몰지반의 지지력특성을 평가하기 위해 현장시험부지의 흙 시료를 채취하여 실내실험을 통한 물리적특성 분석을 수행하였다. 물리적특성 분석은 한국산업규격에 명시되어 있는 기준을 참고하여 비중, 입도분포, 액터버그한계, 다짐시험 등을 수행하였다. 다짐시험결과는 현장지반의 조건이 일정하게 되도록 다짐할 때, 상대다짐도를 계산하기 위해 수행하였다.

그림 3.63 (a)는 사용 흙 시료의 전경을 나타내고, (b)는 체분석, (c)는 액성한계, (d)는 소성한계, (e)는 다짐시험의 전경을 나타낸 것으로 한국산업규격(KS F)에 따라 수행하였다. 비중은 같은 부피의 물의 무게와 흙의 무게의 비를 의미하며 값의 범위는 대부분 2.6~2.9이다. 현장 흙 시료 비중의 산술평균값은 약 2.67의 값을 갖으며 실트질 혹은 점토질이 포함된 흙의 특성을 나타낸다. 그림 3.64는 체분석과 비중계분석에 의한 입도분포곡선을 나타낸다. 일반적으로 흙은 조립토와 세립토로 구분하며 조립토는 자갈질, 모래질, 세립토는 실트질, 점토질로 다시 구분된다. 4.75mm(#No.4)이상의 흙 입자는 자갈질(G), 4.75mm(#No.4)~0.075mm(#No.200)의 사이의 흙 입자는 모래질(S), 0.075mm(#No.200)이하의 입자를 실트질(M) 혹은 점토질(C)의 흙으로 분류한다. 실트질과 점토질의 구분은 보통 0.002mm~0.005mm이다. 현장 채취한 흙 시료는 자갈질 5%, 모래질 53%, 실트질 및 점토질은 42%로 구성되어있다. 흙 시료의 No.200체의 통과율은 12%이상 50% 미만이므로 공학적 특성에 의한 분류를 하려면 액성한계 및 소성한계 시험결과가 필요하다. 액성한계와 소성한계의 시험결과는 각각 25.5%, 4.2%로서 소성지수는 4.2%로서 그림 2.55의 소성도표에서는 A선 아래에 위치하게 된다. 따라서 이 흙은 No.200체 통과량이 12% 이상 50%이하이고, 소성지수가 4.2%로 5%보다 낮으므로 흙의 분류법에 의해 실트질모래(SM)로 분류할 수 있다. 그림 3.66는 다짐시험결과를 나타낸다. 표 3.10은 현장부지에서 채취한 흙의 물리적 특성시험의 결과를 요약해서 나타낸 것이다.

표 3.10 현장채취 흙 시료의 물성시험 결과

구분	자연함수비 (wn)	비중 (Gs)	입도분포	액터버그한계 (%)		다짐시험		USCS
			200체 통과율	LL	PI	w _{opt} (%)	$\gamma_d(\max)$ (kN/m ³)	
현장 시료	12.4%	2.68	42%	25.5	4.2	11	19.3	SM



(a) 사용 흙 시료 전경



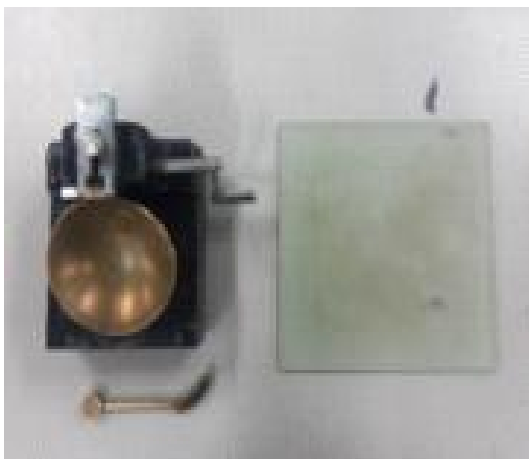
(b) 비중시험(KS F 2308)



(c) 체분석 (KS F 2302)



(d) 비중계분석 (KS F 2303)



(e) 애터버그한계 시험 (KS F 2303)



(f) 다짐시험(KS F 2312)

그림 3.63 흙의 물리 및 역학적 특성 시험

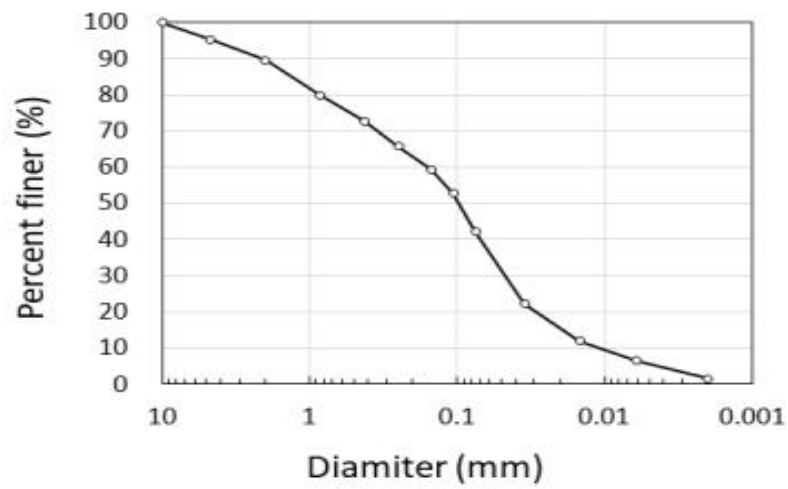


그림 3.64 현장시료의 입도분포곡선

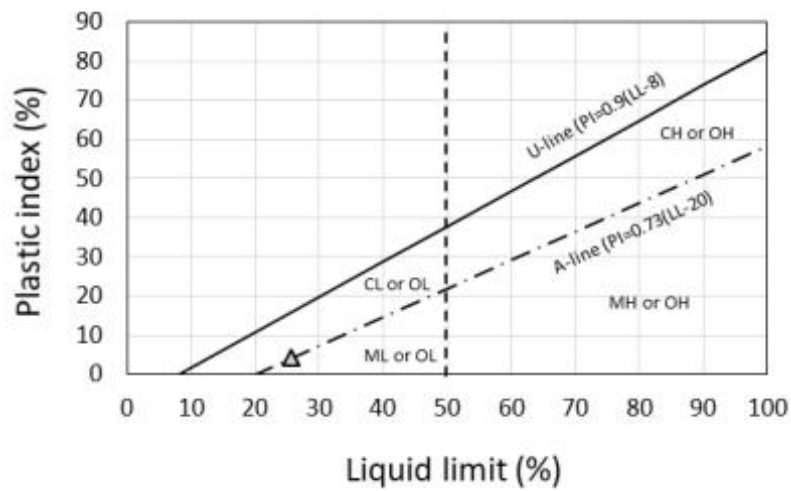


그림 3.65 액터버그한계 시험결과

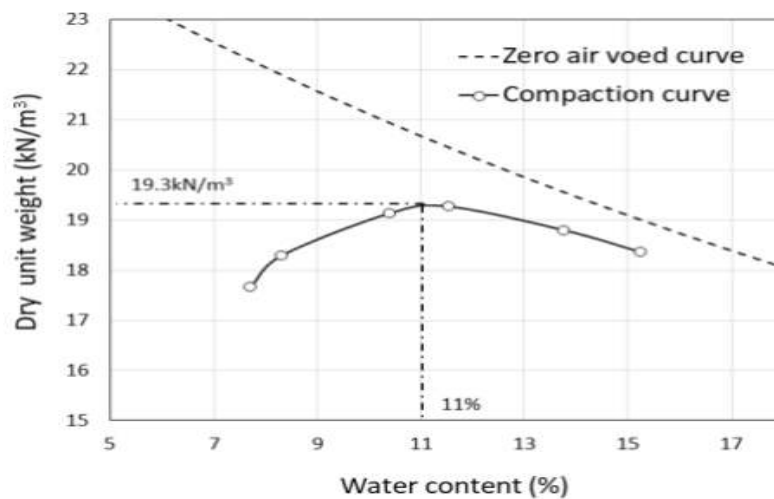


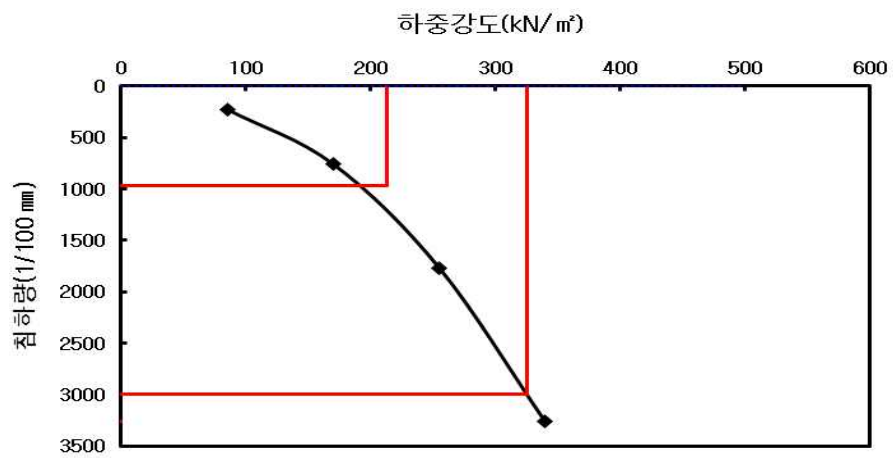
그림 3.66 다짐시험 결과

(2) 원지반의 지지력시험 결과

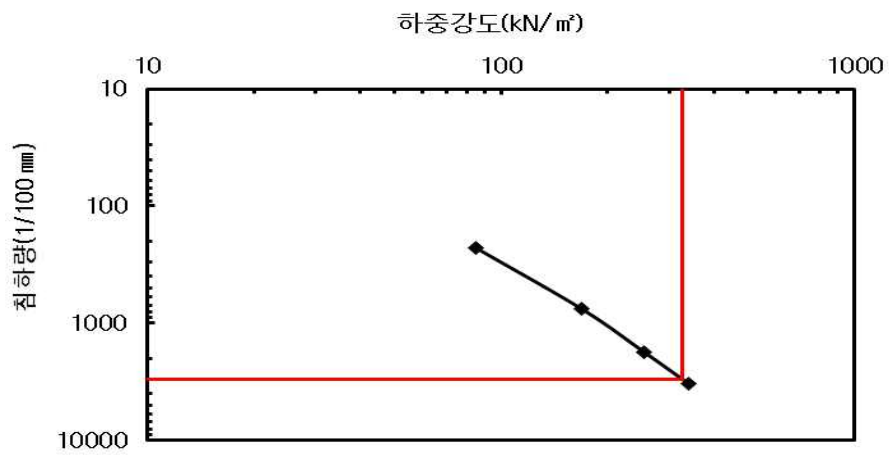
표 3.11은 보강된 지반과의 비교를 위한 원지반의 지지력시험 결과를 나타낸다. 원지반은 하중강도 339.5kPa에서 평판재하판 폭의 10%인 30mm이상 침하량이 발생하여 시험을 종료하였다. 항복하중강도를 평가하기 그림 3.67과 같이 P-S, LogP-LogS, S-logt의 곡선을 도시하여 항복하중강도를 산정하였다.

표 3.11 원지반 평판재하시험 결과

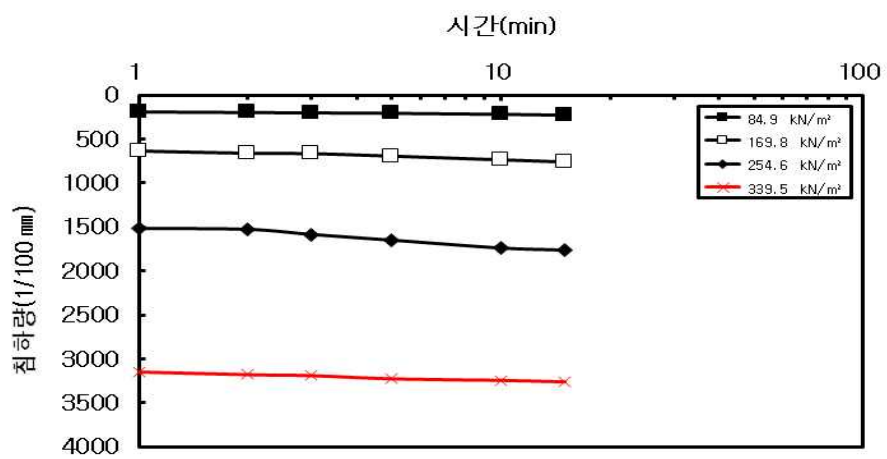
단계	하중	하중강도	시간	침하량(1/100 mm)		
(step)	(kN)	(kN/m ²)	(min)	좌	우	평균
1	6	84.9	1	177	197	187
			2	185	206	196
			3	188	211	200
			5	193	217	205
			10	205	233	219
			15	214	243	229
2	12	169.8	1	614	657	636
			2	638	682	660
			3	644	687	666
			5	671	715	693
			10	711	759	735
			15	734	785	760
3	18	254.6	1	1500	1539	1520
			2	1510	1552	1531
			3	1568	1608	1588
			5	1633	1674	1654
			10	1724	1759	1742
			15	1749	1784	1767
4	24	339.5	1	3148	3151	3150
			2	3180	3178	3179
			3	3192	3189	3191
			5	3226	3226	3226
			10	3244	3244	3244
			15	3261	3260	3261



(a) P-S 곡선



(b) LogP-LogS 곡선



(c) S-Logt 곡선

그림 3.67 원지반의 항복하중강도 산정 결과

표 3.12는 원지반의 허용지지력 산정 결과를 나타낸 것이다. 평판재하시험 시 최대 시험 하중강도, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도를 안전율 3으로 나누어 계산하고, 응력, 침하량, 시간과의 관계를 통해 항복하중강도를 안전율 2로 나누어 허용지지력을 계산하였다.

최대 시험 하중강도는 339.5kPa이고, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도는 325kPa로 나타나 허용지지력은 각각 113.2kPa, 108.3kPa이다. 항복하중강도는 P-S 곡선과 S-logt 곡선에 의한 하중강도 값을 확인 할 수 있었으며, 하중강도는 각각 213kPa, 339.5kPa이고, 이 때 허용지지력은 106.5kPa, 169.8kPa이다. 허용지지력 산정결과 최소값은 P-S 곡선에 의한 값으로 나타나며 허용지지력은 106.5kPa로 산정되었다.

표 3.12 원지반 허용지지력 산정 결과

구분		하중강도	안전율	지지력	침하량
		(kN/m ²)	(F.S)	(kN/m ²)	(mm)
최대 시험 하중강도		339.5	3	113.2	32.61
재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도		325.0	3	108.3	30.00
항복 하중강도	P - S	213.0	2	106.5	(가정)항복
	log P - log S	—	2	—	하중강도시
	S - log t	339.5	2	169.8	침하량(mm)
					9.66

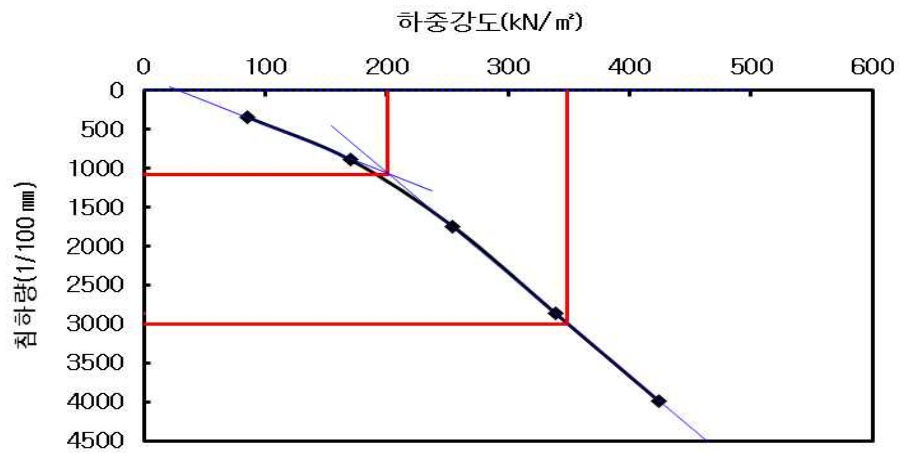
(3) 팽창매트 보강지반 지지력시험 결과

(가) 팽창매트 보강지반(ES-h0)

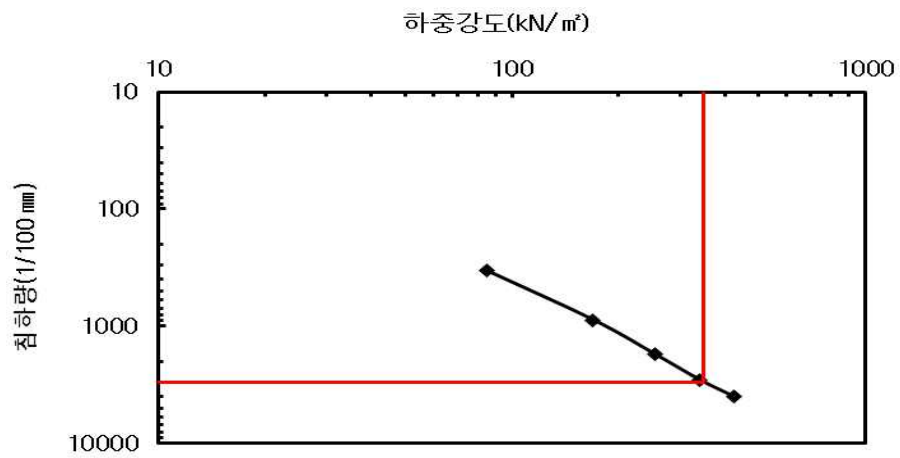
표 3.13은 팽창매트 표면보강지반의 지지력시험 결과를 나타낸 것이고, 그림 3.68은 항복 하중강도 분석결과를 나타낸다.

표 3.13 팽창매트 보강지반(표면) 평판재하시험 결과

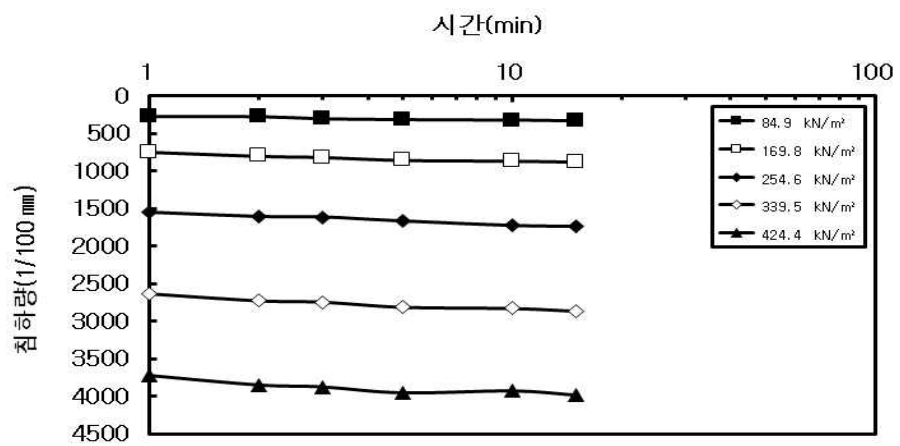
단계 (step)	하중 (kN)	하중강도 (kN/m ²)	시간 (min)	침하량(1/100 mm)		
				좌	우	평균
1	6	84.9	1	259	300	280
			2	261	302	282
			3	292	325	309
			5	299	343	321
			10	305	350	328
			15	314	360	337
2	12	169.8	1	702	790	746
			2	756	848	802
			3	773	865	819
			5	813	908	861
			10	823	919	871
			15	835	933	884
3	18	254.6	1	1483	1625	1554
			2	1535	1682	1609
			3	1543	1690	1617
			5	1596	1744	1670
			10	1659	1799	1729
			15	1667	1818	1743
4	24	339.5	1	2543	2735	2639
			2	2642	2816	2729
			3	2660	2833	2747
			5	2725	2901	2813
			10	2742	2917	2830
			15	2776	2953	2865
5	30	424.4	1	3628	3820	3724
			2	3763	3937	3850
			3	3790	3963	3877
			5	3868	4044	3956
			10	3843	4018	3931
			15	3898	4075	3987



(a) P-S 곡선



(b) LogP-LogS 곡선



(c) S-Logt 곡선

그림 3.68 팽창매트 보강지반(표면) 항복하중강도 산정 결과

표 3.14는 표면에 팽창매트로 보강된 함몰지반의 허용지지력 산정 결과를 나타낸 것이다. 평판재하시험 시 최대 시험 하중강도, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도를 안전율 3으로 나누어 계산하고, 응력, 침하량, 시간과의 관계를 통해 항복하중강도를 안전율 2로 나누어 허용지지력을 계산하였다. 최대 시험 하중강도는 424.4kPa이고, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도는 349kPa로 나타나 허용지지력은 각각 141.5kPa, 116.3kPa이다. 항복하중강도는 P-S 곡선에 의한 하중강도 값을 확인 할 수 있었으며, 하중강도는 각각 201kPa, 이고, 이 때 허용지지력은 100.5kPa이다. 허용지지력 산정결과 최소값은 P-S 곡선에 의한 값으로 나타나며 허용지지력은 100.5kPa로 산정되었다.

표 3.14 팽창매트 보강지반(ES-h0) 허용지지력 산정 결과

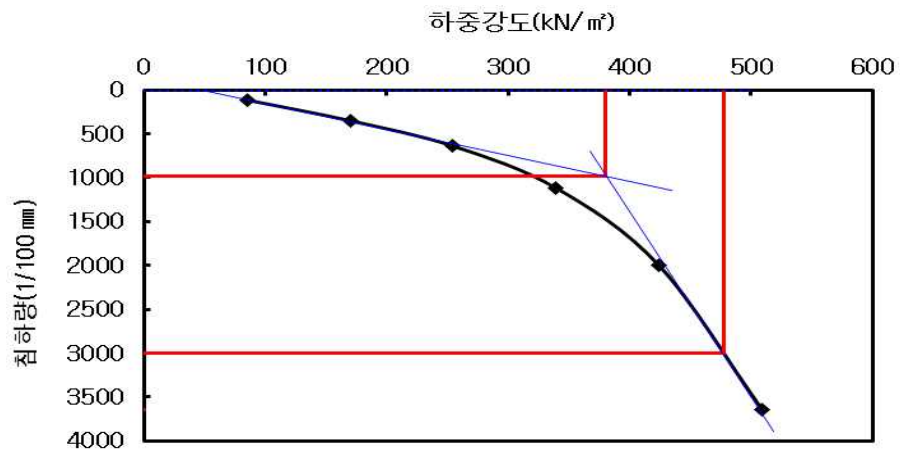
구분		하중강도	안전율	지지력	침하량
		(kN/m ²)	(F.S)	(kN/m ²)	(mm)
최대 시험 하중강도		424.4	3	141.5	39.87
재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도		349.0	3	116.3	30.00
항복 하중강도	P - S	201.0	2	100.5	(가정) 항복 하중강도시 침하량(mm) 10.88
	log P - log S	—	2	—	
	S - log t	—	2	—	

(나) 팽창매트 보강지반(ES - h10)

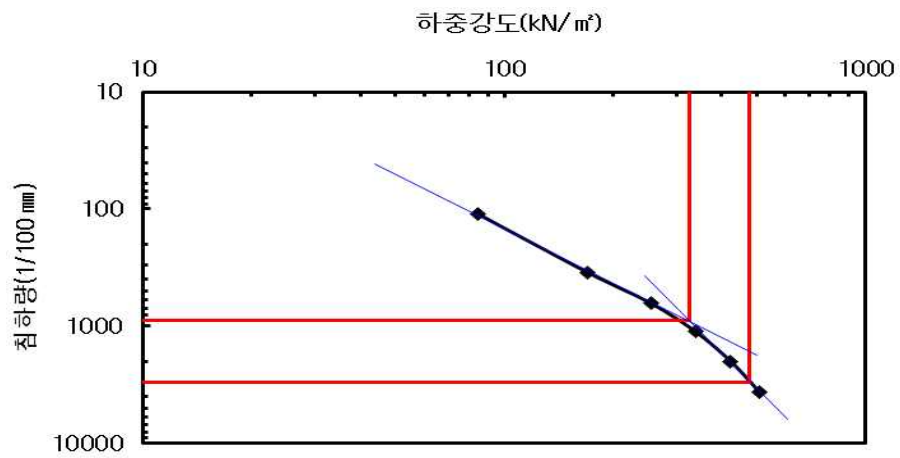
표 3.15는 표면에서 10cm아래 팽창매트 보강지반의 지지력시험 결과를 나타낸 것이고, 그림 3.69는 항복하중강도 분석결과를 나타낸다.

표 3.15 팽창매트 보강지반(ES-h10) 평판재하시험 결과

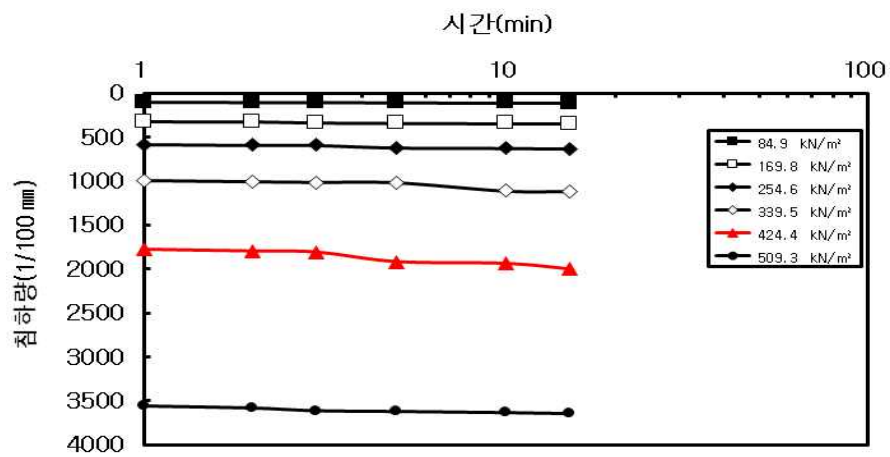
단계	하중	하중강도	시간	침하량(1/100 mm)		
(step)	(kN)	(kN/m ²)	(min)	좌	우	평균
1	6	84.9	1	106	96	101
			2	108	99	104
			3	109	100	105
			5	110	103	107
			10	114	105	110
			15	115	106	111
2	12	169.8	1	318	327	323
			2	320	329	325
			3	330	339	335
			5	335	345	340
			10	338	349	344
			15	340	351	346
3	18	254.6	1	563	600	582
			2	572	609	591
			3	574	611	593
			5	603	644	624
			10	609	650	630
			15	612	660	636
4	24	339.5	1	956	1040	998
			2	969	1051	1010
			3	975	1059	1017
			5	980	1063	1022
			10	1065	1159	1112
			15	1068	1164	1116
5	30	424.4	1	1707	1846	1777
			2	1727	1866	1797
			3	1739	1877	1808
			5	1840	1996	1918
			10	1864	2013	1939
			15	1926	2077	2002
6	36	509.3	1	3501	3623	3562
			2	3526	3644	3585
			3	3544	3685	3615
			5	3554	3691	3623
			10	3562	3708	3635
			15	3578	3714	3646



(a) P-S 곡선



(b) LogP-LogS 곡선



(c) S-Logt 곡선

그림 3.69 팽창매트 보강지반(ES-h10) 항복하중강도 산정 결과

표 3.165은 지면 10cm아래 팽창매트로 보강된 함몰지반의 허용지지력 산정 결과를 나타낸 것이다. 평판재하시험 시 최대 시험 하중강도, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도를 안전율 3으로 나누어 계산하고, 응력, 침하량, 시간과의 관계를 통해 항복하중강도를 안전율 2로 나누어 허용지지력을 계산하였다. 최대 시험 하중강도는 509.3Pa이고, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도는 478kPa로 나타나 허용지지력은 각각 469.8kPa, 159.3kPa이다. 항복하중강도는 P-S 곡선, LogP-LogS, S-Logt에 의한 하중강도 값을 확인 할 수 있었으며, 하중강도는 각각 380kPa, 325kPa, 424.4kPa이고, 이 때 허용지지력은 190kPa, 162.5kPa, 212.2kPa 이다. 허용지지력 산정결과 최소값은 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도의 값으로 나타나며 허용지지력은 159.3kPa로 산정되었다.

표 3.16 팽창매트 보강지반(ES-h10) 허용지지력 산정 결과

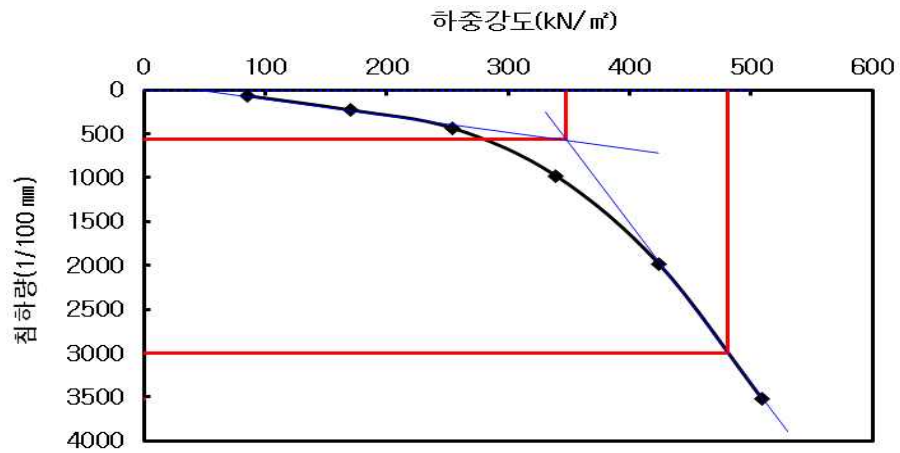
구분		하중강도	안전율	지지력	침하량
		(kN/m ²)	(F.S)	(kN/m ²)	(mm)
최대 시험 하중강도		424.4	3	141.5	39.87
재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도		349.0	3	116.3	30.00
항복 하중강도	P - S	509.3	3	169.8	(가정) 항복 하중강도시 침하량(mm) 9.80
	log P - log S	478.0	3	159.3	
	S - log t	380.0	2	190.0	

(다) 팽창매트 보강지반(ES - h20)

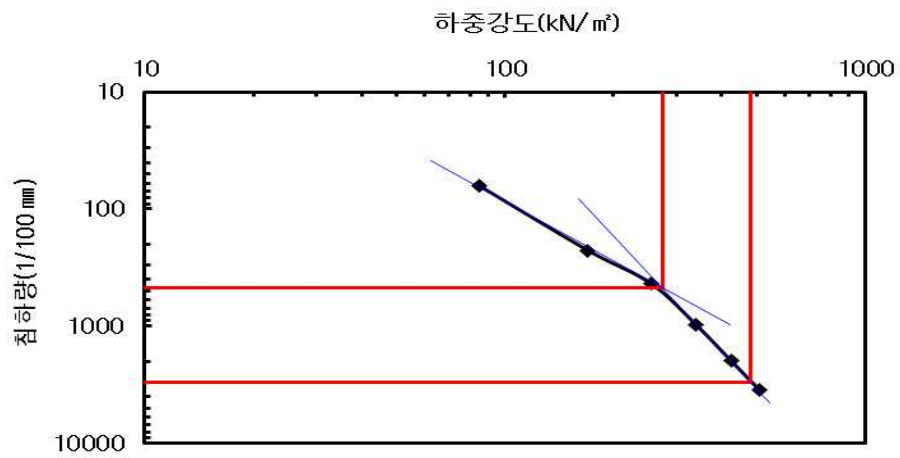
표 3.17은 표면에서 20cm아래 팽창매트 보강지반의 지지력시험 결과를 나타낸 것이고, 그림 3.70은 항복하중강도 분석결과를 나타낸다.

표 3.17 팽창매트 보강지반(ES-h20) 평판재하시험 결과

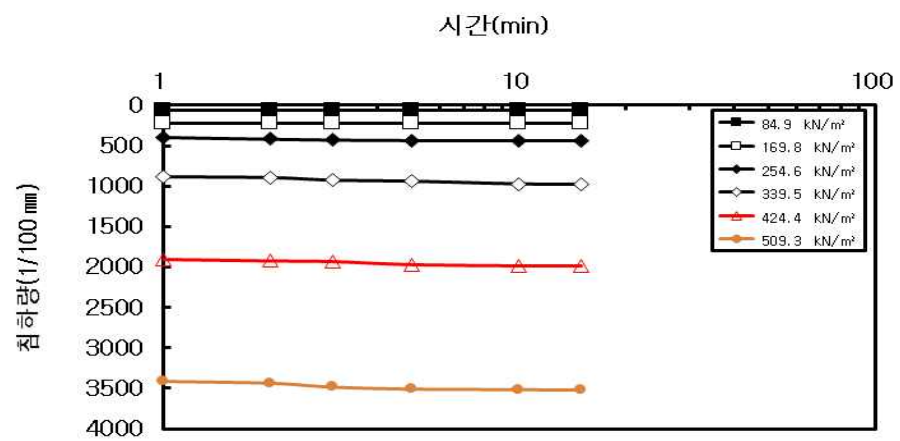
단계	하중	하중강도	시간	침하량(1/100 mm)		
(step)	(kN)	(kN/m ²)	(min)	좌	우	평균
1	6	84.9	1	85	36	61
			2	88	38	63
			3	89	38	64
			5	89	38	64
			10	89	38	64
			15	89	38	64
2	12	169.8	1	274	163	219
			2	278	164	221
			3	280	166	223
			5	281	167	224
			10	283	169	226
			15	283	169	226
3	18	254.6	1	413	388	401
			2	430	407	419
			3	440	414	427
			5	446	419	433
			10	448	421	435
			15	448	421	435
4	24	339.5	1	903	873	888
			2	913	883	898
			3	945	913	929
			5	957	927	942
			10	989	958	974
			15	995	964	980
5	30	424.4	1	1909	1894	1902
			2	1928	1914	1921
			3	1938	1923	1931
			5	1978	1964	1971
			10	1994	1980	1987
			15	1994	1980	1987
6	36	509.3	1	3398	3422	3410
			2	3425	3445	3435
			3	3476	3496	3486
			5	3504	3520	3512
			10	3511	3528	3520
			15	3516	3534	3525



(a) P-S 곡선



(b) LogP-LogS 곡선



(c) S-Logt 곡선

그림 3.70 팽창매트 보강지반(ES-h20) 항복하중강도 산정 결과

표 3.18은 지면 20cm아래 팽창매트로 보강된 함몰지반의 허용지지력 산정 결과를 나타낸 것이다. 평판재하시험 시 최대 시험 하중강도, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도를 안전율 3으로 나누어 계산하고, 응력, 침하량, 시간과의 관계를 통해 항복하중강도를 안전율 2로 나누어 허용지지력을 계산하였다. 최대 시험 하중강도는 509.3Pa이고, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도는 481kPa로 나타나 허용지지력은 각각 169.8kPa, 160.3kPa이다. 항복하중강도는 P-S 곡선, LogP-LogS, S-Logt에 의한 하중강도 값을 확인 할 수 있었으며, 하중강도는 각각 348kPa, 275kPa, 424.4kPa이고, 이 때 허용지지력은 174kPa, 137.5kPa, 212.2kPa 이다. 허용지지력 산정결과 최소값은 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도의 값으로 나타나며 허용지지력은 137.5kPa로 산정되었다.

표 3.18 팽창매트 보강지반(ES-h20) 허용지지력 산정 결과

구분		하중강도	안전율	지지력	침하량
		(kN/m ²)	(F.S)	(kN/m ²)	(mm)
최대 시험 하중강도		509.3	3	169.8	35.25
재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도		481.0	3	160.3	30.00
항복 하중강도	P - S	348.0	2	174.0	(가정) 항복 하중강도시 침하량 (mm) 4.70
	log P - log S	275.0	2	137.5	
	S - log t	424.4	2	212.2	

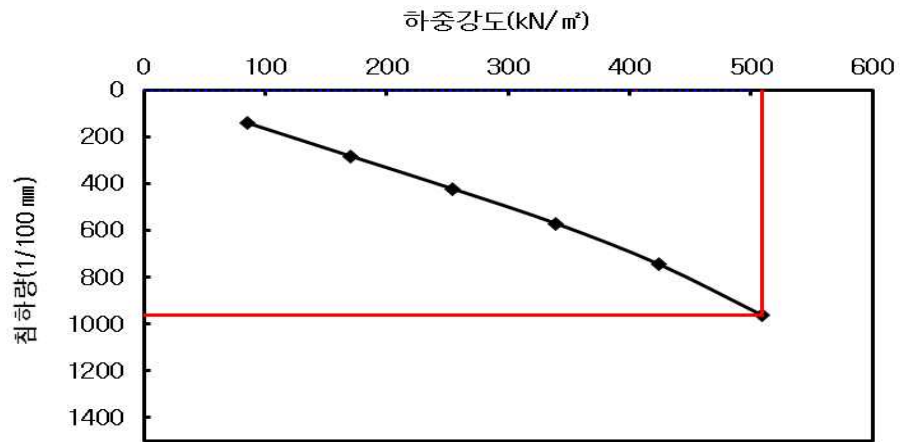
(4) 시멘트매트 보강 지지력 시험 결과

(가) 팽창매트 보강지반(ES - h20)

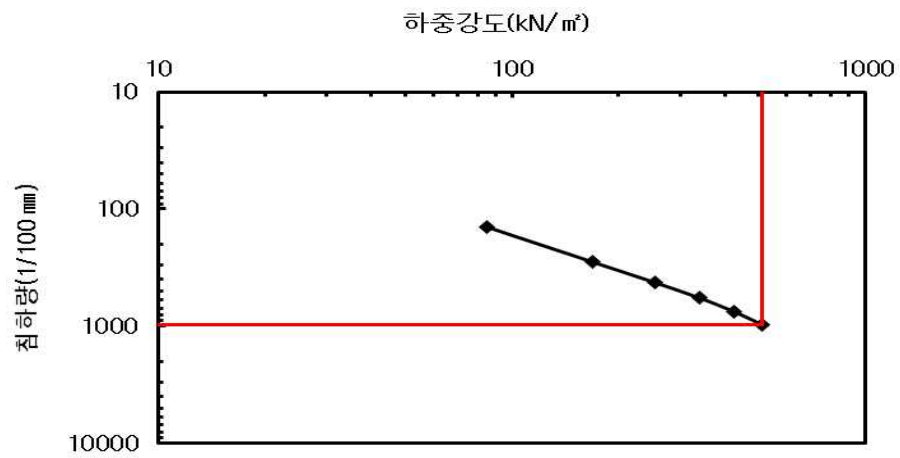
표 3.19는 시멘트매트 표면보강지반의 지지력시험 결과를 나타낸 것이고, 그림 2.71은 항복 하중강도 분석결과를 나타낸다.

표 3.19 시멘트매트 보강지반(CM-h0) 평판재하시험 결과

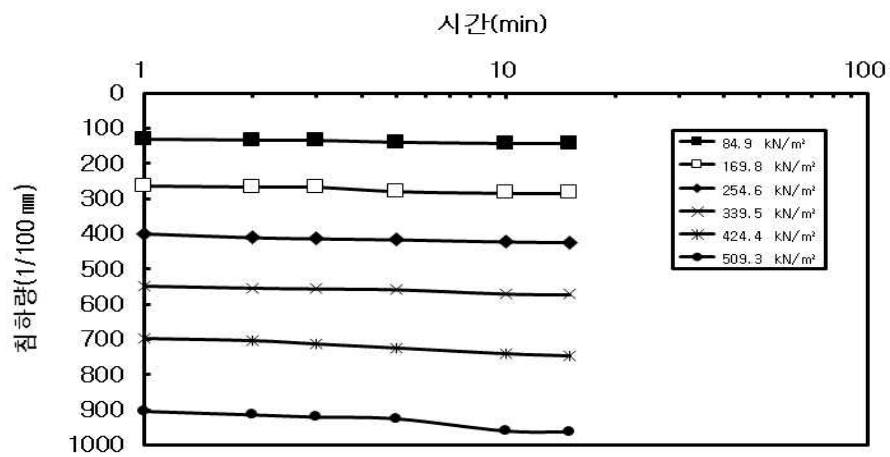
단계	하중	하중강도	시간	침하량(1/100 mm)		
(step)	(kN)	(kN/m ²)	(min)	좌	우	평균
1	6	84.9	1	130	135	133
			2	133	136	135
			3	134	137	136
			5	138	142	140
			10	142	144	143
			15	142	144	143
2	12	169.8	1	270	261	266
			2	273	263	268
			3	274	263	269
			5	285	274	280
			10	291	277	284
			15	291	277	284
3	18	254.6	1	411	387	399
			2	423	397	410
			3	426	401	414
			5	429	404	417
			10	436	409	423
			15	438	411	425
4	24	339.5	1	569	528	549
			2	575	533	554
			3	577	535	556
			5	579	538	559
			10	592	548	570
			15	594	550	572
5	30	424.4	1	727	669	698
			2	734	674	704
			3	743	683	713
			5	749	699	724
			10	765	714	740
			15	775	716	746
6	36	509.3	1	953	857	905
			2	963	867	915
			3	969	873	921
			5	975	877	926
			10	1009	911	960
			15	1012	913	963



(a) P-S 곡선



(b) LogP-LogS 곡선



(c) S-Logt 곡선

그림 3.71 시멘트매트 보강지반(표면) 항복하중강도 산정 결과

표 3.20은 표면에 시멘트매트로 보강된 함몰지반의 허용지지력 산정 결과를 나타낸 것이다. 평판재하시험 시 최대 시험 하중강도, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도를 안전율 3으로 나누어 계산하고, 응력, 침하량, 시간과의 관계를 통해 항복하중강도를 안전율 2로 나누어 허용지지력을 계산하였다. 최대 시험 하중강도는 509.3kPa이고, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도는 나타나지 않았으며, 허용지지력은 각각 169.8kPa이다. 항복하중강도는 확인할 수 없었으며, 허용지지력은 최대시험하중강도 일 때 169.8kPa이고 이때의 침하량은 9.63mm이다.

표 3.20 시멘트매트 보강지반(CM-h0) 허용지지력 산정 결과

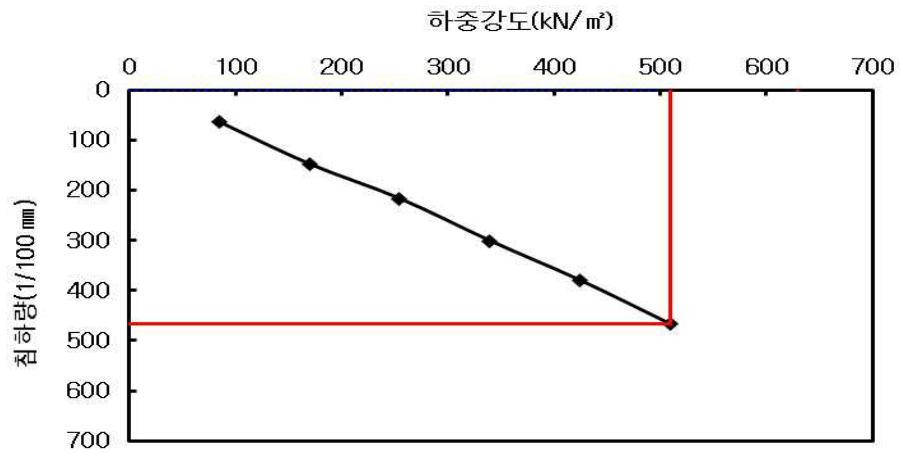
구분		하중강도	안전율	지지력	침하량
		(kN/m ²)	(F.S)	(kN/m ²)	(mm)
최대 시험 하중강도		509.3	3	169.8	9.63
재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도		—	3	—	30.00
항복 하중강도	P - S	—	2	—	(가정) 항복 하중강도시 침하량(mm)
	log P - log S	—	2	—	
	S - log t	—	2	—	

(나) 시멘트매트 보강지반(CM - h10)

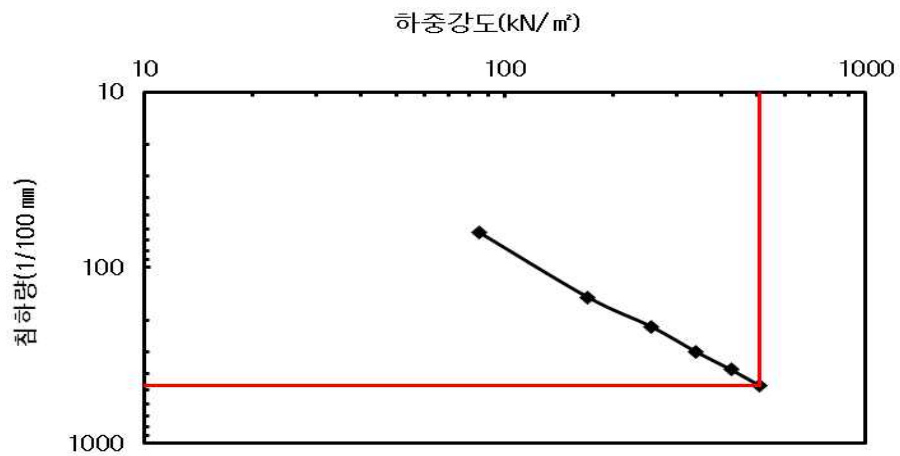
표 3.21은 표면에서 10cm아래 시멘트매트 보강지반의 지지력시험 결과를 나타낸 것이고, 그림 3.72는 항복하중강도 분석결과를 나타낸다.

표 3.21 시멘트매트 보강지반(CM-h10) 평판재하시험 결과

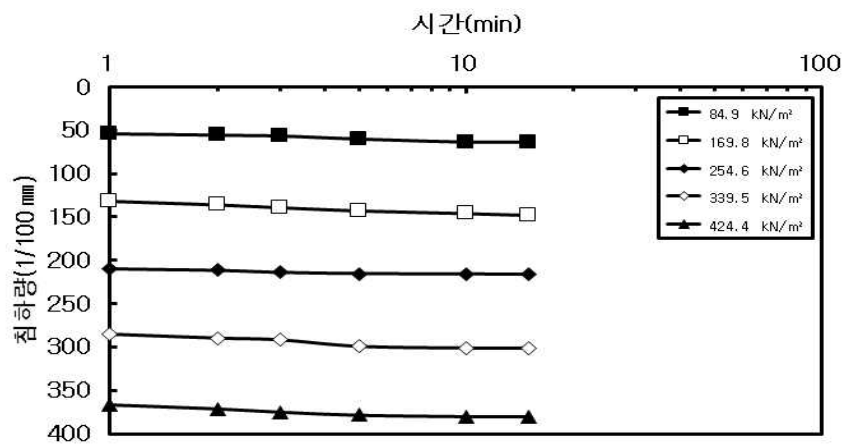
단계	하중	하중강도	시간	침하량(1/100 mm)		
(step)	(kN)	(kN/m ²)	(min)	좌	우	평균
1	6	84.9	1	55	53	54
			2	56	55	56
			3	57	56	57
			5	60	60	60
			10	64	63	64
			15	64	63	64
2	12	169.8	1	132	132	132
			2	136	136	136
			3	139	139	139
			5	142	143	143
			10	145	146	146
			15	147	148	148
3	18	254.6	1	207	212	210
			2	210	213	212
			3	212	216	214
			5	214	217	216
			10	215	217	216
			15	215	218	217
4	24	339.5	1	277	293	285
			2	282	297	290
			3	284	299	292
			5	290	308	299
			10	292	310	301
			15	292	310	301
5	30	424.4	1	353	381	367
			2	358	385	372
			3	361	389	375
			5	365	392	379
			10	366	394	380
			15	366	394	380
6	36	509.3	1	434	472	453
			2	440	476	458
			3	442	480	461
			5	447	484	466
			10	449	486	468
			15	449	486	468



(a) P-S 곡선



(b) LogP-LogS 곡선



(c) S-Logt 곡선

그림 3.72 시멘트매트 보강지반(CM-h10) 항복하중강도 산정 결과

표 3.22는 지면 10cm아래 시멘트매트로 보강된 함몰지반의 허용지지력 산정 결과를 나타낸 것이다. 평판재하시험 시 최대 시험 하중강도, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도를 안전율 3으로 나누어 계산하고, 응력, 침하량, 시간과의 관계를 통해 항복하중강도를 안전율 2로 나누어 허용지지력을 계산하였다. 최대 시험 하중강도는 509.3kPa이고, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도는 나타나지 않았으며, 허용지지력은 각각 169.8kPa이다. 항복하중강도는 확인할 수 없었으며, 허용지지력은 최대시험하중강도 일 때 169.8kPa이고 이때의 침하량은 4.68mm이다.

표 3.22 시멘트매트 보강지반(CM-h10) 허용지지력 산정 결과

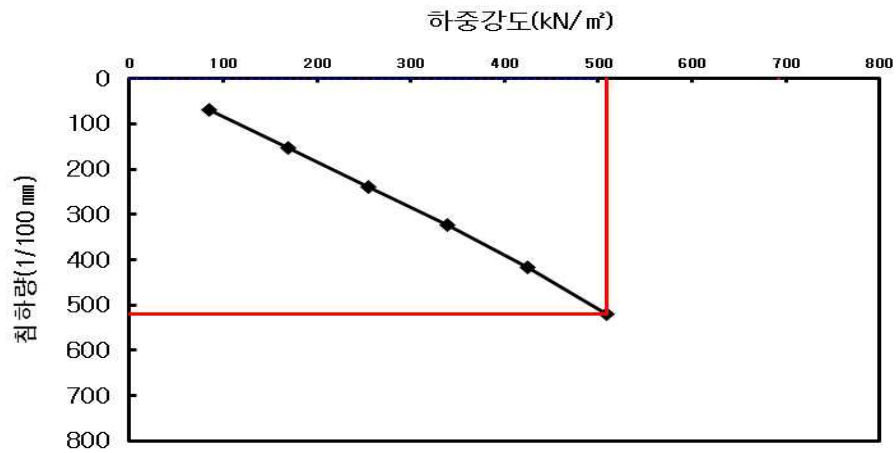
구분		하중강도	안전율	지지력	침하량
		(kN/m ²)	(F.S)	(kN/m ²)	(mm)
최대 시험 하중강도		509.3	3	169.8	4.68mm
재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도		—	3	—	30.00
항복 하중강도	P - S	—	2	—	(가정) 항복 하중강도시 침하량(mm) 0.00
	log P - log S	—	2	—	
	S - log t	—	2	—	

(다) 시멘트매트 보강지반(CM - h20)

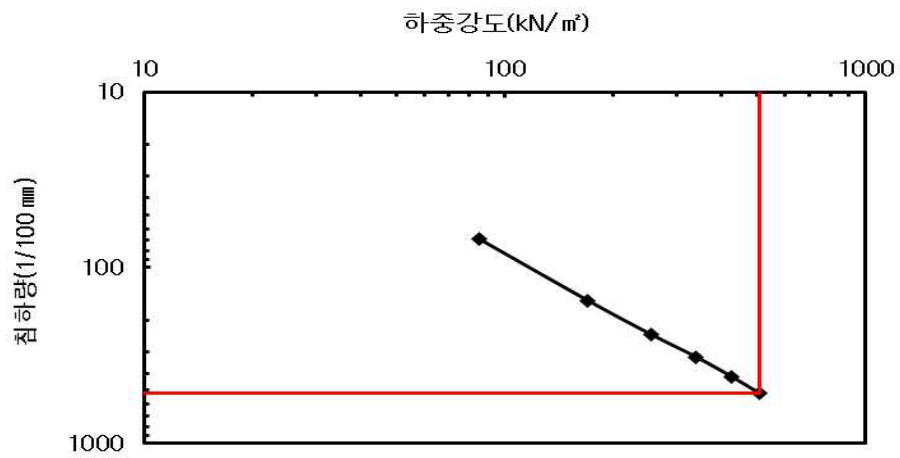
표 3.23은 표면에서 20cm아래 시멘트매트 보강지반의 지지력시험 결과를 나타낸 것이고, 그림 3.73은 항복하중강도 분석결과를 나타낸다.

표 3.23 시멘트매트 보강지반(CM-h20) 평판재하시험 결과

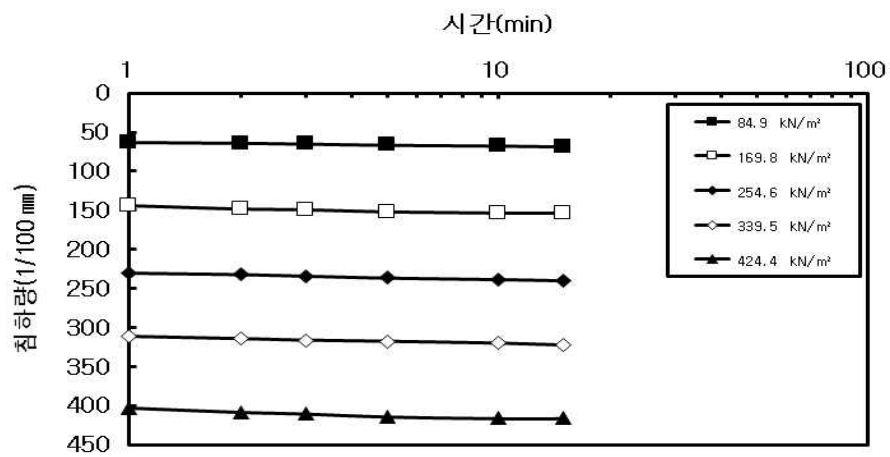
단계	하중	하중강도	시간	침하량(1/100 mm)		
(step)	(kN)	(kN/m ²)	(min)	좌	우	평균
1	6	84.9	1	73	53	63
			2	74	54	64
			3	75	55	65
			5	77	56	67
			10	78	57	68
			15	79	58	69
2	12	169.8	1	163	126	145
			2	167	130	149
			3	168	131	150
			5	171	133	152
			10	173	134	154
			15	173	134	154
3	18	254.6	1	257	203	230
			2	259	205	232
			3	262	206	234
			5	264	209	237
			10	266	211	239
			15	267	213	240
4	24	339.5	1	343	279	311
			2	346	282	314
			3	348	284	316
			5	350	285	318
			10	353	287	320
			15	356	289	323
5	30	424.4	1	441	366	404
			2	446	371	409
			3	448	373	411
			5	452	376	414
			10	454	378	416
			15	454	378	416
6	36	509.3	1	540	459	500
			2	545	464	505
			3	547	465	506
			5	554	471	513
			10	558	476	517
			15	561	479	520



(a) P-S 곡선



(b) LogP-LogS 곡선



(c) S-Logt 곡선

그림 3.73 시멘트매트 보강지반(CM-h20) 항복하중강도 산정 결과

표 3.24는 지면 20cm아래 시멘트매트로 보강된 함몰지반의 허용지지력 산정 결과를 나타낸 것이다. 평판재하시험 시 최대 시험 하중강도, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도를 안전율 3으로 나누어 계산하고, 응력, 침하량, 시간과의 관계를 통해 항복하중강도를 안전율 2로 나누어 허용지지력을 계산하였다. 최대 시험 하중강도는 509.3kPa이고, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도는 나타나지 않았으며, 허용지지력은 각각 169.8kPa이다. 항복하중강도는 확인할 수 없었으며, 허용지지력은 최대시험하중강도 일 때 169.8kPa이고 이때의 침하량은 5.20mm이다.

표 3.24 시멘트매트 보강지반(CM-h20) 허용지지력 산정 결과

구분		하중강도	안전율	지지력	침하량
		(kN/m ²)	(F.S)	(kN/m ²)	(mm)
최대 시험 하중강도		509.3	3	169.8	5.20
재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도		—	3	—	30.00
항복 하중강도	P - S	—	2	—	(가정) 항복 하중강도시 침하량(mm) 0.00
	log P - log S	—	2	—	
	S - log t	—	2	—	

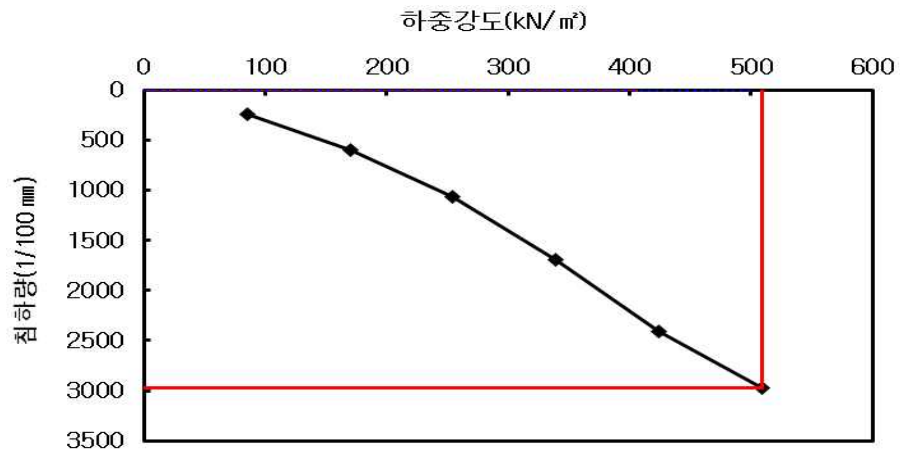
(5) 팽창매트와 시멘트매트 복합 보강 지지력 시험 결과

(가) 시멘트매트 보강지반(EP-CM-h0)

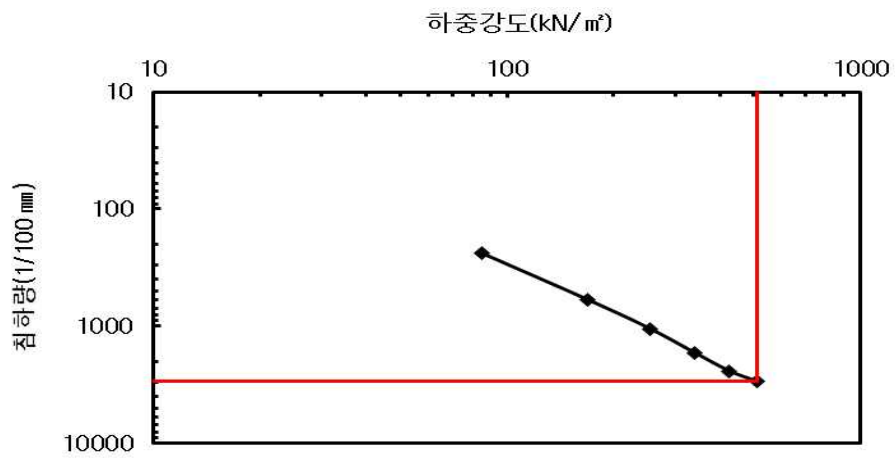
표 3.24는 팽창매트와 시멘트매트 표면 복합 보강지반의 지지력시험 결과를 나타낸 것이고, 그림 3.74는 항복하중강도 분석결과를 나타낸다.

표 3.25 복합 보강지반(ES-CM-h0) 평판재하시험 결과

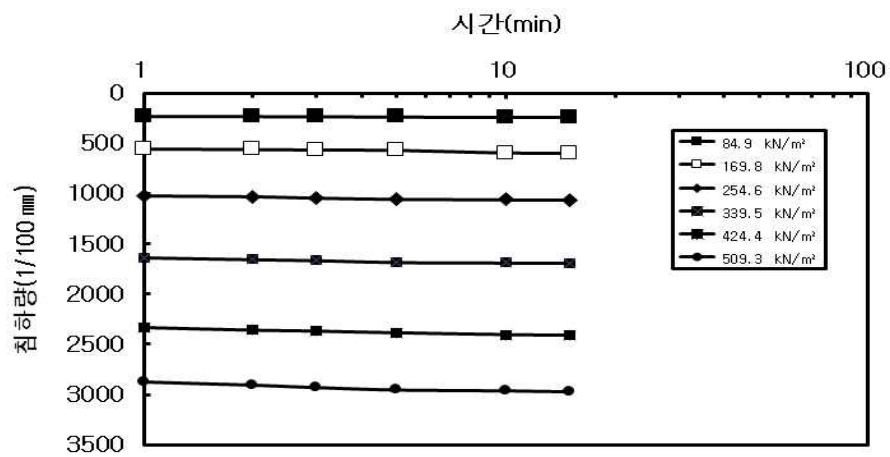
단계	하중	하중강도	시간	침하량(1/100 mm)		
(step)	(kN)	(kN/m ²)	(min)	좌	우	평균
1	6	84.9	1	219	243	231
			2	221	245	233
			3	222	246	234
			5	224	249	237
			10	227	251	239
			15	227	251	239
2	12	169.8	1	530	582	556
			2	535	588	562
			3	539	592	566
			5	543	597	570
			10	567	624	596
			15	570	628	599
3	18	254.6	1	966	1076	1021
			2	979	1080	1030
			3	986	1097	1042
			5	997	1108	1053
			10	1001	1113	1057
			15	1004	1116	1060
4	24	339.5	1	1560	1710	1635
			2	1580	1727	1654
			3	1591	1736	1664
			5	1614	1751	1683
			10	1618	1758	1688
			15	1618	1763	1691
5	30	424.4	1	2282	2384	2333
			2	2307	2410	2359
			3	2318	2419	2369
			5	2333	2437	2385
			10	2354	2453	2404
			15	2359	2461	2410
6	36	509.3	1	2824	2929	2877
			2	2856	2956	2906
			3	2880	2976	2928
			5	2904	2997	2951
			10	2912	3004	2958
			15	2920	3014	2967



(a) P-S 곡선



(b) LogP-LogS 곡선



(c) S-Logt 곡선

그림 3.74 복합 보강지반(표면) 항복하중강도 산정 결과

표 3.26은 표면에 팽창매트와 시멘트매트로 복합 보강된 함몰지반의 허용지지력 산정 결과를 나타낸 것이다. 평판재하시험 시 최대 시험 하중강도, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도를 안전율 3으로 나누어 계산하고, 응력, 침하량, 시간과의 관계를 통해 항복하중강도를 안전율 2로 나누어 허용지지력을 계산하였다. 최대 시험 하중강도는 509.3kPa이고, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도는 나타나지 않았으며, 허용지지력은 각각 169.8kPa이다. 항복하중강도는 확인할 수 없었으며, 허용지지력은 최대시험하중강도 일 때 169.8kPa이고 이때의 침하량은 29.67mm이다.

표 3.26 복합 보강지반(ES-CM-h0) 허용지지력 산정 결과

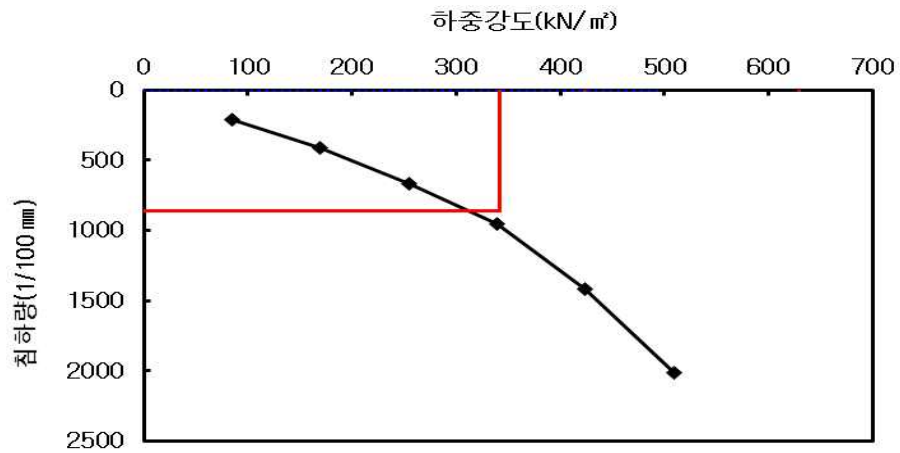
구분		하중강도	안전율	지지력	침하량
		(kN/m ²)	(F.S)	(kN/m ²)	(mm)
최대 시험 하중강도		509.3	3	169.8	29.67
재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도		—	3	—	30.00
항복 하중강도	P - S	—	2	—	(가정) 항복 하중강도시 침하량(mm) 0
	log P - log S	—	2	—	
	S - log t	—	2	—	

(나) 시멘트매트 보강지반(EP-CM-h10)

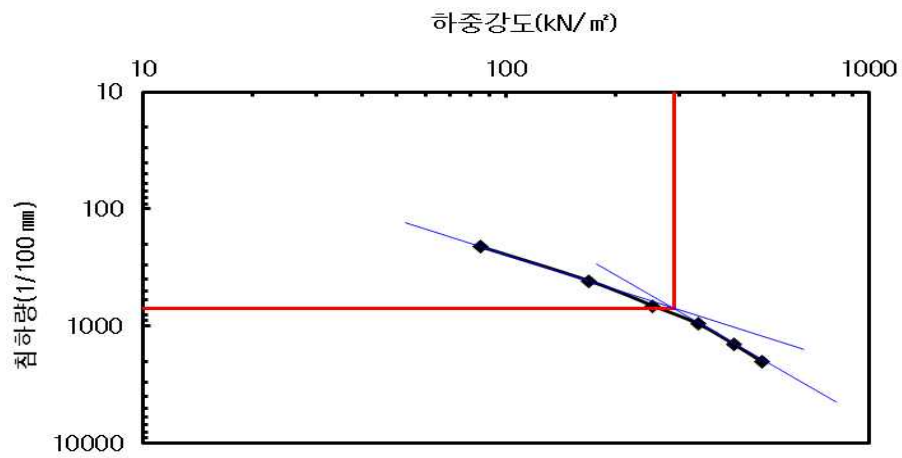
표 3.27은 표면에서 10cm아래 팽창매트와 시멘트매트 복합 보강지반의 지지력시험 결과를 나타낸 것이고, 그림 3.75는 항복하중강도 분석결과를 나타낸다.

표 3.27 복합 보강지반(ES-CM-h10) 평판재하시험 결과

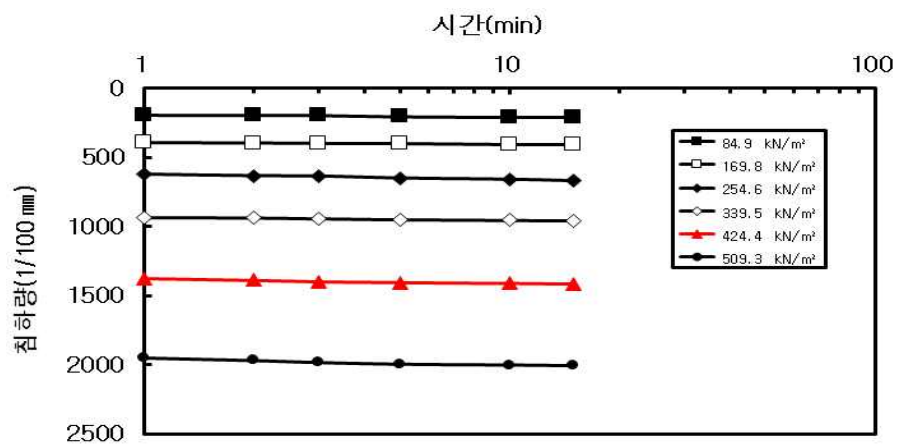
단계	하중	하중강도	시간	침하량(1/100 mm)		
(step)	(kN)	(kN/m ²)	(min)	좌	우	평균
1	6	84.9	1	197	187	192
			2	199	188	194
			3	200	189	195
			5	209	200	205
			10	215	203	209
			15	215	203	209
2	12	169.8	1	404	381	393
			2	407	385	396
			3	410	388	399
			5	413	390	402
			10	421	397	409
			15	423	398	411
3	18	254.6	1	631	609	620
			2	637	626	632
			3	640	628	634
			5	655	643	649
			10	665	653	659
			15	685	656	671
4	24	339.5	1	904	961	933
			2	907	964	936
			3	913	969	941
			5	918	977	948
			10	923	982	953
			15	926	985	956
5	30	424.4	1	1345	1400	1373
			2	1360	1415	1388
			3	1371	1425	1398
			5	1378	1433	1406
			10	1384	1439	1412
			15	1389	1444	1417
6	36	509.3	1	1975	1926	1951
			2	1991	1951	1971
			3	2009	1963	1986
			5	2022	1976	1999
			10	2028	1983	2006
			15	2033	1989	2011



(a) P-S 곡선



(b) LogP-LogS 곡선



(c) S-Logt 곡선

그림 3.75 복합 보강지반(h10) 항복하중강도 산정 결과

표 3.28는 지면 10cm아래 팽창매트와 시멘트매트로 복합 보강된 함몰지반의 허용지지력 산정 결과를 나타낸 것이다. 평판재하시험 시 최대 시험 하중강도, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도를 안전율 3으로 나누어 계산하고, 응력, 침하량, 시간과의 관계를 통해 항복하중강도를 안전율 2로 나누어 허용지지력을 계산하였다. 최대 시험 하중강도는 509.3Pa로 나타나 허용지지력은 각각 169.8kPa이다. 항복하중강도는 P-S 곡선, LogP-LogS, S-Logt에 의한 하중강도 값을 확인 할 수 있었으며, 하중강도는 각각 342kPa, 290kPa, 424.4kPa이고, 이 때 허용지지력은 171kPa, 145kPa, 212.2kPa 이다. 허용지지력 산정결과 최소값은 LogP-LogS 곡선에 나타나며 허용지지력은 145kPa로 산정되었다.

표 3.28 복합 보강지반(ES-CM-h10) 허용지지력 산정 결과

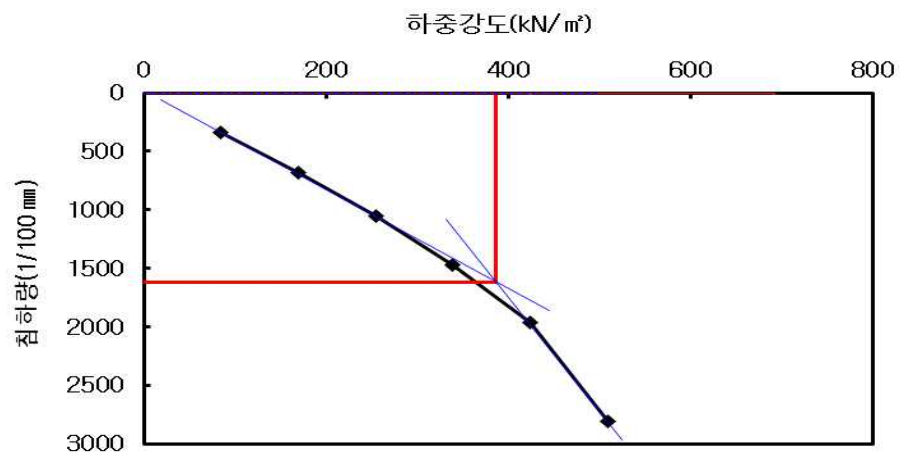
구분		하중강도	안전율	지지력	침하량
		(kN/m ²)	(F.S)	(kN/m ²)	(mm)
최대 시험 하중강도		509.3	3	169.8	20.11mm
재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도		—	3	—	30.00
항복 하중강도	P - S	342.0	2	171.0	(가정) 항복 하중강도시 침하량(mm) 7.00
	log P - log S	290.0	2	145.0	
	S - log t	424.4	2	212.2	

(다) 시멘트매트 보강지반(ES-CM-h20)

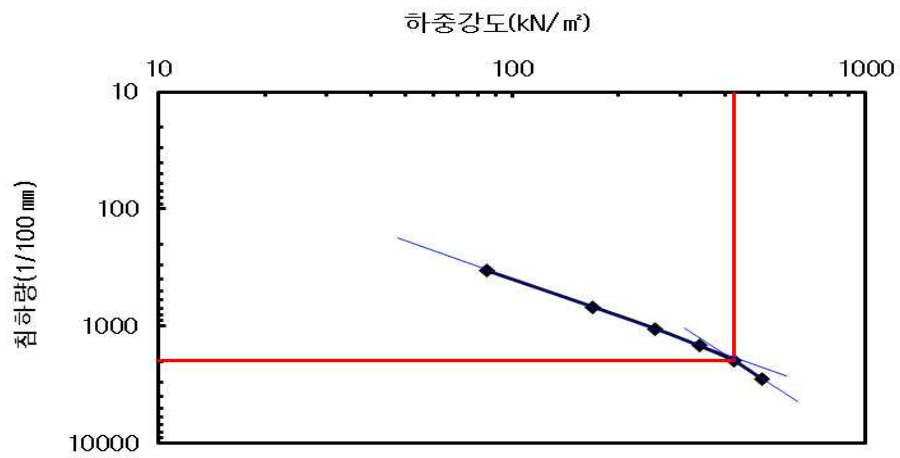
표 3.29는 표면에서 20cm아래 시멘트매트 보강지반의 지지력시험 결과를 나타낸 것이고, 그림 3.76은 항복하중강도 분석결과를 나타낸다.

표 3.29 복합 보강지반(ES-CM-h20) 평판재하시험 결과

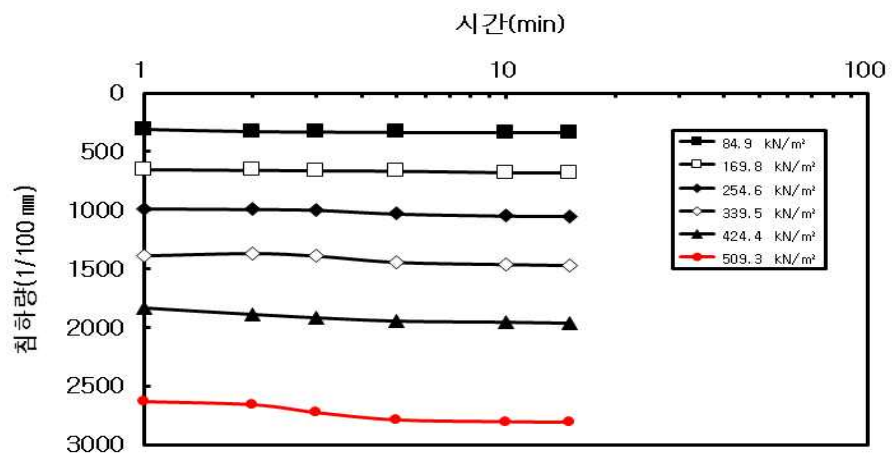
단계	하중	하중강도	시간	침하량(1/100 mm)		
(step)	(kN)	(kN/m ²)	(min)	좌	우	평균
1	6	84.9	1	307	308	308
			2	324	327	326
			3	327	333	330
			5	330	336	333
			10	332	338	335
			15	332	338	335
2	12	169.8	1	638	661	650
			2	645	667	656
			3	649	673	661
			5	654	677	666
			10	667	694	681
			15	672	696	684
3	18	254.6	1	964	1007	986
			2	970	1012	991
			3	976	1019	998
			5	1005	1053	1029
			10	1023	1068	1046
			15	1027	1071	1049
4	24	339.5	1	1383	1393	1388
			2	1344	1397	1371
			3	1365	1417	1391
			5	1417	1466	1442
			10	1431	1487	1459
			15	1439	1494	1467
5	30	424.4	1	1801	1864	1833
			2	1851	1924	1888
			3	1883	1950	1917
			5	1913	1977	1945
			10	1924	1986	1955
			15	1933	1994	1964
6	36	509.3	1	2599	2669	2634
			2	2626	2694	2660
			3	2691	2762	2727
			5	2751	2824	2788
			10	2766	2839	2803
			15	2772	2844	2808



(a) P-S 곡선



(b) LogP-LogS 곡선



(c) S-Logt 곡선

그림 3.76 복합 보강지반(h20) 항복하중강도 산정 결과

표 3.30은 지면 20cm아래 팽창매트와 시멘트매트로 복합 보강된 함몰지반의 허용지지력 산정 결과를 나타낸 것이다. 평판재하시험 시 최대 시험 하중강도, 재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도를 안전율 3으로 나누어 계산하고, 응력, 침하량, 시간과의 관계를 통해 항복하중강도를 안전율 2로 나누어 허용지지력을 계산하였다. 최대 시험 하중강도는 509.3Pa로 나타나 허용지지력은 각각 169.8kPa이다. 항복하중강도는 P-S 곡선, LogP-LogS, S-Logt에 의한 하중강도 값을 확인 할 수 있었으며, 하중강도는 각각 387kPa, 424.4kPa, 509.3kPa이고, 이 때 허용지지력은 193.5kPa, 212.2kPa, 254.6kPa 이다. 허용지지력 산정결과 최소값은 P-S 곡선에 나타나며 허용지지력은 193.5kPa로 산정되었다.

표 3.30 복합 보강지반(ES-CM-h20) 허용지지력 산정 결과

구분		하중강도	안전율	지지력	침하량
		(kN/m ²)	(F.S)	(kN/m ²)	(mm)
최대 시험 하중강도		509.3	3	169.8	28.08
재하판 직경 10% 침하량에 대응하는 하중강도		—	3	—	30.00
항복 하중강도	P - S	387.0	2	193.5	(가정) 항복 하중강도시 침하량(mm) 16.20
	log P - log S	424.4	2	212.2	
	S - log t	509.3	2	254.6	

(6) 팽창매트와 시멘트매트 복합 보강 지지력 시험 결과

표 3.31은 원지반과 보강지반의 평판재하시험 결과를 나타낸 것으로서 재하된 최대응력과 이 때 발생한 최종침하량을 나타내고, 그림 3.77~그림 3.79은 응력과 침하량의 관계를 도시한 것이다. 평판재하시 최대 응력, 평판지름의 10%변위에 대응하는 응력, P-S 곡선, LogP-LogS 곡선, S-Logt 곡선 등의 방법으로 허용지지력을 산정하였다.

그림 3.77은 지반함몰 지반에 팽창매트로 보강하였을 때, 응력과 침하량의 관계를 도시한 것이다. 팽창매트를 표면에 보강하였을 경우, 동일한 응력조건에서 원지반보다 약 4mm정도 침하량이 작게 나타났으나, 응력-변위곡선의 관계에서 크게 차이 나지 않는 것으로 분석된다. 팽창매트를 각각 지표로부터 10cm, 20cm 아래에 보강하였을 경우, 339kPa의 응력조건에서 원지반 대비 약 30%~34%의 침하량이 발생하여 보강효과가 나타나는 것으로 분석된다. 결과적으로 팽창매트를 표면에 보강하였을 때, 약간의 보강효과는 발생하지만 큰 차이는 나지 않으며, 보강깊이가 10cm이상인 경우 그 효과는 현저한 것으로 분석된다. 원지반과 팽창매트를 표면에 보강하였을 때, 지지력에 크게 차이가 나지 않는 것은 평판의 크기가 팽창매트의 크기보다 크기 때문에 그대로 팽창매트가 관입하고, 팽창매트가 관입하는 것은 팽창매트의 강성이 지반의 강성보다 크기 때문에 팽창매트 자체에서 변형이 크게 발생하지 않고 팽창매트 바로 하부 지반에서 변형이 일어나 지반의 침하가 발생하기 때문인 것으로 사료된다.

그림 3.78은 지반함몰 지반에 시멘트매트를 보강하였을 때, 응력과 침하량의 관계를 도시한 것이다. 함몰지반 표면과 표면으로부터 10cm, 20cm 아래의 깊이에 시멘트매트를 보강한 경우, 339kPa의 동일 응력조건에서 원지반 대비 약 10%~18%의 침하량이 발생한 것으로 나타났다. 콘크리트 매트를 표면에 보강하였을 때의 침하량이 가장 크게 나타났으나, 그 크기는 5mm이하로 나타나 발생한 침하량의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 시멘트매트로 보강하였을 때, 같은 응력 조건에서 침하량이 더 작게 나타나는 것은, 매트의 크기가 평판의 크기보다 더 커서 지반과 닿는 접지면적이 늘어나고, 접지면적의 증가로 인해 상부에서 발생하는 하중을 분산시켜주는 역할을 하기 때문인 것으로 사료된다. 또한 시멘트매트의 설치가 깊어질수록 상부에서 발생하는 응력은 분산되어 시멘트매트에 작용하기 때문에 최종적으로 발생하는 침하하는 표면에 보강하였을 때보다 지반아래에 보강되었을 때 변위가 더 작게 나타나는 것으로 판단된다.

그림 3.79는 지반함몰 지반에 팽창매트와 시멘트매트를 복합적으로 사용하여 보강하였을 때, 응력과 침하량의 관계를 도시한 것이다. 표면에 복합 보강하였을 때, 339kPa의 동일 응력 조건에서 원지반 대비 약 29%~51%의 침하량이 발생한 것으로 나타났다. 표면에 복합 보강하였을 때와 10cm아래에 보강하였을 최대 응력조건에서 발생한 침하량은 비슷하며, 팽창매트만으로 보강하였을 때보다 콘크리트 매트를 함께 적용하였을 때 침하량이 더 작은 것으로 분석되었다. 팽창매트만을 이용하여 보강하였을 때보다 복합 보강하였을 때 침하량이 더 작게 나타나는 것은 팽창매트 상부에 시멘트매트가 설치됨에 따라 고르게 응력을 분산시키기 때문인 것으로 사료된다.

표 3.31 보강지반의 극한지지력과 허용지지력

구분		보강방법	최대 응력 (kPa)	최대 침하량 (mm)	허용 지지력 (kPa)	허용지지력 산정시 침하량 (mm)	허용지지력 평가방법
1	원지반	원지반	339.5	32.61	106.5	9.66	P-S 곡선
2	ES-h0	팽창매트	424.4	39.87	100.5	10.88	P-S 곡선
3	ES-h10	팽창매트	509.3	36.46	159.3	30	재하판 직경 10% 침하량 대응
4	ES-h20	팽창매트	509.3	35.34	137.5	4.70	LogP-LogS
5	CM-h0	시멘트매트	509.3	9.13	169.8	9.63	최대 시험 하중강도
6	CM-h10	시멘트매트	509.3	4.68	169.8	4.68	최대 시험 하중강도
7	CM-h20	시멘트매트	509.3	5.20	169.8	5.20	최대 시험 하중강도
8	ES-CM-h0	복합보강	509.3	29.67	169.8	29.67	최대 시험 하중강도
9	ES-CM-h10	복합보강	509.3	20.11	145	7	LogP-LogS
10	ES-CM-h20	복합보강	509.3	28.08	193.5	16.20	P-S 곡선

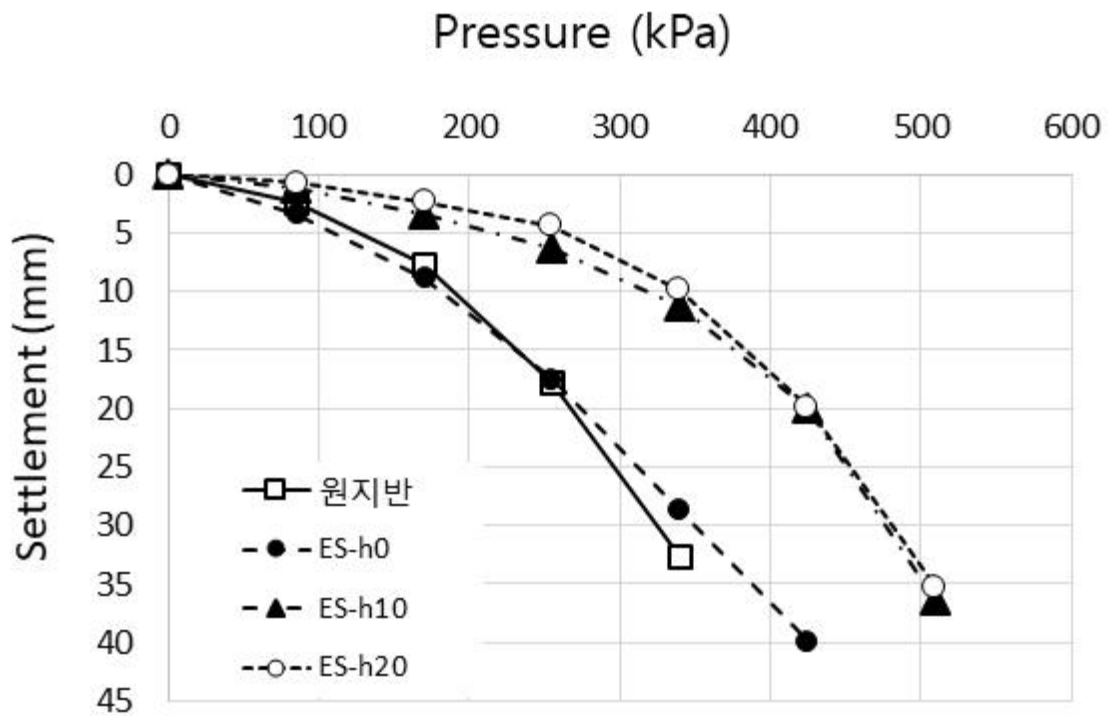


그림 3.77 팽창매트 보강지반의 응력-침하 곡선

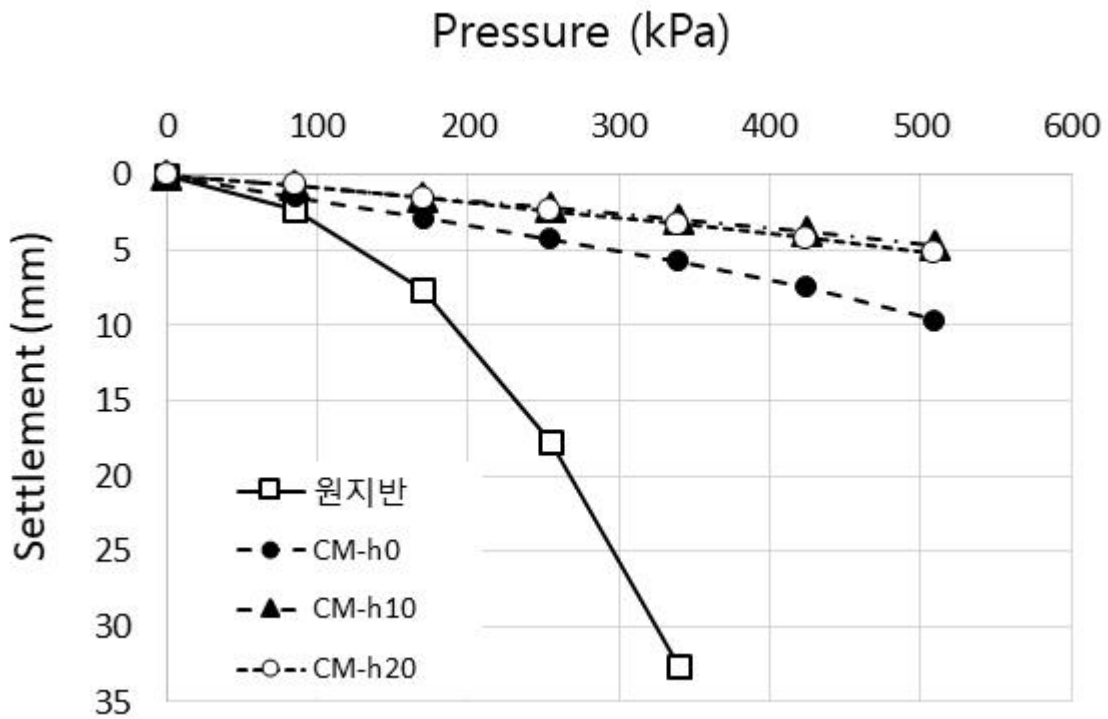


그림 3.78 시멘트매트 보강지반의 응력-침하 곡선

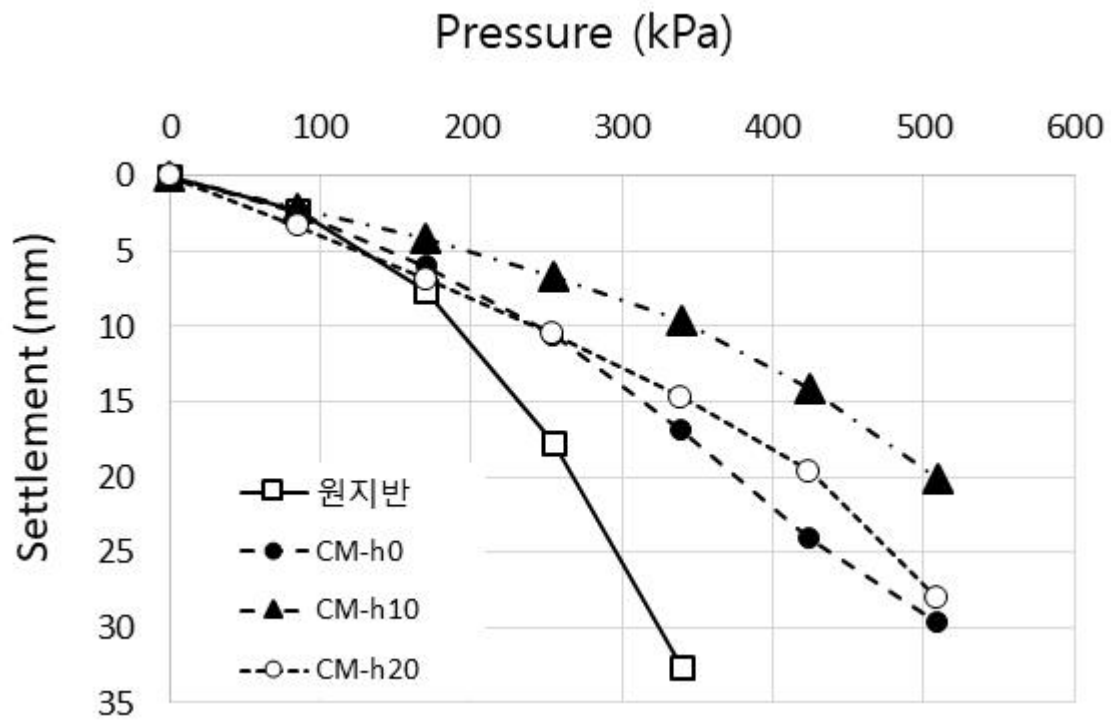


그림 3.79 복합 보강지반의 응력-침하 곡선

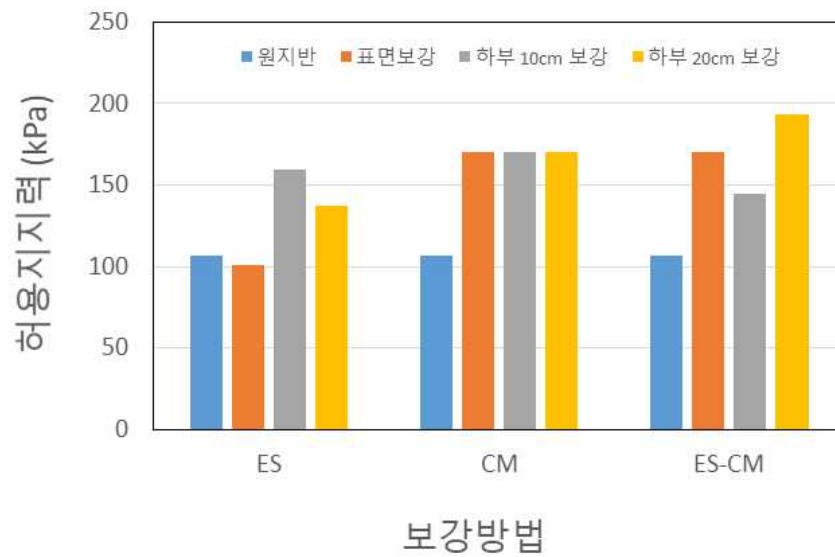


그림 3.80 보강방법별 허용지지력 산정 결과

제 3절 복구된 공동의 유지관리를 위한 표지 및 탐지물질

1. 표지기술의 기능성 평가

가. 탐지태깅 성능 평가

- (1) 1.00m의 원형 아크릴통(그림 3.81)에 RFID 태그를 넣고 0.25m 단위로 토사, 표준사, 토사+표준사, 자갈을 채워서 현장 상태를 구현.
- (2) 리더기를 통해 모든 매설깊이에서 수신이 가능한 매질은 표준사, 토사+표준사, 자갈이었으며, 토사의 경우 0.75m이상에서 수신이 불가.
- (3) 토사의 경우 표준사, 자갈 보다는 입자가 가늘고 밀실하여 수신 방해가 다른 매질보다 컸다고 사료.
- (4) 또한, 실제 포장층에 대한 평가가 필요함에 따라 보도블럭 및 아스팔트블럭을 이용하여 수신율을 확인.
- (5) 표 3.32는 매질 및 매설깊이에 따른 수신가능 여부를 나타냄.

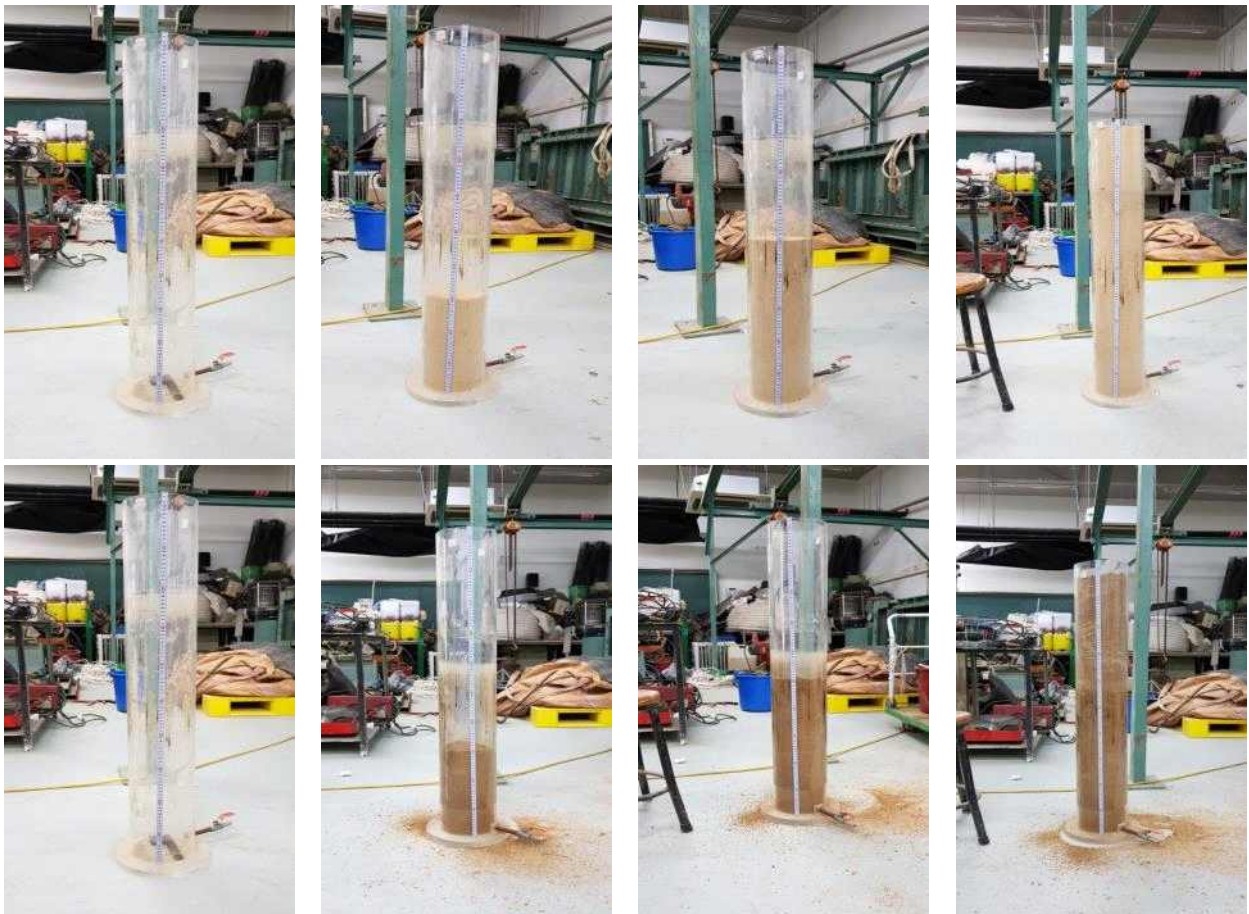


그림 3.81 탐지태깅성능 테스트용 원형 아크릴통의 매설깊이 표현

표 3.32 매질 및 매설깊이에 따른 수신가능 여부

매질 \ 매설깊이 (m)	0.25	0.5	0.75	1.00
토사	○	○	×	×
표준사	○	○	○	○
토사+표준사 (25:75)	○	○	○	○
토사+표준사 (50:50)	○	○	○	○
토사+표준사 (25:75)	○	○	○	×
자갈	○	○	○	○
자갈+토사 (25:75)	○	○	○	×
자갈+토사 (50:50)	○	○	○	○
자갈+토사 (75:25)	○	○	○	○
자갈+표준사 (25:75)	○	○	○	○
자갈+표준사 (50:50)	○	○	○	○
자갈+표준사 (75:25)	○	○	○	○
표준사+보도블럭	○	○	○	×
토사+보도블럭	○	○	×	×
자갈+보도블럭	○	○	○	○
표준사+아스팔트블럭	○	○	○	×
토사+아스팔트블럭	○	○	×	×
자갈+아스팔트블럭	○	○	○	○

나. 탐지물질의 적용성 평가

(1) 탐지물질의 종류 및 특성

(가) EMI 시트

본 연구에서 사용한 EMI 시트는 고주파와 저주파 모두를 차단하는 전자파차단 종이형 벽지이다. 이 벽지는 베이스 금속위에 금속합금 물질을 끼얹은 것 같이 구성되어 있기 때문에 높은 증기 투과성을 갖는다. 또한 높은 인장강도와 우수한 전자파 차단율을 보이며, 오직 공기와 금속만으로 코팅을 하기 때문에 기존의 구리와 니켈을 적층하기 위해 화학적 처리를 한 기존 제품보다는 친환경적이므로 지반 탐사 시험을 진행하기에 적합한 재료로 판단하였다. EMI 시트의 특징은 표 3.33과 같다.

(나) EMI 페인트

본 연구에서 사용한 EMI 페인트는 저주파 전기장, 고주파 차단용 페인트이다. 이 페인트는 동결저항성이 있어, 운반 보관 등 우리나라 환경에 적합한 제품이다. 또한, 시공 후 냄새가 약한 편이며, 거의 모든 유화 페인트, 벽지, 석고, 시멘트, 보드, 석재, 나무위에 시공이 가능하다. EMI 페인트의 특징은 표 3.34와 같다.

(다) 페로니켈 슬래그

페로니켈은 니켈(20%)과 철(80%)을 용융해 만든 알갱이 모양의 스테인리스의 주원료이다. 페로니켈슬래그는 페로니켈의 용해 및 제련 시에 발생하는 부산물로서 니켈 1톤을 생산 시 약 30톤의 페로니켈슬래그가 발생된다. 국내에서는 S사가 연간 3만톤 규모의 니켈공장을 운영하고 있다. 또한 2012년부터 연간 7만 5000톤 생산규모의 새로운 페로니켈 제련공장을 설립하기로 예정됨으로써 페로니켈 생산 시 부산물로 발생하는 페로니켈슬래그의 발생량은 더욱 더 증가할 것으로 예상된다. 페로니켈슬래그의 화학 성분은 이산화규소 및 산화마그네슘이 주를 이루고 있으며 그 뒤로 산화철, 산화알루미늄 및 산화칼슘 등을 함유하고 있다. 규소, 마그네슘 성분을 다량으로 함유하고 있어 사문암 대체재, 토목용 골재 등으로 재활용되고 있다. 표 3.35는 페로니켈슬래그의 구성 성분에 따른 함유량이다.

페로니켈슬래그 잔골재의 화학적 조성은 실리카 및 산화마그네슘의 함량이 비교적 많으며 철분이 약 5~7%정도 함유되어 있기 때문에 일반 잔골재와 비교하여 비중이 큰 특징이 있다(Jung, 2006). 또한 용융된 슬래그를 냉각과정에서 급랭시키면 비산된 슬래그는 표면장력에 의해 구형에 가까운 입형의 잔골재로 만들어진다(조성현 등, 2005). 이러한 특징으로 콘크리트에 페로니켈 슬래그 잔골재를 치환하면 골재와의 접촉면에서 볼 베어링 효과와 말찰저항 감소로 인하여 유동성이 향상되며, 낮은 흡수율로 인한 잉여수량이 페이스트로 공급되기 때문에 콘크리트의 단위수량을 줄일 수 있다(Choi, 1996).

표 3.33 EMI시트의 특징

구분	특징
색상	회색
폭	1M, 롤 20~100M
중량	190g/m ²
두께	0.2mm
인장강도	2.7~4.4kN/m
표면전도성	0.04Ohm
접지	접지도구로 접지가능
시험기준	ASTM D4935-10, IEEE Std 299-2006, IEEEE Std 1128-1998, ASTMA698/A698M-07
제조원 및 시험원	독일 YSHIELD

표 3.34 EMI 페인트의 특징

구분	특징
색상	검정
성분	Pure acylic dispersion, graphite, water, carbon black, additives, preservative (MIT,BIT)
바인더	고품질의 Pure acrylic binder
특징	통기성이 있으며, Solvent 미함유
접지	접지도구로 접지가능
시험기준	ASTM D4935-10, IEEE Std 299-2006, IEEEE Std 1128-1998, ASTMA698/A698M-07
제조원 및 시험원	독일 YSHIELD

표 3.35 페로니켈 슬래그의 화학적 특성

구성물	함유량(%)
SiO ₂	53.45
MgO	35.50
FeO	4.50
Al ₂ O ₃	1.45
CaO	0.65

2. 탐지물질을 적용한 현장 GPR탐사

가. 현장부지의 토질특성

어떤 물질에 전기장이 가해졌을 때 물질이 전하를 저장할 수 있는 정도를 표현하는 용어는 유전율(permittivity)이다. SI 단위계에서 물질의 유전율 ϵ 와 자유공간에서의 유전율 ϵ_0 의 비를 상대 유전율(relative permittivity)이라 하며 이를 유전상수로 정의한다(헌병구, 1995). 일반적으로 흙의 분류는 입자의 크기, 액·소성한계, 비중 등 흙 고유의 물리적 특성에 따라 국내에서는 통일분류법으로 흙을 분류한다. 대상지반의 유전율은 흙의 종류, 함수비, 다짐도에 특성에 따라 상이하게 나타나며 GPR탐사에 영향을 미친다. 박상규(1998)는 모형실험과 토질시험을 통해 SW, SP, SM으로 분류되는 흙에 대하여 12%내외의 함수비 조건에서 유전상수는 각각 11.9, 11.1, 8.6으로 보고한바 있다. 또한 이 흙의 상대다짐도는 88%~95%의 범위이다. 따라서 본 연구에서는 GPR탐사 현장부지의 흙을 채취하여 비중, 입도분포, 애터버그한계, 다짐시험 등을 수행하여 기본적인 물리적 특성을 분석하였다. 그림 3.82 (a)는 사용한 흙의 전경, 그림 3.82 (b)는 비중시험(KS F 2308), 그림 3.82 (c)는 체분석(KS F 2302), 그림 81 (d)는 비중계분석(KS F 2303), 그림 3.82 (e)는 애터버그한계 시험(KS F 2303), 그림 3.82 (f)는 다짐시험(KS F 2312)의 전경을 나타낸 것으로 한국산업규격(KS F)에 따라 수행하였다. 비중은 같은 부피의 물의 무게와 흙의 무게의 비를 의미하며 값의 범위는 대부분 2.6~2.9이다. 현장 흙 시료 비중의 산술평균값은 약 2.67의 값을 갖으며 실트질 혹은 점토질이 포함된 흙의 특성을 나타낸다.



(a) 사용 흙 시료 전경



(b) 비중시험(KS F 2308)



(c) 체분석 (KS F 2302)



(d) 비중계분석 (KS F 2303)



(e) 애터버그한계 시험 (KS F 2303)



(f) 다짐시험(KS F 2312)

그림 3.82 흙의 물리 및 역학적 특성 시험

그림 3.83 (a)는 체분석과 비중계분석에 의한 입도분포곡선을 나타낸다. 일반적으로 흙은 조립토와 세립토로 구분하며 조립토는 자갈질, 모래질, 세립토는 실트질, 점토질로 다시 구분된다. 4.75mm(#No.4)이상의 흙 입자는 자갈질(G), 4.75mm(#No.4)~0.075mm(#No.200)의 사이의 흙 입자는 모래질(S), 0.075mm(#No.200)이하의 입자를 실트질(M) 혹은 점토질(C)의 흙으로 분류한다. 실트질과 점토질의 구분은 보통 0.002mm~0.005mm이다.

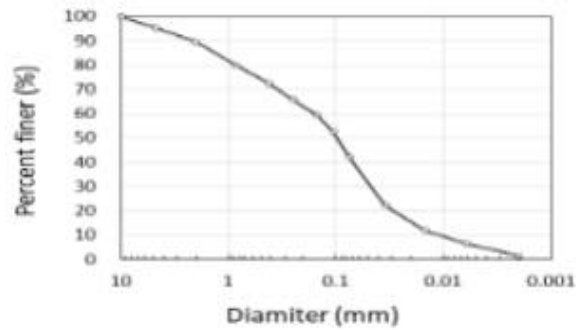
현장 채취한 흙 시료는 자갈질 5%, 모래질 53%, 실트질 및 점토질은 42%로 구성되어있다. 흙 시료의 No.200체의 통과율은 12%이상 50% 미만이므로 공학적 특성에 의한 분류를 하려면 액성한계 및 소성한계 시험결과가 필요하다.

액성한계와 소성한계의 시험결과는 각각 25.5%, 4.2%로서 소성지수는 4.2%로서 그림 3.83 (b)의 소성도표에서는 A선 아래에 위치하게 된다. 따라서 이 흙은 No.200체 통과량이 12% 이상 50%이하이고, 소성지수가 4.2%로 5%보다 낮으므로 흙의 분류법에 의해 실트질모래(SM)로 분류할 수 있다.

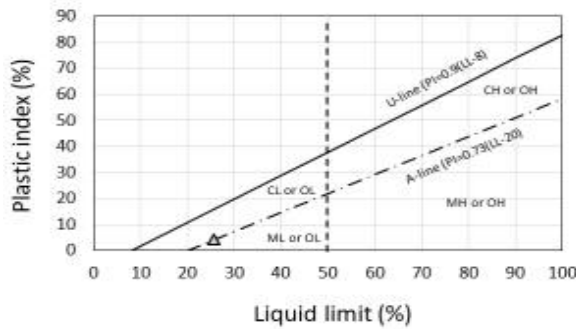
그림 3.83 (c)는 다짐시험결과를 나타낸다. 최적함수비는 약 11%이고, 최대건조단위중량은 19.3kN/m³으로 나타났다. 또한 들밀도 시험결과 현장의 상대다짐도는 약 85%인 것으로 나타났다. 표 3.36은 현장에서 채취한 흙의 물리적 특성시험의 결과를 요약해서 나타낸 것이다.

표 3.36 현장채취 흙 시료의 물성시험 결과

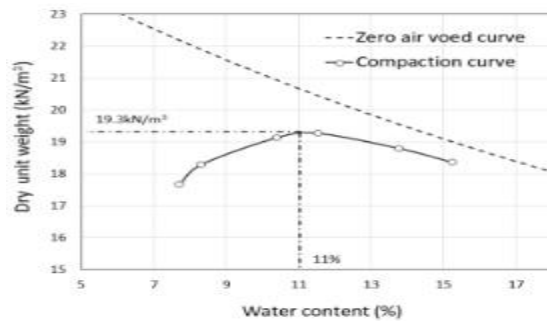
구분	자연함수비 (w _n)	비중 (G _s)	입도분포	액터버그한계 (%)		다짐시험		USCS
			200체 통과율	LL	PI	w _{opt} (%)	γ _d (max) (kN/m ³)	
현장 시료	12.4%	2.68	42%	25.5	4.2	11	19.3	SM



(a) 입도분포곡선



(b) 애터버그한계



(c) 다짐시험

그림 3.83 현장시료의 토질시험 결과

나. GPR 탐사방법

이 연구에서는 복구된 공동이나 지하매설물의 위치를 표적하기 위해 대상지반의 지중에 탐지물질을 매설하고 GPR탐사 장비를 이용하여 탐지성능을 확인하였다. 지중에 매설한 탐지물질은 EMI시트, EMI 페인트, 페로니켈 슬래그로서 그림 3.84에서 나타낸 바와 같이 (ES), (EP), (FNS)구역으로 구분하였다. 각 구역의 가로방향은 15m, 세로방향은 2m이다. 그림 82에서 (1)과 (2)는 탐지물질의 크기를 나타내며 (1)의 경우 250mm×250mm, (2)의 경우 500mm×500mm의 크기로 구분하였다. 그림 3.84에서 (D25), (D50), (D100)물질은 탐지물질이 매설된 깊이를 나타내며, 각각 250mm, 500mm, 1000mm를 의미한다. 예를 들어 (ES)-(1)-(50D)는 500mm깊이에 매설되어 있는 250mm×250mm,크기의 EMI 시트를 의미한다. 각각의 물질별 탐지 Case는 표 3.37과 같이 나타내었다.

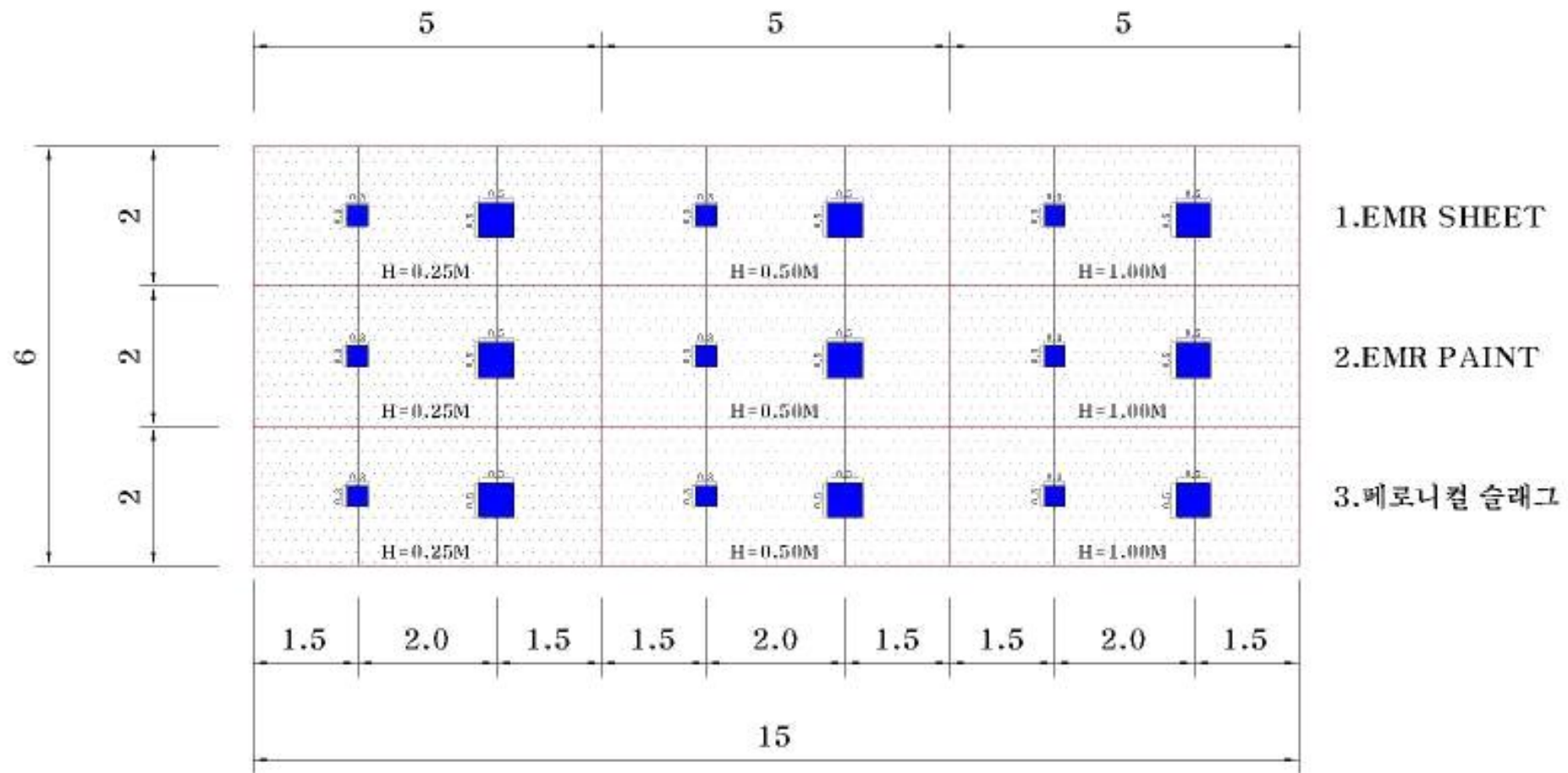


그림 3.84 현장부지의 GPR탐사 개요도

표 3.37 현장부지 GPR 탐사 Case

탐사 Case	탐지물질			탐지물질 크기		탐지 깊이		
	EMI 시트	EMI 페인트	페로 니켈 슬래그	25cm × 25cm	50cm × 50cm	25cm	50cm	100cm
(ES) - (1) - (D25)	●			●		●		
(ES) - (2) - (D25)	●				●	●		
(ES) - (1) - (D50)	●			●			●	
(ES) - (2) - (D50)	●				●		●	
(ES) - (1) - (D100)	●			●				●
(ES) - (2) - (D100)	●				●			●
(EP) - (1) - (D25)		●		●		●		
(EP) - (2) - (D25)		●			●	●		
(EP) - (1) - (D50)		●		●			●	
(EP) - (2) - (D50)		●			●		●	
(EP) - (1) - (D100)		●		●				●
(EP) - (2) - (D100)		●			●			●
(FNS) - (1) - (D25)			●	●		●		
(FNS) - (2) - (D25)			●		●	●		
(FNS) - (1) - (D50)			●	●			●	
(FNS) - (2) - (D50)			●		●		●	
(FNS) - (1) - (D100)			●	●				●
(FNS) - (2) - (D100)			●		●			●

지중에 매설된 탐지물질은 총 3가지의 물질은 선정하였으며 각각 EMI 시트, EMI 페인트, 페로니켈슬래그를 이용하였다. 그림 3.85는 지중에 매설된 각각의 탐지물질을 준비하는 과정을 나타낸 것이다. 그림 3.85 (a)는 EMI 시트를 나타낸 것으로서 시중에 판매되고 있는 기성 제품을 구매하여 실험Case에 맞는 크기로 준비하였다. 그림 3.85 (b)는 EMI 페인트를 나타낸 것으로서 두꺼운 종이의 단면에 EMI 페인트를 덧칠하여 크기별로 구성하였다. 그림 3.85 (c)는 페로니켈슬래그를 나타낸 것으로서 구매한 페로니켈슬래그를 분쇄하여 비닐팩에 넣고 크기별로 구성하였다.

그림 3.86은 현장부지 조성과정을 나타낸 것이다. 먼저 그림 3.86 (a)와 같이 깊이별로 탐지물질을 매설할 위치를 표시하고, 그림 85 (b)와 같이 굴착장비를 이용하여 깊이별로 굴착한다. 그림 3.86 (c) ~ (e)와 같이 25cm, 50cm, 100cm의 깊이에 EMI 시트, EMI 페인트, 페로니켈슬래그 등 탐지물질을 계획 위치에 맞도록 설치하고 VRS측량 장비를 이용하여 각각의 위치를 계측한다. 이후 다시 굴착장비를 이용하여 복토한 후 복토 전 계측한 계측된 좌표를 이용하여 GRP탐사를 수행할 위치를 표시한다. 그림 3.86 (f)는 GPR탐사장비를 이용하여 계측하는 전경을 나타낸 것으로서 각 위치마다 그림 3.86 (g) ~ (h)와 같이 중·횡 방향으로 탐사를 수행한다. 탐사 시 이상신호가 시작되는 지점과 이상신호가 끝나는 지점을 각각의 중·횡방향 별로 표시하여 탐색범위에 대한 길이를 측정하는 것으로서 탐사를 완료한다.



(a) EMI 시트



(b) EMI 페인트



(c) 페로니켈슬래그

그림 3.85 현장에 사용된 탐지물질

다. GPR 탐사 결과 및 분석

(1) 탐지물질의 탐지 성능 분석

GPR 탐사 결과 GPR탐사장비에 의해 탐지가 가능한 물질은 EMI 시트, EMI 페인트, 페로니켈슬래그를 탐지물질로 선정하였다. 페로니켈 슬래그의 경우, 고로슬래그나 제강슬래그보다 철함유량이 높고, 공극에 의해 이상신호가 잡히지 않은 현상을 해결하기 위해 충분한 두께로 포설하였다. GPR탐사는 한 구역에 대하여 각각 종방향, 횡방향으로 구분하여 탐사를 진행하였으며, 각각의 방향에서 이상신호가 시작되는 지점과 이상신호가 끝나는 지점의 폭을 측정하였다. 또한 GPR탐사 시 나타나는 컨투어 뿐만 아니라 이상신호의 강도가 가장 크게 나타나는 탐지물질의 중간부라 판단되는 지점에서의 유전율도 확인하였다. 그림 3.87~그림

3.88은 EMI시트의 매설깊이와 크기별로 종방향과 횡방향의 GPR탐사 결과를 나타내고, 그림 3.89~그림 3.90은 EMI페인트, 그림 3.91~그림 92는 페로니켈슬래그의 탐사결과를 나타낸다.



(a) 부지경계 표시



(b) 탐지물질 매설깊이에 따른 지반 굴착



(c) 25cm깊이 탐지물질 매설



(d) 50cm깊이 탐지물질 매설



(e) 100cm깊이 탐지물질 매설



(f) GPR 탐사 전경



(g) 종방향 탐색 범위 측정



(h) 횡방향 탐색 범위 측정

표 3.86 탐지물질 매설 및 GPR탐사 절차

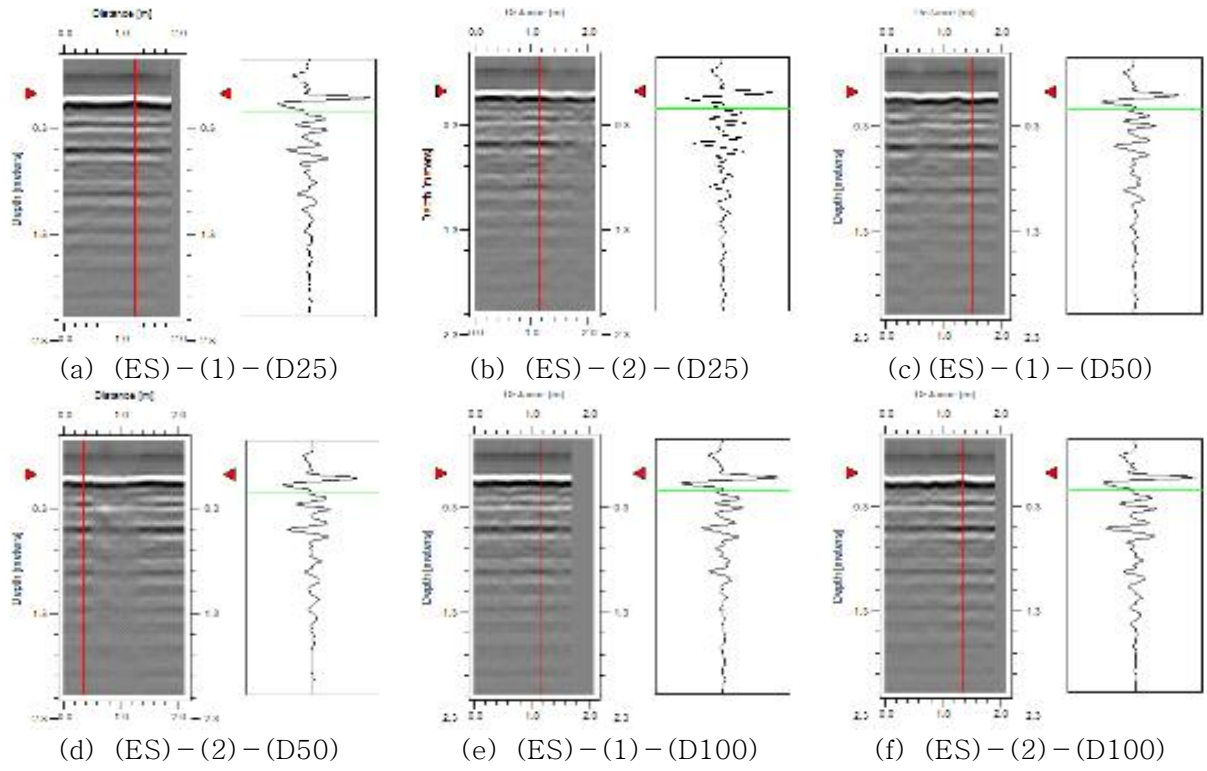


표 3.87 EMI 시트의 종방향 탐사결과

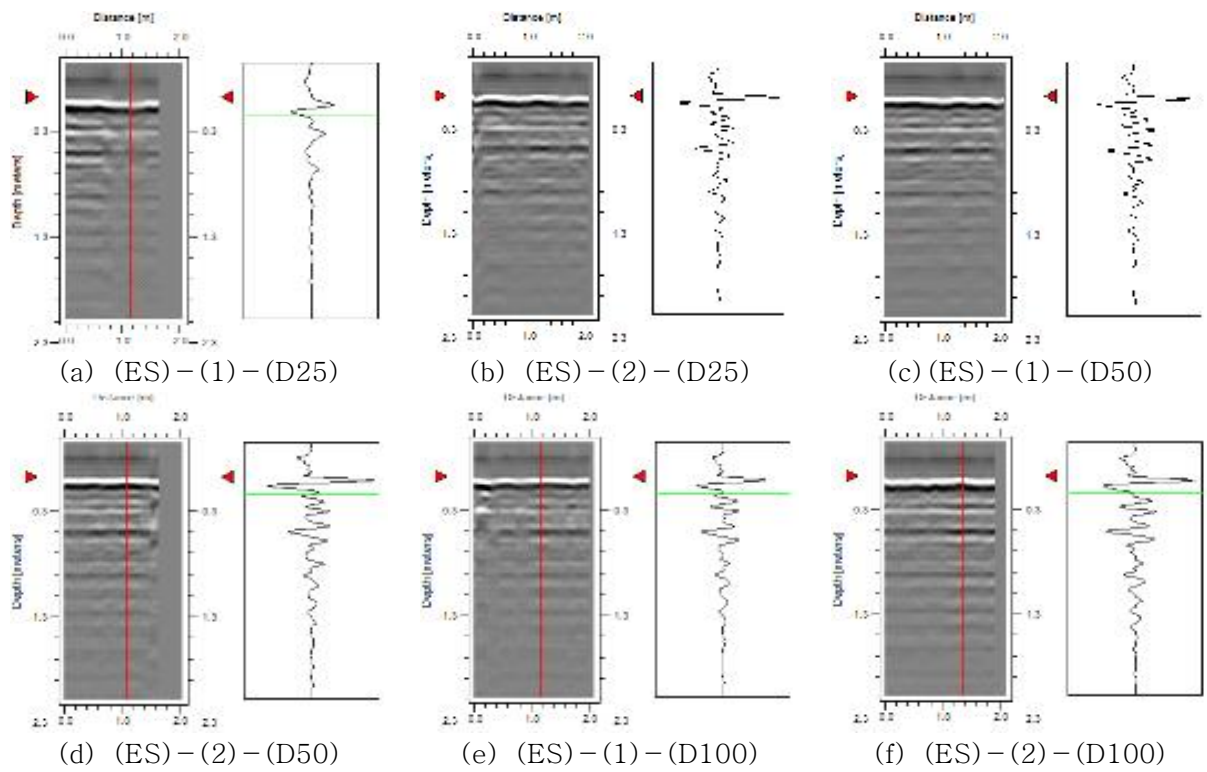


표 3.88 EMI 시트의 횡방향 탐사결과

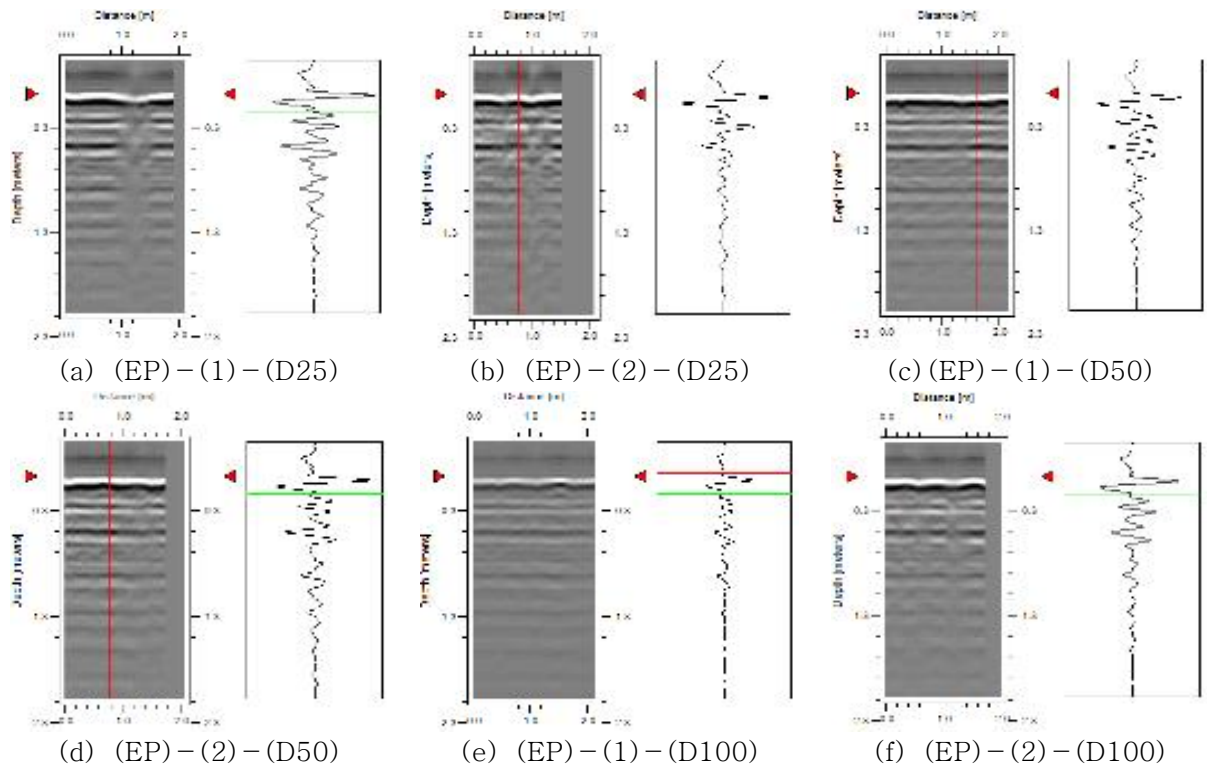


그림 3.89 EMI 페인트의 종방향 탐사결과

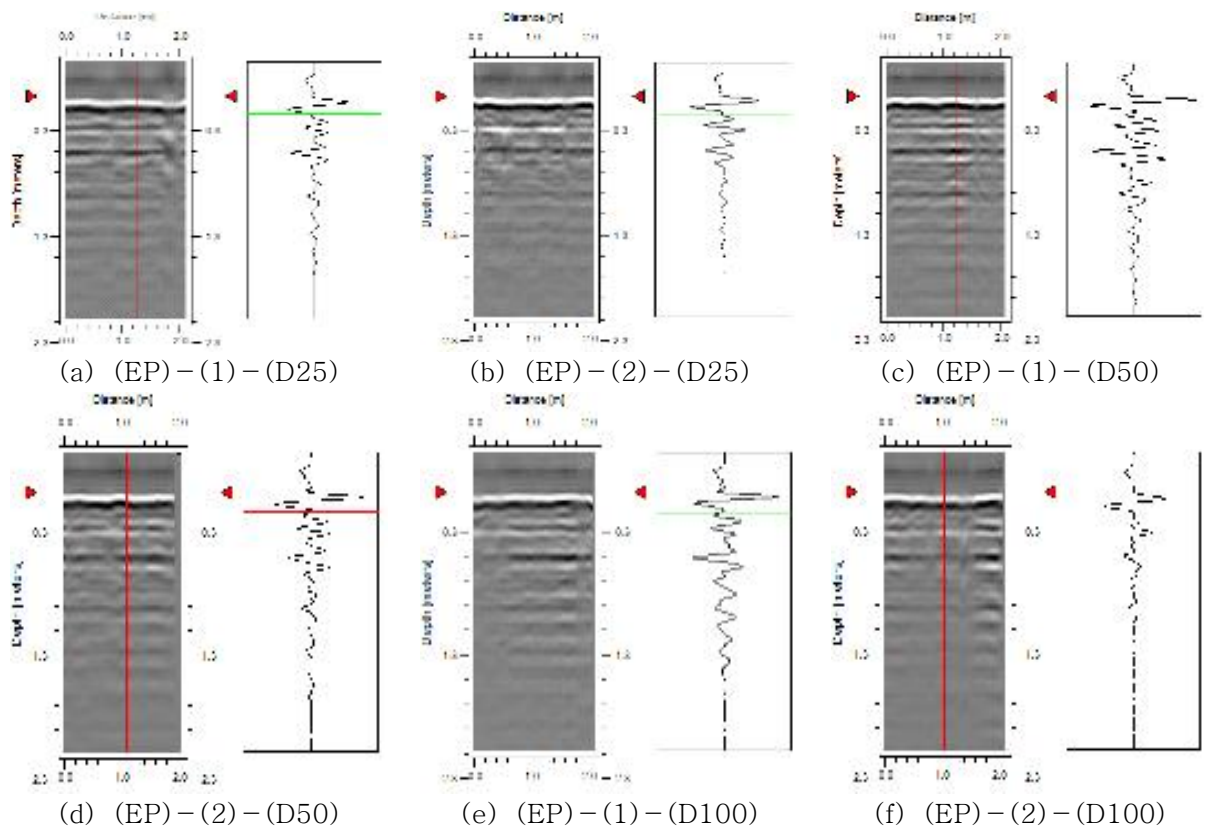


그림 3.90 EMI 페인트의 횡방향 탐사결과

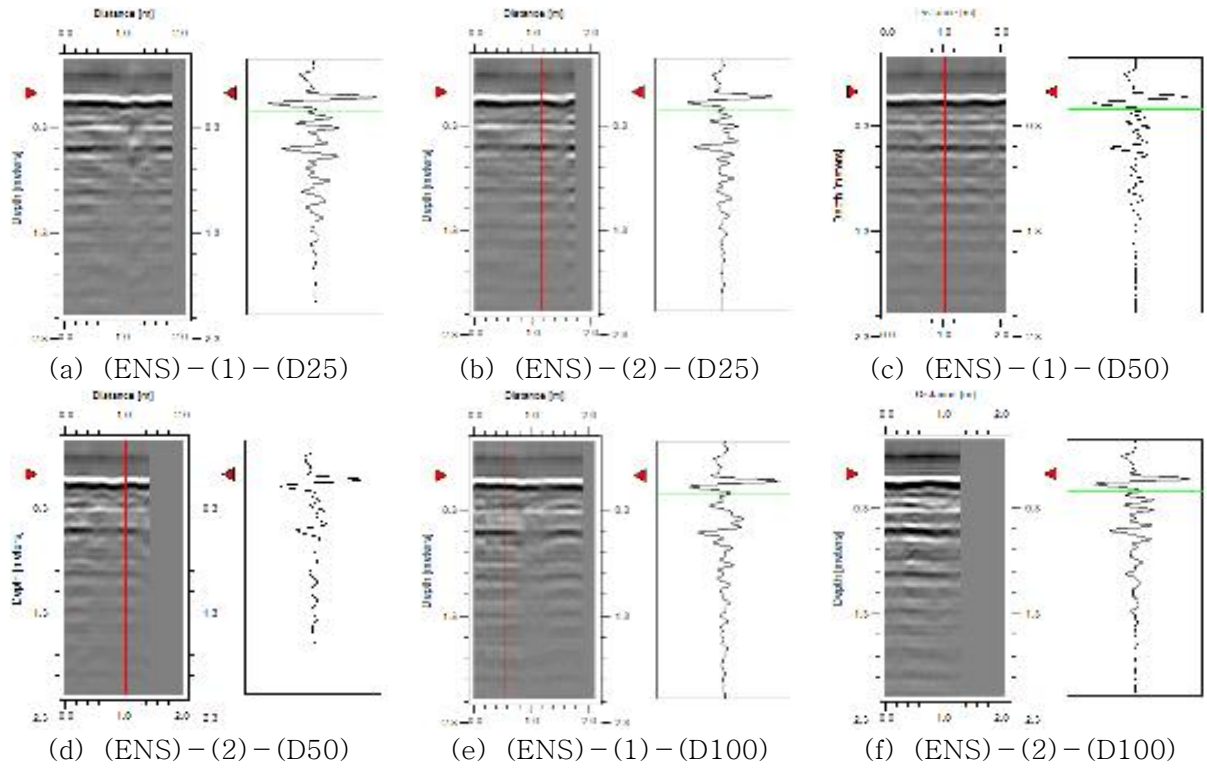


그림 3.91 페로니켈 슬래그의 종방향 탐사결과

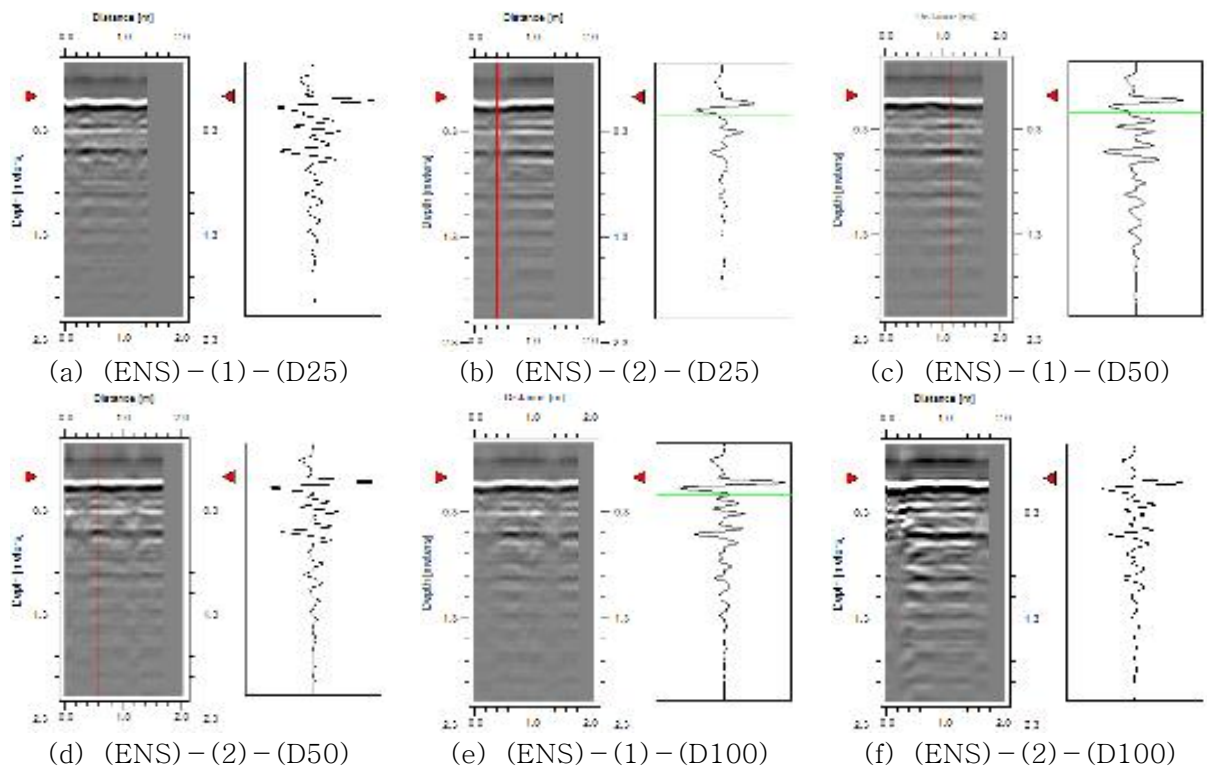


그림 3.92 페로니켈 슬래그의 횡방향 탐사결과

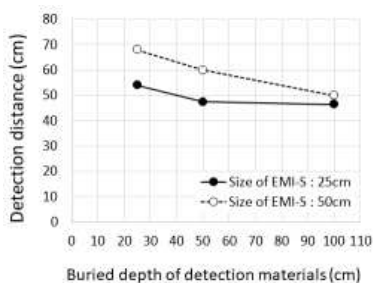
(2) 탐지 물질의 탐지 영향범위 분석

복구된 공동이나 지중 매설된 지장물의 위치를 표지하기 위한 탐지기술 적용 시, 탐지물질의 크기 및 매설 깊이는 GPR탐사에 있어서 어느 정도 영향이 있는지 확인할 필요가 있다. 그림 3.93은 GPR탐사 시 탐지물질의 크기, 매설 깊이 등에 따라 탐지되는 범위를 나타낸 것이다. GPR탐사의 거리는 종횡방향으로 구분하여 이상신호가 발생하는 시점부터 종점까지의 거리를 측정하여 산정하였다.

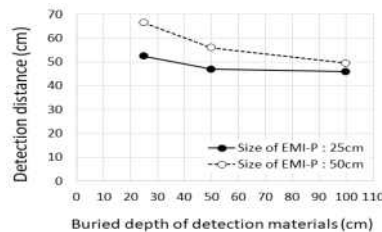
그림 3.93 (a)는 매설된 EMI시트의 크기와 탐지 깊이에 따른 지표의 탐지가능 범위를 나타낸 것이다. EMI 시트가 25cm의 크기일 때 25cm, 50cm, 100cm의 깊이에 따라 이상신호의 탐지 거리는 54cm, 47.5cm, 46.5cm로 나타난다. 50cm의 크기일 때 각각 68cm, 60cm, 50cm로 나타났다. EMI 시트의 경우, 매설된 물질의 크기가 클수록 지표에서 탐지 가능한 범위는 증가하는 것으로 나타나고, 깊이가 깊어질수록 탐지가능거리가 감소하는 것으로 나타났다. 또한 매설된 탐지물질의 크기보다 약 200%이상 큰 범위에서 지표에서 탐지가 가능한 것으로 분석된다.

그림 3.93 (b)는 매설된 EMI페인트의 크기와 탐지 깊이에 따른 지표의 탐지가능 범위를 나타낸 것이다. EMI페인트가 25cm의 크기일 때 25cm, 50cm, 100cm의 깊이에 따라 이상신호의 탐지 거리는 52.5cm, 47cm, 46cm로 나타난다. 50cm의 크기일 때 각각 66.5cm, 56cm, 49.5cm로 나타났다. EMI페인트의 경우, EMI시트의 경우와 마찬가지로 매설된 물질의 크기가 클수록 지표에서 탐지 가능한 범위는 증가하는 것으로 나타나고, 깊이가 깊어질수록 탐지가능거리가 감소하는 것으로 나타났다. 또한 매설된 탐지물질의 크기보다 약 200%이상 큰 범위에서 지표에서 탐지가 가능한 것으로 분석되었다.

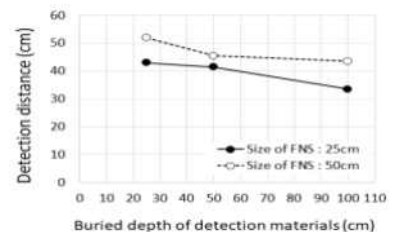
그림 3.93 (c)는 매설된 페로니켈 슬래그의 크기와 탐지 깊이에 따른 지표의 탐지가능 범위를 나타낸 것이다. 페로니켈 슬래그가 25cm의 크기일 때 25cm, 50cm, 100cm의 깊이에 따라 이상신호의 탐지 거리는 43cm, 41.5cm, 33.5cm로 나타난다. 50cm의 크기일 때 각각 52cm, 45.5cm, 43.5cm로 나타났다. 페로니켈 슬래그의 경우, EMI페인트와 EMI시트의 경우와 마찬가지로 매설된 물질의 크기가 클수록 지표에서 탐지 가능한 범위는 증가하는 것으로 나타나고, 깊이가 깊어질수록 탐지가능거리가 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 지표에서 탐지가능한 영향범위는 EMI페인트와 EMI시트보다는 작은 것으로 나타나므로, GPR탐사의 탐지영향범위는 탐지물질의 종류에도 어느 정도 영향이 미치는 것으로 분석되었다.



(a) EMI 시트



(b) EMI 페인트



(c) 페로니켈 슬래그

그림 3.93 탐지가능 영향범위

라. 결론

- (1) 신호가 정확한 탐지 물질을 깊이별, 크기별로 매립하여 분석하였으며, 현장토질의 특성과 큰 상관없이 탐지가 되는 것을 확인하였다. 또한 슬래그를 고로슬래그와 재강슬래그보다 FeO함유량이 많은 페로니켈 슬래그를 사용하였으며, FeO함유량이 많은 슬래그가 탐지의 정확도가 높아짐을 확인하였으며, 슬래그를 매립할 때 슬래그 입자간 공극을 적게하고, 두껍게 매립하면 신호의 정확성이 향상됨을 확인하였다. 탐지물질을 크기별로 매립하여 신호의 정확성을 분석한 결과 매립된 탐지물질이 클수록 탐지가 잘되는 것을 확인하였으나 그 차이는 많지 않음을 확인.
- (2) 지중에 매설된 탐지물질의 크기와 GPR탐사의 탐지가능한 영향거리는 탐지물질이 매설된 깊이가 깊어질수록 영향거리가 작아지고, 탐지물질의 종류도 영향을 미치는 것으로 판단.
- (3) 이 연구에서는 지중에 매설된 탐지물질의 종류에 따른 GPR탐사의 효용성을 평가한 연구로서, 여러 탐지물질에 대한 탐지가능 여부에 대하여 확인 하였고, EMI시트, EMI페인트, 페로니켈 슬래그 등에 대해서는 GPR탐사의 탐지물질로 사용하기에 적합한 것으로 나타남. 향후, 지반의 함수비, 전자파의 주파수, 흙의 종류, 매설된 탐지물질의 패턴 등에 대한 탐지 여부에 대한 연구를 수행하여, 실제 지중매설물의 표지 및 복구된 지반등의 탐지물질로 활용한다면 지속적으로 관찰이 필요한 구조물에 대하여 효율적인 유지관리가 이루어질 수 있을 것이라 사료됨.

제 4절 공동 긴급복구재의 적용성 평가

1. 탐지기술 프로그램

가. RFID 리더기 제원 및 사용한 태그

- (1) 멀티 프로토콜 ISO-1800-6B/6C, EPC Class 1 Gen2
- (2) 리튬 배터리 사용으로 연속 6시간 사용 가능
- (3) UHF(900MHz)와 다양한 옵션(바코드 1D/2D, 13.56MHz)
- (4) 그림 3.94는 탐지하기 위해 사용한 RFID UHF의 모습이며, 그림 3.95는 RFID 태그이다.



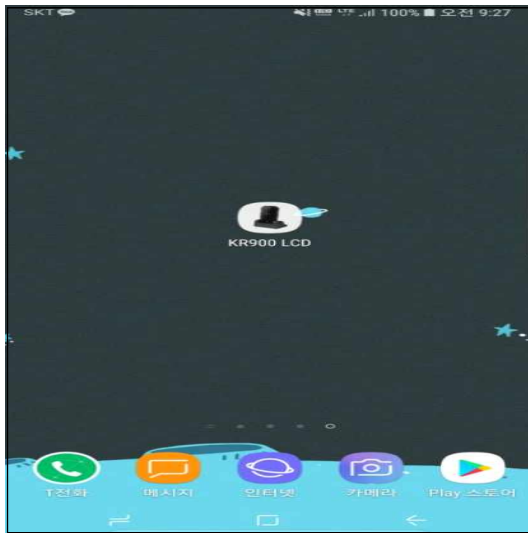
그림 3.94 RFID UHF 휴대용 리더기 외관 및 LCD 구현



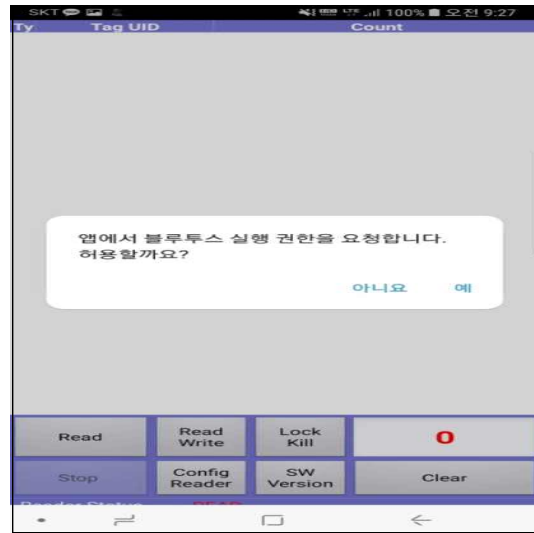
그림 3.95 RFID 금속태그

나. KR900 LCD 어플리케이션

- (1) 그림 3.96 (a)는 KR900 LCD 아이콘 모습이며, b)는 어플리케이션 초기화면으로 구동과 동시에 블루투스 실행 권한 허용 여부를 나타내는 표시창이 뜨는데, 이는 리더기와 스마트폰의 연동을 의미함
- (2) 그림 3.96 (b) 상단 “Tag UID”를 통해 태그 고유의 정보를 확인할 수 있으며, 상단 “Count”를 통해 인식 개수 파악 가능

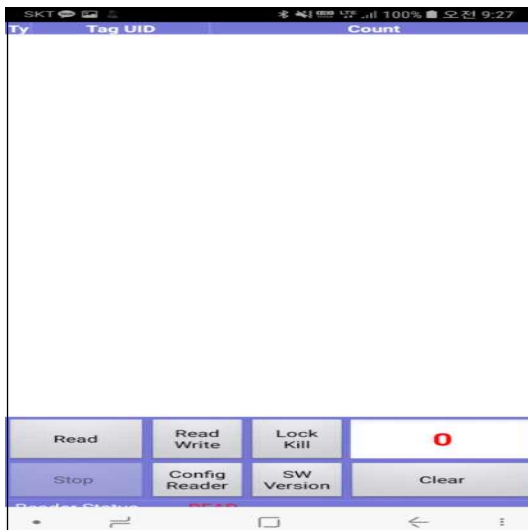


(a) 어플리케이션 아이콘



(b) 어플리케이션 초기화면

그림 3.5 어플리케이션 아이콘 및 실행 초기화면



(a) 태그 인식 전



(b) 태그 인식 후

그림 3.6 리더기를 통한 태그 인식 전후

2. 경제성 분석

가. 기존 공법대비 경제성 비교

- (1) 기존공법 : 아스팔트 포장절단, 아스팔트 깨기, 터파기, 되메우기, 보조기층 포설 및 다짐, 프라임 코팅, 아스팔트 기층 포설 및 다짐, 텍코팅, 아스팔트 표층 포설 및 다짐
- (2) 위 순서에서 되메우기 공정이 비용과 시간을 결정하며, 개발 기술과 비교되는 핵심
- (3) 원가계산을 통해 18M³의 싱크홀에 대해 복구공사를 가정하여 비교함

나. 단가비교

- (1) 기존 공정의 경우 약 3,591,611원/18m³이 산출되었으며, 개발기술의 경우 약 2,538,699원/18m³이 계산됨(EST 프로그램 적용 기준)
- (2) 약 30% 수준의 원가절감 효과 확인

■ 단가자료

(a) 기존 공법에 따른 단가내역

공종	품 명	규 격	수 량	단위	합 계		노무비		재료비		경 비	
					단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액
1	토공				0	3,495,833		2,791,289		508,408		196,136
1-1	기존구조물제거				0	3,495,833		2,791,289		508,408		196,136
a	기존포장철단				0	19,860		11,052		8,184		624
	아스팔트포장철단		12	M	1,655	19,860	921	11,052	682	8,184	52	624
b	기존포장깨기				0	81,639		39,483		17,370		24,786
	아스팔트포장깨기	대형브레이커+0.7㎡	9	㎡	9,071	81,639	4,387	39,483	1,930	17,370	2,754	24,786
o	터파기				0	22,392		10,512		5,454		6,426
	터파기	백호0.7㎡(100%)	18	㎡	1,244	22,392	584	10,512	303	5,454	357	6,426
d	되메우기				0	3,371,942		2,730,242		477,400		164,300
	되메우기	인력(100%)	13	㎡	36,684	476,892	10,684	138,892	26,000	338,000	0	0
	그라우팅		5	㎡	579,010	2,895,050	518,270	2,591,350	27,880	139,400	32,860	164,300
					0	0						
	포장공				0	95,778		67,995		13,671		14,112
	아스팔트포장				0	95,778		67,995		13,671		14,112
a	아스팔트표층포설및다짐				0	5,508		3,447		864		1,197
	아스팔트표층포설및다짐	3m≤시공폭	9	㎡	612	5,508	383	3,447	96	864	133	1,197
b	텍코팅포설				0	450		441		9		0
	텍코팅(인력식)	아스팔트스프레이어400ℓ	9	㎡	50	450	49	441	1	9	0	0
o	아스팔트기층포설및다짐				0	5,868		3,672		918		1,278
	아스팔트기층(88층)포설및다짐	3m≤시공폭, 1층포설두께8~10cm	9	㎡	652	5,868	408	3,672	102	918	142	1,278
d	프라임코팅포설				0	450		441		9		0
	프라임코팅(인력식)	아스팔트스프레이어400ℓ	9	㎡	50	450	49	441	1	9	0	0
e	보조기층포설및다짐				0	83,502		59,994		11,871		11,637
	보조기층포설및다짐	인력식 소규모 장비사용 시공	9	㎡	9,278	83,502	6,666	59,994	1,319	11,871	1,293	11,637
					0	0						
	순 공 사 비				0	3,591,611		2,859,284		522,079		210,248

(b) 개발기술에 의한 단가내역

공종	품 명	규 격	수 량	단위	합 계		노무비		재료비		경 비	
					단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액
1	토공				0	2,441,481		301,437		2,108,208		31,836
1-1	기존구조물제거				0	2,441,481		301,437		2,108,208		31,836
a	기존포장철단				0	19,860		11,052		8,184		624
	아스팔트포장철단		12	M	1,655	19,860	921	11,052	682	8,184	52	624
b	기존포장깨기				0	81,639		39,483		17,370		24,786
	아스팔트포장깨기	대형브레이커+0.7㎡	9	㎡	9,071	81,639	4,387	39,483	1,930	17,370	2,754	24,786
o	터파기				0	22,392		10,512		5,454		6,426
	터파기	백호0.7㎡(100%)	18	㎡	1,244	22,392	584	10,512	303	5,454	357	6,426
d	되메우기				0	2,317,590		240,390		2,077,200		0
	되메우기	인력(100%)	18	㎡	128,755	2,317,590	13,355	240,390	115,400	2,077,200	0	0
					0	0						
2	포장공				0	97,218		67,995		14,643		14,580
2-1	아스팔트포장				0	97,218		67,995		14,643		14,580
a	아스팔트표층포설및다짐				0	5,508		3,447		864		1,197
	아스팔트표층포설및다짐	3m≤시공폭	9	㎡	612	5,508	383	3,447	96	864	133	1,197
b	텍코팅포설				0	450		441		9		0
	텍코팅(인력식)	아스팔트스프레이어400ℓ	9	㎡	50	450	49	441	1	9	0	0
o	아스팔트기층포설및다짐				0	5,868		3,672		918		1,278
	아스팔트기층(88층)포설및다짐	3m≤시공폭, 1층포설두께8~10cm	9	㎡	652	5,868	408	3,672	102	918	142	1,278
d	프라임코팅포설				0	450		441		9		0
	프라임코팅(인력식)	아스팔트스프레이어400ℓ	9	㎡	50	450	49	441	1	9	0	0
e	보조기층포설및다짐				0	84,942		59,994		12,843		12,105
	보조기층포설및다짐	인력식 소규모 장비사용 시공	9	㎡	9,438	84,942	6,666	59,994	1,427	12,843	1,345	12,105
					0	0						
	순 공 사 비				0	2,538,699		369,432		2,122,851		46,416
					0	0						

제 4장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

제 1절 목표 달성

1. 성과점검 기준표(총괄)

핵심성과 (level1)	단위성과 (level2)	최종 성과점검기준						해당 기관	예산 (백만원)	양적 성과목표	달성 도
		질적 성과지표		목표치	측정 방법	검증 방법	가중 치				
A 지반함몰 및 공동구 건설을 위한 팽창매트 개발 및 생산설비 개발	A-1 수용성 커버재 개발	①	수용성	25℃ 수용	육안	사진 제출	1	골든포우	200	목표 : 시제품 3건 달성 : 시제품 3건	100
		②	질량	50 g/m ² 80 g/m ² 100 g/m ²	시험	성적서	1				
	A-2 일반커버재 개발	①	질량	200 g/m ²	시험	성적서	0.5	골든포우	70 /130	목표 : 출원 2건 등록 1건 시제품 3건 달성 : 출원 2건 등록 1건 시제품 3건	100
		②	인장강도(그랩) (kN / %)	0.7/50	시험	성적서	0.5				
	A-3 긴급복구 팽창 매트개발	①	시제품	2 종	제품	보고서	0.8	골든포우 UCI	394	목표 : 출원 1건 등록 1건 시제품 2건 달성 : 출원 1건 등록 1건 시제품 2건	100
		②	시멘트매트	1 종	제품	보고서	0.4				
		③	장기수명평가(10년)	0.7MPa 이상	시험	보고서	0.4				
	A-4 팽창매트 생산 설비	①	단가산출내역서(자 체)	2식	시험	보고서	0.4	골든포우	394		100
		②	생산량	1600m ² /일	설비	보고서	1				
		③	주입제 종류	2종(액상, 분말)	설비	보고서	1				
B 팽창기능 제 성능개선, 및 긴급복구 유지관리 기술개발	B-1 팽창기능제 성능개선	①	고결시간 최적화	200%(기준 300Sec대비)	시험	보고서	1	UCI	336	목표 : 논문 1건 출원 1건 등록 1건 달성 : 논문 1건 출원 1건 등록 1건	100
		②	강도평가	4 kgf / cm ²	시험	성적서	0.5	UCI			
		③	팽창압	100 t / m ²	시험	보고서	0.5	UCI			
		④	팽창량	10 배	시험	보고서	1	UCI			
	B-2 표지기술	①	태깅성능	90%	실험	보고서	0.5	UCI	400	목표 : 출원 1건 등록 1건 S/W 2건 시제품 1건 달성 : 출원 1건 등록 1건 S/W 2건 시제품 1건	100
		②	피로강도 (아스팔트대비)	90%	실험	보고서	0.5				
		③	모바일 프로그램	1			1				
	B-3 탐지기술	①	태깅성능	70%	실험	보고서	0.5	골든포우 UCI KCL	40 /40 /40	목표 : S/W 1건 달성 : S/W 1건	100
		②	프로그램	1			1				
	B-4 메뉴얼제시	①	시공간편성		시험	시험결과	1	골든포우 UCI KCL	40 /40 /40	목표 : S/W 1건 달성 : S/W 1건	100
C 긴급복구 기술 실증	C-1 파일럿테스트	①	복구효율	200%	시험	보고서	0.5	골든포우 UCI KCL	90 /135 /130	목표 : 출원 1건 등록 1건 논문 3건 달성 : 출원 1건 등록 1건 논문 1건	100
		②	보강 시간	50%	시험	보고서	0.5				
		③	시공인력	2인	시험	보고서	0.5				
		④	재시공성평가	90%회수	시험	보고서	0.5				
		⑤	평가 공동 종류	3종	시험	보고서	0.5				
	C-2 복구 성과 인증체계	①	계측기술	1	시험	보고서	0.5	골든포우 UCI KCL	20/15 /15	목표 : 신기술출원 1건 달성 : 신기술출원 1건	0
		②	탐지기술	1	시험	보고서	0.5				
	C-3 신기술 인증 제안	①	신기술 신청서	1	서류	서류	1				
계							20		1,955	목표 : 특허출원 5건 특허등록 5건 논문 : 5건 시제품 : 7건 S/W : 3건 신기술 : 출원 1건 달성 : 특허출원 5건 특허등록 3건 논문 : 3건 시제품 : 7건 S/W : 3건 신기술 : 출원 1건	95*

2. 정량적 연구성과 목표 및 달성도(총괄)

구분		목표	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI			
	비SCI			
	계			
국내 논문 게재	SCI			
	비SCI	5편	3편(60)	
	계	5편	3편(60)	
특허 출원	국내	5건	5건(100)	
	국외			
	계	5건	5건(100)	
특허 등록	국내	5건	3건(60)	
	국외			
	계	5건	3건(60)	
인력 양성	석사			
	박사			
	계			
기술 이전	계약 건수			
	계약액			
	징수액			
국제 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
국내 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문			
	연구시설·장비	-	3건(100)	
	기술요약정보			
	생명자원	생명정보		
		생물자원		
		신품종		
	소프트웨어	3건	3건(100)	
기타	화학물			
	시제품	7건	7건(100)	
	성과 홍보	-	4회(100)	
	일자리 창출	2명	2명(100)	
	매출	-	1.15억	

제 2절 관련 분야 기여도

1. 정책적 측면

- 가. 지반공동에 대한 신속한 대응방안 마련 및 복구에 의해 지반함몰의 사전예방에 따른 2차 사고 방지효과
- 나. 지반함몰의 위험요소를 신속히 차단함으로서 사회적 차원의 불안감 감소
- 다. 긴급복구에 따른 공용구조물의 활용성 확보로 시민불편 감소 효과

2. 기술적 측면

- 가. 팽창 성능의 성능 개선을 통한 지반 함몰 및 공동 긴급복구에 최적화된 기존제품 성능개선
- 나. 기존 생산설비의 개선을 통한 체계화된 공정화 및 생산성증대
- 다. 팽창성 성능 개선을 통한 저다짐 능동 지반함몰 복구기술 실현을 통한 시공성 적용성 증대
- 라. 표지 기술 및 안테나 기술 등의 ICT 기능을 통한 유지관리 및 2차 피해감지
- 마. 대규모 mock-up 및 파일럿 테스트를 통한 보수보강 기술 실증표준 마련

3. 경제적 측면

- 가. 긴급복구 시공 기간의 축소에 따른 정부/지자체기업 등의 시공비용 감소 효과
- 나. 지반공동의 긴급복구를 위해 요구되는 시공구간의 범위 및 시간 축소로 공용성 피해 최소화
화로 간접적 감소와 예산절감 효과
- 다. 개발기술의 실용화에 따른 관련 기술산업의 확장
- 라. 기술수요가 예상되는 도심지국가 또는 개발도상국으로의 기술수출 활로 개척
- 마. 연약지반의 개량 및 공사구간 가도등의 광범위한 지반의 강도개량 공사적용

제 5장 연구개발성과의 활용계획

제 1절 국내외 시장분석 및 사업화 전망

1. 국내 시장규모 및 전망

- 가. 최근 도심지에서 공동발생에 따른 지반함몰이 지속적으로 발생함에 따라, 외국의 싱크홀과 대비한 언론매체의 보도에 의해 국민의 불안이 확산되었으며, 서울시의 경우 공동에 따른 도로 침하 및 함몰의 발생 현황을 살펴보면, 2014년 기준으로 약 3,300여건이 나타남
- 나. 특히, 2014년 8월부터 2015년 2월까지 침하 및 함몰의 크기가 1m×1m인 경우는 약 150여건이 발생하였으며, 2m×2m인 경우에도 최근 5년간 약 20여건(굴착공사 원인 약 60%)이 발생된 것으로 보고.
- 다. 서울시는 지반함몰과 공동이 가장 많이 나타나고 이에 대한 사업이 가장 활발한 지역임. 연도별 지반공동이 매년 20%이상 증가하고 있으며 2020년 2,000건에 육박할 것으로 추정되어 특별 대책을 통해 5년간 1조 900억원의 투자계획을 하고 있음.



그림 5.1 국내의 지반함몰 발생예측(서울시)

2. 해외 시장규모 및 전망

- 가. 지반 침하에 있어서 일본 도쿄의 경우, 지하수 저하에 의한 지반침하 현상을 겪은 바 있음. 최대 누적 침하량이 4.5m의 지반 침하가 일어난 지역도 생겨남에 따라, 1957~1970년까지 약 2억달러를 투입하여 피해를 복구하였음.
- 나. 미국과 같은 선진국의 경우 상하수도관 설치가 오래되어 노후된 상하수도관의 비중이 높아, 강우로 지반이 느슨해진 상황에서 노후된 상하수도관에 의해 토사유출 및 지반침하의 발생 사례가 빈번함.
- 다. 국가적 차원에서 도로 침하, 붕괴분야의 조사와 데이터 베이스화를 통한 유지 관리 단계 및 장/단기적 안정성 평가를 통해 불안정 요소에 대책을 수립하는 추세이며 그 예산의 규모는 빠르게 증가하고 있음.

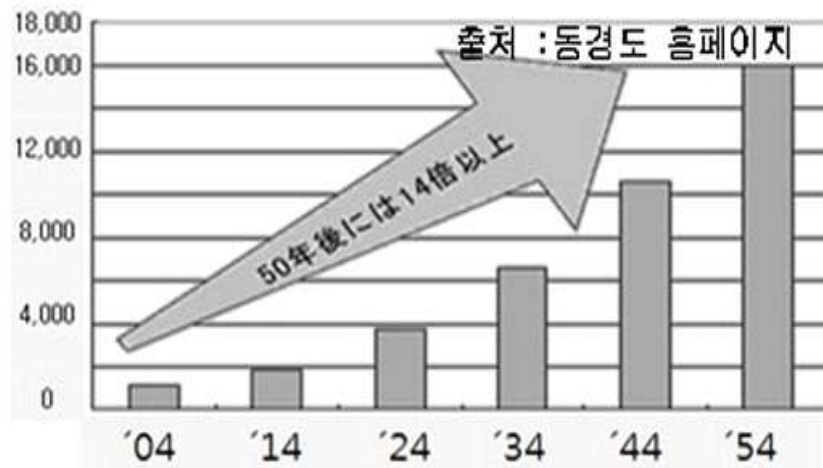


그림 5.2 일본 도쿄의 향후 50년간 지반함몰 발생예측(도쿄 홈페이지)

제 2절 사업화 추진방안

1. 개발기술의 생산특성

가. 팽창매트재 생산

- (1) 주관기관 보유설비를 활용하여 팽창매트의 생산능은 1일 700m² 이상 가능
- (2) 팽창매트의 경우, 1 m³를 채울 수 있는 제품 생산가능

나. 팽창기능제 생산

- (1) 팽창 기능제의 경우, 기성제품의 배합 레시피 기술로 생산능은 외주기관의 생산성과 연관되며, 필요에 따라 다수의 외주기관 확보를 통해 안정정인 공급 가능

2. 최종 제품의 경쟁력

가. 제품성

- (1) 국내 유일한 형태의 제품군으로 차별적인 경쟁력을 보유 및 제조기술의 확보로 기술적 경쟁력 확보로 판단
- (2) 팽창매트의 경우, 제품자체의 경쟁력은 물론 빠른 시공과 긴급성을 만족하는 적용기술로 지반함몰 긴급복구에 경쟁력이 큼

나. 항시성

- (1) 팽창매트재와 팽창 기능제 모두 상시 구비가 가능한 형태로 제공 및 보관되어 개발 목표로 한 지반함몰 발생 현지에서 즉각적인 대응기술로 적용 가능한 장점
- (2) 간단한 적용 방식 및 매뉴얼 제공으로 시공성 우수

3. 판매계획 및 전략

가. 연도별 판매계획

- (1) 개발되는 지반 공동 및 함몰 보수/보강을 위한 팽창 시트는 충분한 제품의 개량이 이루어진다면 기존의 생산 시설과 증가하는 대상 구간의 시장성과 복합적으로 작용하여 신건설 시장에 선도하는 업체가 됨.
- (2) 기존의 보수/보강 기술의 공사단계를 간략화하여 도시화 구역의 공사 시 발생하는 통제에 따른 주민 불편을 최소화 할 수 있고, 나아가 공기의 절감으로 인한 보수/보강의 공사비의 절감으로 타공법과 대비하여 경쟁력이 있음.
- (3) 지반함몰 및 공동을 보수/보강의 관점에서 분류하여 최적화된 시공법을 제시하여 기존의 감각적인 보강보다 효율적인 공사가 될 것으로 사료됨.

표 5.1 개발 후 연도별 팽창매트 시공 계획

(단위 : 백만원)

연 도 별		2019 년	2020 년	2021 년	2022 년	2023 년
팽창매트 및 시공	국내	500	1,000	1,200	1,440	1,730
	해외				500	1,000
합계		500	1,000	1,200	1,940	2,730

나. 연도별 마케팅 전략

(1) 2019년

- (가) 개발된 제품의 경우 연구기간내에 실내검증 및 실외검증을 끝낸 것으로 현장에 바로 적용이 가능한 제품임. 단, 지반의 함몰 및 공동의 긴급 보수/보강의 경우 현재까지 확실한 기술이 없고 적용을 위한 가이드라인이 전무한 실정임에 따라 주요 발주처인 공공업체 및 자치단체의 확인절차가 필요할 것임.
- (나) 따라서 사업화 첫해에는 탐지 구간 및 발생구간에 대한 시범사업의 개념을 도입함.
- (다) 시범사업의 경우 현재 서울시에서 발주한 용역사업(2015년 노면하부 동공탐사용역)
- (라) (1단계))에 참여하고 있는 지케이엔지니어링(주)와 서울시의 업무협약을 통해 진행 예정임.

(2) 2020년

- (가) 해당연도의 경우 시범사업을 통해 긴급복구 기술로써의 효용성을 확인하고 복구시 사용된 유지관리기술의 강점 등을 부각하여 홍보를 실시.
- (나) 협약 지반공동 탐지 업체의 증대 및 지속적인 공동업무를 통한 시범구간확대.
- (다) 기술의 시범구간 결과 등을 통한 신기술(또는 NeP)등록을 마무리하고 이를 통한 단일 영업을 실시함.

(3) 2021년

- (가) 해당연도는 시공이외의 제품의 생산 및 납품 등의 생산품의 판매에 주력함.
- (나) 개발제품의 조달청 등록을 통한 제품의 가격, 품질등의 규격화 및 객관화.

- (다) 시범사업결과, 신기술, 시공메뉴얼, 유지관리기술등의 표준홍보자료 제작 및 이를 통한 홍보전략 수립.
- (라) 시범사업을 실시한 지반공동 탐지업체의 발주처를 통한 해당제품의 강점 제시를 통한 지반함몰대비 상시보관 긴급복구재료로 시범 추진.

(4) 2022년

- (가) 상시보관 긴급보수보강제의 시범추진 지역확대 협의.
- (나) 해외 기술박람회 및 일본 지반공동 탐지업체와의 사업협약을 통한 국외 시범 사업추진
- (다) 해외 적용 사례 자료 획득 및 홍보자료 제작

(5) 2023년

- (가) 지반함몰 및 공동의 긴급보구/보강 이외의 연약지반개량 및 긴급가도공사, 도로보수 보강 재료로의 제품의 개량과 생산을 통한 제품의 변화기.
- (나) 과제결과 및 국내외 시범구간의 자료를 통한 신제품생산 및 개발.
- (다) 상시보관 긴급보수보강제의 구비 지역확대 협의.
- (라) 연도에 따른 지반의 함몰 및 공동의 발생빈도 증가와 연계한 관련분야 점유율 확대.

나. 마케팅 전략 수립

■ 사업분야 다각화

- : 도심지 지반함몰지 복구공사 뿐 아니라 자연재해 복구공사, 하수관거 교체/보수 공사 등에도 개발기술의 요소 기술의 적용이 가능함을 확인
- : 개발 요소 기술의 사업화가 가능한 다양한 분야에 대한 영업활동 진행

■ 해외사업화

- : 동남아시아를 중심으로 개도국에서 시멘트매트의 수요 가능성 확인 - 해외 기술상담회
- : 베트남, 필리핀 중심으로 시멘트 매트 시장 개척 가능성을 확인하였으며, 대상지역을 중심으로 해외영업활동 시작

제 6장 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

해당사항 없음

제 7장 연구개발성과의 보안등급

1. 보안등급의 분류

보안과제	일반과제
	○

2. 결정사유

본 연구에서 개발하고자 하는 최종 성과물은 공공적인 성격이 강하므로 다양한 분야 전문가의 의견수렴을 통해 현장에서 활용 가능한 기술개발이 요구됨. 요소기술과 기술적 최종성과품의 경우 연구 중 또는 연구 종료 후 보호가 필요하다고 판단되면 특허 등록 등을 통하여 지식재산권을 설정할 예정이므로 기술 유출에 의한 문제 발생 가능성은 적다고 볼 수 있음.

제 8장 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설 · 장 비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
(주)골든 포우	커버재공급장치	모델명없음	1	2017.01.12	33,000	한남eng (053.384.2610)	전북 익산시 삼기면 삼기농공단지길 38 (익산공장)	NFEC-2017-05- 237954
	니들편칭 장치	모델명없음	1	2017.01.17	35,200	대한공업사 (053.353.9374)	전북 익산시 삼기면 삼기농공단지길 38 (익산공장)	NFEC-2017-05- 237955
	팽창기능제 공 급장치	모델명없음	1	2017.01.12	33,000	한남eng (053.384.2610)	전북 익산시 삼기면 삼기농공단지길 38 (익산공장)	NFEC-2017-05- 237956
	권취장치	모델명없음	1	2017.01.12	28,000	한남eng (053.384.2610)	전북 익산시 삼기면 삼기농공단지길 38 (익산공장)	(비등록대상장비)
	커팅장치	모델명없음	1	2017.01.17	20,000	대한공업사 (053.353.9374)	전북 익산시 삼기면 삼기농공단지길 38 (익산공장)	(비등록대상장비)

제 9장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

가. 기술적 위험 요소 분석, 안전

나. 유전자변형생물체(LMO) 연구시설 및 수입 신고 현황(해당 시 작성)

시설 번호	제LML〇〇 - 〇〇호	안전 관리 등급	〇등급
수입 신고(최근 1년간)		제LMI〇〇-〇〇	

제 10장 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	지반보강 팽창약액의 팽창성능 및 밀도에 따른 강도특성 평가	유씨아이 테크(주)	한국재난정보학회 논문집		2017-03	단독	
2	논문	팽창약액시트를 이용한 지중응력 특성에 관한 연구	유씨아이 테크(주)	한국재난정보학회 논문집		2017-03	단독	
3	논문	복구된 공동의 유지관리를 위한 GPR 탐사용 탐지물질에 관한 실험적 연구	유씨아이 테크(주)	한국재난정보학회 논문집		2018-12	단독	
4	논문	콘크리트매트를 이용한 개착식 지반공동 복구방법에 관한 연구	유씨아이 테크(주)	한국지반신소재 학 회 논문집		2019-03	단독	게제예정
5	논문	지중매설관 손상 방지를 위한 지반보강공법에 관한 실험적 연구	유씨아이 테크(주)	한국지반신소재 학 회 논문집		2019-03	단독	게제예정
6	특허	지반함몰지 응급복구용 팽창매트	골든포우	대한민국		-	단독	출원
7	특허	현장수화 시멘트 매트	골든포우	대한민국		2018-07-11	단독	등록
8	특허	지반보강용 고팡창 약액의 팽창압력 측정기	유씨아이 테크(주)	대한민국		2018-05-28	단독	등록
9	특허	최소지지력 평가모듈, 그리고 이를 기반으로 한 함몰 및 침하 예측 블록, 지지력 평가 시스템, 함몰 및 침하 예방 방법	유씨아이 테크(주)	대한민국		2018-03-20	단독	등록
10	특허	AR을 이용한 공동매립정보제공시스템	골든포우	대한민국		-	단독	출원
11	SW	유지관리 시스템	유씨아이 테크(주)	대한민국		2017-12-07	단독	소프트웨 어등록
12	SW	지반함몰 긴급복구기술 유지관리 프로그램	유씨아이 테크(주)	대한민국		2018-10-22	단독	소프트웨 어등록
13	SW	긴급복구 및 유지관리 메뉴얼	유씨아이 테크(주)	대한민국		2018-11-05	단독	소프트웨 어등록

제 11장 기타 사항

제 12장 참고 문헌

1. 한진태, 2015, “싱크홀의 발생원인 및 대응 방안”, 플로리다 싱크홀(석회암층 싱크홀) / 피테말라 싱크홀(화산재층 싱크홀)
2. 이대영 (2014), “도심지 지반침하, 싱크홀(Sinkhole)”, 서울기술이야기(구 기술정보) 2014년 5월호, 제225호, 3p, <http://ottawacitizen.com>
3. 서울시 도로함몰 관리정책과 대응매뉴얼, 2015
4. 2014년 9월 싱크홀 진단과 대책 정책 토론회, 2014
5. [취재파일]‘싱크홀 불안사회’...싱크홀이 나오면 덮기에 급급한 이유는?, 2014, SBS
6. 9호선 삼성중앙역에 또 지반침하 사고 발생, 2015, 토목신문
7. 한국건설교통기술협회 <http://www.kcnet.or.kr>
8. 보링그라우팅공사 협의회, 2015
9. 전문건설업 통계연보, 2015
10. 오동욱, 공석민, 이대영, 유용선, 이용주(2015), “하수관 누수에 의해 발생하는 공동 주변 지반의 거동에 대한 가소성유동화토의 보강효과”, 한국지반환경공학회논문집, 제 16권, 12호, pp. 13-22.
11. 강인식, 강기현, 김나한 (2015), 모래지층 송파-구로, 하수관 낚은 종로, 도로함몰 집중, 중앙일보, pp. 10.
12. 책과제연구보고서, pp.1~60
13. 안형신 (2016), 비용 분석을 통한 제강슬래그 골재 활용에 대한 의사결정시스템 연구, 석사학위논문, 명지대학교 일반대학원
14. 유용선, 이대영, 오동욱, 공석민, 이용주(2015), “노후 하수관으로 인한 지하공동 및 이완영역 발생 시 가소성 유동화토적용에 대한 수치해석적 연구”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.125~126
15. 위채복 (1999), 주파수-파수 구조보정을 이용한 지표레이다(GPR) 탐사자료 처리, 석사학위논문, 전남대학교 대학원
16. 이기학 외, 2005, 전자파 및 안테나 공학, 광문각, p. 10-15.
17. 이대영, 김동민, 윤종열 (2015), “현장 모형실험을 통한 노면하부 공동 탐사”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.161~162
18. 이대영, 김동민, 오재일, 윤종열 (2015), “하수관로 손상에 기인한 지반침하 평가기법 연구”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.215~216
19. 이대영, 최연우, 최현 (2015), “도로함몰 원인조사를 위한 노면하부 동공 조사”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.217~218
20. 이병준, (2014), 고출력 전자파에 의한 금속구조체의 전압유기현상 분석, 석사학위논문, 경북대학교 대학원
21. 이용주, 오동욱, 공석민, 이대영, 유용선(2015), “하수관 누수에 의해 발생하는공동 주변 지반의 거동에 대한 가소성유동화토의 보강효과”, 한국지반환경공학회논문집, 16(12),

pp. 13~22

22. 이향재 (2006), 고로슬래그의 분말도에 따른 재생잔골재 모르타르의 강도특성에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교
 23. 임명관, 2008, “고로슬래그의 분말도 및 재생골재 치환율에 따른 콘크리트의 강도 및 내구적 특성에 관한 연구”, 석사학위논문, 단국대학교
 24. 임법규, 2017, “페로니켈슬래그 미분을 혼입한 모르타르의 역학적 특성 및 내구성에 관한 연구”, 석사학위논문, 상명대학교
 25. 조성현, “급냉 제강슬래그 잔골재를 사용한 특수 모르타르 및 콘크리트의 개발과 실용화 방안”, 충남대학교 건축공학과 박사학위 논문, pp. 17~18.
 26. 최광수 (2006), 화순 대곡리 청동유적지 일대에서 GPR 적용에 관한 연구, 석사학위논문, 전남대학교 대학원
 27. 한명식 (2017), GPR과 CCTV 탐사를 활용한 지반함몰 위험도 평가, 박사학위논문, 서울과학기술대학교
 28. 허재원 (2010), 나노슬래그의 표준화 연구, 박사학위논문, 동명대학교 대학원
 29. Panno, S.V., S.E. Greenberg, C.P. Weibel, and P.K. Gillespie, 2004, “Guide to the Illinois Caverns State Natural Area: Illinois State Geological Survey”, GeoScience Education Series 19, 106 p
 30. Barry F. Beck (2005), "Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst", Pro. of the Tenth Multidisciplinary Conference, GSP 144, San Antonio, Texas
 31. Andrade, H.K.P.A. and Palmeira, E.M.(2010), "Geosynthetics for the protection of buried pressurised pipes against mechanical damages caused by excavating tools", 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, pp. 1323-1326.
 32. Jaros, M.B., James, G.M., Gewanlal, C. (2010), "Multi-layer geosynthetic-reinforced embankment over potential sinkholes for a Rapid Rail Link in South Africa", 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, pp. 1555-1559.
 33. Briancon, L., Nancey, A., Villard, P. (2005), "Development of Geodetect: A new warning system for the survey of reinforced earth construction", *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. X X VII, No. 1-2.
 34. Thiansky, A.B. (1999), Sinkholes, West-Central Florida, Land subsidence in the United States, U.S. Geological Survey Circular 1182, pp. 121-140.
 35. Nam, J.W., Byun, Y.S. and Chun, B.S. (2013), Evaluation of the applicability of CLSM by numerical method and field test, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 14, No. 7, pp. 5-12.
 36. ASTM (1985), Classification of soils for engineering purposes, D2487, West Conshohocken, PA.
 37. Choi, C. Y., Lee, S. H., Bae, J. H., Park, D.H. (2011), "Evaluation of correlation
-

-
- between strain modulus (Ev2) and deformation modulus (ELFWD) Using Cyclic Plate loading test and LFWD, Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol.10 No.3, pp.33-41.
38. Han, J. G., Ryu, Y. S., Kim, D., Park, J. J., Hong, G. (2017), "A Study on Expansion and Strength characteristics of material for Emergency Restoration in Ground Cavity", Journal of Korean Geosynthetics society, Vol.16, No.2, pp.131-138.
39. Han, J. G., Kim, Y. H., You, S. K., Chung, D. S. (2018), "Filling System Analysis for Cavity in Ground using DEM", Journal of Korea Geosynthetics Society, Vol.17, No.1, pp.119-126.
40. Hunt, R. E. (1986), Geotechnical engineering analysis and evaluation, McGraw Hill-Ryerson, 729p.
41. Kang, H., Kim, K., Kim, J., Park, J. (2017), "Evaluation of strength characteristics according to expansion amount of ground reinforced expanded polyol", Journal of the Korea Society of Disaster information, Vol.13, no.1 pp.35-42.
42. Kim, J. B., You, S. K., Han, J. G., Hong, G. G., Park, J. B. (2017), "A Study on Simulation of Cavity and Relaxation Zone Using Laboratory Model Test and Discrete Element Method", Journal of Geosynthetics Society, Vol.16, No.2, pp.11-21.
43. Kim, Y., Kim, H., Kim, Y., You, S. K., Han, J. G. (2017), "Experimental Study for Confirmation of Relaxation Zone in the Underground Cavity Expansion", Journal of Geosynthetics Society, Vol.16, No.4, pp.231-240.
44. Korea institute of geoscience and mineral resources (2014), Research on causes and policy suggestions by sinkhole type, Research report, pp.18-39.
45. KS F 2444 (2018), Standard test method for plate bearing test on shallow foundation
46. Lee, K., Kim, D., Park, J. J. (2017), "Study on Management System of Ground Sinking Based on Underground Cavity Grade", Journal of Geosynthetics Society, Vol.16, No.2, pp.23-33.
47. Lee, K., Choi, B. H., Park J., Kim, D. (2018), "Numerical Analysis and Laboratory Experiment of Rapid Restoration of Underground Cavity Using Expansive Material without Excavation", Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol.17, No.1, pp.55-64.
48. Lee, S. Y., Yoon, H. H., Son, M., Kong, J. Y., Jung, H. S. (2018), "Controlled Low strength Material for Emergency Restoration Using Bottom Ash and Gypsum", Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol.17, No.2, pp.19-31.
49. Park, J. J., Kim, J. H., Kim, K. S., Kim, D., Hong, G. (2018), "Evaluation on Behavior Characteristics of a Pocketable Expansion Material for Ground Cavity Based on Wheel Tracking Test Results", Journal of Geosynthetics Society, Vol.17,
-

No.1, pp.75-83.

50. You, S. K., Kim, J. B., Han, J. G., Hong, G. G., Youn, J. M., Lee, k. I. (2017), "A Study on Simulation of Cavity and Relaxation Zone using Finite Element Method", Journal of Geosynthetics Society, Vol.16, No.4, pp.67-74.
 51. Yu, N. J., Choi, J. H., Lee, K. I. (2017), "Fundamental Study on the Development of Filling Materials for Trenchless Emergency Restoration of Ground Cavity", Journal of Korean Geosynthetics Society Vol.16, No.2, pp.97-107.
 52. Campbell, K. J., Orange, A. S. (1974), "Continuous Sea and Fresh Water Ice Thickness profiling using an Impulse Radar System", Polar record, Vol.17, No.106, pp.31-41
 53. Cook, J. C., 1960: Proposed monocyce-pulse VHF radar for airborne ice and snow measurement. AIEE Comm. and Electronics., 51, 588-594.
 54. Davis. J. L., and annan, A.P., (1989), Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock straigraphy, Geophys. Prosp., 37, pp.531-551
 55. Evans, S., 1963, Radio Techniques for the Measurement of Ice Thickness: Polar Rec., v.3, p.406-410.
 56. Harris. C. H., (1970, Reconstruction of subglacial relief from radio echo sounding records, Geophysics, Vol. 35, pp.1099-1115
 57. Knoll, M. D., Knight, R. (1994), "relationships between Dielectric and Hydrogelologic properties of sand-Clay Mixtures", Fifth International Conferention on Ground Penetrating Radar, GPR Theory and Modelling
-