

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

농업기반 및 재해 대응기술개발사업 2022년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-004351-01

저수지 개보수공사 가물막이 공법 및 용수확보 기술 개발

2023.05.17.

농어촌연구원 /
경북대학교 /
대운지오텍

농림축산식품부
(전문기관)농림식품기술기획평가원

제출문

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “저수지 개보수공사 가물막이 공법 및 용수확보 기술 개발”(개발기간 : 2020. 04. 19~2022. 12. 31) 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2022. 12. 31.

주관연구기관명 : 한국농어촌공사 농어촌연구원 (대표자) 최강원 (인)



공동연구기관명 : 경북대학교 산학협력단 (대표자) 공성호 (인)



공동연구기관명 : 대윤지오택(주) (대표자) 이상기 (인)



위탁연구기관명 : ㈜지구환경전문가그룹 (대표자) 한상재 (인)



주관연구책임자 : 강 병 윤
공동연구책임자 : 변 용 훈
공동연구책임자 : 손 일 욱
위탁연구책임자 : 한 상 재

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

최종 보고서										보안등급		
										일반[√], 보안[]		
중앙행정기관명		농림축산식품부			사업명		사업명		농업기반 및 재해 대응기술개발사업			
전문기관명 (해당 시 작성)		농림식품기술기획평가원			내역사업명 (해당 시 작성)							
공고번호					총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)							
					연구개발과제번호		320045-3					
기술분류	국가과학기술 표준분류	LB0999		70 %	LB0903		15 %	LB0901		15 %		
	농림식품과학기술분류	RA0103		70 %	RA0101		15 %	RA0102		15 %		
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		국문										
		영문										
연구개발과제명		국문	저수지 개보수공사 가물막이 공법 및 용수확보 기술 개발									
		영문	Development of Improved Cofferdam for Securing Water in the Reservoir Rehabilitation									
주관연구개발기관		기관명	농촌진흥연구원			사업자등록번호		134-82-04362				
		주소	(우)15634			법인등록번호		135271-0000027				
연구책임자		성명	강병윤			직위		책임연구원				
		연락처	직장전화				휴대전화					
			전자우편				국가연구자번호					
연구개발기간		전체			2020. 04. 29~2022. 12. 31(2년 9개월)							
		단계 (해당 시 작성)	1단계		2020. 04. 29~2021. 12. 31(1년 9개월)							
			2단계		2022. 01. 01 ~ 2022. 12. 31(1년)							
연구개발비 (단위: 천원)		정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
		현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계		685,000	-	166,000					685,000	166,000	851,000	
1단계		1년차	187,000	-	-				187,000	-	187,000	
		2년차	249,000	-	83,000				249,000	83,000	332,000	
2단계		1년차	249,000	-	83,000				258,000	83,000	332,000	
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)		기관명	책임자	직위	휴대전화		전자우편		비고			
									역할	기관유형		
공동연구개발기관		경북대학교	변용훈	조교수						학		
		대운지오텍	손일욱	차장						산		
위탁연구개발기관		지구환경 전문가그룹	한상재	대표이사						산		
연구개발기관 외 기관												
연구개발담당자 실무담당자		성명		조길순			직위		연구원			
		연락처	직장전화				휴대전화					
			전자우편				국가연구자번호					

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2023년 5월 17일

연구책임자: 강 병 윤 (인)
 주관연구개발기관의 장: 최 강 원 (직인)
 공동연구개발기관의 장: 김 지 현 (직인)
 공동연구개발기관의 장: 이 상 기 (직인)
 위탁연구개발기관의 장: 한 상 재 (직인)

< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명		농업기반 및 재해 대응기술개발 사업			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)							
내역사업명 (해당 시 작성)					연구개발과제번호		320045-3					
기술분류	국가과학기술 표준분류	LB0999	70%	LB0903	15%	LB0901	15%					
	농림식품 과학기술분류	RA0103	70%	RA0101	15%	RA0102	15%					
총괄연구개발명 (해당 시 작성)												
연구개발과제명		저수지 개보수공사 가물막이 공법 및 용수확보 기술 개발										
전체 연구개발기간		2022.04.29. ~ 2022.12.31. (2년 9개월)										
총 연구개발비		총 851,000천원 (정부지원연구개발비: 685,000천원, 기관부담연구개발비 : 166,000천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)										
연구개발단계		기초[] 응용[] 개발[<input checked="" type="checkbox"/>] 기타(위 3 가지에 해당되지 않는 경우)[]			기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준() 종료시점 목표()					
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)												
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)												
연구개발 목표 및 내용	최종 목표		안정성, 시공성, 경제성을 확보한 농업용저수지 개보수공사 가물막이 공법 개발 및 실증연구를 통한 농업용수 확보 기술을 개발									
	전체 내용		<ul style="list-style-type: none"> - 지반신소재를 활용한 최적 가물막이 단면 결정 - 가물막이 최적단면에 대한 테스트 배드 운용 - 지반신소재를 활용한 가물막이 단면 설계 및 시공 매뉴얼 개발 - 저수지 제방 양압력 완화를 위한 감압정 설계기술 및 시공 프로세스 정립 및 매뉴얼 개발 									
	1단계 (해당 시 작성)	목표	지반신소재를 이용한 가물막이 용수기술 확보									
		내용	안정하고 경제적인 가물막이 공법개발을 통해 안정적인 농업용수 확보기술 구현									
2단계 (해당 시 작성)	목표	감압정 설치를 통한 제방 안정성 확보										
	내용	감압정 설치를 통한 제방 하부 간극수압 소산 및 침류선 저하로 저수지 제방의 안정성 확보기술 구현										
연구개발성과		지반신소재를 이용한 가물막이 용수기술 확보, 감압정 설치를 통한 제방 안정성 확보										
연구개발성과 활용계획 및 기대 효과		<ul style="list-style-type: none"> - 전국에 분포된 농업용 저수지의 평균 제원에 해당하는 가물막이 제체 시공에 활용 가능 - 갈수기에 육상조건으로 급속 시공이 필요한 현장에 효과적으로 활용 - 홍수기에 높은 안정성 유지가 필수적인 현장에 적용 가능 - 현장토사가 유용가능하거나, 토취장의 거리가 먼 현장에 효과적으로 활용 - 저수지 제체 및 기초부 누수에 대한 항구적인 대책공법으로 활용 - 농업용 저수지 제방 하부 투수성 지반에 감압정 적용 가능 										
연구개발성과의 등록·기탁 건수		논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		신제품	
		2	3	1			1		생명 정보	생물 자원	화합 물	정보
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황		구입 기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치 장소)	ZEUS 등록 번호		
국문핵심어 (5개 이내)		저수지		용수확보		가물막이		감압정		지반신소재		
영문핵심어 (5개 이내)		reservoir		securing water		temporary barrier		rerelieg wells		materials of geosynthetics		

〈 목 차 〉

1. 서론	1
1.1 연구배경 및 필요성	1
1.1.1 개요	1
1.1.2 연구개발의 필요성	2
1.2 연구개발의 목표	3
1.3 연구 범위	4
1.4 연구 방법	5
1.4.1 연구개발 추진체계	7
1.4.2 단계별 추진 내용	8
1.4.3 연구 추진 수행 내용	9
2. 가물막이 설계 및 시공기술 개발	11
2.1 가물막이 높이 결정	11
2.1.1 1종 저수지 내용적 곡선 분석	12
2.1.2 가물막이 공사 사례 분석	13
2.1.3 가물막이 높이 결정	14
2.2 지반신소재의 재료적 특성 조사	15
2.2.1 지반신소재 종류별 사례 조사	15
2.2.2 저수지 퇴적토 특성 분석	28
2.2.3 보강성토체 단면 및 투수성 검토	30
2.2.4 지오텍스타일 튜브 단면 및 투수성 검토	31
2.3 가물막이 고려 요소	39
2.3.1 지오텍스타일 제원 비교	39
2.3.2 일반적인 가물막이	40
2.3.3 지반신소재를 활용한 가물막이	41
2.4 성토체의 단면형상 분석	44
2.4.1 구축가능한 단면	44
2.4.2 응력해석 및 안정해석	44
2.5 수위에 따른 지반신소재 적용 방법	48
2.5.1 단층 지오텍스타일 튜브 형식	48
2.5.2 다층 지오텍스타일 튜브 형식	49
2.6 지반신소재 원단물성 개선	50
2.6.1 지오텍스타일 튜브 현황	50

2.6.2 지오텍스타일 튜브 제작의 문제점	51
2.6.3 개선원단 목표설정 및 개발	52
2.6.4 1차 원단 설계 (6종 설계)	55
2.6.5 2차 원단 설계 (6종 설계)	60
2.6.6 지오텍스타일 튜브 원단물성 개선 효과분석	65
2.7 지반신소재 마찰력 증대를 위한 결합재 개발	67
2.7.1 선행연구	67
2.7.2 시멘트계 결합재	69
2.7.3 직접전단시험 시스템 설계	70
2.7.4 결합재 개발을 위한 사전 실험	72
2.7.5 시멘트계 결합재 개발	75
2.7.6 직접전단시험 실험	77
2.8 모형실험	81
2.8.1 토조 및 저류조 구축	81
2.8.2 지오텍스타일 튜브의 수리 모형실험 시스템	82
2.8.3 단일 지오텍스타일 튜브의 채움 모형실험	84
2.8.4 다단 지오텍스타일 튜브의 수리 모형실험	87
2.8.5 결합재를 적용한 다단 지오텍스타일 튜브의 수리 모형실험	91
2.9 시공/운용을 모사한 안정성 평가	94
2.9.1 시공단계 모사	94
2.9.2 다양한 시공조건에 따른 수치해석	97
2.9.3 월류시 체체 안정성	98
2.9.4 긴급상황에 대비한 시나리오	99
2.10 가물막이 체체에 최적화된 매립식 전단파 센서/시스템 개발	101
2.10.1 전단파 센서/시스템	101
2.10.2 현장을 모사한 조건별 모형 체체의 동적특성 도출	102
2.11 개발된 가물막이 공법에 대한 설계 및 시공 매뉴얼	103
2.11.1 신소재 가물막이 설계 매뉴얼	104
2.11.2 신소재 가물막이 시공 매뉴얼	108
2.12 실대형 현장 실험	113
2.12.1 실험 준비	113
2.12.2 실험체 시공	120
2.12.3 실험방법	125
2.12.4 실험결과	127
2.12.5 소결	142

2.12.6	시공 경제성 검토	143
2.12.7	실대형 실험 결론	146
3.	농업용수 용수확보를 위한 감압정 설계, 시공 프로세스 개발	147
3.1	감압정의 필요성	147
3.2	감압정 설치 목적	149
3.3	감압정 설계 및 설치 해외사례 검토	150
3.3.1	해외(미국USACE) 감압정 사용 이력	150
3.3.2	해외(미국USACE) 감압정 사용 현황	150
3.3.3	해외(미국USACE) 감압정 설계 사례 : HHD 사례 연구	151
3.3.4	필댐 감압정 설치 필요조건 도출	154
3.3.5	감압정 설계 적용 시 검토사항	154
3.4	감압정 규모 결정을 위한 수치해석	155
3.4.1	수치해석 조건	155
3.4.2	수치해석 결과	157
3.5	농업용 저수지 감압정 유지관리 및 테스트베드 구축	179
3.5.1	감압정 테스트베드 지구 선정 시 고려사항	179
3.5.2	선정지구 지반조사 및 결과	180
3.5.3	감압정 시험시공	184
3.5.4	효과 분석을 위한 계측시스템 구축	186
3.5.5	자동화 계측시스템	189
3.5.6	계측 모니터링 프로그램 개발 및 구축	191
3.5.7	계측 데이터 기반 계측분석	194
3.5.8	수치해석	195
3.5.9	감압정 효과 분석	203
3.6	Well Point 적용에 따른 제방비탈면의 안정성 평가	207
3.6.1	수치해석 프로그램 및 해석모델의 선정	207
3.6.2	제방비탈면 단면 및 해석 Parameter	216
3.6.3	3차원 수치해석에 의한 제방안정성 검토	217
3.6.4	수치해석 결과 분석	224
3.7	감압정 설계 및 시공 매뉴얼	247
4.	연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	253
4.1	연구개발 성과	253
4.1.1	국내·외 논문 게재	253

4.1.2	국내 및 국제 학술회의 발표	254
4.1.3	지식재산권	254
4.1.4	제품화	255
4.1.5	기술이전	255
4.2	연구수행 결과	256
4.2.1	정성적 연구개발 성과	256
4.2.2	정량적 연구개발 성과	256
4.2.3	세부적인 연구개발실적	256
4.2.4	세부 정량적 연구개발 성과	257
4.3	목표 달성 수준	263
4.3.1	정성적 연구목표 달성	263
4.3.2	정량적 연구목표 달성	263
5.	연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도	264
5.1	기술적 측면	264
5.2	경제적·산업적 측면	264
5.3	사회적 측면	264
5.4	연구개발성과 기술 기여도	265
6.	연구개발성과의 관리 및 활용 계획	266
6.1	최종성과물에 대한 활용방안	266
6.2	최신기술 동향을 반영한 사업화 전략 도출	266
6.2.1	공사현장 적용 방안	266
6.2.2	공사현장 사업화 전략	266
6.2.3	모니터링 시스템 활용 방안 및 기대효과	267
6.3	연구개발성과 활용계획표	269
7.	참고문헌	270

〈 표 목차 〉

[표 1-1] 수리시설개보수사업 연도별 예산	1
[표 1-2] 가물막이에 대한 설계 및 시공기술 개발에 따른 연구결과	9
[표 1-3] 농업용수 용수확보를 위한 감압정 설계 및 시공 프로세스 개발에 따른 연구결과	10
[표 2-1] 농업생산기반 1종, 2종, 3종 시설의 정의	11
[표 2-2] 농업용 저수지 관리주체별 종별 개소수	11
[표 2-3] ○○저수지 내용적표 RIMS DB 추출 사례	12
[표 2-4] 피벗기능 활용 1종 저수지 만수위-사수위 분석 결과(일부)	12
[표 2-5] 4대강 득 높이기사업 가물막이 시공 사례	13
[표 2-6] 지반신소재의 종류	18
[표 2-7] 지반신소재의 공학적 특성	19
[표 2-8] 지오멤브레인의 종류	20
[표 2-9] 지오멤브레인의 종류별 장단점	20
[표 2-10] 전북지역 저수지 준설토의 토성	28
[표 2-11] 전북지역 저수지 준설토의 골재 함유율	28
[표 2-12] 전북지역 저수지 준설토의 물성	28
[표 2-13] 경북지역 6개의 준설사업 대상지구에 대한 토질시험 결과	29
[표 2-14] 경북 포항 오어지 퇴적토의 기본 물성	29
[표 2-15] 지오텍스타일 튜브 제원 및 사진	33
[표 2-16] 펌프 제원	33
[표 2-17] 교반기 제원	34
[표 2-18] 간극수압계 제원 및 사진	35
[표 2-19] 토압계 제원 및 사진	35
[표 2-20] 레이저 거리 측정기 제원 및 사진	36
[표 2-21] PP 및 PET 원사로 구성된 지오텍스타일 제원 비교	40
[표 2-22] 입력 지반 특성	45
[표 2-23] 필댐의 안전율	46
[표 2-24] 입력 지반 특성	47
[표 2-25] 글로벌 지반신소재 및 지오텍스타일 튜브 생산업체	50
[표 2-26] 선도업체 제품 원단물성 및 개발 원단 물성목표 대비	52
[표 2-27] 원재료(원사)별 특성 대비	54
[표 2-28] 1차 조직, 섬도 및 밀도 별 설계내용	55
[표 2-29] 1차 설계 별 시험결과	59

[표 2-30] 2차 조직, 섬도 및 밀도 별 설계내용	60
[표 2-31] 2차 설계 별 시험결과	64
[표 2-32] 개발된 지오텍스타일 튜브와 기존 지오텍스타일 튜브의 차이점 요약	65
[표 2-33] 원사 소요량 비교	66
[표 2-34] 급속응결 모르타르 배합표 (예시)	69
[표 2-35] Cement 제원	69
[표 2-36] 규사 제원	69
[표 2-37] 지오텍스타일 특성	72
[표 2-38] 시멘트 특성	72
[표 2-39] CSA 팽창재 특성	72
[표 2-40] 플라이애쉬 특성	72
[표 2-41] 급결제 특성	73
[표 2-42] 사전 실험에서 사용된 시멘트계 결합재의 배합비	73
[표 2-43] 응결시간시험 결과	74
[표 2-44] 시멘트 특성	75
[표 2-45] 모래 특성	75
[표 2-46] 플라이애쉬(2종) 특성	75
[표 2-47] 급결제 특성	75
[표 2-48] 최종 선정된 시멘트계 결합재 배합비	75
[표 2-49] 지오텍스타일 접촉면의 마찰특성 비교	80
[표 2-50] Froude 상사법칙에 의한 수리량의 축척 환산값	82
[표 2-51] 다단 수리 모형실험에 사용된 지오텍스타일 튜브 제원	82
[표 2-52] 5종류 채움재의 입도분포 특성	84
[표 2-53] 채움재에 따른 형상의 높이 및 폭	85
[표 2-54] 채움재별 지오텍스타일 튜브의 조성을 위한 총 소요 시간	86
[표 2-55] 4종류 채움재의 입도분포 특성	87
[표 2-56] 필댐 상태평가 항목 및 기준 (한국시설안전공단)	88
[표 2-57] 상사비를 적용한 안정성 및 누수 기준	89
[표 2-58] 채움재의 종류에 따른 수직 침하량 및 수평 변위	90
[표 2-59] 채움재의 종류에 따른 누수량	90
[표 2-60] 채움재의 종류 및 결합재 적용에 따른 수직 침하량	93
[표 2-61] 채움재의 종류 및 결합재 적용에 따른 수평 변위	93
[표 2-62] 채움재의 종류 및 결합재 적용에 따른 누수량	93
[표 2-63] 시공단계에 따른 수직 침하량	95
[표 2-64] 시공단계에 따른 수평 변위	95

[표 2-65] 시공단계에 따른 누수량	96
[표 2-66] 투수층 두께에 따른 동수경사 변화	97
[표 2-67] Case 별 최대 동수경사	97
[표 2-68] 월류에 따른 수직 침하량	98
[표 2-69] 월류에 따른 수평 변위	99
[표 2-70] 지오텍스타일 튜브 시공공법 비교	108
[표 2-71] 지오텍스타일 튜브 공법 시공 장비	109
[표 2-72] 지오텍스타일 튜브 규격에 따른 수처리 물량 및 채움골재 물량 자료	110
[표 2-73] 실험대형 현장 실험 목표	113
[표 2-74] 지오텍스타일 튜브 제원	114
[표 2-75] 규사 종류 및 혼합비율	115
[표 2-76] 결합재 종류 및 혼합비율	115
[표 2-77] 채움재 주입펌프 제원	116
[표 2-78] 물공급 펌프 1 (수조에서 믹싱탱크) 제원	116
[표 2-79] 물공급 펌프 2 (수조에서 배면) 제원	117
[표 2-80] 물공급 펌프 3 (침사지에서 수조) 제원	117
[표 2-81] 교반기 제원	117
[표 2-82] 압력트랜스미터의 제원	118
[표 2-83] 레이저 스캐너의 제원 및 출력 결과물	118
[표 2-84] 로드셀 및 디지털인디케이터 제원	118
[표 2-85] DAQ Device의 제원	119
[표 2-86] 드론의 제원	119
[표 2-87] CCTV 제원	119
[표 2-88] 필댐 댐마루 상태평가 항목 및 기준	125
[표 2-89] 필댐 댐사면 상태평가 항목 및 기준	125
[표 2-90] 필댐 체체 안정성 및 누수 기준 (월류 실험)	125
[표 2-91] 흙제방 누수량 측정결과	127
[표 2-92] 지오텍스타일 튜브 누수량 측정결과	128
[표 2-93] 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 누수량 측정결과	129
[표 2-94] 흙제방 변위 및 변형 측정결과	133
[표 2-95] 지오텍스타일 튜브 변위 및 변형 측정결과	133
[표 2-96] 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 변위 및 변형 측정결과	135
[표 2-97] 케이스별 변위 및 변형 측정결과	136
[표 2-98] 수위에 따른 계측 압력값	138
[표 2-99] 케이스별 월류 안정성 검토 결과	141

[표 2-100] 케이스별 필담 상태평가에 대한 결과 및 종합등급	142
[표 2-101] 케이스별 월류 안정성 검토 결과	142
[표 2-102] 경제성 평가에 활용된 제방의 제원	143
[표 2-103] 가물막이 공법별 축조비용 산정	143
[표 2-104] 토체와 대형마대를 이용하는 가물막이 공법 축조비용	144
[표 2-105] 토체와 강널말뚝을 이용하는 가물막이 공법 축조비용	144
[표 2-106] 지오텍스타일 튜브를 이용하는 가물막이 공법 축조비용	145
[표 2-107] 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브를 이용하는 가물막이 공법 축조비용	145
[표 3-1] 수위조건별-지점별 안전율 요구 기준(HHD 사례)	153
[표 3-2] 수치해석 조건	156
[표 3-3] 지반조사 항목 및 수량	180
[표 3-4] 현장조사 위치 현황	180
[표 3-5] 시추조사 현황 및 지층분포	181
[표 3-6] 현장조사 및 시험 결과	182
[표 3-7] 토질 물성 시험 결과	183
[표 3-8] 토질 역학 시험 결과	183
[표 3-9] 감압정 시공위치	184
[표 3-10] 계측항목 및 목적	186
[표 3-11] 계측기 사양	187
[표 3-12] 자동화 계측시스템 사양	189
[표 3-13] 모니터링 프로그램 특징 및 기능	191
[표 3-14] 계측시스템 관리항목 및 조치계획	192
[표 3-15] 감압정 계측 결과(요약)	194
[표 3-16] 수치해석 조건(요약)	197
[표 3-17] 수치해석 Case 조건(요약)	197
[표 3-18] 감압정 효과 분석조건	204
[표 3-19] 감압정 효과 분석 CASE	204
[표 3-20] 직경, 관통율 변화에 따른 분석결과	205
[표 3-21] 투수계수, 관통율 변화에 따른 분석결과	206
[표 3-22] 지층두께 변화에 따른 분석결과	206
[표 3-23] 해석 Parameter	216
[표 3-24] 해석종류	217
[표 3-25] 해석단계	223

〈 그림 목차 〉

[그림 1-1] 농업용저수지 가물막이 공사 전경	1
[그림 1-2] 토체와 대형마대를 이용한 가물막이 공법	1
[그림 1-3] 토체와 강널말뚝을 이용한 가물막이 공법	1
[그림 1-4] 지반신소재를 활용한 가물막이 공법 연구개발 개요도	3
[그림 1-5] 연구개발 범위 및 목표	4
[그림 1-6] 가물막이 공법 개발 참여기관별 연구내용 및 협력체계 모식도	5
[그림 1-7] 용수확보 기술 개발 참여기관별 연구내용 및 협력체계 모식도	6
[그림 1-8] 연구개발 연차별 추진내용	8
[그림 1-9] 기관별 세부 추진내용	8
[그림 2-1] 농업용저수지 가물막이 공사 전경	13
[그림 2-2] 토체와 대형마대를 이용한 가물막이	13
[그림 2-3] 토체와 강널말뚝을 이용한 가물막이	13
[그림 2-4] 가물막이(토체) 붕괴 사고 전경	14
[그림 2-5] 지오텍스타일 튜브 개념도	21
[그림 2-6] 지오텍스타일 시공순서	21
[그림 2-7] 가물막이 사진(일산대교)	22
[그림 2-8] 인천대교 가물막이 사진	22
[그림 2-9] 수어댐 여수로 가물막이 사진	23
[그림 2-10] 일시적인 댐의 물막이	23
[그림 2-11] 부산 신항 남컨테이너 가호안	24
[그림 2-12] 영진만 해안침식 방지공사 개념도	24
[그림 2-13] 울진 원전 수중잠재 설치 사진	24
[그림 2-14] 지오텍스타일 튜브로 만든 사구 사진	25
[그림 2-15] 새만금 방조제 끝막이 공사	25
[그림 2-16] Amwaj 섬 지오텍스타일 튜브 방파제 배치도	26
[그림 2-17] 지오텍스타일 튜브를 이용한 건조 준설매립 현장 사진	26
[그림 2-18] 지오텍스타일 튜브를 이용한 소형 댐 공사	26
[그림 2-19] 지오텍스타일 튜브를 이용한 방파제 공사 (고정용 틀 사용)	27
[그림 2-20] 지오텍스타일 튜브를 이용한 준설토 투기 제방 공사	27
[그림 2-21] 지오텍스타일 튜브의 탈수처리 시스템	27
[그림 2-22] 현장 퇴적토 사진(경북 포항 오어지)	29
[그림 2-23] 경북 포항 오어지 퇴적토의 입도분포	29
[그림 2-24] 지오텍스타일 재료 특성에 따른 침하 거동 분석	30

[그림 2-25] 실대형 실험토조 전체 모식도	31
[그림 2-26] 실대형 실험토조 세부 사진	31
[그림 2-27] 실대형 모형실험 과정	32
[그림 2-28] 주입모듈에 따른 내부 퇴적형상	32
[그림 2-29] 펌프 및 각부 명칭	33
[그림 2-30] 펌프성능곡선표	33
[그림 2-31] 함수비 300% 준설토 준비과정	34
[그림 2-32] 교반기	34
[그림 2-33] 아크릴 수조 전경	34
[그림 2-34] 철제 프레임 전경	35
[그림 2-35] 1차 version 실험장치	36
[그림 2-36] 1차 version 실험과정	36
[그림 2-37] 2차 version 실험장치	37
[그림 2-38] 2차 version 실험과정	37
[그림 2-39] 역 Y-Type 주입모듈	38
[그림 2-40] PET 원사로 구성된 지오텍스타일 샘플 사진	39
[그림 2-41] 지반신소재의 주요 기능	41
[그림 2-42] 지반신소재를 활용한 가물막이 체체 구성안	41
[그림 2-43] Case1(9개 지오텍스타일 튜브+성토층)의 시공 모습 및 필요 수량 산출	42
[그림 2-44] Case2(5개 지오텍스타일 튜브+성토층+지오멤브레인)의 시공 모습 및 필요 수량 산출	42
[그림 2-45] Case3(15개 지오텍스타일 튜브+일부 성토층)의 시공 모습 및 필요 수량 산출	42
[그림 2-46] Case1 예상 시공단가 세부 계산서	43
[그림 2-47] Case2 예상 시공단가 세부 계산서	43
[그림 2-48] Case3 예상 시공단가 세부 계산서	43
[그림 2-49] 지반신소재를 활용한 체체 요소 단면 배치도	44
[그림 2-50] 사면-침투 연계해석 흐름도	44
[그림 2-51] Case1 동수경사 분포도	45
[그림 2-52] Case2 동수경사 분포도	45
[그림 2-53] Case1 간극수압 분포도	46
[그림 2-54] Case2 간극수압 분포도	46
[그림 2-55] 안정해석 결과	47
[그림 2-56] 토압에 대한 안정성 검토 개념도	48
[그림 2-57] 다단 지오텍스타일 튜브 형식 예시	49
[그림 2-58] 다단으로 시공 시, 고려인자	49
[그림 2-59] 지오텍스타일 침투수압	49

[그림 2-60] 가물막이용 지오텍스타일 튜브	50
[그림 2-61] 호안보호용 지오텍스타일 튜브	50
[그림 2-62] 오페수 처리용 지오텍스타일 튜브	50
[그림 2-63] 지오텍스타일 튜브 배수형상	50
[그림 2-64] 글로벌 지반신소재 업체 Tencate 토목용 지오텍스타일 튜브 물성표	52
[그림 2-65] 1차 원단설계도 샘플 #1	55
[그림 2-66] 1차 원단설계도 샘플 #2	56
[그림 2-67] 1차 원단설계도 샘플 #3	56
[그림 2-68] 1차 원단설계도 샘플 #4	57
[그림 2-69] 1차 원단설계도 샘플 #5	57
[그림 2-70] 1차 원단설계도 샘플 #6	58
[그림 2-71] 2차 원단설계도 샘플 #1	60
[그림 2-72] 2차 원단설계도 샘플 #2	61
[그림 2-73] 2차 원단설계도 샘플 #3	61
[그림 2-74] 2차 원단설계도 샘플 #4	62
[그림 2-75] 2차 원단설계도 샘플 #5	62
[그림 2-76] 2차 원단설계도 샘플 #6	63
[그림 2-77] Concrete Canvas (CC)	67
[그림 2-78] Ohno-shear test	67
[그림 2-79] 아스팔트 층간의 접착 강도를 측정하기 위한 직접전단시험기	68
[그림 2-80] 모래 및 시멘트로 처리된 Geotxtile 층면	68
[그림 2-81] 모래 및 시멘트가 혼합된 이중 Geotxtile에 의한 얇은 기초 보강효과 실험	68
[그림 2-82] 비카트 침 실험	69
[그림 2-83] 직접전단시험기 도면 및 사진	70
[그림 2-84] 시험기의 구조	70
[그림 2-85] 대형직접전단시험기 사진 및 모식도	71
[그림 2-86] 본 연구과제에 사용된 직접전단시험기	71
[그림 2-87] 경계면 조건을 고려한 직접전단상자 개념도	71
[그림 2-88] 지오텍스타일 사진	72
[그림 2-89] 모래의 입도분포곡선	73
[그림 2-90] 플로우 시험 결과	73
[그림 2-91] 양생일에 따른 일축압축강도 변화	74
[그림 2-92] 규사 6호사 및 8호사의 입도분포곡선 비교	75
[그림 2-93] 플로우시험	76
[그림 2-94] 응결시험 결과	76

[그림 2-95] 일축압축시험 결과	76
[그림 2-96] 수정된 직접전단상자	77
[그림 2-97] 시료준비 및 실험절차	78
[그림 2-98] 지오텍스타일 접촉면 전단강도	78
[그림 2-99] 두 개의 지오텍스타일의 전단응력-수직응력	78
[그림 2-100] GT1에서 재령일에 따른 시료의 전단강도	79
[그림 2-101] 재령 3일 시료의 전단강도	79
[그림 2-102] 시멘트계 결합재의 전단응력-수직응력	80
[그림 2-103] 양생일자에 따른 강도특성 변화	80
[그림 2-104] 개선된 실험 부품	81
[그림 2-105] 변경된 채움재 주입방식	81
[그림 2-106] 다단 수리 모형실험에 사용된 지오텍스타일 튜브	82
[그림 2-107] 주입방식 모식도	83
[그림 2-108] 수리 모형실험을 위한 아크릴 수조	83
[그림 2-109] 단일 지오텍스타일 튜브의 채움재로 사용된 5종류 시료의 입도분포	84
[그림 2-110] 지오텍스타일 튜브의 폭 측정	85
[그림 2-111] No. 3 채움재의 주입단계에 따른 형상변화	85
[그림 2-112] No. 5 채움재의 시간에 따른 형상변화	85
[그림 2-113] 채움재에 따른 지오텍스타일 튜브의 단면형상	86
[그림 2-114] 채움재의 종류에 따른 단계별 채움 시간	86
[그림 2-115] 다단 지오텍스타일 튜브의 채움재로 사용된 시료의 입도분포	87
[그림 2-116] 다단 지오텍스타일 튜브 시공순서도	87
[그림 2-117] 다단 지오텍스타일 튜브 조성 사진	88
[그림 2-118] 변위 측정 사진	89
[그림 2-119] 다단 지오텍스타일 튜브에 의해 저수된 물	89
[그림 2-120] 결합재 적용 여부에 따른 비교 실험 모식도	91
[그림 2-121] 결합재 용해 시험	91
[그림 2-122] 지오텍스타일 튜브에 결합재를 적용한 모식도	91
[그림 2-123] 결합재를 이용한 다단 지오텍스타일 튜브 조성 과정	92
[그림 2-124] 시공단계에 따른 다단 지오텍스타일 튜브 안정성 평가	94
[그림 2-125] 투수층의 두께 변화	97
[그림 2-126] Case별 다단 지오텍스타일 튜브 형상	97
[그림 2-127] 월류시 제체 안정성에 대한 평가	98
[그림 2-128] 차수매트를 이용한 제체보호기술	99
[그림 2-129] 급속시공을 통한 월류방지 기술	100

[그림 2-130] 감압정을 이용한 누수방지 기술	100
[그림 2-131] GCCM을 이용한 체체보호기술	100
[그림 2-132] 병렬형식의 벤더엘리먼트	101
[그림 2-133] 측정모듈에 설치된 벤더 엘리먼트	101
[그림 2-134] 측정 시스템에 사용된 장비	101
[그림 2-135] 구축된 진단과 측정 시스템	102
[그림 2-136] 진단과 센서를 이용한 신호 측정 결과	102
[그림 2-137] 신소재 가물막이 설계 및 시공 매뉴얼	103
[그림 2-138] 일반적인 가물막이 설계 프로세스	104
[그림 2-139] 지오텍스타일 튜브를 이용한 가물막이 설계 프로세스	105
[그림 2-140] 지오텍스타일 설계 시, 외부인자 평가항목	106
[그림 2-141] 세굴 방지용 필터매트의 적용 예	106
[그림 2-142] 지오텍스타일 설계 시, 내부인자 평가항목	106
[그림 2-143] 지오텍스타일 튜브 시공프로세스	108
[그림 2-144] 지오텍스타일 튜브 해체프로세스	109
[그림 2-145] 수중샌드펌프 용량 및 양정에 따른 토출량	112
[그림 2-146] 수중샌드펌프 용량별 토출량	112
[그림 2-147] 토조 및 수조	113
[그림 2-148] 믹싱 탱크	114
[그림 2-149] 지오텍스타일 튜브 배치도	114
[그림 2-150] 규사 및 혼합모습	115
[그림 2-151] 결합재 종류별 모습	116
[그림 2-152] 물공급 배관 및 부속품	117
[그림 2-153] 시공할 제방 제원 및 모습	120
[그림 2-154] 제방 시공 순서에 따른 모습	120
[그림 2-155] 지오텍스타일 튜브 시공시 재료별 동선 및 개략도	121
[그림 2-156] 지오텍스타일 튜브 시공 순서에 따른 모습	122
[그림 2-157] 지오텍스타일 튜브 시공모습	122
[그림 2-158] 시공된 지오텍스타일 튜브의 입도분포 결과 그래프	123
[그림 2-159] 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 시공모습	123
[그림 2-160] 결합재 시공 모습	124
[그림 2-161] 시공된 지오텍스타일 튜브의 입도분포 결과 그래프	124
[그림 2-162] 누수량 측정 방법	124
[그림 2-163] 변위량 확인 방법	124
[그림 2-164] 흙제방 누수량 측정결과 그래프	127

[그림 2-165] 지오텍스타일 튜브 누수량 측정결과 그래프	128
[그림 2-166] 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 누수량 측정결과 그래프	129
[그림 2-167] 누수량 측정결과 그래프	130
[그림 2-168] 포인트 클라우드를 통한 흠제방 변화 모습	131
[그림 2-169] 실험 전 흠제방 수평, 수직 기준점 측정	131
[그림 2-170] 실험 중 흠제방 수평, 수직 기준점 측정	131
[그림 2-171] 실험 후 흠제방 수평, 수직 기준점 측정	132
[그림 2-172] 흠제방 사면 침하량 측정	132
[그림 2-173] 흠제방 사면 체적 변화 계산(MeshLab)	132
[그림 2-174] 실험 전 지오텍스타일 튜브 수평, 수직 기준점 측정	134
[그림 2-175] 실험 중 지오텍스타일 튜브 수평, 수직 기준점 측정	134
[그림 2-176] 실험 후 지오텍스타일 튜브 수평, 수직 기준점 측정	134
[그림 2-177] 지오텍스타일 튜브 중심부 단면 변형 확인	134
[그림 2-178] 실험 전 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 수평, 수직 기준점 측정	135
[그림 2-179] 실험 중 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 수평, 수직 기준점 측정	135
[그림 2-180] 실험 후 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 수평, 수직 기준점 측정	135
[그림 2-181] 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 중심부 단면 변형 확인	136
[그림 2-182] 흠제방 파이핑 현상 및 붕괴 모습	137
[그림 2-183] 흠제방의 압력트랜스미터 배치도	137
[그림 2-184] 수위에 따른 간극수압 및 이슈사항	137
[그림 2-185] 수위에 따른 간극수압 및 이슈사항	138
[그림 2-186] CCTV를 통한 지오텍스타일 튜브 월류 실험 모습	139
[그림 2-187] 지오텍스타일 튜브 월류 실험 전경	139
[그림 2-188] 지오텍스타일 튜브 실험 전, 중, 후 변위 및 변형 검토	139
[그림 2-189] CCTV를 통한 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 월류 실험 모습	140
[그림 2-190] 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 월류 실험 전경	140
[그림 2-191] 지오텍스타일 튜브결합재 실험 전, 중, 후 변위 및 변형 검토	140
[그림 2-192] 가물막이 공별법 시공단가	146
[그림 3-1] 제체를 통한 내부침식	147
[그림 3-2] 제체의 기초를 통한 침식	147
[그림 3-3] 제체와 제체의 기초를 통한 침식	147
[그림 3-4] 제체와 기초간의 접합부를 통한 침식	148
[그림 3-5] 제체와 제체 내에 매설된 구조물의 접합부를 통한 침식	148
[그림 3-6] 감압정 모식도 (USACE, 1992)	149
[그림 3-7] Herbert Hoover Dike 프로젝트 위치	151

[그림 3-8] Herbert Hoover Dike 프로젝트에 해석지점	152
[그림 3-9] 감압정 설계를 위한 입력 파라미터 개념도	153
[그림 3-10] 수치해석 모델	156
[그림 3-11] 간극수압의 수치해석 결과 예시	157
[그림 3-12] 하부지반 투수계수에 따른 저수지 하류사면 종방향 간극수압	157
[그림 3-13] 하부지반 투수계수에 따른 저수지 하류사면 최대간극수압	157
[그림 3-14] 하부지반 투수계수($1.0E^{-3}$ m/sec)의 저수지 하류사면 종방향 간극수압	158
[그림 3-15] 하부지반 투수계수($1.0E^{-5}$ m/sec)의 저수지 하류사면 종방향 간극수압	159
[그림 3-16] 하부지반 투수계수($1.0E^{-7}$ m/sec)의 저수지 하류사면 종방향 간극수압	160
[그림 3-17] 하부지반 투수계수($1.0E^{-3}$ m/sec)의 저수지 하류사면 최대간극수압 변화	161
[그림 3-18] 하부지반 투수계수($1.0E^{-5}$ m/sec)의 저수지 하류사면 최대간극수압 변화	162
[그림 3-19] 하부지반 투수계수($1.0E^{-7}$ m/sec)의 저수지 하류사면 최대간극수압 변화	163
[그림 3-20] 하부지반 투수계수에 따른 저수지 하류사면 최대간극수압 변화	164
[그림 3-21] 하부지반 투수계수에 따른 저수지 하류사면 종방향 동수경사	165
[그림 3-22] 하부지반 투수계수에 따른 저수지 하류사면 최대동수경사	165
[그림 3-23] 하부지반 투수계수($1.0E^{-3}$ m/sec)의 저수지 하류사면 종방향 동수경사	166
[그림 3-24] 하부지반 투수계수($1.0E^{-5}$ m/sec)의 저수지 하류사면 종방향 동수경사	167
[그림 3-25] 하부지반 투수계수($1.0E^{-7}$ m/sec)의 저수지 하류사면 종방향 동수경사	168
[그림 3-26] 하부지반 투수계수($1.0E^{-3}$ m/sec)의 저수지 하류사면 최대동수경사 변화	169
[그림 3-27] 하부지반 투수계수($1.0E^{-5}$ m/sec)의 저수지 하류사면 최대동수경사 변화	170
[그림 3-28] 하부지반 투수계수($1.0E^{-7}$ m/sec)의 저수지 하류사면 최대동수경사 변화	171
[그림 3-29] 하부지반 투수계수($1.0E^{-3}$ m/sec)의 저수지 하류사면 종방향 동수경사 안전율	172
[그림 3-30] 하부지반 투수계수($1.0E^{-5}$ m/sec)의 저수지 하류사면 종방향 동수경사 안전율	173
[그림 3-31] 하부지반 투수계수($1.0E^{-7}$ m/sec)의 저수지 하류사면 종방향 동수경사 안전율	174
[그림 3-32] 하부지반 투수계수($1.0E^{-3}$ m/sec)의 저수지 하류사면 동수경사 안전율 변화	175
[그림 3-33] 하부지반 투수계수($1.0E^{-5}$ m/sec)의 저수지 하류사면 동수경사 안전율 변화	176
[그림 3-34] 하부지반 투수계수($1.0E^{-7}$ m/sec)의 저수지 하류사면 동수경사 안전율 변화	177
[그림 3-35] 하부지반 투수계수($1.0E^{-7}$ m/sec)의 저수지 하류사면 동수경사 안전율 변화	178
[그림 3-36] 감압정 설치시 효과검증이 용이한 지반조건	179
[그림 3-37] 테스트베드 대상지(은계호수공원)	179
[그림 3-38] 현장조사 위치	180
[그림 3-39] 현장시험 과정	183
[그림 3-40] 감압정 시험시공 순서도	184
[그림 3-41] 감압정 시공 과정	185
[그림 3-42] 감압정(은계호수공원) 계측 모니터링 위치	186

[그림 3-43] 감압정 등수두선	187
[그림 3-44] 감압정 센서 배치도	187
[그림 3-45] 감압정 계측기 설치사진	188
[그림 3-46] 감압정 간극수압계 설치 사진	188
[그림 3-47] 자동화 계측시스템 통신 구성	190
[그림 3-48] 감압정 계측기 설치사진	190
[그림 3-49] 감압정 모니터링시스템 화면	191
[그림 3-50] 감압정 모니터링시스템	193
[그림 3-51] 계측데이터 분석 결과(펌프 유량계)	194
[그림 3-52] 계측데이터 분석 결과	194
[그림 3-53] 수치해석 단면	196
[그림 3-54] 수치해석 모델링	197
[그림 3-55] 간극수압 수치해석 결과 (CASE 8)	198
[그림 3-56] 하류사면 종방향 간극수압(P1)	199
[그림 3-57] 동수경사 수치해석 결과(CASE 8)	199
[그림 3-58] 하류사면 종방향 동수경사(P1, F.W.L.)	200
[그림 3-59] 하류사면 종방향에 따른 동수경사 안전비 증가(F.W.L.)	200
[그림 3-60] 직경, 간격별 하류사면 종단방향 파이핑안전율 변화 (P1, N.H.W.L.)	201
[그림 3-61] 관통율-종단방향 파이핑 안전율 증가비	201
[그림 3-62] 수위-종단방향 파이핑안전율 증가비	202
[그림 3-63] 분석 단면	203
[그림 3-64] 침투수압에 대한 감압정 분석 모식도	205
[그림 3-65] Nodes and stress points	208
[그림 3-66] 탄소성모델의 기본개념	209
[그림 3-67] 주응력공간상에서의 Mohr-Coulomb 항복면	212
[그림 3-68] 연구대상 제방비탈면 해석단면	216
[그림 3-69] 해석 종류별 유한요소망	218
[그림 3-70] 해석단계	223
[그림 3-71] Well Point설치간격에 따른 제방내 간극수압	224
[그림 3-72] Well Point설치간격에 따른 제방내 간극수압 감소율	224
[그림 3-73] 침투해석에 의한 제방내 간극수압 분포도	225
[그림 3-74] Well Point설치간격에 따른 제방비탈면 안전율	240
[그림 3-75] Well Point설치간격에 따른 제방비탈면 안전율 증가율	240
[그림 3-76] 강도감소법에 의한 제방비탈면의 예상 활동파괴원	241
[그림 3-77] 감압정 매뉴얼	247

[그림 3-78] 감압정 단면도(미국 공병단(USACE))	248
[그림 3-79] 감압정 내부 채움재 권장 입도분포(미국 공병단(USACE))	248
[그림 3-80] 감압정 설계시 수질기준(미국 공병단(USACE))	250
[그림 3-81] 감압정 시스템의 간격 결정을 위한 제원	251
[그림 6-1] 개발된 공법의 사업화 추진과정	267
[그림 6-2] 모니터링 시스템 활용 계획 및 방안	268
[그림 6-1] 감압정 및 가물막이 모니터링시스템 활용 계획 및 방안	268

1. 서론

1.1 연구배경 및 필요성

1.1.1 개요

현재까지 국내의 경우 건설된지 50년 이상된 노후 저수지가 전체 비중의 81.2%(한국농어촌공사, “2018 농업생산기반정비통계연보”)를 차지하고 있다.

노후 시설물의 재해예방을 위하여 매년 4,000여억원 이상의 개보수 예산이 투입되고 있다.

[표 1-1] 수리시설개보수사업 연도별 예산

(단위 : 억원)

2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
3,490	3,513	4,307	3,759	2,418	3,485	4,013	4,585	7,853	4,723	4,518	4,050	4,780

노후 저수지에서 개보수가 필요한 공종 중 수중에 위치하는 복통, 사통, 취수탑 등 농업용수를 취수하기 위한 시설을 개보수하는 경우에는 익년도의 영농에 필요한 농업용수를 확보하면서 공사 구간을 Dry구간으로 만들기 위하여 가물막이 시설이 필수적이다.



[그림 1-2] 농업용저수지 가물막이 공사 전경

현재 농업용저수지 개보수 현장에서 적용되고 있는 가물막이 공법은 토체와 대형 마대쌓기 또는 토체와 강널말뚝(Sheet Pile)을 이용하는 공법이 주가 되어 있다.



[그림 1-3] 토체와 대형마대를 이용한 가물막이 공법



[그림 1-4] 토체와 강널말뚝을 이용한 가물막이 공법

최근 오래전에 축조된 대다수 농업용 저수지의 노후화는 과거 축조될 당시 기술의 한계를 드러내는 요인이 되고 있다. 저수지 하부 기초지반이 암반이 아닌 투수성 지반 위에 축조되어 있는 경우, 투수성 토층 내부로 침투수에 의한 제체 하류사면의 하단부의 높은 간극수압의 발생으로 제체의 장기적인 안정성 문제를 초래하게 되므로 농업용수 용수확보 측면에서 문제가 발생할 가능성이 크다. 그래서 침투수량이 과다하여 필요로 하는 저수량을 확보할 수 없는 경우에는 침투수 억제방법을 사용하여 침투수량을 줄이고 댐의 안정성을 확보하여야 한다. 이를 방지하기 위해 침투수를 안전하게 제체의 외부로 배수를 유도하는 방법을 취하고 있으며, 저수지 하류에 가면에 감압정을 설치하는 방법이 유효한 것으로 알려지고 있다.

미국에서는 저수지 제방의 안정성을 향상시켜 용수를 확보하기 위한 감압정 설계, 시공 및 유지관리의 기술의 학문적 연구, 실제 현장에서의 적용을 연계하는 구조를 이루고 있으나, 국내의 경우 농업용저수지 제방 감압정 설계에 관련한 연구 등이 미진한 편이고, 기술개발이 시급한 실정이며, 일본에서는 농업용저수지 제방 내부의 하중을 감소시키기 위한 다양한 기술을 연구하고, 이를 실제 실증시험을 통하여 성과를 검증하기 위한 지속적인 노력을 계속하고 있다.

농업용 저수지 제방 특성을 고려한 감압정 기술의 검토 및 개발을 통해 노후화로 인한 제방 내부의 침식으로 인한 붕괴 가능성에 대처하고 농업용수를 확보 할 수 있도록 취약성을 개선할 필요가 있다.

1.1.2 연구개발의 필요성

현재 문제점을 토대로 본 연구의 개발의 필요성은, 첫째 한정된 개보수 사업비를 들 수 있다. 정부에서는 한정된 사업비로 농업용저수지 17,000여개를 안전하게 관리하여야 하는 실정이지만 개보수 사업비의 부족으로 전년도에 저수지 정밀안전진단을 실시하고 안전등급이 낮은 시설 위주로만 이루어지고 있다.

둘째 경제적으로 안전한 공법을 개발하여 개보수 공사에서 상대적으로 비용이 높은 비율을 차지하는 가물막이 공종의 소요비용을 줄이면서 안전한 공법의 개발이 필수적이며 이는 한정된 예산으로 많은 수의 저수지를 안전하고 효율적으로 안전관리 하는데 충분히 기여할 것으로 예상된다.

셋째 저수지의 제방이 노후화로 투수성 토층 내부로 침투수에 의한 제방 하류사면의 하단부에 높은 간극수압이 발생하여 제방의 장기적인 안정성에 문제가 발생 될 것으로 예상되므로, 제방 손실로 인한 농업용수 저수량 저하를 방지하기 위하여 선제적 대응이 필요하다.

마지막으로 농업용 저수지 제체 특성을 고려한 감압정 공법의 적용을 통해 노후화로 인한 내부침식 발생 시 제체 침식으로 인한 농업용수 저수량 저하를 대처할 수 있도록 침윤선 저하 공법 개발이 필요하다.

일반적으로 감압정은 지표로부터 투수층의 전체 길이를 관통하도록 직경 10~50cm의 우물을 10~30m의 간격으로 설치하고 있으나, 이에 대한 명확한 설계기준과 그 효과에 대한 검증은 미비한 상태이다.

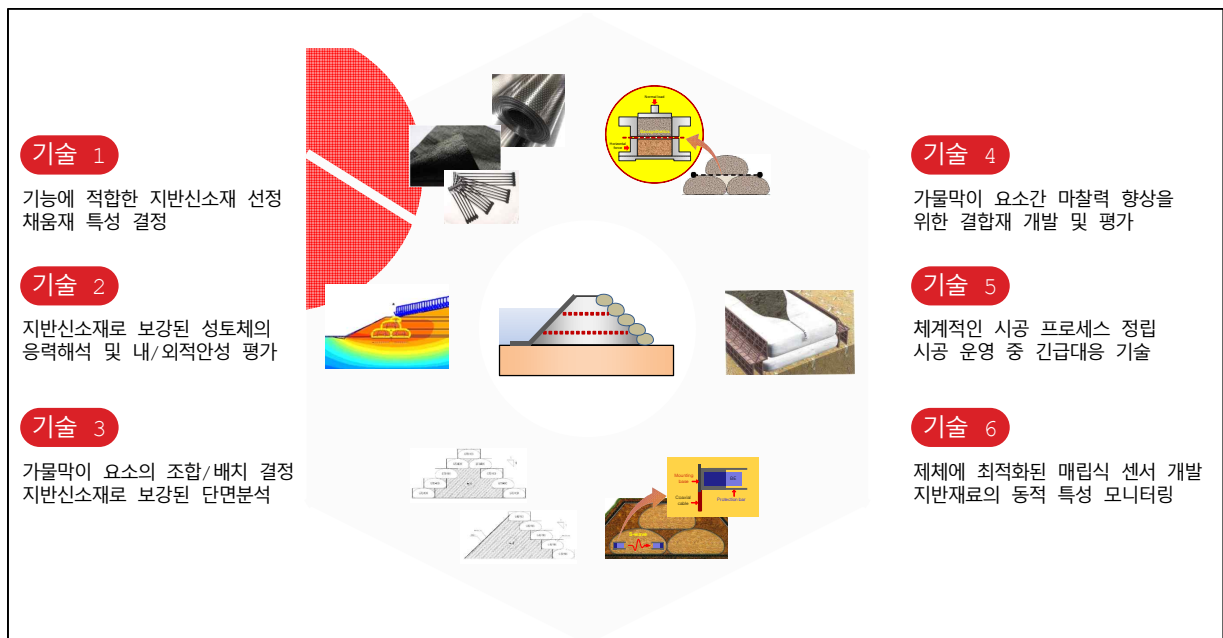
1.2 연구개발의 목표

본 연구의 목표는 농업용저수지 개보수 사업을 보다 안전하고 효율적으로 수행하기 위해서는 가물막이 시설을 합리적인 비용으로 보다 안전하게 계획할 수 있는 단면과 설계 및 시공 매뉴얼을 현장 실증을 통하여 제시함으로써 농업용수 확보를 모색해야 한다.

따라서, 본 연구에서는 안정성, 시공성, 경제성을 확보한 농업용 저수지 개보수공사 가물막이 공법 개발 및 실증연구를 통한 농업용수 확보 기술을 개발 하는 것을 본 연구의 최종 목표로 하고 있다.

이에 크게 지반신소재를 이용하여 기존보다 단면축소 및 결합성능이 보강된 가물막이 공법에 대한 설계 및 시공기술 개발과 농업용수 용수확보를 위한 감압정 설계, 시공 프로세스 개발로 구분할 수 있다.

지반 신소재를 이용하여 기존보다 단면축소 및 결합성능이 보강된 가물막이 공법에 대한 설계 및 시공기술 개발의 핵심 기술은 ① 보강 및 차수기능에 적합한 지반신소재 결정 및 채움재 특성 결정 기술, ② 가물막이 요소의 조합/배치 결정 및 구축가능 단면 분석 기술, ③ 가물막이 요소간 마찰력 향상을 위한 결합재의 개발 및 마찰특성 평가 기술, ④ 지반신소재로 보강된 성토체의 응력해석 및 내/외적 안정성 평가 기술, ⑤ 시공/운영 중 긴급대응 기술 및 시공성과 안정성을 확보한 차수/보강 기술, ⑥ 제체에 최적화된 매립식 탄성과 센서 개발 및 지반재료의 동적특성 평가 기술로 구분할 수 있다.



[그림 1-5] 지반신소재를 활용한 가물막이 공법 연구개발 개요도

농업용수 용수확보를 위한 감압정 설계, 시공 프로세스 개발은 저수지 제방 하중 저하를 위한 감압정 설계 기술, 용수확보를 위한 감압정 시공 프로세스 정립이 필요하다.

1.3 연구 범위

본 연구의 최종목적은 집중호우에 의한 농업용저수지 제체 월류 및 내부침식 보호공법 개발이며, 저수지 제체 주요 붕괴원인 및 붕괴방지 기술조사 분석, 대형모형실험 및 원심모형 실험에 의한 월류 발생시 제체 보호기술, 내부 침식시 제체 및 복통 보호기술 개발을 연구 범위로 하고 있으며, 가물막이/감압정 설계 및 시공 매뉴얼 개발을 목표로 연구가 진행되었다.



[그림 1-6] 연구개발 범위 및 목표

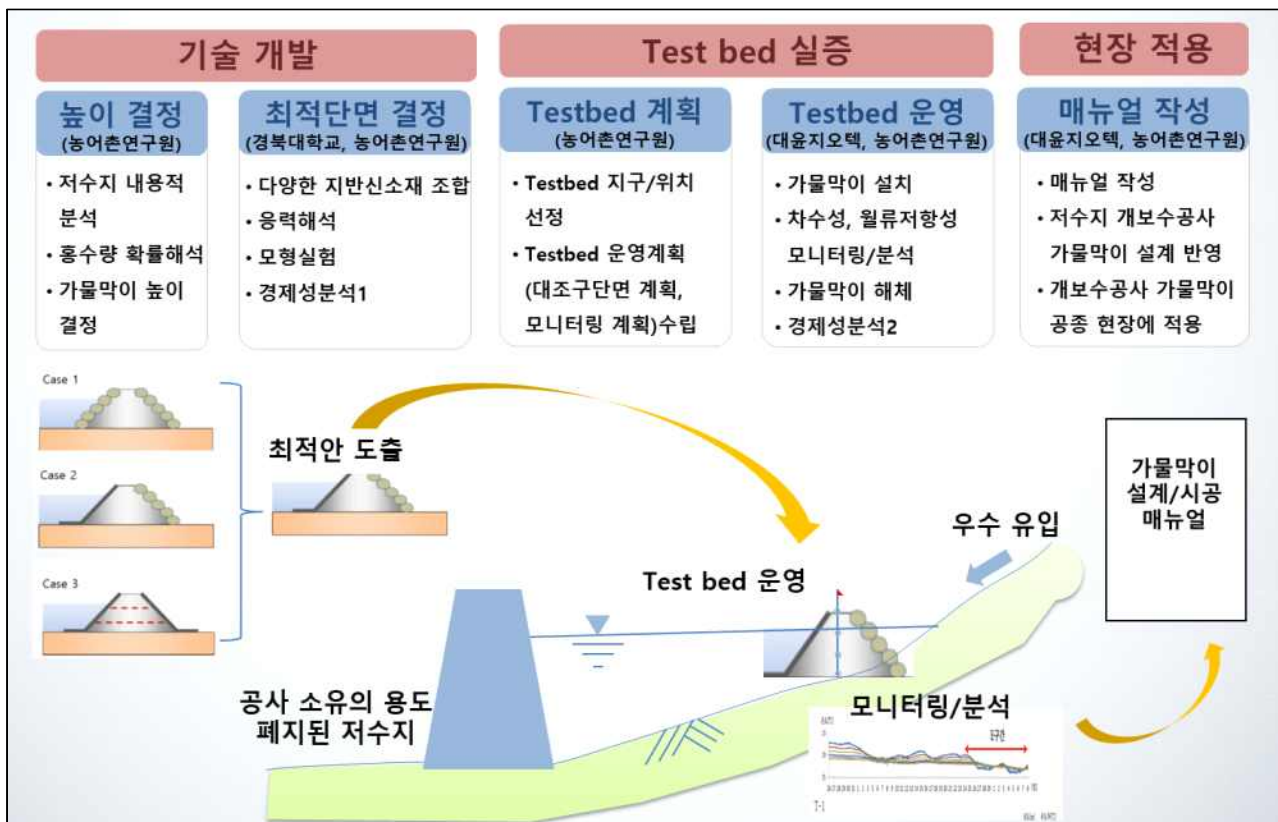
1.4 연구 방법

첫째로 기 보유한 지반신소재 관련 기술을 기반으로 저수지 가물막이 공법의 설계 및 시공 기술 개발 추진하였다. 농어촌연구원은 용수 확보 및 저수지 제방의 하중 저하를 위한 감압정 설계 및 시공기술 개발 담당하였으며, 경북대학교는 가물막이 공법의 안정성 확보 기술 및 요소간 밀폐/결합 설계기술 개발 담당, 대운지오텍은 가물막이 공법의 설치 및 해체 기술 개발 및 테스트베드 시공 및 운영 담당하였다.

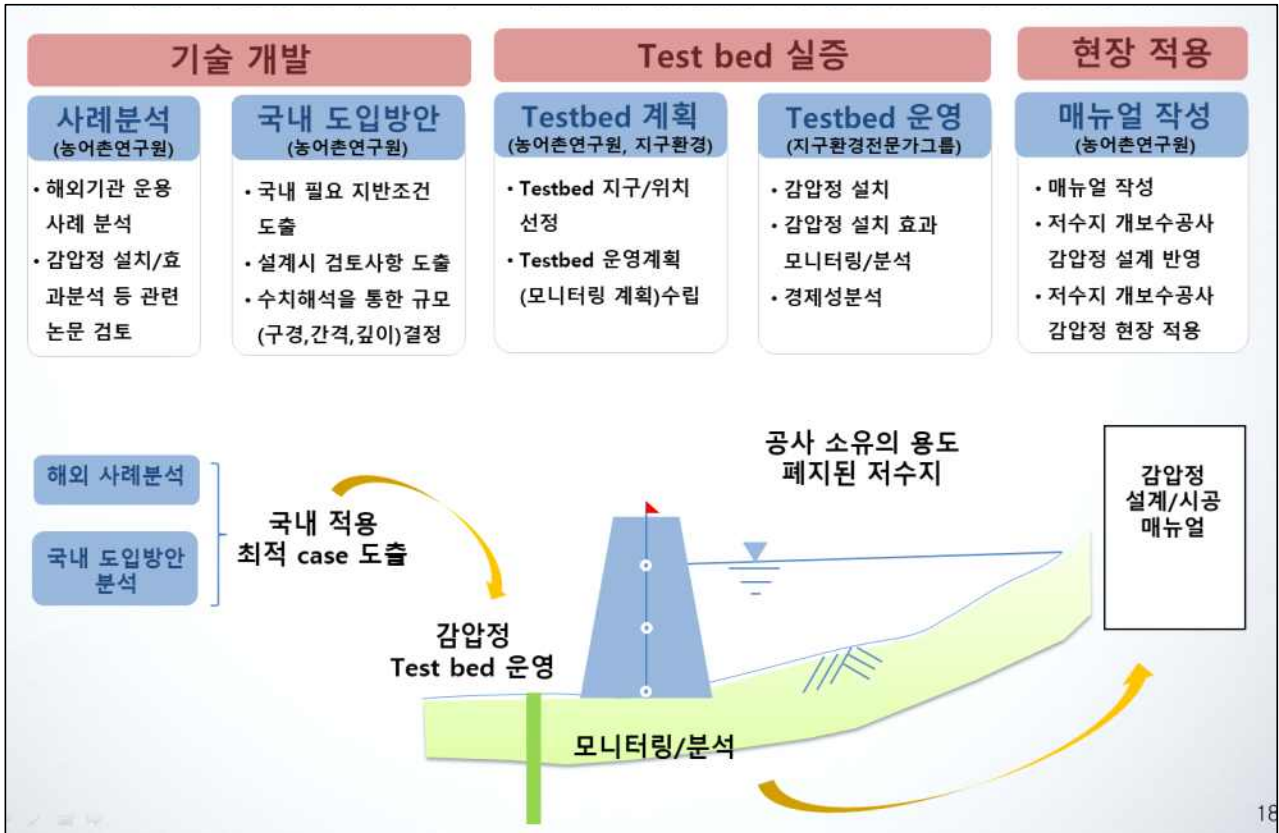
둘째로 농업용 저수지 특성을 고려한 지반 및 수리 통합 안정성을 확보한 가물막이 설계기술 개발을 위하여, 한국농공학회 중심의 지반공학 및 수문학 분야의 전문가 확보 및 자문을 구하였다.

셋째로 기술정보 수집을 위한 구축된 네트워크 활용용하는 방안으로 농어촌연구원에서는 한국농어촌공사의 각 지사별 가물막이 공법의 설계 및 시공 사례의 수집 및 시사점 도출하였으며, 경북대학교는 고려대학교, University of Illinois at Urbana-Champaign 등 국내/외 우수 대학의 전문가들과의 기술정보 공유 수행하였다. 대운지오텍은 기존의 노하우 외에도 가물막이 공법의 설계 및 시공 경험을 보유한 국내/외 업계 네트워크를 통해 최신 기술 수집하였다.

마지막으로 개발된 가물막이 공법의 시범 적용을 위한 테스트베드 구축하였다. 경북대학교에서는 테스트베드 운용을 위하여 개발된 매립식 탄성과 센서 시스템을 적용하였으며, 대운지오텍에서는 한국농어촌공사가 관리하는 저수지 중 용도폐지된 저수지 상류지역에서 소규모 가물막이 모형 시공 계획하였으나, 테스트베드 섭외가 어려워 인공적으로 토조를 이용한 실험 모형으로 개발한 가물막이 공법을 시공 실시하였다.



[그림 1-7] 가물막이 공법 개발 참여기관별 연구내용 및 협력체계 모식도



[그림 1-8] 용수확보 기술 개발 참여기관별 연구내용 및 협력체계 모식도

1.4.1 연구개발 추진체계

연구개발과제		총 참여 연구원
과제명	저수지 개보수공사 가물막이 공법 및 용수확보 기술 개발	주관연구책임자 (강 병운)외 총 22명

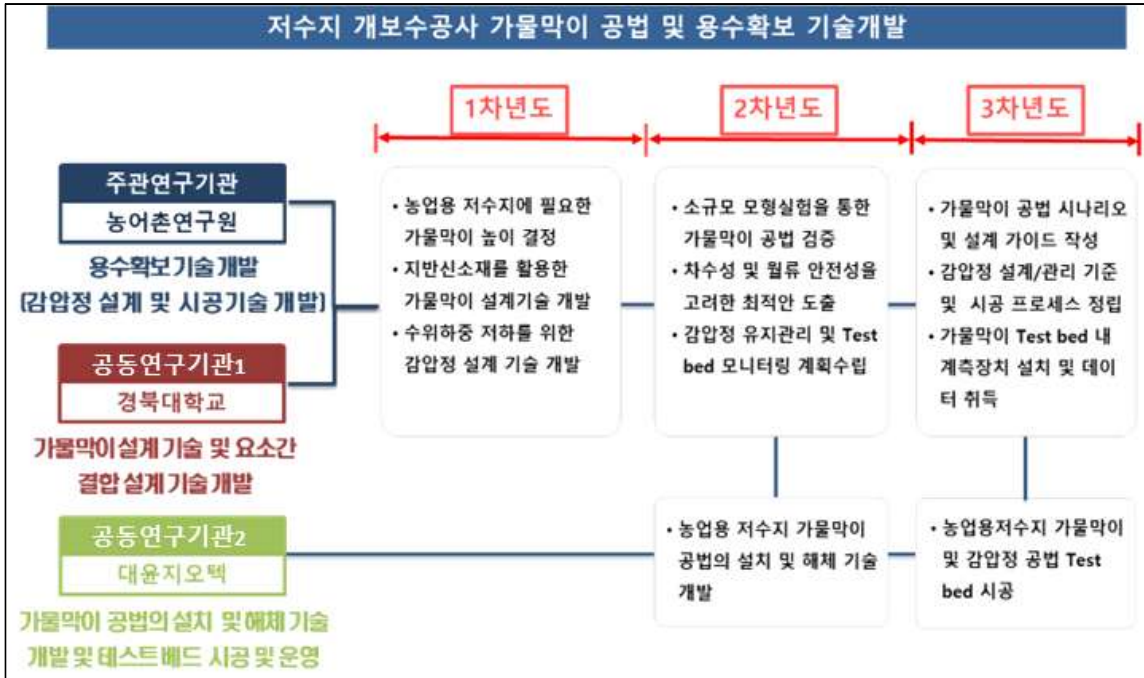
기관별 참여 현황		
구 분	연구기관수	참여연구원수
중소기업	2	11
대 학	1	5
국공립(연)		
출 연 (연)		
기 타	1	7

농어촌연구원	경북대학교	대운지오텍(주)
농업용수 용수확보 기술개발	농업용저수지 가물막이 공법의 설계기술 개발	저수지 가물막이 공법의 설치 및 해체기술 개발
강병운 외 6명	변용훈 외 4명	손일욱 외 5명
기술개발 내용	기술개발 내용	기술개발 내용
<ul style="list-style-type: none"> -농업용저수지 가물막이 높이 결정 -저수지 수위하중 저하를 위한 감압정 설계 및 설치 기술 개발 -가물막이 공법의 평상시 차수성 및 홍수시 월류 안전성 모니터링 계획 수립 /분석 -가물막이 및 감압정 공법의 경제성 분석 	<ul style="list-style-type: none"> -다양한 지반소재를 활용한 보강된 최적 가물막이 제체 도출 -가물막이 요소 사이의 마찰력 증대를 위한 결합재 개발 -가물막이 제체에 최적화된 매립식 진단과 센서/시스템 기술 	<ul style="list-style-type: none"> -현장 토사를 활용하여 설계에서 도출된 지반신소재를 활용한 최적단면과 대조단면의 현장구현 및 복구 -가물막이 시설 설치 및 해체를 위한 프로세스 정립 및 매뉴얼 개발

지구환경전문가그룹
지반신소재로 보강된 가물막이 모니터링 방안
한상재 외 4명
기술개발 내용
<ul style="list-style-type: none"> -지반신소재로 보강된 가물막이 계측장치 설치 및 데이터 취득

1.4.2 단계별 추진 내용

본 연구의 경우 2단계 3년 과제로 각 그룹별 개발 목표를 정하여 년도별 연구 목표를 달성하였다. 주관연구기관인 농어촌연구원은 감압정 설계 및 시공기술 개발 관련 연구를 연차별로 진행하였다. 공동연구기관 1인 경북대학교에서는 가물막이 설계 기술 및 요소간 결합 설계 기술개발을 진행했으며, 공동연구기관 2인 대운지오택은 가물막이 공법의 설치 및 해체 기술 개발 및 테스트베드 시공 및 운영을 담당하여 최종 테스트베드까지 검증을 완료하였다.



[그림 1-9] 연구개발 연차별 추진내용

수행 기관	연구목표	연구내용	세부 추진내용
주관 (농어촌연구원)	·감압정 설계 및 시공기술 개발	·농업용저수지 가물막이 적정높이 결정 ·기존 가물막이 공법 사례 분석(사고사례, 비용절감방안분석) ·감압정 해외적용 사례 및 적용 매뉴얼 분석 ·감압정 설치 필요조건 및 규모 결정	·1종 농업용저수지 내용적곡선 분석, 가물막이 계획홍수량 및 최고수위 결정홍수량도 확률해석 ·4대강 등 높이기 사업에 적용된 가물막이 공사 사례 분석 ·감압정 설계 및 설치 해외 사례 및 해외 적용 매뉴얼 분석 ·저수지 감압정 설치 필요 조건 도출 및 규모 결정을 위한 수치해석
공동연구 (경북대학교)	·가물막이 설계 기술 및 요소간 결합 설계 기술 개발	·지반신소재의 재료적 특성 조사 ·지반신소재를 활용한 가물막이 공법 설계 방안 개발	·지반신소재 종류에 따른 공학적 특성 및 적용 사례 조사 ·다양한 지반신소재를 활용한 가물막이 요소 선정 및 조합 배치 결정 ·가물막이 요소간 마찰력 증대 위한 결합재 개발 ·지반신소재로 보강된 성토체의 구축 가능 단면형상 분석 ·지반신소재 구조물의 응력해석 및 안정해석
공동연구 (대운지오택)	·가물막이 공법 의 설치 및 해체 기술 개발 및 테스트 베드 시공 및 운영	·지오택스타일 튜브용 원단물성 개선 ·지오택스타일 튜브 시공공법 및 장비 조합 최적화 ·개발된 공법에 대한 안정성 및 시공방법 평가를 위한 실험 현장 실험 수행	·경제성, 물성 적용성을 검토하여 강도 및 조작설계 실시 ·현장에 적용 가능한 지오택스타일 튜브를 활용한 가물막이 공사 시방서 작성 ·개발된 지오택스타일 튜브 및 결합재를 적용하여 시공, 차수성능 및 제재안정성 검토 실시

[그림 1-10] 기관별 세부 추진내용

1.4.3 연구 추진 수행 내용

본 연구는 크게 2개의 부분으로 나눌 수 있다. 지반신소재를 활용한 가물막이에 대한 설계 및 시공기술 개발과 농업용수 용수확보를 위한 감압정 설계 및 시공 프로세스 개발로 구분된다. 각 연구 주제별 연구 내용 및 연구결과는 다음 표와 같다.

[표 1-2] 가물막이에 대한 설계 및 시공기술 개발에 따른 연구결과

연구개발 수행 내용	연구결과	년차
국내 농업용 저수지에 필요한 가물막이 높이 결정	<ul style="list-style-type: none"> · 1종 저수지 1,197개의 평균 만수위-사수위 차이를 분석 (차이 13.6m) · 과거 개보수 및 4대강 뚝 높이기 사업에 적용된 가물막이 규모 결정 사례 분석으로 통해 유효저수량(저수율)의 30~80% <ul style="list-style-type: none"> ➔ 평균 만수위-사수위 차이의 60% · 최종적용 가물막이 구조물의 규모는 약 8.0m로 결정 	1차년도
지반신소재의 재료적 특성 조사	<ul style="list-style-type: none"> · 지반신소재 종류에 따른 공학적 특성 및 적용 사례 조사 · 지오텍스타일 튜브 공법 및 적용사례 조사 · 관련 선행 연구를 참고하여 모형실험 시스템 구축 및 실시 (새로운 주입모듈 개발로 장비사양 최적화) 	1차년도
지반신소재를 활용한 가물막이 공법 설계 방안 개발	<ul style="list-style-type: none"> · 다양한 지반신소재를 활용한 가물막이 요소 선정 및 조합/배치 결정 · 지반신소재로 보강된 성토체의 구축가능 단면형상 분석 · 지반신소재 구조물의 응력해석 및 안정해석 · 가물막이 요소 사이의 마찰력 증대를 위한 결합재 개발 	1차년도
개발된 공법에 대한 안정성 평가를 위한 모형실험 수행	<ul style="list-style-type: none"> · 소규모 모형시험을 위한 토조 및 저류조 구축 · 지오텍스타일 튜브의 체체의 투수성 안전성 평가 실시 	2차년도
가물막이 요소별 밀폐/결합 성능 평가	<ul style="list-style-type: none"> · 개발된 결합재의 결합 성능 비교 실험 실시 · 시멘트계 결합재 배합비 결정 	2차년도
시공/운용을 모사한 안전성 평가	<ul style="list-style-type: none"> · 시공단계에 따른 다단 지오텍스타일 튜브 안정성 평가 (체체의 변위 측정) · 다양한 시공조건에 따른 수치해석 실시 (투수층 두께, 체체 형상 등) 	2차년도
지반재료의 동적특성 평가	<ul style="list-style-type: none"> · 가물막이 체체에 최적화된 매립식 전단파 센서 및 시스템 개발 	2차년도
지오텍스타일 튜브용 원단물성 개선	<ul style="list-style-type: none"> · 경제성, 물성, 적용성을 검토하여, 강도 및 조직설계 실시 (조직, 경사, 위사 조건 차이 적용) 	2차년도
지오텍스타일 튜브 시공공법 및 장비 조합 최적화	<ul style="list-style-type: none"> · 지오텍스타일 튜브(신소재)를 활용한 가물막이 시공 매뉴얼 작성 	2차년도
개발된 공법에 대한 안정성 및 시공방법 평가를 위한 실험대형 현장 실험 수행	<ul style="list-style-type: none"> · 동일한 배합비의 흙제방, 지오텍스타일 튜브, 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브를 시공하여, 차수성능 및 체체안전성 검토 실시 	3차년도

[표 1-3] 농업용수 용수확보를 위한 감압정 설계 및 시공 프로세스 개발에 따른 연구결과

연구개발 수행 내용	연구결과	년차
농업용수 용수확보 기술개발	<ul style="list-style-type: none"> · 감압정 설계 기술 개발을 위해 해외 감압정 사용 현황 및 시공 방법, 지침 등 조사 · 감압정 규모 결정을 위한 수치 해석 실시 · 감압정 설계 매뉴얼 개발 	1차 년도
농업용 저수지 감압정 유지관리 및 테스트베드 모니터링 계획 수립	<ul style="list-style-type: none"> · 감압정 테스트베드는 은계호수공원(구 소래저수지)로 선정하여, 감압장 및 모니터링 시스템 구축 · 계측 결과를 통한 3차원 침투 해석을 통한 침투 안전성 평가 실시 · 감압정 설계 및 시공매뉴얼 작성 	2차 년도
감압정(Relief)적용에 따른 제방비탈면의 안정성 평가	<ul style="list-style-type: none"> · 높은 수위시 제방 비탈면의 붕괴방지 감압정(Relief)적용을 위한 3차원 수치해석 실시(간극수압-응력-사면안정 연동 해석 실시) · 감압정(Relief)적용하지 않은 경우에 대해서도 수치해석을 수행하여 그 안정성에 대해 규명 	3차 년도

2. 가물막이 설계 및 시공기술 개발

2.1 가물막이 높이 결정

본 과업의 목적은 농업용저수지 개보수 공사 시 농업용수 확보를 위하여 적용되는 기존 가물막이 공법의 문제점을 파악하고 보다 안전하고 경제성 있는 공법을 개발하고자 한다

개보수 공사 시 적용되는 가물막이 공법 결정은 공사기간, 개보수 공종, 하류부 농경지 면적 등에 따라 이루어지나, 여러 가지 요소들을 포괄적으로 표현할 수 있는 저수지의 규모의 대소에 따라 정해지는 경우가 대부분이다. 비교적 소규모 저수지의 경우에는 농업용수 확보를 위한 가물막이라는 개념보다는 복통 등 취수시설의 개보수 공사에 필요한 dry한 작업을 위한 작업용 가시설 위주로 설치되고 있는 실정이다.

반면에 기존 저수지가 확보하고 있는 농업용수를 개보수 공사기간 중에도 확보하여 익년도 영농에 지장이 없도록 하기 위한 가물막이는 주로 1종 시설 이상 규모의 저수지에 적용된다.

[표 2-1] 농업생산기반 1종, 2종, 3종 시설의 정의

종별 구분	시설 구분	주요 내용
농업생산기반 1종 시설	저수지	총 저수용량 30만m ³ 이상인 시설
	양수장·배수장	단위시설(1개소)당 2,000마력 이상인 시설
	방조제	방조제관리법 제3조의 규정에 따라 결정된 국가관리 방조제
	하구둑	-
농업생산기반 2종 시설	저수지	총 저수용량 30만m ³ 미만인 시설
	양수장·배수장	단위시설(1개소)당 1,000마력 이상 2,000마력 미만인 시설
	방조제	방조제관리법 제3조의2의 규정에 따라 결정된 지방자치단체 관리 방조제
농업생산기반 3종 시설	-	1종 시설 및 2종 시설 이외의 양수장, 배수장, 취입보, 지하수이용시설, 용수로, 배수로 및 그 부대시설

그리고, 국내의 농업용 저수지 관리주체는 한국농어촌공사와 지방자치단체로 나뉘어져 있으며, 농업용 저수지의 관리주체별 종별 관리 저수지의 개소수는 다음과 같다.

[표 2-2] 농업용 저수지 관리주체별 종별 개소수

구분	합계	1종	2종	비고
개소수	17,289	1,270	16,019	
한국농어촌공사	3,406	1,197	2,209	
지자체	13,883	55	13,828	

농업용 저수지 관리주체별 종별 개소수 표를 보면 익년도 농업용수 확보를 위한 가물막이 공종이 이루어지는 1종 저수지 1,273개소 중 1,197(94.3%)는 한국농어촌공사에서 관리하고 있으며, 저수지 개보수 공사 시 필요한 가물막이의 높이를 결정하기 위하여 1종 저수지의 94% 이상을 관리하고 있는 한국농어촌공사의 1종 저수지의 내용적을 분석하여 가물막이의 규모(높이)를 결정하고자 한다.

2.1.1 1종 저수지 내용적 곡선 분석

가물막이 높이 결정을 위하여 한국농어촌공사 관리 1종 저수지 1,197개의 내용적표를 RIMS D/B에서 추출하였다.

하지만, RIMS DB에서 추출한 1,197개 저수지의 내용적표에는 개별 저수지의 만수위와 사수위에 해당하는 수위값은 있었지만, 가물막이 높이 결정에 필요한 만수위와 사수위의 수위차이를 저수지별로 제공해 주지는 못하였다.

[표 2-3] ○○저수지 내용적표 RIMS DB 추출 사례

시설명	저수위	면적		내용적		저수율	비고
		표고별	평균	구간별	누가		
○○	58	5,400	2,700	0	25,000	0	사수위
	59	8,320	6,860	4,668	29,668	0.98	
	60	20,630	14,475	17,098	46,766	4.59	
	61	33,260	26,945	31,828	78,594	11.31	
	62	44,520	38,890	45,937	124,531	21	
	63	54,580	49,550	58,529	183,061	33.35	
	64	62,190	58,385	68,965	252,026	47.9	
	65	71,190	66,690	78,775	330,801	64.51	평수위
	66	81,850	76,520	81,386	412,187	81.69	
	67	92,230	87,040	86,813	499,000	100	만수위
	68	92,230	92,230	92,230	591,230	119.46	홍수위

이에 RIMS DB에서 추출한 1,197개 저수지의 내용적표를 엑셀(Excel)의 피벗 기능을 활용하여, 각 저수지별 만수위와 사수위의 차이를 도출한 후 이를 평균하였다.

[표 2-4] 피벗기능 활용 1종 저수지 만수위-사수위 분석 결과(일부)

저수지명	만수위	사수위	홍수위	만수위-사수위	비고
매산	297.56	272.84	298.56	24.72	
지산	303	292	304.57	11	
가북	440.8	407	443	33.8	
상천	449.2	431	450	18.2	
거창	391.5	365	393.5	26.5	
진목	349.7	324	350.7	25.7	
신원	476.48	455	477.48	21.48	
죽전	344	307		37	
신촌	141.75	124	142.55	17.75	
상신	57.2	36.76	58.2	20.44	
울원	76.54	56.14	77.54	20.4	
명곡	119.17	99.92	119.97	19.25	
무곡	82.6	74.27	83.8	8.33	
백역	126.62	116.91	127.62	9.71	
가회	290.64	264.58	291.64	26.06	
울곡	132.9	110	133.7	22.9	
장계	132.7	110	134.5	22.7	
대현	185.2	171	186	14.2	
중촌	141.2	130	142	11.2	
대암	154.6	132	155.6	22.6	
귀엄	50.9	43.6		7.3	
용수	24	21		3	
성읍	168	163.4		4.6	
			평균	13.6	

2.1.2 가물막이 공사 사례 분석

노후 저수지에서 개보수가 필요한 공중 중 수중에 위치하는 복통, 사통, 취수탑 등 농업용수를 취수하기 위한 시설을 개보수하는 경우에는 익년도의 영농에 필요한 농업용수를 확보하면서 공사 구간을 Dry구간으로 만들기 위하여 가물막이 시설이 필수적이다.



[그림 2-1] 농업용저수지 가물막이 공사 전경

농업용 저수지 개보수 현장에서 적용되고 있는 가물막이 공법은 토제와 대형 마대쌓기 또는 토제와 강널말뚝(Sheet Pile)을 이용하는 공법이 주종을 이루고 있다.



[그림 2-2] 토제와 대형마대를 이용한 가물막이



[그림 2-3] 토제와 강널말뚝을 이용한 가물막이

4대강 뚝 높이기 사업 준공기록지를 참고하여 가물막이 시공사례를 조사결과, 농업용 저수지 개보수 현장에서 사용하는 가물막이 공법과 유사하게 토제, 마대, 강널말뚝을 적절하게 조합하여 현장 상황에 맞게 가물막이 공사를 수행하였다.

[표 2-5] 4대강 뚝 높이기사업 가물막이 시공 사례

지역	지구명	가물막이		비고
		형식	규모	
경기	대평	강널말뚝+토제+마대	-	
	마둔	2열 sheet pile	저수율 30%	
	봉원	강널말뚝+토제+마대	저수율 56%	
	고려	토제	수위 최대한 하강	
	금사	토제	저수율 30%	
강원	개운	강제 구조물	저수율 39%	
	금호	토제+마대	유효저수량 70%	
	빈계	강제 구조물	유효저수량 70%	
전북	고수	강널말뚝+토제+마대	유효저수량 80%	
	금풍	토제	수위 최대한 하강	
	노촌	강제 구조물	유효저수량 40%	

현재 가물막이 공사의 문제점으로 크게 3가지를 들 수 있다. 첫째로 체계화된 설계기준 부재이다. 이는 영구 구조물이 아닌 가시설의 특성으로 인해 체계화된 설계기준의 부재로 규모 및 공법 등이 체계화되어 있지 않다.

둘째는 안전사고 발생 빈번하게 발생하는데 있다. 이는 임시구조물이라는 인식의 한계로 안전사고 발생이 빈번하다. 마지막으로 공사비용 과다이다. 이는 임시 구조물임에도 불구하고 수면에 접하여 시설물이 설치되고 한쪽으로 편중된 하중을 지지 및 차수하기 위하여 공사비용이 높은 편이다.



[그림 2-4] 가물막이(토제) 붕괴 사고 전경

2.1.3 가물막이 높이 결정

본 연구를 통하여 개발하고자하는 가물막이 공법의 대상 규모(모델링하고자 하는 가물막이의 높이)를 결정하기 위하여 1종 저수지 1,197개의 평균 만수위-사수위 차이를 분석하였으며, 익년도 영농에 지장이 없는 수준의 농업용수를 확보하면서 시공한 사례를 조사하였다.

각 지구에 적용된 가물막이는 유역면적과 수혜면적의 비율, 개보수 공종과 공사에 소요되는 기간, 개보수 대상 구조물의 평면적 배치 위치 등에 따라 다양한 규모로 적용되었다.

이에 본 연구에서 분석하고자 하는 가물막이 구조물의 규모는 다음 조건을 고려하여 개략 8.0m로 검토대상 제원을 결정하였다.

첫 번째 조건으로 가물막이 적용대상 저수지인 1종 저수지 전체의 평균 만수위-사수위 차이가 13.6m이라는 점이다.

두 번째가 과거 개보수 및 4대강 뚝 높이기 사업에 적용된 가물막이 규모 결정 사례를 활용해서 유효저수량(저수율)의 30~80%로 이는 평균 만수위-사수위 차이의 60%라는 점이다.

마지막으로 저수지 개보수사업 공사비 규모 대비 가물막이 공사비 규모가 가물막이 공사비가 개보수 전체 공사비(약 30억원 규모)에 비하여 너무 많은 비율을 차지하는 것은 불합리하다는 점에서 30억원 내외의 공사비로 가물막이 공종 외에도 다른 공종에 대한 개보수가 이루어져야 하기 때문에 가물막이 구조물의 규모를 대략 8.0m로 결정하였다.

2.2 지반신소재의 재료적 특성 조사

2.2.1 지반신소재 종류별 사례 조사

지반신소재 종류에 따른 공학적 특성을 조사하였으며, 크게 6가지의 종류로 구분되며, 종류에 따라 조금씩 다른 특성을 가지고 있다.

가. 지오텍스타일(Geotextiles)

지오텍스타일의 기능적으로 특성을 분석하였다. 지오텍스타일의 기능은 여과/분리, 보강, 배수 및 차수 등으로 구분할 수 있다.

첫째 분리 기능적 특성은 연약한 점성토와 자갈, 돌덩어리, 블록 등의 조립재가 외부하중에 의해 서로 압착될 때 두 재료 사이에 놓인 지오텍스타일이 세립토와 조립입자가 혼합되는 것을 막아주며, 세립토가 조립입자의 공극 속으로 유입되면 배수능력이 저하되며, 조립입자가 세립토로 침입할 때에는 조립입자의 강도가 저하한다.

둘째 여과 기능적 특성은 조립토와 세립토 또는 부유세립토 사이에 설치하여 물의 흐름에 따른 세립토의 이동을 최소로 방지하면서 물을 여과시키는 기능이다.

셋째 보강 기능적 특성은 토목용 섬유제품의 인장강도에 의해 흙 구조물의 안정성을 증진시킨 기능이다. 보강기능을 목적으로 사용하는 지오텍스타일은 인장강도는 물론 흙과의 마찰력 또한 커야 한다. 연약지반 위에 포설된 지오텍스타일은 하부지반의 변위를 저감시키고 부등침하를 감소시켜 파괴에 대한 저항력을 증대시키므로 상부에 설치되는 구조물 안정성을 증대시킨다. 이때, 흙과 토목용 섬유제품 사이의 마찰력이 상부하중에 의한 유발 인장력보다 작다면 지오텍스타일은 연약지반 내부로 빨려 들어가 큰 침하를 야기하며 지오텍스타일의 인장력은 발현되지 못한다. 따라서, 보강재용 지오텍스타일은 인장강도가 크고, 흙과의 마찰력이 클수록 보다 큰 효과를 보여줄 수 있다.

넷째 배수 기능적 특성으로 세립토, 콘크리트와 같은 투수성이 낮은 토목재료 등과 밀착해 설치하여 물이 원활하게 배수구로 흐르게 한다.

마지막으로 차수 기능적 특성으로 고밀도의 폴리에틸렌계 제품을 이용하여 폐기물 매립장 내부의 오염수가 주위의 토양 및 지하수를 오염시키지 못하도록 차단하는 기능이다.

나. 지오그리드(Geogrids)

지오그리드 폴리머를 판상으로 압축시키면서 격자모양의 그리드 형태로 구멍을 내어 특수하게 만든 후, 일축 또는 이축으로 연신하여 제조한다. 일반적으로 연신과정에서 보통 10~50mm 크기의 타원 또는 사각모양의 큰 구멍의 형상으로 제조된다.

분자배열도 잘 조정되어 결과적으로 높은 강도를 나타내므로 지반보강용으로 사용되며 원료로는 폴리올레핀과 폴리프로필렌 및 PVC 코팅 재료 등을 들 수 있다.

다. 지오네트(Geonets)

지오네트는 폴리에틸렌으로 만들어지며 비중은 거의 0.935~0.942g/cc로 되어 있다.

지오네트는 일정한 각도로 Strand를 교차한 2세트의 평행한 구조를 가지며 각각 교차점의 가닥들은 용융, 접착되어 있으며, 지오네트는 두께가 5~7mm 정도이며 배수능력이 가장 중요한 인자이고, 지오네트의 다이아몬드형 구멍은 길이 12mm, 폭 8mm 이다.

지오네트는 전적으로 현장 배수용으로 사용되며 항상 지오텍스타일과 지오멤브레인과 같은 다른 토목섬유 재료와 같이 사용된다.

라. 지오멤브레인(Geomembranes)

차수용 토목섬유의 재료로서 폴리머 계통의 합성수지 성분으로 이루어진 재료로 지오텍스타일에 아스팔트로 포화시키거나 도포하여 만든 제품이다. 여러 겹의 역청재를 혼합한 지오펜프지트 등의 제품도 있다.

일반적으로 지오멤브레인은 완전한 불투수성의 재료로 알려져 있으나 완전 불투수성의 재료는 아니며, 지오텍스타일이나 점토에 비해서는 불투수성의 재료라고 할 수 있다. 수증기 투과법에 의해 측정된 지오멤브레인의 투수계수는 $10^{-12} \sim 10^{-15} \text{m/sec}$ 정도이다.

지오멤브레인은 합성섬유의 성분에 따라서 열가소성, 열경화성, 그리고 혼합성 지오멤브레인 등 크게 3가지의 형태로 분류된다.

사용재료의 혼합비와 제조공정을 다양하게 하여 사용목적에 적합한 제품이 생산되어 재료의 선정에서는 사용대상의 구조물의 용도와 현장의 특성과 환경적인 조건을 신중하게 검토하여야 한다.

지오멤브레인의 가장 큰 장점은 얇고 연성과 소성의 재질로서 구조물의 모양과 관계없이 설치가 용이한 점이며, 공장에서 적합한 공정을 거쳐 생산되므로 사용목적에 따라 수요자의 주문대로 규격과 형식을 변형할 수도 있다.

지오멤브레인은 단점으로는 현장 조달이 불가능하여 공장에서 생산하여 현장으로 운반하여 사용하므로 크기에 대한 제한이 있으며 따라서 현장에서 접합하여 설치하기 때문에 고도의 접합기술을 필요로 한다.

마. 토목섬유-점토차수재(Geosynthetic clay liners, GCL)

GCL은 사실상 오래전부터 건축공사에서 방수기능의 재료로 사용했는데 규격이 작고 소단위의 방수 목적으로 사용하는 것으로 인식되어 왔다. 이것이 환경오염 방지시설에 사용되면서 수요가 증가하고 그 범위도 크게 확대되기 시작하였다. 현재는 폐기물 매립장의 차수재, 저수지의 바닥층, 폐기물 매립지의 마감재, 지하 저장 탱크의 차단층, 기타 구조물의 방수재 및 불투수층의 기능을 갖는 구조물 등에서 광범위하게 사용하고 있다.

GCL은 투수성이 아주 작은 벤토나이트 등을 지오텍스타일이나 지오멤브레인과 같이 이용하여

부착하거나 이들 사이에 넣고 접착 또는 바느질을 하여 분말 또는 조립상태의 재료가 유실되지 않도록 공장에서 제조한 제품을 말한다.

바. 하이브리드 토목섬유

토목섬유를 단독으로 사용할 경우 기능상의 한계로 인하여 적용 분야가 극히 제한적이다.

이러한 이유로 특정 기능과 환경에 적합한 하이브리드 토목섬유가 개발되었고, 그 사용량 역시 토목합성 재료의 어떤 분야에서보다 빠르게 증가하고 있다.

현재 크게 지오그리드+지오텍스타일이 합해진 형태와 지오멤브레인+지오텍스타일이 합해진 형태의 하이브리드 토목섬유가 개발되어 있다.

첫째, 지오그리드+지오텍스타일의 두 토목섬유를 복합시킨 제품이 개발되고 있으며, 폐기물 매립장, 보강토옹벽, 도로, 연약지반 보강 등에 많이 사용되고 있다. 이는 지오그리드의 보강 기능과 지오텍스타일의 투수기능을 동시에 수행하는 토목섬유를 의미한다. 지오그리드와 지오텍스타일은 열 및 초음파 용착을 통해 접합하며, 이 제품의 경우 인장강도, 꿰뚫림 저항력은 증가하고, 유효 구멍크기, 수직투수도는 감소되지만, 인열강도는 중량의 변화에 큰 영향을 받지 않는다. 또한, 지오그리드의 인장변형률과 크리프 변형률로부터 실제 시공할 경우 보강 기능을 충분히 수행할 뿐 아니라 부분적인 지오텍스타일 보호효과까지 얻을 수 있다.


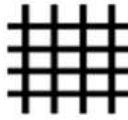


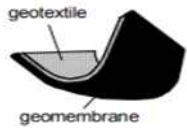
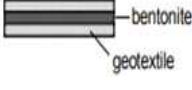

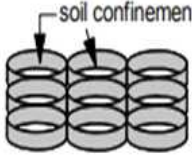
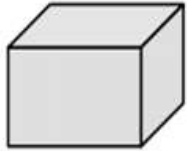
둘째, 지오멤브레인+지오텍스타일의 두 토목섬유를 복합시킨 제품이 개발되고 있으며, 지오멤브레인은 매끄러운 sheet상의 외형을 갖기 때문에 토양과의 마찰력이 낮으며 시공과정에 자갈, 콘크리트 조각, 나무뿌리 등과 같은 날카로운 물체에 의한 표면손상이 많이 발생한다. 또한, 폐기물 매립장에서 차수재로 사용된 지오멤브레인이 토양 또는 다른 토목섬유와의 계면에서 미끄러짐이 발생하거나, 표면손상을 입으면 매립이 진행되는 도중 또는 매립이 완료된 후 매립장 시스템의 안정성에 문제를 유발할 수 있으며, 폐기물의 분해 시 발생하는 침출수에 의하여 복합적인 영향을 받을 수 있다.

따라서, 지오멤브레인과 지오텍스타일의 복합재료를 제조할 경우 인장, 인열, 파열 및 꿰뚫림 강도는 증가하고 접촉토사에 대한 내부 마찰각이 커져서 전단 특성이 향상된다. 또한 지오텍스타일의 보호효과에 의해 지오멤브레인의 침출수에 대한 안정성도 향상된다. 이러한 현상은 지오멤브레인에서 일반적으로 나타나는 연신에 의한 두 방향에서의 강신도 차이가 열용착 복합화에 의하여 보완할 수 있다. 특히, 지오텍스타일과 지오멤브레인 결합 부분의 보강 효과에 의해 인장력에 대한 저항성이 증가하기 때문이다.

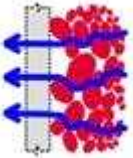
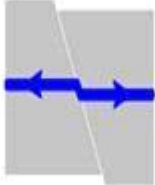
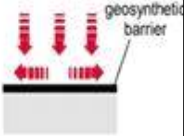
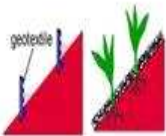
보강용 지오텍스타일의 분리 기능을 향상시키기 위해 직포의 평활도를 높게 설계함에 따라서 물리적 특성 향상과 투수성을 향상시킬 수 있으며, AOS를 조절하는 조직을 설계함에 따라 형태 안정성을 향상시키는 효과를 발휘할 수 있다.

아래의 표들은 지반신소재의 종류, 공학적 특성, 지오멤브레인의 종류 및 장·단점 등을 나타내고 있다.

[표 2-6] 지반신소재의 종류

분류	모식도	설명	적용
Geotextiles		<ul style="list-style-type: none"> 직포, 부직포, 편물 또는 스티치 본딩된 섬유 또는 실의 연속체 시트이 유연성, 투수성이 있으며 일반적으로 겉모양이 직물형태임 Geotextiles은 분리, 여과, 배수, 보강, 침식방지 용도로 사용 	<ul style="list-style-type: none"> 수중 제방 방과제 가도호안 해안침식방지 가호안
Geogrids		<ul style="list-style-type: none"> 개방된 격자구조와 같은 외관을 갖는 토목 섬유 재료 	<ul style="list-style-type: none"> 연약지반 보강 성토사면 보강 보강토 옹벽 도로보수 보강
Geonets		<ul style="list-style-type: none"> 압출된 2개의 고분자 스트랜드 세트가 일정한 예각으로 교차된 울퉁불퉁하고, 평행하게 형성된 개방형 그리와 같은 재료 상대적으로 많은 양의 유체 또는 기체를 운송하기 위하여 평면상 다공성 시트 형태의 망상구조로 되어 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 도로보수 보강 가스 및 침출수의 배수/수집 및 액체에 포함된 퇴적물의 여과
Geomembranes		<ul style="list-style-type: none"> 한 종류 또는 그 이상의 고분자 재료로 제조된 유연성이 있는 시트 상대적으로 불투수성이고, 액체와 가스 저장시설의 차단재 또는 증기 차단막으로도 사용 	<ul style="list-style-type: none"> 위험한 폐기물 쓰레기 매립 흙담 방수 터널 방수
Geocomposites		<ul style="list-style-type: none"> 두 종류 또는 그 이상의 Geosynthetic를 결합하여 만듦 Geotextile-Geonet, Geotextile-Geogrid, Geonet-Geomembrane 또는 Geosynthetic clay liner(GCL) 등이 해당 	<ul style="list-style-type: none"> 건축자재 보강 연약지반 개량용 수직배수재
Geosynthetic clay liners(GCLs)		<ul style="list-style-type: none"> Geotextile 또는 Geomembrane에 벤토나이트 점토를 접착시키거나 2개의 Geotextile 사이를 벤토나이트 점토로 충전시켜 제조한 Geocomposite 일반적으로 Geomembrane과 함께 사용하여 매립지에서의 차수재로써 사용 	<ul style="list-style-type: none"> 쓰레기 매립지의 침출수 누출 방지
Geopipes		<ul style="list-style-type: none"> 고분자로 만든 유공관이며 액체 또는 가스의 운송을 위하여 사용 유공관을 지오텍스타일 필터로 감아놓은 제품들도 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 매립지 적용 시 침출수, 가스 포집에서 적용
Geocells		<ul style="list-style-type: none"> 상대적으로 두께가 두꺼우며, 띠 형태의 고분자 시트로 제조된 3차원의 망상구조로 되어 있음 띠는 채움재인 흙과 또는 콘크리트로 충전되어 셀 형태로 서로 연결되어 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 제방용 기초 보강재 연약지반의 퇴적물 위에 적용
Geofoam		<ul style="list-style-type: none"> 가스가 충전된 폐쇄된 저밀도 망상구조를 형성하기 위하여 폴리스틸렌 폼을 발포시켜 블록이나 판상형태로 제조함 Geofoam은 단열재로 사용되며 경량 충전재로써 또는 단단한 벽체에 작용되는 수평토압을 경감시키기 위해 압축 가능한 연직층의 재료로써 사용됨 	<ul style="list-style-type: none"> 포장 단열재 사면 안정화

[표 2-7] 지반신소재의 공학적 특성

기능	개요도	설명
Separation		<ul style="list-style-type: none"> · Geosynthetic은 입자크기 분포가 다른 두 층의 토양을 분리할 수 있음 · 예를 들어, Geotextile은 미립자의 노상토가 투과성 입상재인 도로 기층에 유입되는 것을 방지하는데 도움을 줌
Filtration		<ul style="list-style-type: none"> · Geosynthetic은 이동성 토양 입자를 유지한 채 물은 토양을 통과하도록 하여 모래 필터와 유사한 기능이 있음 · 예를 들어, Geosynthetic은 토양의 침식을 막기 위해 해안과 하천 제방 보호 시스템에서 사석과 다른 보호 소재 아래에 적용됨
Drainage		<ul style="list-style-type: none"> · Geosynthetic은 투수성이 낮은 토양을 통해 흘러가는 유체를 운반하는 배수관 역할을 함 · 예를 들어, Geosynthetic과 Geocomposite는 포장 가장자리 배수관, 경사 차단 배수관, 교대 및 옹벽 배수관으로 사용됨
Reinforcement		<ul style="list-style-type: none"> · Geosynthetic은 토양 내에서 토양과 결합하여 연약지반에 대한 강도 및 변형 특성을 개선한 복합체를 생성하기 위한 보강재로 사용됨 · 제방을 보강한다면, 연약한 기초 위 건설도 가능하고, 비보강된 제방보다 더 가파른 각도로 경사면을 조성할 수 있게 됨
Fluid/Gas (barrier) containment		<ul style="list-style-type: none"> · Geosynthetic, Geotextil composites, GCLs는 유체나 기체에 대하여 비교적 불침투성의 장벽 기능을 보유함 · 아스팔트 포장, 팽창 토양 및 폐기물의 억제에도 사용됨
Erosion control		<ul style="list-style-type: none"> · Geosynthetic은 강우나 지표수 유출로 인한 토양 침식을 감소시키는 역할을 하며 비탈면의 노출된 토양표면 위에 배치됨 · Geotextile 실트 펜스는 침전물이 많은 유출수에서 부유입자를 제거하기 위해 사용되며, 일부 침식방지매트는 자연분해성 목재 섬유를 사용하여 제조됨

[표 2-8] 지오멤브레인의 종류

구분	고분자 원료
열가소성 지오멤브레인	-PVC(poly chloride, 흑색 또는 유색) -HDPE, VLDOE, LDPE, LLDPE, MDPE -CPE(chlorinated polyethylene, 흑색) -Elasticized polyolefin(3110) -EIA(ethylene interpolymer alloy) -PA(polyamide, 백색) -ECB(ethylene copolymer bitumen, 흑색, 유색)
열경화성 지오멤브레인	-IIR(isoprene-isobutylene, Butyl, 흑색) -Epichlorohydrin-rubber -EPDM(ethylene propylene diene mixture, 흑색) -CR(polychloroprene terpolymer) -EPT(ethylene propylene terpolymer) -EVA(ethylene vinyl acetate, 흑색 또는 백색)
혼합성 지오멤브레인	-PVC-nitrile rubber -PE-EPDM -PVC-ethyl vinyl acetate -Cross-linked CPE -CSPE(chlorosulfonated polyethylene) -CSMR(reinforced chlorosulfonated polyethylene)ew

[표 2-9] 지오멤브레인의 종류별 장단점

종류	장점	단점
열가소성	PVC 저가, 경량 접합 양호, 강인성	가소재 필요 기후, 온도에 민감
	CPE 기후, 저온도, 내화학성에 양호 접합이 간편	접합에 대한 신뢰성 얇은 균열 발생
	HDPE 내화학성, 접합성 우수 저가이며 규격이 다양	응력균열, 열팽창수축, 저마찰 전문접합기술 필요
열경화성	EPDM 기후, 저온도에 양호 접합성이 양호	고온저항성, 내화학성이 보통 단가 보통
	CR 기후, 고온도, 내화학성 양호	고가, 접합신뢰성이 보통
혼합성	CSPE 기후, 저온도, 내화학성에 양호 접합성이 양호	단가 보통, 고온저항성 보통

지금까지 알아본 지반신소재 특성에 따라 다양한 목적으로 지오텍스타일 튜브 공법이 사용되고 있다. 공법은 고분자 합성섬유를 이용한 거대 포대를 이용한 공법이다. 폴리에스테르(PET), 폴리프로필렌(PP) 등 고분자 합성섬유를 포대 소재로 직조된 투수성 직포, 부직포, 복합포로 제작된 거대 포대에 모래 또는 준설 토사(현장 가용재료)를 채워 사용하며, 지오텍스타일 튜브로 성토구축물을 구축하여 시공하는 공법을 말한다.

환경훼손 최소화, 시공성, 경제성 등의 이유로 전 세계적으로 수중제방, 방파제, 가도 호안, 해안침식방지, 가호안 등의 해안, 하천구조물 축조, 오염 준설토 탈수 및 매립 등에 적용하여 사용한다.

일반적으로 소시지 형태나 베개 모양, 튜브 채질인 지오텍스타일과 내부 채움재로 사용되는 토사로 구분되며, 직경과 길이는 현장 조건과 설치가능성에 따라 달라지며, 보통 50~600m, 폭 4~5m, 채움 높이 1.5~2.0m이다.

준설토를 수리학적인 방법으로 채우기 위해 주입구와 배수구가 필요하며, 주입구 설치간격은 모래질 흙의 경우 보다 가깝게(약 10m), 점토질 흙의 경우 가능한 멀게 한다.



[그림 2-5] 지오텍스타일 튜브 개념도

시공 방법은 바닥면을 고른 후 토목섬유를 포설한 후에 토목섬유에 내부 토사를 채워 원하는 제방 높이까지 축조하는 순서로 완성한다. 다음 그림은 지오텍스타일 시공순서를 나타낸다.



(a) 바닥 고르기



(b) 토목섬유 포설



(c) 내부 토사 채움



(d) 제방 축조 완료

[그림 2-6] 지오텍스타일 시공순서

현재 국내·외 다양한 목적으로 지오텍스타일 튜브를 활용한 가물막이 공사가 진행되었으며, 시공 목적에 따라 분류하여 적용된 사례를 조사하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

가. 가도 조성을 위한 가물막이 공사

국내의 경우 가도 조성을 위해 일산대교 가물막이 공사를 실시하였다. 경기도 일산과 김포를 연결하는 일산대교의 가축도 공사로 직경 3.5m, 단위 길이 20~60m, 총 연장 7.4km의 지오텍스타일 튜브 시공하였다. 이에 준설과 함께 튜브 채움과 뒷채움을 동시에 시행하여 공기 단축하였다.



[그림 2-7] 가물막이 사진(일산대교)

인천대교 가물막이 공사에는 한정된 공사기간을 만족시키고자 지오텍스타일 튜브가 적용되었으며, 직경 3~5m, 길이14km의 지오텍스타일 튜브 시공하였다. 튜브 설계시 60%높이로 단면 형성 예상하였으나, 실제 53% 높이로 단면 형성되어 지오텍스타일 튜브 1단 추가 시공으로 예상 밖의 비용 발생하였다.



[그림 2-8] 인천대교 가물막이 사진

나. 댐 가물막이 공사

광양의 수어댐 여수로 공사시 기존 토사가 장마시 붕괴되어 긴급 공사가 필요하였으며, 이에 직경 3.5m, 길이 62.0m 튜브 시공하였다. 인근에 모래가 없어 답사로 튜브 채움하였으며, 채움 토사가 세사라서 설계상 높이(4.0m)가 되지 않아 난항을 겪었으며, 튜브 하단 경사로 채움재 집중되어, 낮은 쪽 봉제선 터지는 등의 현상이 나타났다.



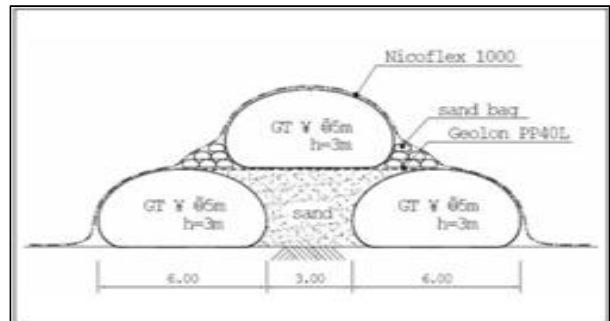
[그림 2-9] 수어댐 여수로 가물막이 사진

해외의 경우 모로코에서 일시적인 댐의 물막이 공사로 높이 6.0m 댐에 직경 5.0m, 채움 높이 3.0m를 갖는 3개의 지오텍스타일 튜브를 적용하였다.

저부 2개의 지오텍스타일 튜브는 상부의 지오텍스타일 튜브 설치를 위해 횡으로 3.0m 이격하여 시공하였으며 지오텍스타일 튜브의 최종 시공 후에 불투수성의 Nicoflex liner를 덮었다. 지오텍스타일 튜브의 시공 길이는 70.0m이고 봉합강도가 160kN/m인 Geolon® PP 200S재료를 사용하였다.



(a) 현장사진



(b) 개념도(단면)

[그림 2-10] 일시적인 댐의 물막이

다. 준설토 투기장 가호안 공사

본 현장은 준설토 투기장 가호안 공사를 위해 지오텍스타일 튜브를 선정하였으며 사석 제방 하단의 모래압성 체질에 2.5m 높이의 튜브를 축조함으로써 모래 하단폭을 줄이면서 모래량을 절약하고 공기 단축과 공사비를 절감하였다.

시공 규모는 직경 4.25m, 길이 50.0m의 지오텍스타일 튜브를 제방 양단에 3km를 시공하였다. 본 현장에는 튜브 채움재 과충전으로 인하여 작업 도중 주입구의 봉제선이 자주 터졌으며 주입구의 터짐이 확대되어 튜브를 재시공하였고 튜브 이음부(마구리와 마구리가 닿는 부분)에서는 굴곡이 발생하였다.



(a) 개념도

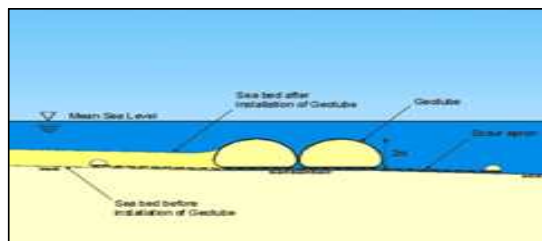


(b) 굴곡 발생 사진

[그림 2-11] 부산 신항 남컨테이너 가호안

라. 해안침식 방지 공사

강릉 영진만 재해위험지구 정비사업에 월파로 인한 해안도로 및 가옥을 보호하고 해안선 침식 방지 및 해수욕장 모래 퇴적 유도를 목적으로 직경 3.5m, 길이 50m 지오텍스타일 튜브를 2열로 30m 간격으로 시공하였다. 본 현장의 경우 시공 중 튜브가 물에 뜨는 사실을 알지 못하여 어려움을 겪었으며 준설펌프의 토출압이 너무 강하여 튜브가 부풀어 오르는 현상이 발생하여 공사에 어려움이 있었다.



[그림 2-12] 영진만 해안침식 방지공사 개념도

울진 원자력발전소 수중잠재 설치공사시 발전소 온배수유입 방파제로 인한 인근 해수욕장의 해안선 침식을 방지하고 모래 퇴적을 유도하기 위해 튜브 직경 3.5m, 길이 50.0m의 지오텍스타일 튜브를 나란히 붙여 30.0m 간격으로 시공하였다. 본 현장의 경우 사석과 소파블럭이 적용 예정된 공사였지만 지오텍스타일 튜브 공법을 적용함으로써 해수욕장의 미관과 위험을 초래한다는 민원과 예산을 절반 이하로 감소시켜 경제적인 공법임을 확인할 수 있었다.

다만 시공 후 지오텍스타일 튜브가 일부 모래속으로 파묻히고 유실되어 재시공 되었다



[그림 2-13] 울진 원전 수중잠재 설치 사진

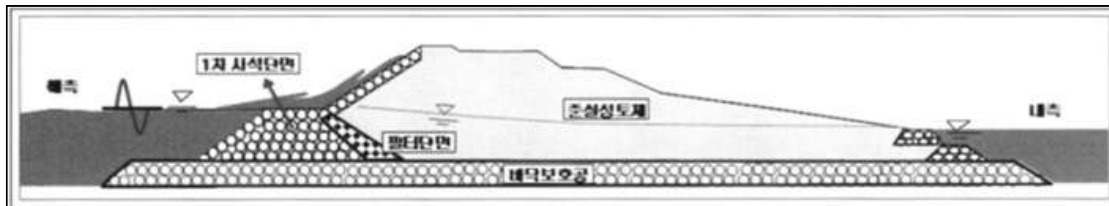
해외의 경우 미국 애틀랜틱시티의 유명한 해변 산책로가 허리케인 및 해안 침식의 영향으로 붕괴 위험이 있어서 그에 대한 대책으로 지오텍스타일 튜브를 적용한 해안가 사구를 조성하여 침식 및 모래 유실을 방지했다. 해변에 시공된 지오텍스타일 튜브의 총 길이는 45.0m이다



[그림 2-14] 지오텍스타일 튜브로 만든 사구 사진

마. 대규모 방조제 공사

새만금 방조제 33km에 대한 최종 연결공사 2.7km 끝막이 공사는 막대한 양의 성토재료를 바다에서 준설하여 준설 성토공법을 적용하였다. 적용된 준설토는 실트질 모래(SM)이고 사석필터는 대석과 돌망태 등으로 축조하였다. 축조된 사석필터 간극을 통해 배면 매립 토사가 유출되고 세굴되는 것을 방지하기 위해 횡방향으로 튜브 매트리스를 시공하였으며 그 결과 배면 매립 토사의 유출 및 세굴현상을 방지할 수 있었다. 본 현장은 시공중 사석필터 재료의 수급 부족으로 인해 대안 공법으로 종방향 튜브 매트리스를 적용한 결과 부족한 사석 필터 재료를 대체할 수 있었고 배면 매립 토사의 유출과 세굴 발생을 막을 수 있었다.



(a) 구상도



(b) 현장 사진(1)



(c) 현장 사진(2)

[그림 2-15] 새만금 방조제 끝막이 공사

바. 인공섬 조성 가호안 공사

바레인의 Amwaj 섬 프로젝트에서 상대적으로 얇은 바다 심도 조건에 있는 최북단 섬인 Muharraq섬의 동북까지 준설 매립된 곳이다. Amwaj 섬은 지오텍스타일 튜브를 이용한 준설매립 기술이 적용되었으며 제방을 쌓기 위해 둘레 13.7m, 총 연장 30.0km의 지오텍스타일 튜브를 2단으로 시공하였다. 제방 배면에는 해수면을 기준으로 하여 3.0m 높이로 모래를 준설 매립하였으며 인공섬 조성을 위한 해안선은 약 5개월 만에 완성되었다.

미국 일리노이 인공섬 건설 현장에서 지오텍스타일 튜브를 적용하여 건조 준설 매립을 수행하였다. 연장 4.7km의 인공섬 둘레를 형성하기 위해 지오텍스타일 튜브를 3열로 6.0m 높이까지 채움 작업을 수행하였고 약 1년 후 채움 높이는 5.0m로 감소하였다.



[그림 2-16] Amwaj 섬 지오텍스타일 튜브 방파제 배치도 [그림 2-17] 지오텍스타일 튜브를 이용한 건조 준설매립 현장 사진

사. 소형댐 공사

필리핀 마닐라의 Wack Wack 골프장은 코스 근처에 위치한 오염된 배수로의 범람으로 인해 골프 코스 내에 연못이 오염되는 것을 방지하기 위해 배수로와 연못사이에 길이 85.0m, 채움 높이 1.5m의 지오텍스타일 튜브를 2열로 시공한 후에 상부에 계비온 구조물을 설치하여 소형댐을 조성하였다.

지오텍스타일 튜브는 물위에 띄워서 시공 지점에 위치하였고 슬러리 상태로 펌핑된 모래로 튜브를 채워 시공하였다. 아래 그림에서처럼 지오텍스타일 튜브를 이용하여 소형댐이 완성된 후에 그 상부에 콘크리트 계비온을 설치하여 연못과 배수로의 수위를 유지하였다.



[그림 2-18] 지오텍스타일 튜브를 이용한 소형 댐 공사

아. 방파제 중심코어

에콰도르 태평양 연안의 고급 휴양지인 Stella Maris에서 지오텍스타일 튜브를 적용하여 정박지를 조성하였다. 둘레 13.7m, 총연장 2.0km의 지오텍스타일 튜브를 피라미드 방식으로 쌓아서 방파제 코어로 적용하였으며, 튜브 채움 작업 시 지오텍스타일 튜브를 직선으로 유지하기 위해 철제 위치 고정용 틀을 사용하였다.

네덜란드의 Enkhuizen지역에서 해상 수로 Naviduct 건설 중 준설토 투기 제방의 코어(Core)로 지오텍스타일 튜브를 적용하였다. 적용된 지오텍스타일 튜브의 직경은 3.92m(둘레 12.30m), 총연장은 7.5km이며 튜브의 채움 토사는 모래가 적용되었다



[그림 219] 지오텍스타일 튜브를 이용한 방파제 공사 (고정용 틀 사용) [그림 220] 지오텍스타일 튜브를 이용한 준설토 투기 제방 공사

자. 환경오염물 처리

브라질 Rio das Ostras시에서 둘레 18.3m, 길이 61.0m의 지오텍스타일 튜브 용기를 이용하여 매립장에 하수처리장과 분뇨처리 시설을 설치하였다.

지오텍스타일 튜브의 탈수처리 시스템은 폐수를 여과 처리하여 지역수로 방출하는데 아주 효과적이었다.



(a) 현장 사진1



(b) 현장 사진2

[그림 2-21] 지오텍스타일 튜브의 탈수처리 시스템

2.2.2 저수지 퇴적토 특성 분석

농업용수의 안정적 확보와 공급 및 농업생산기반의 여건을 개선하기 위해서 농업용 저수지의 기능이 원활히 유지될 필요가 있다. 저수지 기능 유지를 위한 목적과 가물막이 제체 재료로 사용하기 위해, 국내 저수지 퇴적토 특성을 분석하였으며, 저수지 준설토를 활용기준을 통해서 검토하고 있다.

손재권 등(1997)이 전북지역 저수지의 준설토에 대한 물리적 특성을 조사한 바 있으며, 준설토의 물리적 성질 중 입도분석은 비중계 및 체분석을 이용한다.

미국농무성(USDA)의 입도조성에 의한 삼각분류법에 의하여 토성을 분류한다.

[표 2-10] 전북지역 저수지 준설토의 토성

Soil texture							
Gravelly Sand (GS)	Gravelly loam sand (GLS)	Gravelly sandy loam (GSL)	Gravelly loam (GL)	Gravelly silty loam (GSiL)	Gravelly sandy clay loam (GSCL)	Gravelly clay loam (GCL)	Gravelly silt clay loam (GSiCL)
19 (5.9)	33 (10.2)	90 (27.9)	49 (15.2)	25 (7.7)	1 (0.3)	3 (0.9)	8 (2.5)
Soil texture							Total
Sand (S)	Loamy sand (LS)	Sandy loam (SL)	Loam (L)	Silty loam (SiL)	Clay loam (CL)	Silty clay loam (SiCL)	
5 (1.6)	6 (1.9)	21 (6.5)	26 (8.0)	26 (8.0)	4 (1.2)	7 (2.2)	323 (100.0)

(Note) () is the percentage (%)

[표 2-11] 전북지역 저수지 준설토의 골재 함유율

Items	Aggregate content ratio (%)					Total
	0	0~10	10~30	30~50	50<	
Gravel	94(29.1)	95(29.4)	67(20.7)	40(12.4)	27(8.4)	323(100.0)
Sand	-	10(3.1)	80(24.8)	112(34.7)	121(37.4)	

(Note) () is the percentage (%), sand or gravel 60% < : 79 samples (24.5)%

[표 2-12] 전북지역 저수지 준설토의 물성

Items	Numbers(Percentage) by range				
	1.10~1.20	1.20~1.40	1.40~1.50	1.50<	
Bulk density	35(10.8)	150(46.5)	67(20.7)	71(22.0)	-
	41(12.7)	88(27.2)	123(38.1)	59(18.3)	12(3.7)
Specific gravity	30~40	40~45	45~50	50~55	55~60
	64(19.8)	115(35.6)	65(20.1)	46(14.3)	33(10.2)

(Note) () is the percentage (%)

2016년 한국농어촌공사 경북지역 본부에서 6개의 준설사업 대상지구에 대한 토질시험을 수행한 결과, 습윤밀도 및 함수비는 아래와 같이 보고되었으며, 본 연구진에서 포항 오어지에서 채취한 시료의 비중을 적용 시, 산정되는 건조밀도 및 간극비의 추정값을 아래 표에 추가하였다.

[표 2-13] 경북지역 6개의 준설사업 대상지구에 대한 토질시험 결과

저수지	평균 습윤밀도 [kN/m ³]	함수비[%]	평균 건조밀도 [kN/m ³]	간극비	채취시료 위치
모화지	16.0	3.3	15.5	0.66	저수지 상류부
입실지	14.2	5.9	13.5	0.91	저수지 상류부
송전지	17.6	4.3	16.9	0.54	저수지 상류부
권이지	16.8	8.3	15.5	0.66	저수지 상류부
모길지	12.8	50.5	8.5	2.03	저수지 내
동산지	11.1	26.0	8.8	1.92	저수지 내

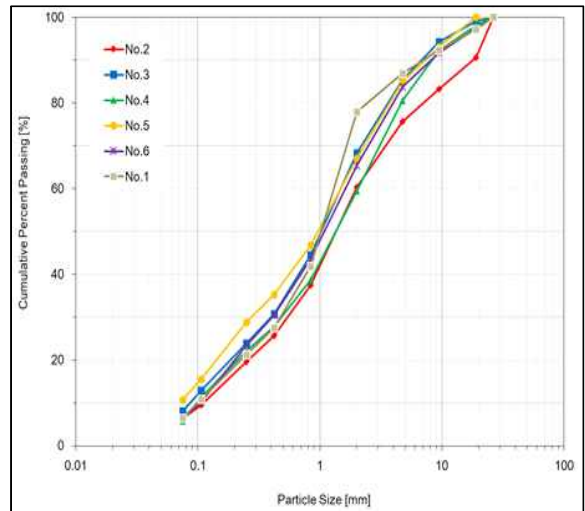
본 과제에서는 저수지 현장의 퇴적토 특성을 모형 지오텍스타일 튜브 조성 시 검토하기 위하여 경상북도 포항시 남구에 위치한 오어지를 답사하였으며, 현장을 방문한 2020년 8월경 오어지는 개보수 공사가 진행 중이었으며, 아래의 사진과 같은 지표에 노출된 퇴적토를 확인한 후, 물리적 특성을 평가하기 위하여 시료를 채취하였다.



(a)



(b)



[그림 2-23] 경북 포항 오어지 퇴적토의 입도분포

[그림 2-22] 현장 퇴적토 사진(경북 포항 오어지)

[표 2-14] 경북 포항 오어지 퇴적토의 기본 물성

구분	평균값	비 고
비중	2.62	
액성한계	24.4	
통일분류법	SW-SM	

2.2.3 보강성토체 단면 및 투수성 검토

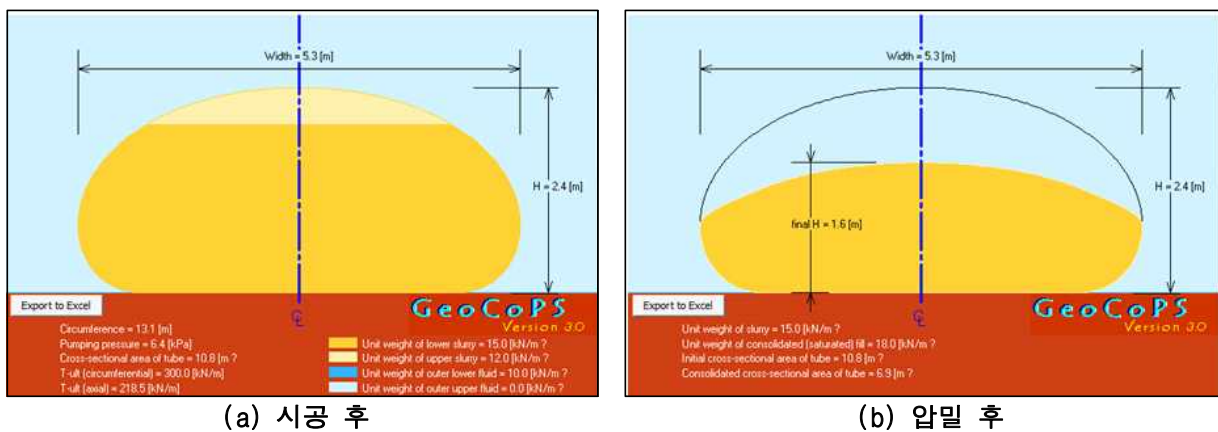
본 과제에서는 지오텍스타일 튜브의 채움 작업에 따라 발생하는 인장강도 및 단면변화, 팽팽압력 등을 분석하기 위해 2차원 평면해석을 수행하였다.

이를 위해, 채움과정에서 지오텍스타일 튜브의 거동을 분석할 수 있는 전용 해석프로그램인 GeoCoPS를 이용하였으며, 지오텍스타일 튜브의 평면변형 해석이론은 길이방향의 변형을 무시하는 평면변형 조건을 적용하였다.

토목섬유 shell 모델은 얇고 유연하며, 단위길이 당 단위중량은 무시하여 해석하였으며, 지오텍스타일 튜브의 외부 경계조건은 슬러리와 지오텍스타일 접촉면의 전단응력은 발생하지 않는 것으로 가정하였으며, 내부 경계조건은 슬러리로 채워져 있는 수리학적 응력상태로 가정하였다.

GeoCoPS의 해석유형은 크게 3가지로 구분되어 있다. 첫 번째로 지오텍스타일 튜브의 설계 최대높이가 주어질 경우는 지오텍스타일의 극한강도 계산한다. 두 번째 지오텍스타일 튜브의 극한강도가 주어질 경우는 지오텍스타일 튜브의 형태 계산한다. 마지막으로 지오텍스타일 튜브의 팽팽압력이 주어질 경우는 지오텍스타일 튜브의 형태 및 지오텍스타일 극한강도 계산할 수 있다.

본 과제에서는 선정된 지오텍스타일의 극한강도가 최소값이 300kN/m임을 고려하여, 극한강도가 주어질 경우, 지오텍스타일 튜브의 형태를 분석하는 방법을 사용하였으며, 분석결과, 시공 후 지오텍스타일 튜브의 최대 높이 및 폭은 각각 2.4m 및 5.3m로 나타났으며, 압밀완료 후 최대 높이는 1.6m로 산정되었다.



[그림 2-24] 지오텍스타일 재료 특성에 따른 침하 거동 분석

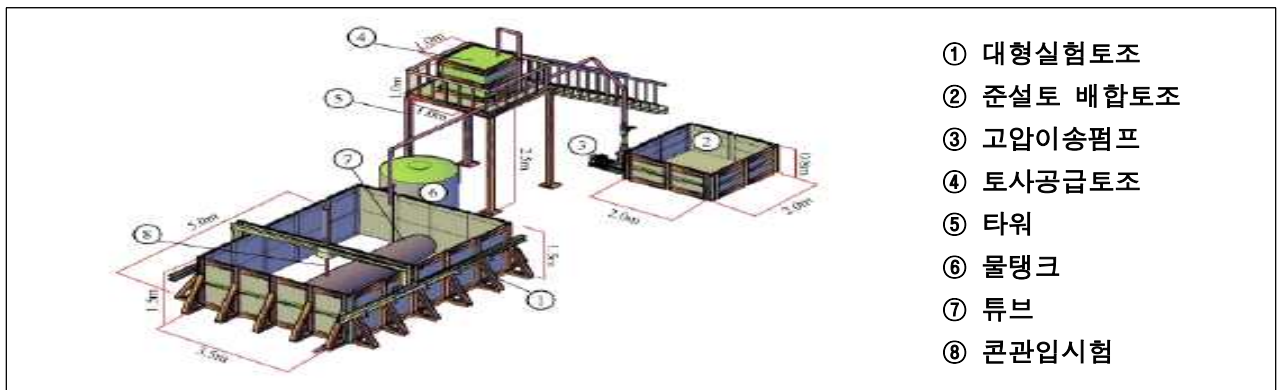
2.2.4 지오텍스타일 튜브 단면 및 투수성 검토

『준설토를 활용한 토목섬유 튜브 구조체의 설계기법 연구(2016)』에서는 실대형 토목섬유 튜브 모형시험 목적으로 지금까지 국내 토목섬유 튜브에 관한 연구는 현장 또는 시공사례 중심으로 진행되어 선행연구에서는 토목섬유 튜브와 준설토의 거동특성 및 영향인자를 분석하고자 하였으며, 그 방법은 다음과 같다.

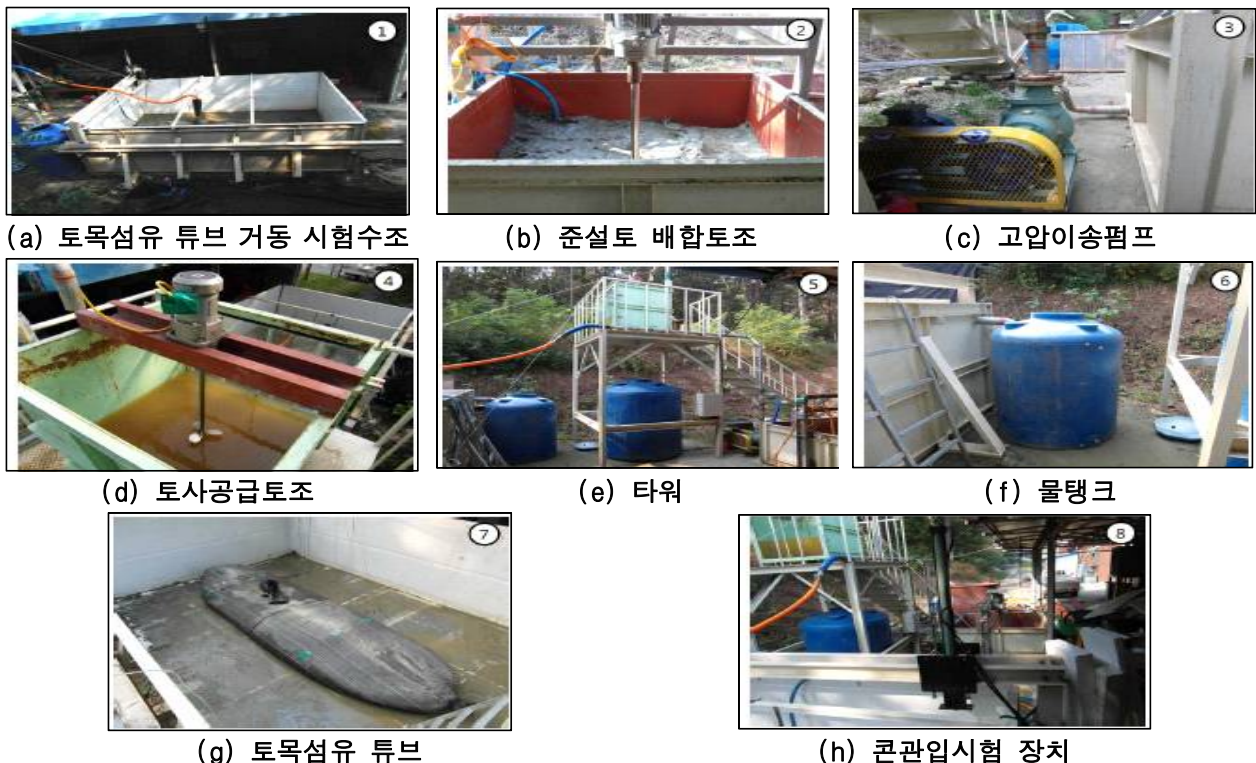
실험에 사용된 토목섬유 튜브의 재질은 폴리프로필렌(PP)를 사용하였다. 토목섬유 튜브는 대형 실험수조의 폭 3.5m, 길이 5.0m, 높이 1.5m를 고려하여 직경 1m, 길이 4m로 제작하였다.

주입구는 실제 현장에서 적용되는 비율을 고려하여 튜브 끝단에서 주입구까지 거리 1.5m, 주입구 간 거리 2.5m로 배치하였다.

실험에 사용된 장치는 준설토 준비부터 준설토 및 매립까지의 모든 공정을 포함한 실험이 가능하도록 제작되었다. 실험에 사용된 장치구성은 다음과 같다.



[그림 2-25] 실대형 실험토조 전체 모식도

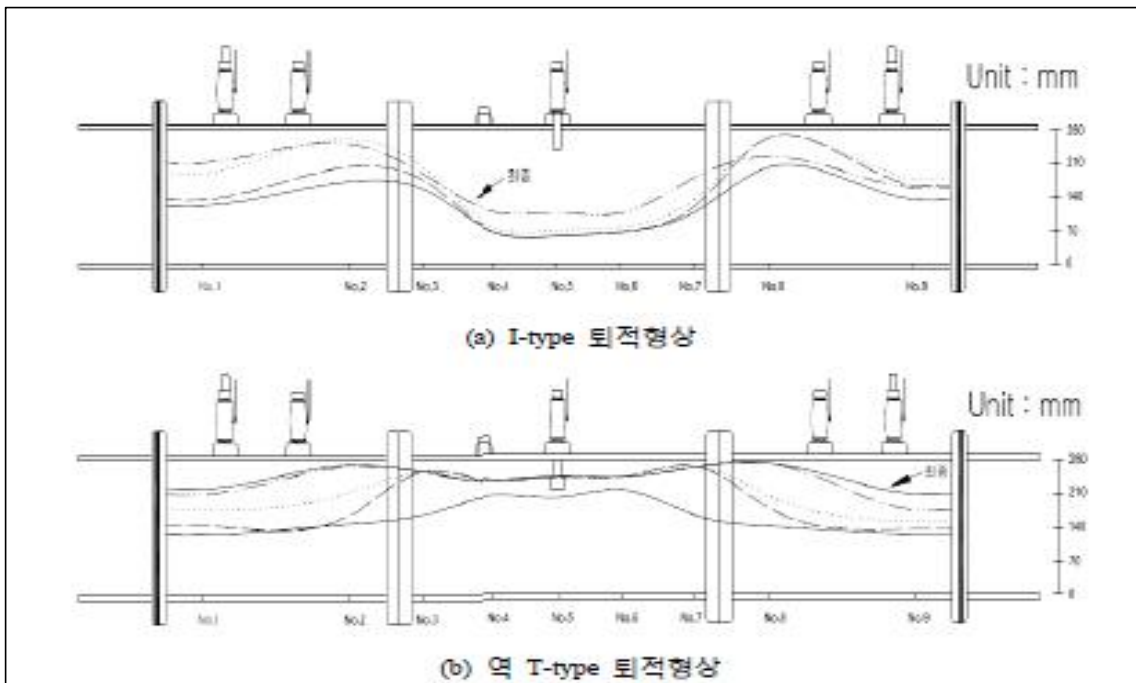


[그림 2-26] 실대형 실험토조 세부 사진

본 시험 과정은 아래 그림과 같은 순서로 진행되었으며, 기존 사용되던 I-type 주입모듈은 불균등한 퇴적분포를 보여 이를 해결하기 위한 역 T-type의 주입 모듈을 개발하여 적용되었다.



[그림 2-27] 실대형 모형실험 과정



[그림 2-28] 주입모듈에 따른 내부 퇴적형상

가. 모형실험 시스템

저수지 개보수 공사시 기존 사용되는 가물막이 설치 방법을 경제성과 효율성을 고려하여 개선한 지오텍스타일 튜브 공법을 연구하기 위하여 실내 모형시험을 실시하기 위하여 모형실험 시스템을 구축 하였다.

모형실험에 사용된 재료 및 장비는 다음과 같다.

지오텍스타일 튜브는 Polyester 재질로 150kN/m강도를 가지며, 자세한 제원은 아래표와 같다.

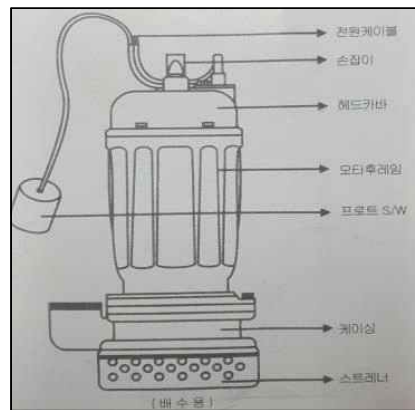
[표 2-15] 지오텍스타일 튜브 제원 및 사진

총길이	140cm	
마감부 길이	5cm	
폭	35cm	
주입구 위치	중앙	
주입구 직경	10cm	
재질	Polyester	
봉합강도	150kN/m	
신율	15%	

펌프는 배합토조에서 교반된 흙과 물을 지오텍스타일 튜브로 이송 시 사용되며 플로트 스위치가 부착되어 수위의 변화에 따라 가동, 정지가 자동으로 작동한다.

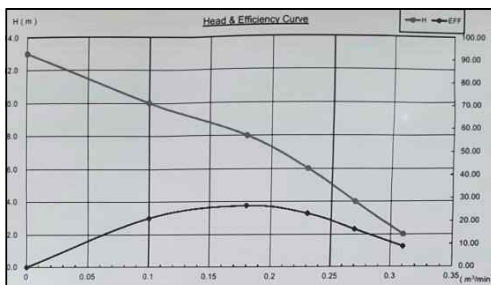


(a) 펌프 사진



(b) 펌프 명칭

[그림 2-29] 펌프 및 각부 명칭



[그림 2-30] 펌프성능곡선표

[표 2-16] 펌프 제원

품명	샌드펌프	모델명	MPS 1050
출력	0.75KW/1HP	사양	200L/min(7M)
정격전압	AC 200V	최대양정	12M
정격전류	6.0A	최대유량	320L/min
상/주파수	단상/60Hz	IP code	IP 68
회전수	3450rpm	토출관	50mm

배합토조는 준비된 흙과 물을 교반기를 사용하여 적절히 교반시키는 토조로 본 시험과정에서는 흙 50kg 에 대하여 함수비 300%로 배합된 준설토를 2개의 토조에서 각각 준비하였다. 배합토조의 윗지름은 76cm, 바닥 지름은 60cm, 높이는 75cm로 제작되었다.



[그림 2-31] 함수비 300% 준설토 준비과정

교반기(핸드믹서)는 토조에서 준비된 흙과 물을 적절히 교반하기 위하여 사용되며, 본 시험과정에서는 효과적인 교반을 위하여 교반기 2대를 일정한 위치에서 고정하여 사용한다.



[그림 2-32] 교반기

[표 2-17] 교반기 제원

Power	No Load Speed(RPM)	Variable Speed	Unit Weight
1400W	0-400/800	Yes	3.5kg

아크릴 수조는 지오텍스타일 튜브와 철제프레임 거치를 위해 제작하였으며, 지오텍스타일 튜브에서 배출되는 물을 원활히 배출하기 위한 배출구가 우측 중앙부에 위치해 있다. 아크릴 수조의 길이는 180cm, 폭 80cm, 높이 50cm, 배출구 직경 5cm로 제작되었다.



[그림 2-33] 아크릴 수조 전경

철제 프레임은 지오텍스타일 튜브 충전 및 방치 기간 동안 레이저 측정기로 각 지점의 높이를 측정하기 위해 설치된 프레임으로 수평이동이 가능하도록 제작되었다. 길이 178cm, 높이 70cm, 폭 60cm, 두께 4cm로 제작되었다.



[그림 2-34] 철제 프레임 전경

간극수압계는 본 과제에서 활용된 간극수압계의 사진 및 제원은 아래와 같으며, 간극수압계 설치위치는 지오텍스타일 튜브 주입구로부터 10cm 떨어진 하단부에 설치하였다.

[표 2-18] 간극수압계 제원 및 사진

Model	AP-K	
Range	0.1 ~ 10 kgf/cm ²	
Rated output	0.5 ~ 4.5VDC	
Non-Linearity	0.1% FS	
Hysteresis		
Temp, Range	-20 ~ 80° C	
Allowable Exc. Voltage	5VDC	
Cable	Φ 6mm, 4Core shield	
Safe Overload Rating	120%FS	
Ultimate Overload Rating	150%FS	

본 과제에서 활용된 토압계의 사진 및 제원은 아래와 같으며, 토압계 설치위치는 지오텍스타일 튜브 주입구로부터 10cm 떨어진 하단부에 설치하였다.

[표 2-19] 토압계 제원 및 사진

PERFORMANCE		
Measurement Range(for ±2.5V output)	34.45 kPa	
Sensitivity(± 15%)	72.5 mV/kPa	
Maximum Pressure(step)	690 kPa	
Maximum Pressure(static)	3448 kPa	
Resolution	0.00048 kPa	
Resonant Frequency	≥ 40 kHz	
Rise Time	≤ 12 μ sec	
Low Frequency Response(-5%)	0.5 Hz	
Non-Linearity	≤ 1 %FS	
ENVIRONMENTAL		
Acceleration Sensitivity	≤ 0.0014 kPa/(m/sec ²)	
Temperature Range(Operating)	-54 ~ +121 ° C	
Temperature Coefficient of Sensitivity	≤ 0.054 %/° C	
Maximum Flash Temperature	1649 ° C	
Maximum Vibration	4903 m/s ² pk	
Maximum Shock	9807 m/s ² pk	

마지막으로 레이저 거리 측정기로 철제 프레임에 고정하여 지오텍스타일 튜브 충전 및 방치 기간 동안의 높이를 각 지점별로 측정하기 위한 센서로, 높이 측정은 지오텍스타일 튜브 중심에서 30cm 떨어진 지점에서 중심으로부터 횡방향으로 5cm 간격마다 측정을 실시하였다.

[표 2-20] 레이저 거리 측정기 제원 및 사진

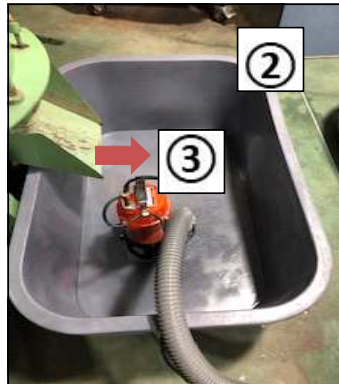
레이저다이오드	635 nm, <1 mW		
측정거리	0.05~250 m		
레이저등급	2	(a) 레이저 거리 측정기	(b) 레이저 거리 측정 모습
측정 정확도(표준)	±1 mm/m		
측정시간(표준)	<0.5 s		
측정시간(최대)	4 s		
전원공급	4×1.5 V(AA)		
중량(약)	0.24 kg		
폭	120mm		
측정단위	m or ft		

나. 모형시험 과정

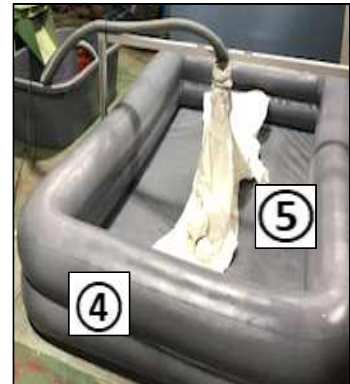
1차 version 시험장치의 경우 『준설토를 활용한 토목섬유 튜브 구조체의 설계기법 연구』(2016)의 참고하여 제작하였다. ①교반기, ②토조, ③펌프, ④고무튜브, ⑤ 지오텍스타일 튜브의 시험장치가 사용 되었다.



(a) 교반기



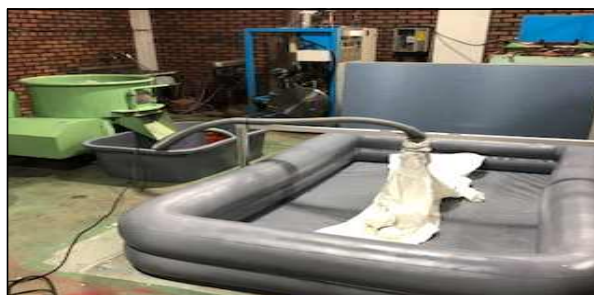
(b) 토조와 펌프



(c) 지오텍스타일 튜브

[그림 2-35] 1차 version 실험장치

실험순서는 ① 교반장치를 사용하여 흙 50kg에 대하여 함수비 300%로 배합 → ② 교반장치 배출구를 열어 토조로 이동 → ③ 일정수위 이상 시 펌프를 통해 고무튜브에 위치한 지오텍스타일 튜브로 이송 → ④ 지오텍스타일 튜브 충전 및 방치 순으로 진행되었다.



[그림 2-36] 1차 version 실험과정

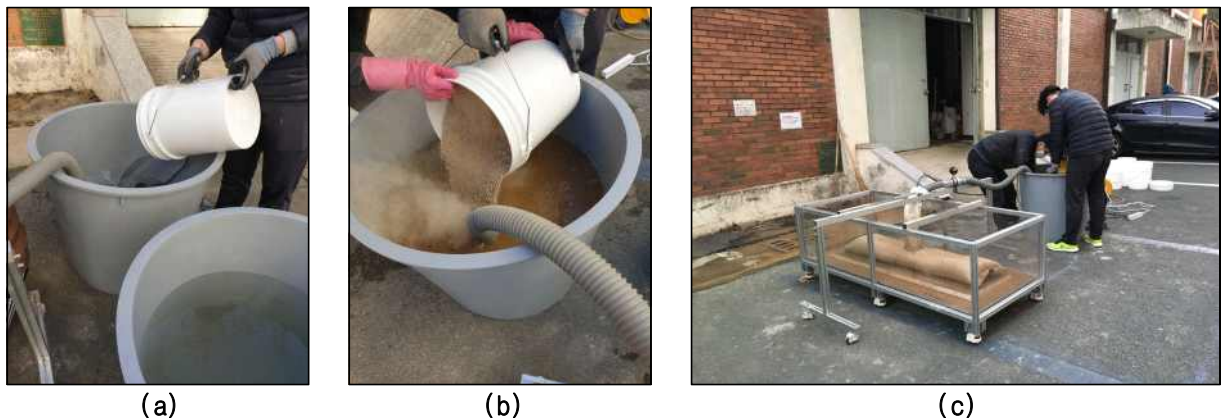
1차 version 실험시 교반장치에서 토조로 이송된 슬러리의 침강속도가 매우 빠르며, 토조 바닥이 넓어 펌프와 먼 곳의 흙은 이송되지 못하였다. 또한 한번 실험 후 지오텍스타일 튜브로부터 빠져나온 물을 처리하기가 힘들어 2차 version 모형실험 시스템을 구축하였다.

2차 version은 ①교반기, ②배합토조, ③펌프, ④아크릴 수조, ⑤철제 프레임의 시험장치가 사용되었다. 교반기와 배합토조의 경우 1차 version의 문제를 극복하기 위해 핸드믹서형태와 좁고 높은 토조로 변경하였으며, 고무튜브를 이용시 배수 무제를 보완하여 아크릴 수조를 제작 하였다. 또한 지오텍스타일 튜브의 변위측정을 이해 철제 프레임을 제작하였다.



[그림 2-37] 2차 version 실험장치

실험순서는 ① 교반장치를 사용하여 흙 50kg에 대하여 함수비 300%로 배합 → ② 교반기 2대를 사용 하여 충분히 교반 → ③ 펌프를 통해 고무튜브에 위치한 지오텍스타일 튜브로 이송 → ④ 지오텍스타일 튜브 충전 및 방치 순으로 진행되었다.



[그림 2-38] 2차 version 실험과정

2차 version 실험시 1차 version의 교반장치보다 성능이 좋고 직접 조정하여 교반시킬 수 있는 교반기 2대를 사용하였으며, 펌프에 의해 이송 중에도 흙이 퇴적되지 않아 준비된 흙의 손실률을 줄일 수 있었으며, 1차 version의 토조가 바닥이 넓고 높이가 낮은 반면 2차 version의 배합 토조는 바닥이 좁고 높이가 높아 손실률을 줄일 수 있다. 또한 아크릴 수조 바닥면 측면 중앙부에 직경 5cm의 배출구가 설치되어 물이 원활히 배출되었다.

실험을 통해서 선행연구에서 개발한 역 T-Type 주입모듈 사용 시 흙이 T자형의 평평한 부분에 쌓여 원활히 배출되지 않았으며, 본 연구에서는 경사를 두어 위 문제를 해결할 수 있는 역 Y-Type 주입모듈을 제작하여 사용하였다.



[그림 2-39] 역 Y-Type 주입모듈

2.3 가물막이 고려 요소

2.3.1 지오텍스타일 제원 비교

지오텍스타일 튜브를 위해서 최대 인장강도는 PET 원사는 PP 원사대비 고강도 저신율로 최대 180kN/m (MD/CD)정도의 원단강도를 발현하는 PP제품에 비해, PET 원단은 최대 500kN/m (MD/CD) 제품까지 생산 가능하며, 봉제를 고려하더라도 300~350kN/m 지오텍스타일 튜브 확보 가능하다.

항복 변형율은 PP 원사대비 저신율로 지오텍스타일 튜브 시공 및 사용 시 사용하중에 따른 구조체의 변위가 적다. 또한 봉재 강도는 일반적으로 PP, PET 모든 원단강도의 50% 정도에 해당하며, 봉재 품질이 균질 및 우수한 제품 확보 필요하다. 지오텍스타일 튜브 2단 봉제를 적용해 시공 시 지오텍스타일 튜브가 터지는 사고위험 감소하였으며, 다양한 원단폭 생산을 통해, 지오텍스타일 튜브의 응력 집중구간을 피해 봉제선을 설계하여 사고위험 감소되었다.

자외선 저항의 경우 UV 처리를 하지 않은 PP는 PET에 비해 UV 저항성이 너무 떨어져 UV 처리 후 지오텍스타일 튜브를 제작하였으며, UV처리를 한 PP 제품은 단가가 고가이며, 실제 사용 환경에서 장기간의 강도 저감율은 비슷할 것으로 판단된다.

예비실험 시, PET 지오텍스타일 튜브의 사용기간 2~5년 후에도 문제가 없었으나, PET 원사는 생산공정상 UV 후처리가 쉽지 않았다. PET 300kN/m 원단 70% 잔류강도는 PP 200kN/m 원단 85% 잔류강도보다 컸다.

투수성의 경우 PP 지오텍스타일 튜브는 납작한 원사에 칼집을 낸 Split 원사를 사용하는데, 이로 인해 유효구멍 크기에 비해 상대적으로 투수성능을 높일 수 있다.

PET 원단은 평직으로 직조해 지오텍스타일 튜브를 만들 경우, 투수성능이 낮아 시공성이 좋지 않았으나, PET 원사를 변형 조직으로 직조해 지오텍스타일 튜브를 만들 경우, PP split yarn 제품과 동등한 정도의 투수성능 발휘한다. 평직은 변형조직 대비 작은 유효구멍 크기와 낮은 투수성을 가진다. 평직은 변형조직 대비 작은 유효구멍 크기와 투과성을 가진다.



[그림 2-40] PET 원사로 구성된 지오텍스타일 샘플 사진

[표 2-21] PP 및 PET 원사로 구성된 지오텍스타일 제원 비교

Properties	Test Method	Unit	Value					
			Polypropylene geotube	Polyester geotube				
				DT-15	DT-20	DT-30		
Tensile Strength at break	MD	ISO 10319	kN/m	≥	100~180	≥ 150	≥ 200	≥ 300
	CD	ISO 10319	kN/m	≥	100~180	≥ 150	≥ 200	≥ 300
Tensile Elongation at Nominal	MD	ISO 10319	%	≤	20	≤ 15		
	CD	ISO 10319	%	≤	20	≤ 15		
Factory Seam Strength		ISO 10321	kN/m	≥	100	≥ 75	≥ 100	≥ 150
UV Resistance (at500 hours) Retained strength		ASTM D 4355	%	≥	85	≥ 60		
Flux (h:50mm)		ISO 11058	l/m2sec	≥	15~20	1.5		
Apparent Opening Size (O90)		ISO 12956	mm	≤	0.5	0.1		

2.3.2 일반적인 가물막이

일반적으로 가물막이의 설계기준에서 가물막이 시기는 과거의 수문자료로부터 상당히 장기간 동안 갈수가 예상되는 시기를 택하는 것이 좋고, 가급적 단기간에 공사를 실시하는 것이 좋다.

단시간의 갈수기간 동안에 가물막이 공사를 종료하는데 한도가 있으므로 전체 시공계획을 고려하여 종합적으로 판단해야 한다.

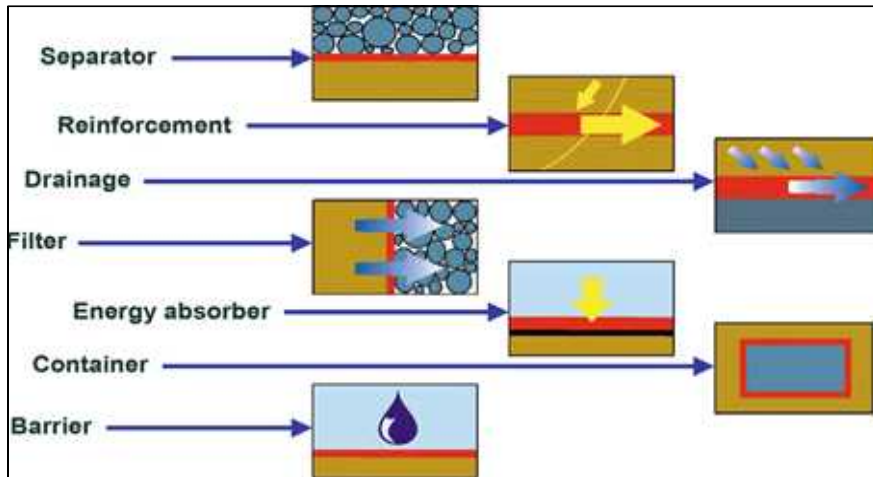
그러나, 공사의 긴급성 등으로 인하여 갈수기에 가물막이 시공이 불가능한 경우도 발생할 수 있으며, 이와 같은 경우, 시공계획을 신중히 검토하여 가물막이 공사의 공기를 단축토록 해야 하며 예를 들면, 토취장이 먼 곳에 위치 시, 축제재료를 미리 가물막이 부근에 저장해 둠으로서 공기를 단축할 수 있다.

가물막이 형식은 흙 댐이나 사력댐 형식의 가물막이는 공사 중에 홍수에 의해 체체가 월류 시, 결괴 현상으로 파괴될 우려가 높으므로 댐의 비탈면을 콘크리트 혹은 아스팔트 피복공으로 보호한다든지, 사력층 표면을 철사망으로 피복하는 등의 처리로 단시간 동안의 월류수에 대해서는 견딜 수 있도록 설계할 필요가 있다.

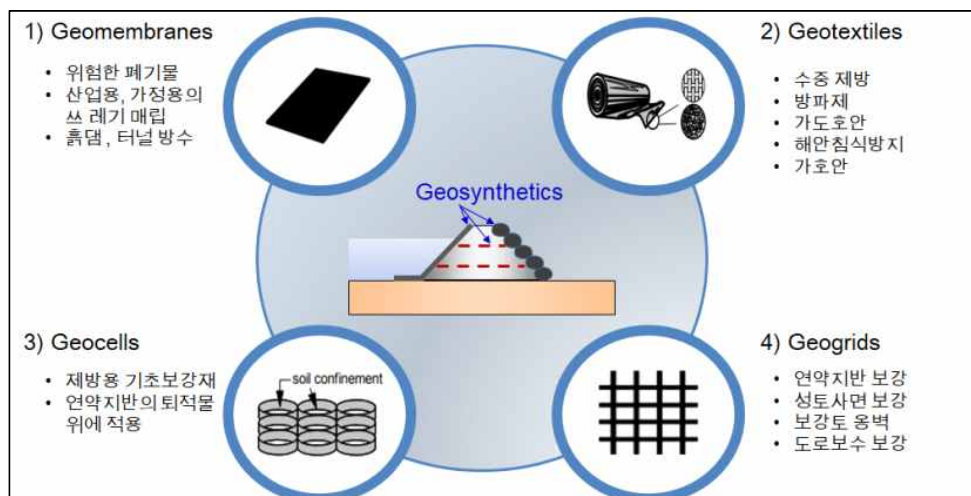
지수는 중앙 콘크리트 지수벽과 점토 코어를 설치하는 경우와 강관을 타입하는 경우가 많으며, 가물막이의 체체 체적이 클 경우, 이를 댐 체체의 일부로서 설계하는 것이 경제적이며, 이 경우 가물막이의 시공은 댐 본체와 같은 정도의 충분한 시공 및 품질관리가 요구된다.

2.3.3 지반신소재를 활용한 가물막이

지반신소재를 활용한 가물막이 요소는 우선 소재의 기능, 배치 및 구성, 경제성을 고려하여 선정하여야 한다.



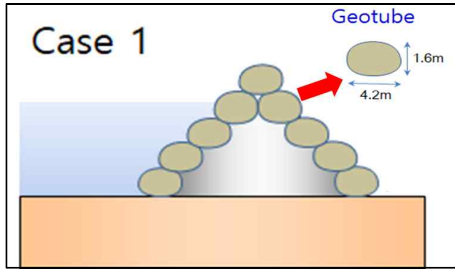
[그림 2-41] 지반신소재의 주요 기능



[그림 2-42] 지반신소재를 활용한 가물막이 체제 구성안

지오텍스타일 튜브, 성토, 지오멤브레인의 배치 요소를 다르게 하여 구성할수 있으며, 본 연구에서 크게 3가지로 구분하여 배치 및 경제성을 분석 하였다. 첫 번째(Case1)는 9개 지오텍스타일 튜브와 성토층을 이용한 가물막이 형태이며, 두 번째(Case2)는 5개 지오텍스타일 튜브, 성토층과 지오멤브레인을 이양한 가물막이 형태이며, 세 번째(Case3)는 15개의 지오텍스타일 튜브와 일부 성토층을 이용하는 형태로 구분하였다.

경제성 분석의 체제 제원은 높이 8m, 길이 100m이며, 체제 구성은 지오텍스타일 튜브, 지오텍스타일, 지오멤브레인을 이용하여 위 3가지 케이스를 사용 하였으며, 구조물 철거 제외하였다. 지오텍스타일 튜브 채움골재 및 용수 현장조달 발주처 무상제공 가정하였으며, 현장 부지는 지오텍스타일 튜브 채움재 및 물 공급지에서 30m 이내에 조성하는 것을 가정하였다.

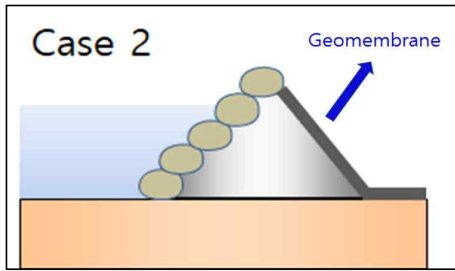


(a) 시공모습

Case 1	규격	횡단면수량	종단면수량	총수량	비고
지오투브	D720 (D3.0m*H2.5m)	9 ea	4 ea	36 ea	
지오텍스타일	DM10 (100/100kN/m)	38.4 m	1000 m	5,940.0 m ²	
성토골재	모래 (포트러진 상토)	64.3 m ²	1000 m	6,431.0 m ³	활중5%, 포트러진상토 14%

(b) 산출수량

[그림 2-43] Case1(9개 지오텍스타일 튜브+성토층)의 시공 모습 및 필요 수량 산출

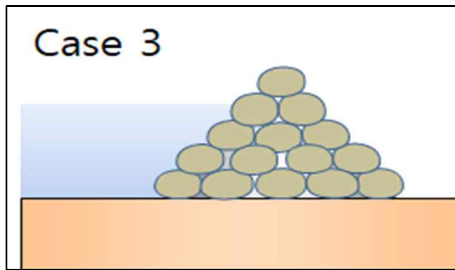


(a) 시공모습

Case 2	규격	횡단면수량	종단면수량	총수량	비고
지오투브	D720 (D3.0m*H2.5m)	5 ea	4 ea	20 ea	
지오텍스타일	DM10 (100/100kN/m)	46.6 m	1000 m	4,600.0 m ²	
성토골재	모래 (포트러진 상토)	93.5 m ²	1000 m	9,046.6 m ³	활중5%, 포트러진상토 14%

(b) 산출수량

[그림 2-44] Case2(5개 지오텍스타일 튜브+성토층+지오텍스막)의 시공 모습 및 필요 수량 산출



(a) 시공모습

Case 3	규격	횡단면수량	종단면수량	총수량	비고
지오투브	D720 (D3.0m*H2.5m)	15 ea	4 ea	60 ea	
지오텍스타일	DM10 (100/100kN/m)	81.0 m	1000 m	8,100.0 m ²	
성토골재	모래 (포트러진 상토)	100 m ²	1000 m	1,000.0 m ³	

(b) 산출수량

[그림 2-45] Case3(15개 지오텍스타일 튜브+일부 성토층)의 시공 모습 및 필요 수량 산출

케이스별 산출된 필요 수량을 토대로 예상 시공단가 세부 계산서를 작성하였다. 골재 조달로 인해 단가가 상승하여 소요비용은 Case2 > Case1 > Case3순이다. 이에 제체 전체를 지오텍스타일 튜브로 시공하는 것이 가장 경제적인 공법으로 계산되었다.

각 케이스별 예상 시공단가 세부 계산서는 다음과 같다.

No.	항목	상세	단위	수량	자재비		인건비		경비		합계	비고	
					단가	금액	단가	금액	단가	금액			
1. 통원 및 부지정지													
1.1	통원	인원, 장비, 자재 등용	L/S	1	23,446,590	23,446,590	1,162,000	1,162,000	4,800,000	4,800,000	31,408,590		
1.2	직업장부지정지 및 장비 세팅		L/S	1	5,861,648	5,861,648	2,108,000	2,108,000	2,600,000	2,600,000	10,569,648		
2. 지오투브 설치 시공													
2.1	지오투브스타일 포설	DM10 (100/100kN/m)	m ²	5,940	2,400	14,256,000	800	4,752,000	1,435	6,494,200	27,502,200		
2.2	지오투브 설치 및 시공	DT20 (200/200kN/m) D3.0m 길이 25m * 967)	m	36	8,600,000	309,600,000	571,400	20,570,400	2,149,300	77,374,800	227,545,200		
3. 취재용 및 다짐													
3.1	공작포설		m ³	6,431	20,000	128,620,800	2,300	18,077,600	17,000	108,327,880	254,028,080		
3.2	현상다짐		m ³	6,431	1,000	6,431,000	300	1,929,312	7,000	45,017,280	53,377,612		
4. 철수													
4	철수		L/S	1	500,000	500,000	630,000	630,000	3,000,000	3,000,000	4,130,000		
합계					308,716,078		49,279,312		250,013,960		608,009,350		

[그림 2-46] Case1 예상 시공단가 세부 계산서

No.	항목	상세	단위	수량	자재비		인건비		경비		합계	비고	
					단가	금액	단가	금액	단가	금액			
1. 통원 및 부지정지													
1.1	통원	인원, 장비, 자재 등용	L/S	1	27,270,966	27,270,966	1,938,000	1,938,000	4,800,000	4,800,000	34,008,966		
1.2	직업장부지정지 및 장비 세팅		L/S	1	6,817,746	6,817,746	1,292,000	1,292,000	2,600,000	2,600,000	16,709,746		
2. 지오투브 설치 시공													
2.1	지오투브스타일 포설	DM10 (100/100kN/m)	m ²	4,860	2,400	11,664,000	800	3,888,000	1,430	6,949,800	22,501,800		
2.2	지오투브가 포설	말뚝타입	m ²	3,430	24,000	82,800,000	8,889	30,687,050	16,000	55,200,000	166,867,050		
2.3	지오투브 설치 및 시공	DT20 (200/200kN/m) D3.0m 길이 25m * 207)	m	20	8,600,000	172,000,000	571,400	11,428,000	2,149,300	42,986,000	128,414,000		
3. 취재용 및 다짐													
3.1	공작포설		m ³	9,647	20,000	192,940,000	2,300	24,116,400	17,000	163,991,520	381,058,120		
3.2	현상다짐		m ³	9,647	1,000	9,646,580	300	2,893,968	7,000	67,525,920	80,066,448		
4. 철수													
4	철수		L/S	1	500,000	500,000	630,000	630,000	3,000,000	3,000,000	4,130,000		
합계					403,630,498		76,853,418		347,059,240		827,537,156		

[그림 2-47] Case2 예상 시공단가 세부 계산서

No.	항목	상세	단위	수량	자재비		인건비		경비		합계	비고	
					단가	금액	단가	금액	단가	금액			
1. 통원 및 부지정지													
1.1	통원	인원, 장비, 자재 등용	L/S	1	21,823,400	21,823,400	4,386,000	4,386,000	4,800,000	4,800,000	31,009,400		
1.2	직업장부지정지 및 장비 세팅		L/S	1	5,455,850	5,455,850	2,924,000	2,924,000	2,600,000	2,600,000	10,979,850		
2. 지오투브 설치 시공													
2.1	지오투브스타일 포설	DM10 (100/100kN/m)	m ²	8,100	2,400	19,440,000	800	9,480,000	1,430	11,983,000	37,903,000		
2.2	지오투브 설치 및 시공	DT20 (200/200kN/m) D3.0m 길이 25m * 967)	m	60	8,600,000	516,000,000	571,400	34,284,000	2,149,300	128,958,000	379,242,000		
3. 취재용 및 다짐													
3.1	공작포설		m ³	1,000	20,000	20,000,000	2,300	2,300,000	17,000	17,000,000	39,500,000		
3.2	현상다짐		m ³	1,000	1,000	1,000,000	300	300,000	7,000	7,000,000	8,300,000		
4. 철수													
4	철수		L/S	1	500,000	500,000	630,000	630,000	3,000,000	3,000,000	4,130,000		
합계					284,219,250		51,504,000		174,947,000		510,664,250		

[그림 2-48] Case3 예상 시공단가 세부 계산서

시공내용(참고)

Case1 : 제체 양쪽 지오투브스타일 튜브 시공

Case2 : 제체 한쪽 지오투브스타일 튜브 시공 및 일부 멤브레인 시공

Case3 : 제체 전체 지오투브스타일 튜브

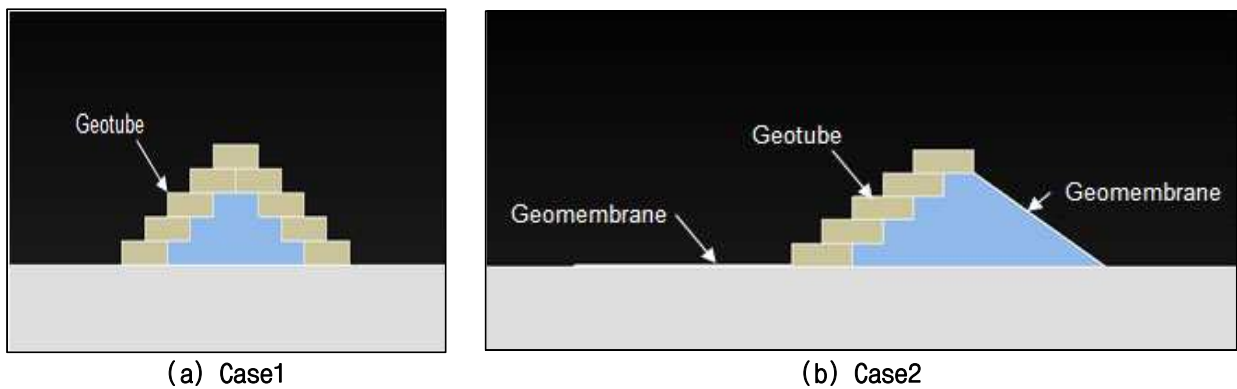
2.4 성토체의 단면형상 분석

2.4.1 구축가능한 단면

가물막이 제체 단면 구성은 소정의 기능을 발휘할 수 있도록 기초지반, 제체 재료, 시공조건 및 경제성 등을 고려하여 종합적으로 판단하여 결정한다.

제체 형식의 선정 및 배치, 순서 및 기하학적 형상으로 된 제체 단면의 설계는 제체 재료의 입도나 조성에 따라 조합방법이 다르고, 제체의 포화도나 재하상태에 따라 달라진다. 따라서, 일률적인 수학적 해석 방법이나 공식을 적용하여 설계할 수 없다.

때문에 가물막이 제체 구성을 위한 요소는 지오택스타일 튜브를 등가 형상으로 높이 1.6m, 폭 4.2m 직사각형으로 모델링하였으며, Case 별 경제성 분석결과를 토대로 하면, 현장 준설토를 이용할 경우 Case3의 경제성이 가장 높은 것으로 나타났으나, 이 경우 안정성이 가장 클 것으로 예상되므로 선행적으로 Case1 및 Case2에 대한 단면형상을 분석하였다.



[그림 2-49] 지반신소재를 활용한 제체 요소 단면 배치도

2.4.2 응력해석 및 안정해석

제체 및 기초는 침투수에 대해 안전하도록 설계하여야 하며, 이를 위해 침투해석이 필요하다. 가물막이 제체를 설계할 때 침투현상에 대해 다음과 같은 사항을 검토하여야 한다.

우선 제체 및 기초지반 내에서의 침투유량 결정하여, 침투수가 제체 및 기초지반의 안정성에 미치는 영향 및 침투 조절방법을 검토하여야 한다.

제체 및 기초지반의 누수를 완전히 차단할 수 없기 때문에 침투수압 및 동수경사 등을 검토하여 파이핑, 수리적 과쇄 등에 대해 안전하도록 설계하여야 하며, 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하여, 침투해석을 수행한 후, 간극수압을 사면해석에 반영하였다.



[그림 2-50] 사면-침투 연계해석 흐름도

가. 침투해석

구축된 제체(선정된 가물막이 요소를 반영)의 침투해석을 위해, 아래 표와 같은 지반 물성을 입력하였다.

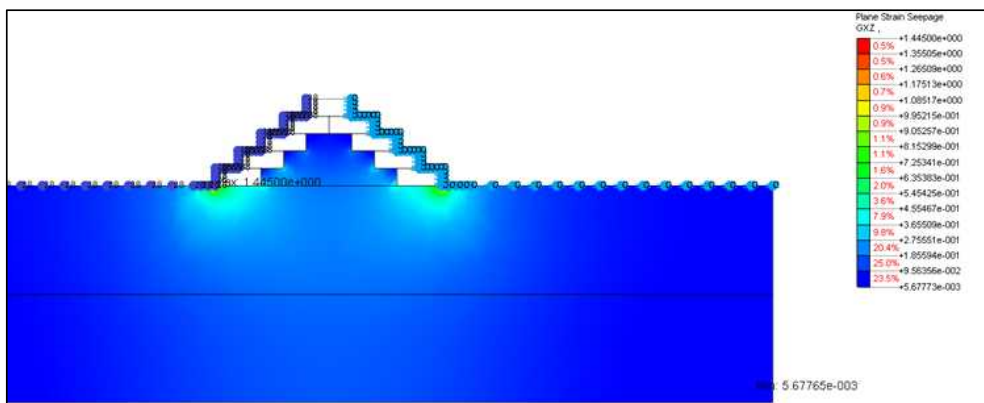
[표 2-22] 입력 지반 특성

구분	이름	투수계수[m/sec]	체적함수비	비 고
1	풍화토	1E ⁻⁶	0.35	
2	풍화암	1.2E ⁻⁶	0.35	
3	지오텍스타일 튜브	-	-	
4	뒷채움토	5E ⁻⁷	0.35	
5	지오멤브레인	-	-	

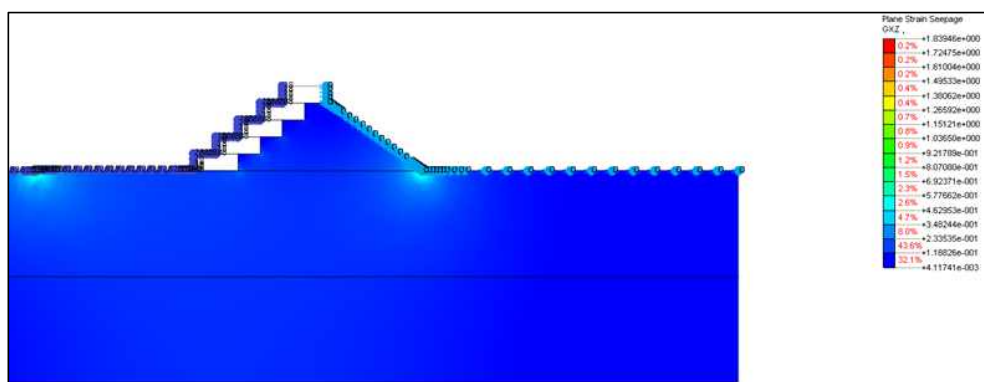
침투해석은 정상류 해석(steady state analysis)에 대해서, 제체의 좌측이 담수된 경우로써 정수위 조건을 설정하였으며, 제체 내부로는 침투로 인한 침윤선이 형성되어 하류사면에 대해 unconfined flow 발생에 따른 경계조건을 반복적으로 수정하도록 하였다.

침투해석 결과 도출된 간극수압 분포는 제체의 사면안정해석에 사용되었으며, 제체 및 투수성 기초지반(풍화토)의 동수경사분포를 아래의 2가지 case에 대해서 도출하였다.

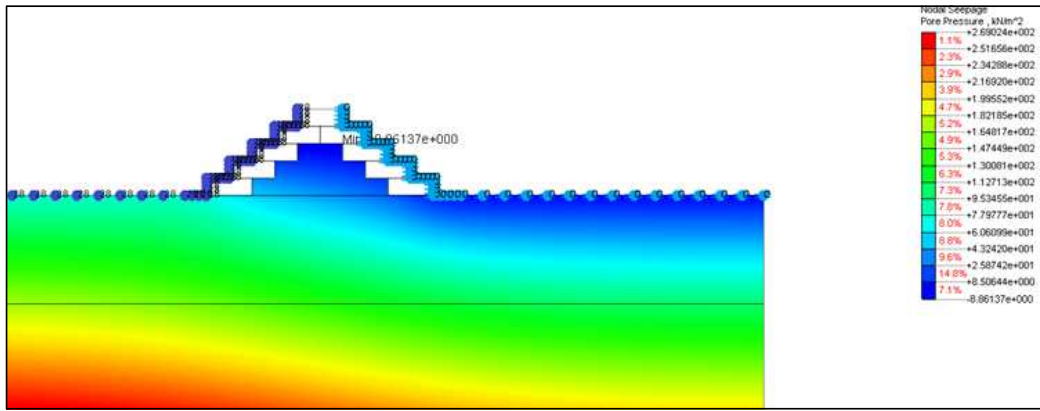
한계동수경사를 기준으로, 흡입자의 유효응력이 0이 되어 발생하는 분사현상이 제체 상/하류의 하단에서 발생 가능한 것으로 확인되었다.



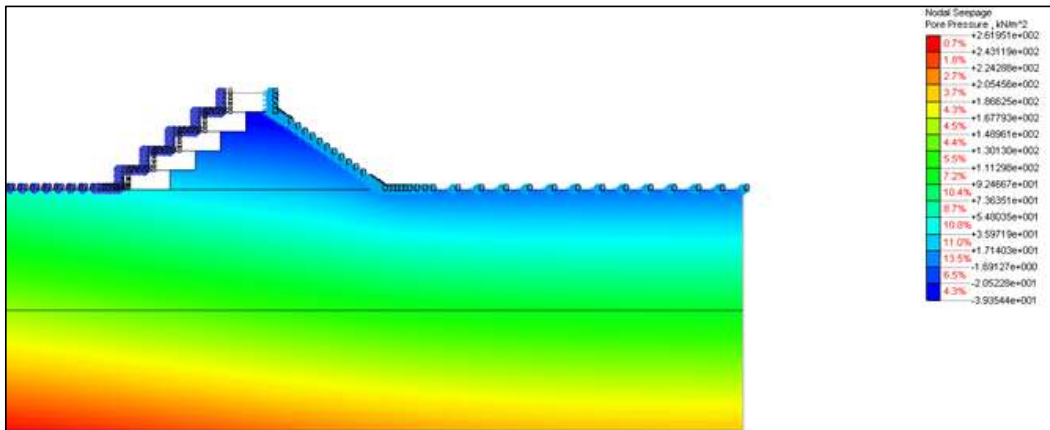
[그림 2-51] Case1 동수경사 분포도



[그림 2-52] Case2 동수경사 분포도



[그림 2-53] Case1 간극수압 분포도



[그림 2-54] Case2 간극수압 분포도

나. 안정해석

제체 및 기초지반은 토질시험의 결과로부터 도출된 재료상수를 기반으로, 제체 및 기초에 작용하는 각종 하중을 고려하여 안정계산을 수행하여 정해진 안전율을 만족하도록 설계해야 한다.

농업생산기반시설 설계기준(2019)에서 제시하고 있는 제체 조건별 필댐의 안전율은 다음과 같다.

[표 2-23] 필댐의 안전율

구분	제체 조건	저수위	지진	안전율		비고
				상류	하류	
1	완성직후 (간극수압최대)	바닥상태	있음	1.3	1.3	
2	완성직후	일부저수	없음	1.3	-	
3	평상시	설계홍수위	없음	1.2	1.2	
4	평상시	만수	있음	1.2	1.2	
5	평상시	일부저수	있음	1.15	-	
6	평상시	급강하	있음	1.2	-	

제체 사면의 안정해석을 위하여, 활동면을 따라 파괴발생이 예상되는 토체의 안정성을 해석하는 한계평형법(Limit Equilibrium Method)를 이용한다. 한계평형법 중, 설계상 채택되는 Bishop방법을 이용하여 안전율을 산정하였다.

가물막이 요소인 지오텍스타일 튜브를 고려하여, 제체의 구성은 Case1 및 Case2로 선정하여 배치하며, 배치된 제체의 안정해석을 위해, 아래 표와 같은 지반 물성을 입력되었다.

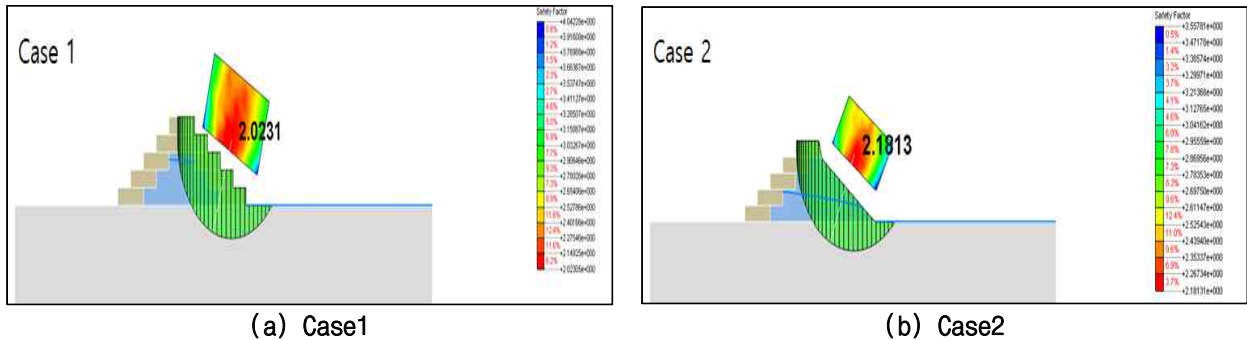
[표 2-24] 입력 지반 특성

구분	이름	습윤단위중량[kN/m ³]	포화단위중량[kN/m ³]	점착력[kN/m ²]	내부마찰각[°]	비고
1	풍화토	18.5	20	17.5	31	
2	풍화암	20	21	35	30	
3	지오텍스타일 튜브	15	18	100	35	
4	덧채움토	18.5	19.5	14	32	

만수위 시 침투해석 결과를 연계하여, 도출된 가물막이 제체의 안전율을 아래와 같이 나타냈다.

지오텍스타일 튜브로 구성된 가물막이 제체의 경우, 상/하류사면에 대한 안정성이 높은 것으로 판단되나, 침투해석 결과, 상/하류사면의 하단부에서 각각 한계동수경사 이상의 동수경사가 도출되므로, 동수경사 저감 대책이 필요하다.

따라서, 지반신소재를 복합적으로 활용하여 제체 안정성을 강화하기 보다는, 침투 저감 대책에 대한 보완이 중점적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.



[그림 2-55] 안정해석 결과

2.5 수위에 따른 지반신소재 적용 방법

2.5.1 단층 지오텍스타일 튜브 형식

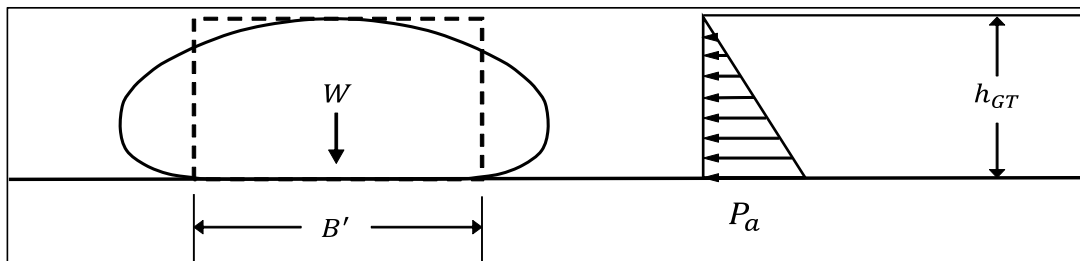
일반적으로 지오텍스타일 직경(D) 1.0~5.5m의 지오텍스타일 튜브가 활용될 수 있으며, 이론적 직경(D)을 이용하여 식 (1)을 통해 최대 시공 높이를 추정할 수 있다.

$$H \approx 0.6D \quad \text{식 (1)}$$

단일 지오텍스타일을 사용하면 높이(H)는 최소 0.6m에서 최대 3.3m를 확보할 수 있다.

‘농업생산기반시설 설계기준 (KDS 67 10 40:2018)’의 농업용댐 가배수공 설계편에서 가물막이의 높이는 콘크리트 구조인 경우 0.5~1.0m 정도의 여유를 제시하고 있다. 따라서, 단층 지오텍스타일 튜브는 설치할 지역의 상류 수위가 2.3~2.8m이하인 경우 가물막이로 활용 가능하다.

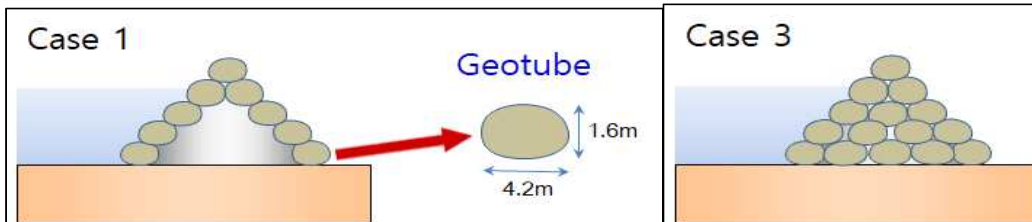
단일 지오텍스타일 튜브 설계 및 시공시, 외부인자로 고려해야 할 사항은 활동, 전도, 지지력, 기초의 세굴 및 침하 등이 있다. 단독 구조물로 사용 시, 토압에 대한 안정성을 고려해 주어야 한다.



[그림 2-56] 토압에 대한 안정성 검토 개념도

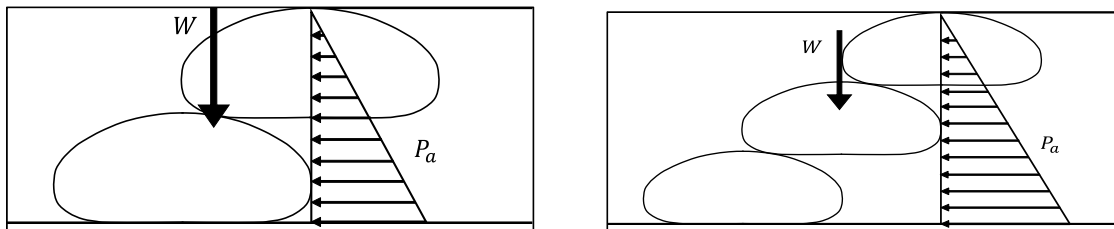
2.5.2 다층 지오텍스타일 튜브 형식

설치할 지역의 상류수위가 다층 지오텍스타일 튜브의 시공높이보다 높을 경우 다층 지오텍스타일 튜브 형식을 설치할 수 있다. 다층 지오텍스타일 튜브 높이 산정기준과 동일한 산정 기준을 사용하여 다층 지오텍스타일 튜브의 시공 높이 및 층수를 결정한다. 설치할 다층 지오텍스타일 튜브의 층수 및 형식은 상황에 따라서 변경될 수 있다.



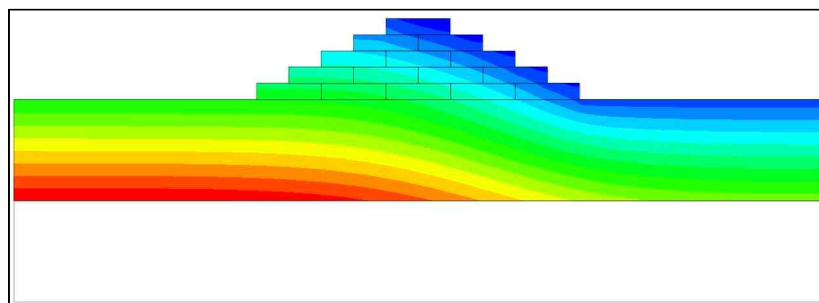
[그림 2-57] 다단 지오텍스타일 튜브 형식 예시

다층 지오텍스타일 튜브 설계 및 시공 시, 단층과 동일하게 활동, 전도, 지지력, 기초의 세굴, 기초 침하를 고려해야 하며, 추가로 사면활동에 대한 안정성을 고려해야 한다.



[그림 2-58] 다단으로 시공 시, 고려인자

제체 및 기초지반의 누수를 완전히 차단할 수 없으므로 침투수압 및 동수경사 등을 검토하여 파이핑, 수리적 파쇄 등을 고려해야 하며, 지오텍스타일 튜브간 접촉면의 전단강도를 고려해야 한다.



[그림 2-59] 지오텍스타일 침투수압

지오텍스타일 튜브간 접촉면의 전단강도를 높이기 지반신소재 마찰력 증대를 위한 결합재를 사용하는 방법이 연구 중이며, 본 연구에서도 개발하고 있다.

2.6 지반신소재 원단물성 개선

2.6.1 지오텍스타일 튜브 현황

지오텍스타일 튜브는 크게 토목용, 산업용으로 사용 용도를 나눌 수 있으며, 토목용으로 사용하는 지오텍스타일 튜브는 가물막이, 호안보호 등의 임시구조물과 제방 및 방파제의 코어 등의 영구구조물로 적용범위를 구분된다. 산업용으로 사용하는 지오텍스타일 튜브는 발전소, 양식장 등 슬러지를 포함한 오폐수를 배출하는 시설의 슬러지 처리 및 여과용으로 사용된다.



[그림 2-60] 가물막이용 지오텍스타일 튜브



[그림 2-61] 호안보호용 지오텍스타일 튜브



[그림 2-62] 오폐수 처리용 지오텍스타일 튜브



[그림 2-63] 지오텍스타일 튜브 배수형상

다량의 물과 골재(슬러지)를 지오텍스타일 튜브 내에 주입하고 물을 배수시켜 구조체를 만들기 때문에 지오텍스타일 튜브를 만드는 원단은 골재를 지오텍스타일 튜브 내에 가둬둘 수 있는 적절한 수준의 유효구멍크기를 가지며, 배수성능이 우수하고 주입압력을 견딜 수 있도록 원단의 인장강도 및 봉합인장강도가 충분해야 한다.

유럽지역에 지반신소재 및 산업섬유를 전문으로 설계, 제조, 시공 능력을 갖춘 글로벌 업체들이 시장을 선도, 선점하고 있으며, 아시아 지역의 후발업체들이 따라가고 있지만 점유율은 미미한 수준이다. 국내 업체 중 글로벌 기준의 물성을 확보한 지오텍스타일 튜브 생산업체는 전무하며, 적용실적 또한 미미한 수준이다.

[표 2-25] 글로벌 지반신소재 및 지오텍스타일 튜브 생산업체

업체명	국가	사업영역	시장 점유율	비고
Tencate	네델란드	· 지반신소재 및 산업섬유 생산, 현장설시설계 및 시공	· 글로벌 토목섬유 시장의 30~40% 정도 점유, 지오텍스타일 튜브 역시 유사한 비율로 시장 점유	
Huesker	독일	· 지반신소재 생산, 현장설시설계 및 시공	· 글로벌 토목섬유 시장의 20~30% 정도 점유, 지오텍스타일 튜브 역시 유사한 비율로 시장 점유	
ACE	대만	· 지반신소재 생산, 현장설시설계 및 시공	· 글로벌 토목섬유 시장의 10% 정도 점유, 지오텍스타일 튜브 역시 유사한 비율로 시장 점유	
기타 중국업체		· 지반신소재 생산, 납품	· 중국시장 지반신소재 시장 대부분을 점유하고 있으며 지오텍스타일 튜브 제품 및 원단 납품	

2.6.2 지오텍스타일 튜브 제작의 문제점

현재 지오텍스타일 튜브 제작에 대한 문제점은 크게 4가지를 들 수 있다. 원재료 수급문제, 생산설비의 적합성, 제품의 물성 마지막으로 원단 물성을 고려한 시공 공법의 부재로 들 수 있다.

먼저 토목용 지오텍스타일 튜브 생산에 사용하는 원사는 폴리프로필렌 스플릿사로 원유에서 폴리프로필렌 칩을 생산하고 다시 칩을 연신하여 생산되고 있다. 공정상 대량생산이 쉽지 않으므로 인해, 생산 시설 및 시기에 따라서 물성이 다를 수 있다. 최종 제품의 물성 안정화 및 관리에 분리하며, 국내에서 원사를 납품하는 업체가 없어 안정적인 원재료(원사) 수급에 문제가 있다.

또한, 토목용 지오텍스타일 튜브에 적용하는 폴리프로필렌 스플릿사는 형태가 납작해 원단 생산 시 원사 꼬임을 방지하기 위해 워터직기를 사용해야 생산성이 높아지고 정경작업부터 별도의 시설 갖춰야 한다.

본 연구기업의 생산설비를 활용해 폴리프로필렌 스플릿사로 원단 제직 시 원사 꼬임으로 인해 생산성이 현저히 낮다. 토목용으로 사용하는 지오텍스타일은 지오텍스타일 튜브 원단대비 수리적 특성이 현저하게 떨어진다는(일반 지오텍스타일 투수성능은 $1\sim 5L/m^2/sec$, 지오텍스타일 튜브의 투수성능은 $20L/m^2/sec$ 이상).

그래서, 사용하는 원단 및 현장여건(골재, 시공규모 등)에 따라 지오텍스타일 튜브가 견딜 수 있는 주입압력, 배수성능, 시공속도 등이 상이하므로, 이에 따라 적합한 시공방법 및 장비조합 설정이 필요하다.

이 같은 문제를 해결하기 위해서 생산성, 경제성, 완제품의 물성을 고려한 원재료(원사)를 선정하여, 선정한 원재료(원사)의 조직 설계를 통한 물리적, 수리적 특성을 개선하고자 한다. 또한 개선된 지오텍스타일 튜브 원단 물성과 현장여건을 고려한 시공 공법 선정 및 장비를 조합을 결정하였다.

2.6.3 개선원단 목표설정 및 개발

현재 글로벌 시장에서 지오텍스타일 튜브 설계, 시공 및 자재 생산을 주도하는 선도기업의 지오텍스타일 튜브 원단물성을 상회하는 수준의 원단 개발을 목표로 하고 있다. (아래 목표물성 참조)



GC1000M

GC1000M is composed of high tenacity polypropylene multifilament yarns, which are woven into a stable network such that the yarns retain their relative position. GC1000M is inert to biological degradation and resistant to naturally encountered chemicals, alkalis, and acids.

Mechanical Properties	Test Method	Unit	Minimum Average Roll Value	
			MD	CD
Wide Width Tensile Strength (at ultimate)	ASTM D4595	lbs/in (kN/m)	1000 (175)	1000 (175)
Wide Width Tensile Elongation	ASTM D4595	%	20(max.)	20 (max.)
Factory Seam Strength	ASTM D4884	lbs/in (kN/m)	500 (88)	
Apparent Opening Size (AOS)	ASTM D4751	(U.S. Sieve #) (mm)	30 (0.60)	
Water Flow Rate	ASTM D4491	gpm/ft ² (l/min/m ²)	20 (815)	
Mass/Unit Area	ASTM D5261	oz/yd ² (g/m ²)	33 (1119) (Typical Value)	
UV Resistance (% strength retained after 500 hrs)	ASTM D4355	%	85	

[그림 2-64] 글로벌 지반신소재 업체 Tencate 토목용 지오텍스타일 튜브 물성표

[표 2-26] 선도업체 제품 원단물성 및 개발 원단 물성목표 대비

구분	시험방법	단위	선도업체 제품물성	개발목표물성	비고
1. 물리적특성					
인장강도 (MD)	ASTM D 4595	kN/m	≥ 175	200	
인장강도 (CD)	ASTM D 4595	kN/m	≥ 175	200	
인장신율 (MD)	ASTM D 4595	%	≤ 20	15	
인장신율 (CD)	ASTM D 4595	%	≤ 20	15	
봉합강도	ASTM D 4884	kN/m	≥ 88	100	
UV 저항성	ASTM D 4355	%	≥ 85 (149kN/m)	85 (149kN/m)	
2. 수리적특성					
유효구멍크기	ASTM D 4751	mm	≤ 0.6	0.6	
투수성능	ASTM D 4491	l/m ² /min	≥ 815	815	

원단 개선을 위해서 원재료(원사) 변경을 통한 물리적 특성 개선과 조직 설계 개발을 통해 수리적인 특성을 개선을 실시하였다.

원사 변경은 기존 토목용 지오텍스타일 튜브에 사용하는 폴리프로필렌 스플릿사 대비 고강도, 저신율을 원사 적용을 통해 제품의 강성을 포함한 물리적 특성을 향상시키고 구조체의 안정성 추구하였으며, 조직 설계를 부분에서는 일반적으로 직물 지오텍스타일에 적용하는 평직 설계는 높은 투수성능을 발휘하기 불리하며, 투수성능 향상을 위한 별도의 설계를 진행하였다.

가. 원재료(원사) 선정

원사 선정방법은 현재 사용 가능한 지반신소재 가운데에서 물성, 경제성, 적용성과 생산성을 종합적으로 검토하여 선정하였다. 현재 지반신소재에 사용하는 원사는 원재료 별로 폴리프로필렌, 폴리에스터, 폴리비닐알콜(PVA), 아라미드 원사가 있으며, 형태별로는 플랫사, 멀티필라멘트사, 모노사 등이 존재한다.

원사 중 가장 높은 강성과 낮은 신율의 물성을 가진 원재료(원사)는 아라미드사로 강성은 기존 지오텍스타일 튜브에서 사용하는 폴리프로필렌 원사 대비 약 3~4배 수준이며 신율도 상당히 낮아 구조체 안정성 확보에 가장 유리하다. 지반신소재에 가장 광범위하게 사용하는 폴리에스터 원사는 폴리프로필렌 원사대비 약 1.5배 정도 높은 강성을 가지고 있으며, 인장신율은 15%정도로 상대적으로 낮아 물리적 성질이 양호하다. PVA 소재의 원사는 폴리프로필렌과 폴리에스터 원사 대비 우수한 수준의 물리적 성질을 보유하고 있으나 아라미드 소재의 원사 대비해서 물리적 성질이 낮다.

PVA 및 Aramid 소재의 원사는 폴리프로필렌이나 폴리에스터 대비 약 10배 이상 가격이 수준이 높아 완제품 제작 시 단가 경쟁력을 갖추기 어렵다. 현재 PVA 는 국내생산 업체가 전무하며 일본 기업이 시장을 과점하고 있어 자재 수급이 어려우며, Aramid 소재의 원사는 역시 국내 조달이 불가능하고 충분한 물량을 공급할 수 있는 업체가 제한적이다.

폴리프로필렌 스플릿사는 원유에서 칩 형태의 폴리프로필렌을 생산하고 칩 형태의 원재료를 연신하여 원사를 생산하기 때문에 소규모 원사생산 설비에 적합하고 원사 물성을 개선하기 위한 후처리 공정을 추가하기 쉽다. 소량 생산으로 인해 생산 시기, 생산 설비 및 업체마다 물성이 상이하여 물성 안정화가 쉽지 않다. 또 원사의 인장강도가 타 원사대비 낮아 생산 가능한 최대 인장강도가 낮다.

폴리에스터 원사는 원유에서 직접 대량으로 원사를 만들기 때문에 생산 시기나 생산설비에 따른 물성차이가 크지 않아 완제품의 물성 신뢰도가 높으나, 원재료 물성 개선을 위한 후처리 공정을 추가하기 쉽지 않다.

PVA, Aramid, 폴리에스터 원사는 주로 multifilament 형태의 원사를 사용하며, 연구기업이 보유한 생산설비로 제직하기 용이하다. 폴리프로필렌 스플릿사는 단면 형태가 납작하여 multifilament 원사 대비 제직 시 원사 꼬임 등의 문제가 쉽게 발생하여 생산 시 주의가 필요하다.

구조체의 안정성을 최대한 높이기 위해 원재료의 강성이 가장 큰 Aramid 원사 또는 PVA 원사를 사용 하는 것이 타당하지만 경제성, 적용성, 원재료의 수급 등을 고려하면 합리적인 선택지가 아닌 것으로 판단된다.

따라서 기존 폴리프로필렌보다 강성을 높이고 동등한 수준의 배수성능을 가진 지오텍스타일 튜브 원단을 개발하기 위해서는 경제성, 적용성, 생산성을 고려해 지오텍스타일에 널리 쓰이는 PET multifilament 원사를 활용해 조직 설계를 변경하는 방법이 가장 타당할 것으로 판단된다.

[표 2-27] 원재료(원사)별 특성 대비

구분	폴리프로필렌 스플릿사 (기존지오텍스타일 튜브)	고강도 폴리에스터 멀티필라멘트사	PVA 멀티필라멘트사	Aramid 멀티필라멘트사	비고
형태					
물성	강성	약 6g/Deniar	약 8g/Deniar	약 15g/Deniar	약 20g/Deniar
	신율	20% 내외	15% 내외	7% 내외	5% 이하
경제성	약 2,500원/kg	약 2,000원/kg	약 20,000원/kg	약 100,000원/kg	
적용성	<ul style="list-style-type: none"> · 다양한 업체가 생산하지만 대량으로 조달하기 어려움 · 업체별 생산 기간별 물성이 상이하고 물성 관리가 어려움 	<ul style="list-style-type: none"> · 대량 조달가능하며 원유에서 직접 대량으로 생산해 안정적 물성보유 	<ul style="list-style-type: none"> · 국내 생산이 불가능하고 세계적으로 생산가능한 업체가 한정적 	<ul style="list-style-type: none"> · 국내 생산이 불가능하고 세계적으로 생산가능한 업체가 한정적 	
생산성	<ul style="list-style-type: none"> · 납작한 원사단면으로 일반적인 제직설비로 제직시 생산성이 떨어짐. 추가 설비필요 	<ul style="list-style-type: none"> · 원형 원사단면으로 제직이 용이하며, 당사 제직설비에 적합 	<ul style="list-style-type: none"> · 원형 원사단면으로 제직이 용이하며, 당사 제직설비에 적합 	<ul style="list-style-type: none"> · 원형 원사단면으로 제직이 용이하며, 당사 제직설비에 적합 	

2.6.4 1차 원단 설계 (6종 설계)

선정된 PET multifilament 원사를 기준으로 강도와 조직의 조건에 따라 6개의 설계가 나왔다.

강도설계의 경우 경사의 설계 인장강도는 본 연구기업 제직설비의 밀도와(2x10.9/inch) PET multifilament 원사의 인장강도를(9g/denier) 기준으로 제직 시 강도감소를 고려해 약 230kN/m로 설계하였다.

위사 인장강도 역시 제직 시 강도 감소를 고려해 약 230kN/m로 설계하였으며 위사 밀도 및 섬도에 따른 수리적 특성(유효구멍 크기, 투수성능) 변화를 확인하기 위해 밀도 및 섬도를 각각 2가지 조건으로 설정하였다.

조직 설계에 따른 수리적 특성 변화를 확인하기 위해 평직, 능직, 변형직 형태의 조직 설계를 적용하였다. 아래의 표와 그림은 설계 내용 및 설계도를 나타낸다.

[표 2-28] 1차 조직, 섬도 및 밀도 별 설계내용

설계 번호	조직	경사 조건		위사 조건		비고
		섬도(d)	밀도(매/inch)	섬도(d)	밀도(매/inch)	
#1	평직	3,000	2×10.9	3,750	2×9	
#2	능직	3,000	2×10.9	3,750	2×9	
#3	변형직	3,000	2×10.9	3,750	2×9	
#4	평직	3,000	2×10.9	5,000	14	
#5	능직	3,000	2×10.9	5,000	14	
#6	변형직	3,000	2×10.9	5,000	14	

對外秘
Confidential

제직부장	R&D	공장장

샘플제직설계도(Sample Weaving Design) #1

규격/조직	바 디			경 사						위 사			폭 (cm)	질량 (g/m ²)
	매수 /in	성폭 (in)	바디폭 (in)	본수	본통	Denier	Maker	밀도		Denier	Maker	밀도		
								설계	실측					
R&D #1 샘플	10.9	214.1	216.5	4,668	2	3,000 (연사)	Hubis	21.8	21.8	3,750 (연사)	Hubis	2 X 9	538	-

특 이 사 항

<제직 조건>

- RPM : 240
- 개구각도 : 45°, 경사 폐구각도 : 305°
- 경사장력 : 350 kg (2-in-beam 사용)
- 변부 : -
- 통경순서 : 순방향
- 특이사항 : -

경사 변부 1 2 3 4 5 6 7 8 9

↓									
9									
8									
7									
6									
5									
4	■	■	■	■	■	■	■	■	■
3	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2	■	■	■	■	■	■	■	■	■
1	■	■	■	■	■	■	■	■	■

위사 →

인장강도 (kN/m)		인장변형률 (%)	
경사(MD)	위사(CD)	경사(MD)	위사(CD)
궤롤링강도 (kN)		수직투수성 (L/min/m ²)	
유효구멍크기 (mm)		두께 (mm)	

[그림 2-65] 1차 원단설계도 샘플 #1

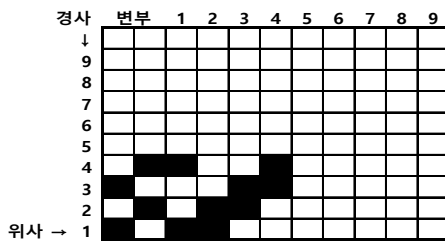
對外秘
Confidential

제작부장	R&D	공장장

샘플제직설계도(Sample Weaving Design) #2

규격/조직	바 디			경 사						위 사			폭 (cm)	질량 (g/m ²)
	매수 /in	성폭 (in)	바디폭 (in)	본수	본통	Denier	Maker	밀도		Denier	Maker	밀도 실측		
								설계	실측					
R&D #2 샘플	10.9	214.1	216.5	4,668	2	3,000 (연사)	Hubis	21.8	21.8	3,750 (연사)	Hubis	2 X 9	538	-

특 이 사 항	<제작 조건>
	1. RPM : 240
	2. 개구각도 : 45°, 경사 폐구각도 : 305°
	3. 경사장력 : 350 kg (2-in-beam 사용)
	4. 변부 : 폭 11 cm, 평직으로 제직
	5. 통경순서 : 순방향
6. 특이사항 : -	



인장강도 (kN/m)		인장변형률 (%)	
경사(MD)	위사(CD)	경사(MD)	위사(CD)
궤폭림강도 (kN)		수직투수성 (L/min/m ²)	
유효구멍크기 (mm)		두께 (mm)	

[그림 2-66] 1차 원단설계도 샘플 #2

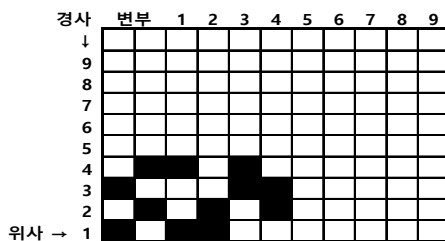
對外秘
Confidential

제작부장	R&D	공장장

샘플제직설계도(Sample Weaving Design) #3

규격/조직	바 디			경 사						위 사			폭 (cm)	질량 (g/m ²)
	매수 /in	성폭 (in)	바디폭 (in)	본수	본통	Denier	Maker	밀도		Denier	Maker	밀도 실측		
								설계	실측					
R&D #3 샘플	10.9	214.1	216.5	4,668	2	3,000 (연사)	Hubis	21.8	21.8	3,750 (연사)	Hubis	2 X 9	538	-

특 이 사 항	<제작 조건>
	1. RPM : 240
	2. 개구각도 : 45°, 경사 폐구각도 : 305°
	3. 경사장력 : 350 kg (2-in-beam 사용)
	4. 변부 : 폭 11 cm, 평직으로 제직
	5. 통경순서 : 순방향
6. 특이사항 : -	



인장강도 (kN/m)		인장변형률 (%)	
경사(MD)	위사(CD)	경사(MD)	위사(CD)
궤폭림강도 (kN)		수직투수성 (L/min/m ²)	
유효구멍크기 (mm)		두께 (mm)	

[그림 2-67] 1차 원단설계도 샘플 #3

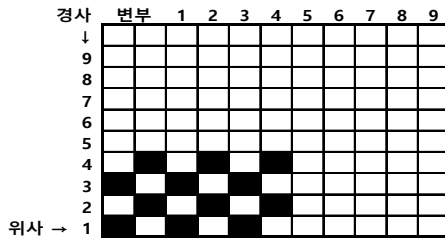
對外秘
Confidential

제작부장	R&D	공장장

샘플제작설계도(Sample Weaving Design) #4

규격/조직	바 디			경 사						위 사			폭 (cm)	질량 (g/m ²)
	매수 /in	성폭 (in)	바디폭 (in)	본수	본통	Denier	Maker	밀도		Denier	Maker	밀도 실측		
								설계	실측					
R&D #4 샘플	10.9	214.1	216.5	4,668	2	3,000 (연사)	Hubis	21.8	21.8	5,000 (연사)	Hubis	14	538	-

특 이 사 항	<제작 조건> 1. RPM : 130 2. 개구각도 : 45°, 경사 폐구각도 : 305° 3. 경사장력 : 350 kg (2-in-beam 사용) 4. 변부 : - 5. 통경순서 : 순방향 6. 특이사항 : -
---------	--



인장강도 (kN/m)		인장변형률 (%)	
경사(MD)	위사(CD)	경사(MD)	위사(CD)
궤물림강도 (kN)		수직투수성 (L/min/m ²)	
유효구멍크기 (mm)		두께 (mm)	

대 윤 지 오 텍

[그림 2-68] 1차 원단설계도 샘플 #4

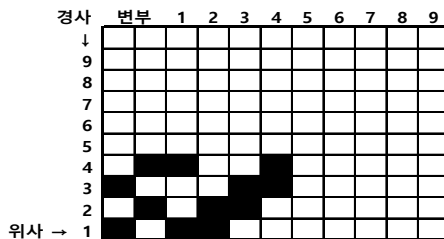
對外秘
Confidential

제작부장	R&D	공장장

샘플제작설계도(Sample Weaving Design) #5

규격/조직	바 디			경 사						위 사			폭 (cm)	질량 (g/m ²)
	매수 /in	성폭 (in)	바디폭 (in)	본수	본통	Denier	Maker	밀도		Denier	Maker	밀도 실측		
								설계	실측					
R&D #5 샘플	10.9	214.1	216.5	4,668	2	3,000 (연사)	Hubis	21.8	21.8	5,000 (연사)	Hubis	14	538	-

특 이 사 항	<제작 조건> 1. RPM : 130 2. 개구각도 : 45°, 경사 폐구각도 : 305° 3. 경사장력 : 350 kg (2-in-beam 사용) 4. 변부 : 폭 10 cm, 평직으로 제작 5. 통경순서 : 순방향 6. 특이사항 : -
---------	---



인장강도 (kN/m)		인장변형률 (%)	
경사(MD)	위사(CD)	경사(MD)	위사(CD)
궤물림강도 (kN)		수직투수성 (L/min/m ²)	
유효구멍크기 (mm)		두께 (mm)	

[그림 2-69] 1차 원단설계도 샘플 #5

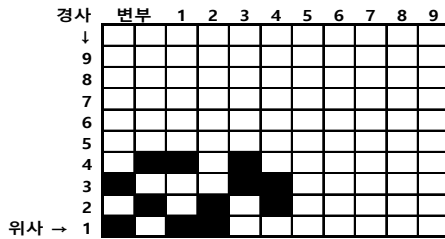
對外秘
Confidential

제작부장	R&D	공장장

샘플제직설계도(Sample Weaving Design) #6

규격/조직	바 디			경 사						위 사			폭 (cm)	질량 (g/m ²)
	매수 /in	성폭 (in)	바디폭 (in)	본수	본통	Denier	Maker	밀도		Denier	Maker	밀도 실측		
								설계	실측					
R&D #6 샘플	10.9	214.1	216.5	4,668	2	3,000 (연사)	Hubis	21.8	21.8	5,000 (연사)	Hubis	14	538	-

특 이 사 항	<제직 조건> 1. RPM : 130 2. 개구각도 : 45°, 경사 폐구각도 : 305° 3. 경사장력 : 350 kg (2-in-beam 사용) 4. 변부 : 폭 10 cm, 평직으로 제직 5. 통경순서 : 순방향 6. 특이사항 : -
---------	---



인장강도 (kN/m)		인장변형률 (%)	
경사(MD)	위사(CD)	경사(MD)	위사(CD)
궤롤림강도 (kN)		수직투수성 (L/min/m ²)	
유효구멍크기 (mm)		두께 (mm)	

대 윤 지 오 텍

[그림 2-70] 1차 원단설계도 샘플 #6

가. 1차 원단 물성 평가

인장강도 및 신율의 경우 폴리프로필렌 보다 강성이 우수한 폴리에스터 원사를 사용하여 인장강도 및 신율은 목표한 물성을 대부분 달성하였으나 #4 샘플의 경우 경사방향 신율이 목표 물성대비 높다.

봉합강도는 위사 섬도가 낮은 #1, #2, #3 샘플의 경우 원단 봉제 시 원사손상이 위사 섬도가 높은 나머지 샘플에 비해 많이 발생하여 봉합강도 결과가 상대적으로 낮은 것으로 판단된다.

UV 저항성은 전반적인 UV 저항성은 원단 강도의 약 50% 내외 이며, 이는 목표물성에 한참 미치지 못하는 결과이다. 일반적으로 폴리프로필렌이 폴리에스터에 비해 UV저항성이 낮은 것을 고려하면 선진제품에 사용하는 폴리프로필렌 원사는 UV저항성을 높이기 위해 별도의 후처리 공정을 추가한 것으로 판단된다.

수리적 특성은 평직으로 설계한 #1, #4 샘플은 원사 섬도 및 밀도에 상관없이 목표한 수리적 물성을 달성하기 어려울 것으로 판단되며, #2 샘플은 유효구멍크기가 평직으로 설계한 #1, #4 샘플보다 큰 결과값을 얻었으나 투수성능은 오히려 떨어지는 것으로 판명되었으며, #3 샘플은 투수성능이 목표물성 대비 월등하지만 그만큼 유효구멍 크기가 커 제품으로 부적합 할 것으로 예상된다.

따라서 #5, #6 샘플의 조직 설계가 지오텍스타일 튜브 원단으로 가장 적합할 것으로 예상된다.

종합적으로 평가했을 때 #5, #6 샘플의 원단설계가 수리적 특성과 UV저항성을 제외한 물리적 특성이 지오텍스타일 튜브 원단에 적합할 것으로 예상되나, UV저항성은 폴리에스터 원사 특성상 제조업체에서 개선이 어려울 것으로 판단된다.

현재 결과를 바탕으로 UV저항성을 높이기 위해 원단 설계강도를 약 50% 높은 300kN/m로 설계변경하면 잔여보유강도를 약 150kN/m 수준으로 높일 수 있을 것으로 판단된다.

[표 2-29] 1차 설계 별 시험결과

구분	시험 방법	단위	개발 목표물성	샘플 #1 평직	샘플 #2 능직	샘플 #3 변형직	샘플 #4 평직	샘플 #5 능직	샘플 #6 변형직	비고
----	-------	----	---------	-------------	-------------	--------------	-------------	-------------	--------------	----

1. 물리적 특성

인장강도 (MD)	ASTM D4595	kN/m	≥	200	213.31	223.2	211.92	207.66	222.32	231.6	
인장강도 (CD)	ASTM D4595	kN/m	≥	200	223.59	218.05	213.41	234.14	226.63	230.57	
인장신율 (MD)	ASTM D4595	%	≤	15	12.6	10	10.7	17.4	9.6	11.2	
인장신율 (CD)	ASTM D4595	%	≤	15	11	13	12.3	11.3	13.6	13.6	
봉합강도	ASTM D4884	kN/m	≥	100	41.56	32.91	46.59	121.39	109.52	107.8	
UV 저항성 (MD)	ASTM D4355	%	≥	85 (149kN/m)	51.4 (110kN/m)	40.5 (90kN/m)	47.2 (100kN/m)	57.9 (120kN/m)	43 (96kN/m)	51.2 (119kN/m)	
UV 저항성 (CD)	ASTM D4355	%	≥	85 (149kN/m)	40.2 (90kN/m)	38 (83kN/m)	35.5 (76kN/m)	42.8 (100kN/m)	45.8 (104kN/m)	46.3 (107kN/m)	

2. 수리적 특성

유효구멍 크기	ASTM D4751	mm	≤	0.6	0.046	0.32	0.6 이상	0.038	0.051	0.296	
투수 성능	ASTM D4491	l/m ² /min	≥	815	86.3	32.91	3381.5	101.3	824	1790.7	

2.6.5 2차 원단 설계 (6종 설계)

1차 원단 설계한 결과 UV저항성을 낮아 UV저항성을 높이기 위해 원단 설계강도를 약 50% 높은 300kN/m로 설계 변경하였으며, 잔여보유강도도 약 150kN/m 수준으로 높여서 설계를 실시하였다. 1차 원단 설계와 동일한 방법으로 강도설계와 조직 설계를 진행하였다. 경사의 설계 인장강도는 본 연구기업의 제직설비의 밀도와(2x10.9/inch) PET multifilament 원사의 인장강도를 (9g/denier) 기준으로 제직 시 강도감소를 고려해 약 340kN/m로 설계하였다. 위사 인장강도 역시 제직 시 강도 감소를 고려해 약 350kN/m로 설계하였으며 위사 밀도 및 섬도에 따른 수리적 특성(유효구멍 크기, 투수성능) 변화를 확인하기 위해 밀도 및 섬도를 각각 2가지 조건으로 설정하였다.

조직 설계에 따른 수리적 특성 변화를 확인하기 위해 평직, 능직, 변형직 형태의 조직을 설계하였다.

1차 원단설계 샘플 중 #5, #6 샘플이 지오텍스타일 튜브 원단 목표물성에 가장 근접하지만 2차 설계는 UV저항성의 잔류강도를 높이기 위해 사용하는 원사의 섬도 및 밀도를 변경하였기 때문에 #1~4 샘플의 조직설계의 물성변화를 예측할 수 없기 때문에 다시 평가를 진행하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

아래의 표와 그림은 설계 내용 및 설계도를 나타낸다.

[표 2-30] 2차 조직, 섬도 및 밀도 별 설계내용

설계번호	조직	경사 조건		위사 조건		비고
		섬도(d)	밀도(매/inch)	섬도	밀도(매/inch)	
#1	평직	4,500	2×10.9	5,000	2×10	
#2	능직	4,500	2×10.9	5,000	2×10	
#3	변형직	4,500	2×10.9	5,000	2×10	
#4	평직	4,500	2×10.9	6,000	2×9	
#5	능직	4,500	2×10.9	6,000	2×9	
#6	변형직	4,500	2×10.9	6,000	2×9	

對外秘
Confidential

제직부장	R&D	공장장
------	-----	-----

샘플제직설계도(Sample Weaving Design) #1

규격/조직	바 디			경 사				위 사			폭 (cm)	질량 (g/m ²)		
	매수 /in	성폭 (in)	바디폭 (in)	본수	본통	Denier	Maker	밀도 설계	실속	Denier			Maker	밀도 설계
R&D #1 샘플	10.9	214.1	216.5	4,668	2	4,500 (연사)	Hubis	21.8	21.8	5,000 (연사)	Hubis	2 X 10	538	-

특 이 사 항

<제직 조건>
 1. RPM : 220
 2. 개구각도 : 45°, 경사 폐구각도 : 305°
 3. 경사장력 : 400 kg (2-in-beam 사용)
 4. 변부 : -
 5. 통경순서 : 순방향
 6. 특이사항 : -

경사

	변부	1	2	3	4	5	6	7	8	9
↓										
9										
8										
7										
6										
5										
4										
3										
2										
1										

위사 →

인장강도 (kN/m)		인장변형률 (%)	
경사(MD)	위사(CD)	경사(MD)	위사(CD)
궤롤링강도 (kN)		수직투수성 (L/min/m ²)	
유효구멍크기 (mm)		두께 (mm)	

[그림 2-71] 2차 원단설계도 샘플 #1

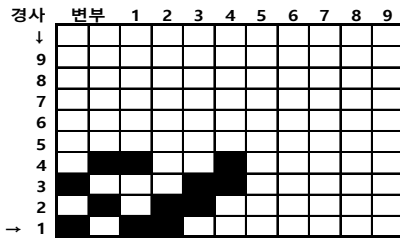
對外秘
Confidential

제작부장	R&D	공장장

샘플제작설계도(Sample Weaving Design) #2

규격/조직	바 디			경 사						위 사			폭 (cm)	질량 (g/m ²)
	매수 /in	성폭 (in)	바디폭 (in)	본수	본통	Denier	Maker	밀도		Denier	Maker	밀도		
								설계	실측					
R&D #2 샘플	10.9	214.1	216.5	4,668	2	4,500 (연사)	Hubis	21.8	21.8	5,000 (연사)	Hubis	2 X 10	538	-

특 이 사 항	<제작 조건> 1. RPM : 220 2. 개구각도 : 45°, 경사 폐구각도 : 305° 3. 경사장력 : 400 kg (2-in-beam 사용) 4. 변부 : 폭 7.5 cm, 평직으로 제작 5. 통경순서 : 순방향 6. 특이사항 : -
---------	--



인장강도 (kN/m)		인장변형률 (%)	
경사(MD)	위사(CD)	경사(MD)	위사(CD)
퀘틀링강도 (kN)		수직투수성 (L/min/m ²)	
유효구멍크기 (mm)		두께 (mm)	



[그림 2-72] 2차 원단설계도 샘플 #2

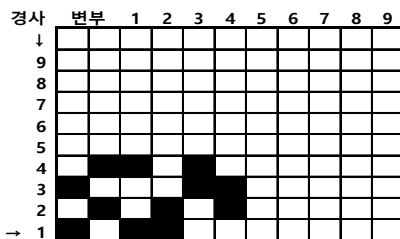
對外秘
Confidential

제작부장	R&D	공장장

샘플제작설계도(Sample Weaving Design) #3

규격/조직	바 디			경 사						위 사			폭 (cm)	질량 (g/m ²)
	매수 /in	성폭 (in)	바디폭 (in)	본수	본통	Denier	Maker	밀도		Denier	Maker	밀도		
								설계	실측					
R&D #3 샘플	10.9	214.1	216.5	4,668	2	4,500 (연사)	Hubis	21.8	21.8	5,000 (연사)	Hubis	2 X 10	538	-

특 이 사 항	<제작 조건> 1. RPM : 220 2. 개구각도 : 45°, 경사 폐구각도 : 305° 3. 경사장력 : 400 kg (2-in-beam 사용) 4. 변부 : 폭 7.5 cm, 평직으로 제작 5. 통경순서 : 순방향 6. 특이사항 : -
---------	--



인장강도 (kN/m)		인장변형률 (%)	
경사(MD)	위사(CD)	경사(MD)	위사(CD)
퀘틀링강도 (kN)		수직투수성 (L/min/m ²)	
유효구멍크기 (mm)		두께 (mm)	

[그림 2-73] 2차 원단설계도 샘플 #3

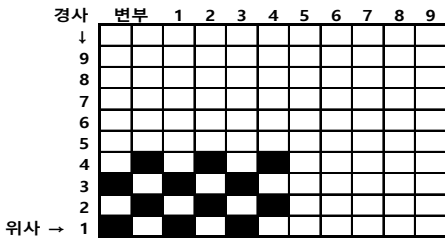
對外秘
Confidential

제작부장	R&D	공장장

샘플제작설계도(Sample Weaving Design) #4

규격/조직	바 디			경 사						위 사			폭 (cm)	질량 (g/m ²)
	매수 /in	성폭 (in)	바디폭 (in)	본수	본통	Denier	Maker	밀도		Denier	Maker	밀도 실측		
								설계	실측					
R&D #4 샘플	10.9	214.1	216.5	4,668	2	4,500 (연사)	Hubis	21.8	21.8	6,000 (연사)	Hubis	2 X 9	538	-

특 이 사 항	<제작 조건>
	1. RPM : 220
	2. 개구각도 : 45°, 경사 폐구각도 : 305°
	3. 경사장력 : 400 kg (2-in-beam 사용)
	4. 변부 : -
	5. 통경순서 : 순방향
6. 특이사항 : -	



인장강도 (kN/m)		인장변형률 (%)	
경사(MD)	위사(CD)	경사(MD)	위사(CD)
궤뿔림강도 (kN)		수직투수성 (L/min/m ²)	
유효구멍크기 (mm)		두께 (mm)	



[그림 2-74] 2차 원단설계도 샘플 #4

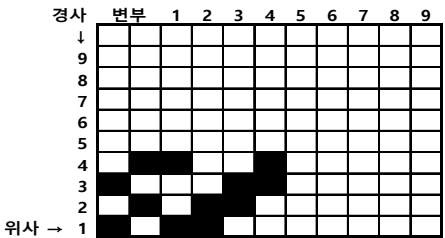
對外秘
Confidential

제작부장	R&D	공장장

샘플제작설계도(Sample Weaving Design) #5


규격/조직	바 디			경 사						위 사			폭 (cm)	질량 (g/m ²)
	매수 /in	성폭 (in)	바디폭 (in)	본수	본통	Denier	Maker	밀도		Denier	Maker	밀도 실측		
								설계	실측					
R&D #5 샘플	10.9	214.1	216.5	4,668	2	4,500 (연사)	Hubis	21.8	21.8	6,000 (연사)	Hubis	2 X 9	538	-

특 이 사 항	<제작 조건>
	1. RPM : 220
	2. 개구각도 : 45°, 경사 폐구각도 : 305°
	3. 경사장력 : 400 kg (2-in-beam 사용)
	4. 변부 : 폭 7.5 cm, 평직으로 제작
	5. 통경순서 : 순방향
6. 특이사항 : -	



인장강도 (kN/m)		인장변형률 (%)	
경사(MD)	위사(CD)	경사(MD)	위사(CD)
궤뿔림강도 (kN)		수직투수성 (L/min/m ²)	
유효구멍크기 (mm)		두께 (mm)	

[그림 2-75] 2차 원단설계도 샘플 #5

對外秘 Confidential		제작부장		R&D		공장장																																																																																																																																				
샘플제작설계도(Sample Weaving Design) #6																																																																																																																																										
규격/조직	바 디			경 사				위 사			폭 (cm)	질량 (g/m ²)																																																																																																																														
	매수 /in	성폭 (in)	바디폭 (in)	본수	본통	Denier	Maker	밀도		Denier			Maker																																																																																																																													
R&D #6 샘플	10.9	214.1	216.5	4,668	2	4,500 (연사)	Hubis	설계 21.8	실측 21.8	6,000 (연사)	Hubis	2 X 9	538	-																																																																																																																												
특 이 사 항	<제작 조건> 1. RPM : 220 2. 개구각도 : 45°, 경사 폐구각도 : 305° 3. 경사장력 : 400 kg (2-in-beam 사용) 4. 변부 : 폭 7.5 cm, 평직으로 제직 5. 통경순서 : 순방향 6. 특이사항 : -																																																																																																																																									
경사		<table border="1"> <tr> <th>변부</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>6</th> <th>7</th> <th>8</th> <th>9</th> </tr> <tr> <th>↓</th> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>9</th> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>8</th> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>7</th> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>6</th> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>5</th> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>4</th> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>3</th> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>2</th> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> <tr> <th>위사 → 1</th> <td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>									변부	1	2	3	4	5	6	7	8	9	↓										9										8										7										6										5										4										3										2										위사 → 1										<table border="1"> <tr> <th colspan="2">인장강도 (kN/m)</th> <th colspan="2">인장변형률 (%)</th> </tr> <tr> <td>경사(MD)</td> <td>위사(CD)</td> <td>경사(MD)</td> <td>위사(CD)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">꺾림강도 (kN)</td> <td colspan="2">수직투수성 (L/min/m²)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">유효구멍크기 (mm)</td> <td colspan="2">두께 (mm)</td> </tr> </table>		인장강도 (kN/m)		인장변형률 (%)		경사(MD)	위사(CD)	경사(MD)	위사(CD)	꺾림강도 (kN)		수직투수성 (L/min/m ²)		유효구멍크기 (mm)		두께 (mm)	
변부	1	2	3	4	5	6	7	8	9																																																																																																																																	
↓																																																																																																																																										
9																																																																																																																																										
8																																																																																																																																										
7																																																																																																																																										
6																																																																																																																																										
5																																																																																																																																										
4																																																																																																																																										
3																																																																																																																																										
2																																																																																																																																										
위사 → 1																																																																																																																																										
인장강도 (kN/m)		인장변형률 (%)																																																																																																																																								
경사(MD)	위사(CD)	경사(MD)	위사(CD)																																																																																																																																							
꺾림강도 (kN)		수직투수성 (L/min/m ²)																																																																																																																																								
유효구멍크기 (mm)		두께 (mm)																																																																																																																																								
		 대 윤 지 오 텍																																																																																																																																								

[그림 2-76] 2차 원단설계도 샘플 #6

가. 2차 원단 물성 평가

1차 원단물성 평가와 동일하게 물리적 평가와 수리적 평가를 진행하였다.

인장강도 및 신율의 경우, UV 저항성의 향상을 위해 인장강도를 높게 설계했기 때문에 원단의 인장강도는 6중 샘플 모두 200kN/m를 크게 상회하는 물성을 보유한다. 1차 설계와 마찬가지로 평직으로 설계한 샘플의 경우 변형직이나 능직에 비해 신율이 상대적으로 큰값을 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 이는 위사 두께로 인한 경사방향 굴곡이 다른 조직에 비해 평직이 크기 때문일 것으로 추정된다.

붕합강도의 경우 2차 샘플의 설계 원단 인장강도가 1차 샘플보다 50% 상향되었기 때문에 6중의 모든 샘플의 붕합강도 물성이 목표물성을 크게 상회한다.

PET 원단의 UV 저항성은 일반적으로 50% 내외이며 UV 저항성을 높이기 위해 후처리 공정을 추가한 PP 원단 대비 현저히 낮다. 하지만 원단의 설계 강도를 높여 UV 저항성 비율이 낮다고 하더라도 잔류 강도는 PP원단의 잔류강도 대비 높은 수준으로 원단 생산이 가능하다. 위사방향의 잔류강도가 개발목표물성에 못미치는 #5, #6 샘플을 제외한 나머지 샘플을 충분한 UV 저항성을 확보했다고 판단된다.

수리적 특성은 200kN/m 샘플과 마찬가지로 평직으로 설계한 #1, #4 샘플의 경우 상대적으로 투수성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있었으며, #1, #4 샘플을 제외한 나머지 샘플의 투수성능은 목표 물성을 상회하나, #6 샘플의 경우 유효구멍 크기가 목표물성범위를 벗어나 부적합한 것으로 판단된다.

변형직과 능직의 경우 위사 데니어가 상향 조정되었음에도 불구하고 전반적으로 투수성능 개선이 확인된다. 이는 위사 두께가 굴곡을 크게 만들어 유효 구멍 크기에 영향을 주기 때문

인 것으로 추측 가능하다.

종합적으로 평하였을 때 #2, #3 샘플의 원단설계가 수리적 특성과 물리적 특성이 지오텍 스타일 튜브 원단에 적합할 것으로 판단된다. 그중 #3 샘플이 적정 유효구멍크기와 월등히 우수한 투수계수를 보유하고 있어 최종 개발 원단은 #3 샘플로 선정한다.

[표 2-31] 2차 설계 별 시험결과

구분	시험 방법	단위	개발 목표물성	샘플 #1 평지	샘플 #2 능지	샘플 #3 변형지	샘플 #4 평지	샘플 #5 능지	샘플 #6 변형지	비고
----	-------	----	---------	----------	----------	-----------	----------	----------	-----------	----

1. 물리적 특성

인장강도 (MD)	ASTM D4595	kN/m	≥	200	309.48	332.15	327.92	309.21	330.08	316.28	
인장강도 (CD)	ASTM D4595	kN/m	≥	200	332.24	333.15	324.47	319.07	311.86	312.36	
인장신율 (MD)	ASTM D4595	%	≤	15	18.9	11.1	12.5	16.0	10.6	10.9	
인장신율 (CD)	ASTM D4595	%	≤	15	10.4	13.2	13.0	11.5	14.2	16.3	
봉합강도	ASTM D4884	kN/m	≥	100	159.61	153.14	157.66	147.17	122.41	117.78	
UV 저항성 (MD)	ASTM D4355	%	≥	85 (149kN/m)	71.6 (221.6 kN/m)	59.1 (196.3 kN/m)	63.2 (207.2 kN/m)	73.8 (228.2 kN/m)	67.9 (224.1 kN/m)	65.6 (207.5 kN/m)	
UV 저항성 (CD)	ASTM D4355	%	≥	85 (149kN/m)	50 (166.1 kN/m)	49.3 (164.2 kN/m)	52.8 (171.3 kN/m)	55.4 (176.8 kN/m)	47.6 (148.4 kN/m)	45.7 (142.7 kN/m)	

2. 수리적 특성

유효구멍 크기	ASTM D4751	mm	≤	0.6	0.04	0.345	0.488	0.04	0.497	0.6 이상	
투수 성능	ASTM D4491	l/m ² /min	≥	815	107.6	1562.1	3054.3	148.9	1768.2	3384.0	

2.6.6 지오텍스타일 튜브 원단물성 개선 효과분석

개발된 PET 지오텍스타일 튜브와 기존 PP 지오텍스타일 튜브의 물성, 경제적 차이점을 요약하면 아래의 표와 같다.

[표 2-32] 개발된 지오텍스타일 튜브와 기존 지오텍스타일 튜브의 차이점 요약

항 목		기존 PP 지오텍스타일 튜브	개발 PET 지오텍스타일 튜브
물 성	인장강도	·원재료의 강도 특성 및 제직 밀도의 한계로 최대 약 180kN/m 한계	·PP 원사 대비 약30% 정도 높은 강도 보유하고 있고 제직성이 우수해 최대 300kN/m 까지 생산 가능
	인장변형율	·원재료의 인장 변형율 특성으로 인해 약 20% 내외	·원재료의 인장 변형율 특성으로 인해 약 15% 내외
	투수성능	·납작하고 흠이 있는 원사를 사용하기 때문에 매우 우수한 투수성능 보유	·제직 설계 개발로 기존 원단의 한계를 넘어 PP 지오투류 원단과 동등한 투수성능 발휘
	UV저항성	·원재료에 UV첨가제 투입이 용이하며, 약90% 저항성보유	·생산공정상 UV첨가제 투입이 어려우며, 약 50%의 저항성을 보유. 인장강도 증대로 낮은 UV저항성 극복
	장기강도	·높은 변형율로 인해 Creep 시험에 부적합하여 장기물성 산정이 어려움	·기존 PET 직물지오텍스타일의 장기물성 산정을 위한 감소계수값을 이미 확보하고 있어 장기물성 산정 가능
	종합평가	·기존 PP 지오투류가 우수한 투수성능과 UV저항성을 보유하고 있으나, 이는 PET multifilament 지오투류의 강도 개선과 조직설계 개발로 극복가능하다. 또 PET 원재료의 강도 및 변형율 특성이 PP 대비 상대적으로 우수해 구조물의 안정성 증대가 가능하고 영구구조물에 제품을 적용할 경우 강도 감소 예측이 가능하여 구조물 설계의 신뢰도를 높일 수 있다.	
경 제 성	원재료 단가	·kg 당 단가가 PET multifilament 대비 약 40% 정도 고가	·상대적으로 저렴
	제품단가	·원재료 및 UV 처리 비용으로 인해 고가	·원사 투입을 늘려 높은 강도로 생산 하더라도 PP 대비 상대적으로 경쟁력 있는 단가로 생산 가능
	종합평가	·구조물의 안정성을 향상시키면서 경제성 확보 가능	

현재 원사 가격은 공장입고를 기준으로 UV 처리가 된 PP 스피릿사의 경우 2,700원/kg 정도이며, PET multifilament 사의 경우 1,900원 정도이다. PET원사의 경우 생산 공정상 별도의 UV 처리가 어려워 원단강도를 높이는 방향으로 물성개선을 진행하였으며, 설계강도는 300kN/m로 UV 처리가 된 PP 스피릿사 보다 50%이상 인장강도가 크다.

PET 원단의 설계 인장강도가 PP제품 대비 50% 이상 높지만 PET 원재료의 인장강도 물성이 PP 대비 우수하기 때문에 원사 투입량은 약 25% 정도 증가할 것으로 예상된다.

증가하는 원사투입량을 고려하더라도 PP 제품의 원사 단가가 PET 원사 단가 대비 약 50% 정도 높기 때문에 최종적으로 투입되는 원사비용은 PP 대비 PET 가 약 13% 정도 저렴할 것으로 예상하며, 생산효율이 동일하다는 가정 하에 최종 제품은 PET 제품이 PP 제품 대비 약 5~6% 정도 저렴할 것으로 예상된다.

[표 2-33] 원사 소요량 비교

구 분	원사강도(cN/dtex)	설계강도(kN/m)	원사소요량(dtex/m)	비고
기존 PP 스플릿사	6.0	180	30,000,000	
PET multifilament 사	8.0	300	37,500,000	원사 소요량 약 25% 증가

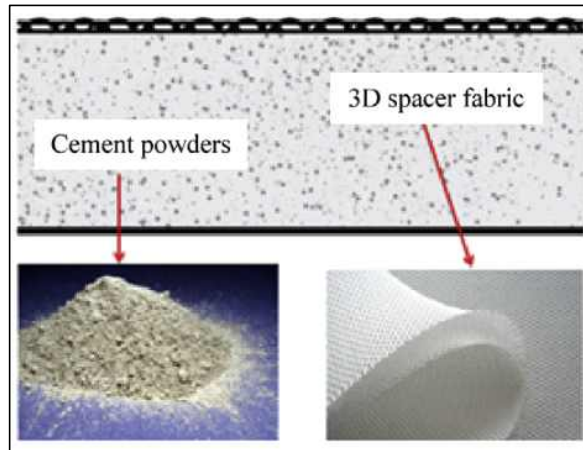
원사의 물성 개선을 통해서 제품에 적용시 구조물 안정성 확보를 할 수 있을 것으로 판단된다. PP 스플릿사는 원사의 형태가 넓고 납작한 형태로 제작시 투입할 수 있는 원사 밀도의 한계 때문에 양산 가능한 최대 인장강도의 범위가 180kN/m 이내로 제한적이다.

기존 PP 제품과 동등 이상의 투수성을 가지며 원단의 인장강도가 크게 향상된 제품 적용 시 기존 PP 제품과 동등한 시공성으로 구조물 안정성을 높일 수 있으며, 대형 구조물 적용이 가능해 지오텍스타일 튜브의 적용성을 확대할 수 있을 것으로 예상되며, 현재 시장에 적용되는 PP 제품 대비 인장강도가 크게 향상된 제품은 설계 반영을 통해 타사 제품에 대한 진입장벽을 만들 수 있고 이를 통해 시장점유율 확대 도모가 가능하다.

2.7 지반신소재 마찰력 증대를 위한 결합재 개발

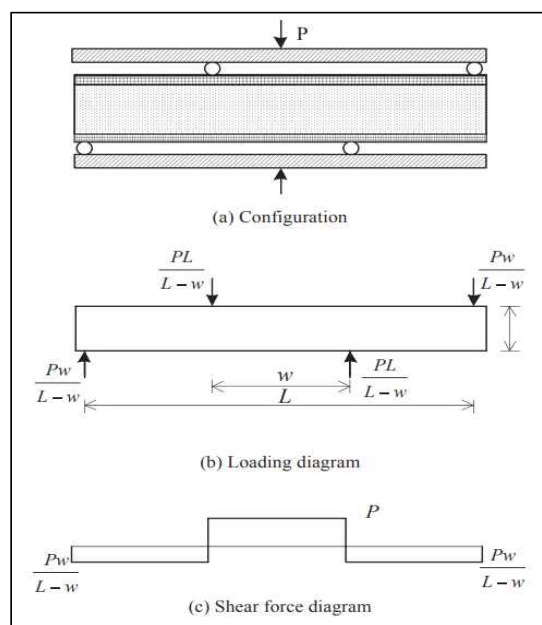
2.7.1 선행연구

Application design of concrete canvas (CC) in soil reinforced structure(2016)연구에서는 콘크리트 캔버스(CC)는 수화반응을 이용하여 얇고 내구성 있는 방수와 내화 콘크리트 층을 형성하는 유연한 시멘트 분말 함침 직물로 경사보호에 사용되어 왔으며, 기존 콘크리트 활용 공법에 비해, CC는 설치 속도가 빠르고 간편하며 비용 효율이 높은 제품이다. 환경영향 감소, 공사기간 단축, 인건비 절감 등의 장점이 있으므로 옹벽 구조물에 널리 응용될 가능성이 있다.



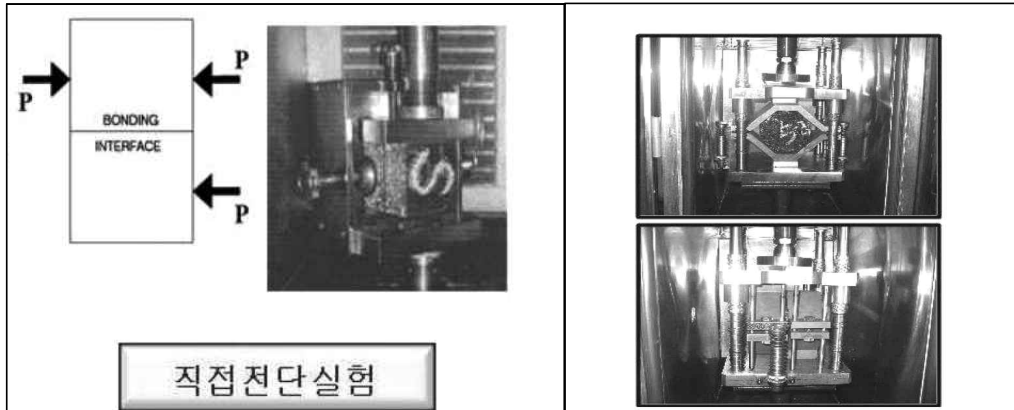
[그림 2-77] Concrete Canvas (CC)

철근 콘크리트 보의 전단거동을 시험하기 위해 개발되었으며, 휨모멘트가 0인 빔의 중심에는 순수 전단 상태가 존재한다. 순수 전단 상태 조건은 엔지니어가 재료의 전단특성을 보다 정확하게 파악할 수 있다. 두 개의 원통형 롤러가 시료를 지지하며, 수직하중은 하중 빔에 의해 시료 상단에 가해 Ohno-shear test를 실시하였다.



[그림 2-78] Ohno-shear test

직접전단실험을 통한 배수성포장용 텍코트 특성 평가 (2009)연구에서는 아스팔트 층간의 접착 강도를 측정하는 실험법과 평가 방법을 개발하고 배수성 포장에 사용되는 다양한 텍코트 재료의 특성과 적정 살포량을 평가 분석하였으며, 텍코트와 포장의 종류 및 현장 상황에 따라 적정 살포량이 다르다.



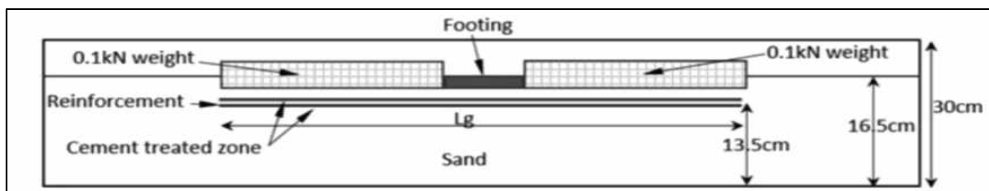
[그림 2-79] 아스팔트 층간의 접착 강도를 측정하기 위한 직접전단시험기

Laboratory and numerical modeling of strip footing on geotextile-reinforced sand with cement-treated interface (2018)연구에서는 지오텍스타일 보강 모래위에 건설된 기초의 지지력에 지오텍스타일과 모래의 접합부에서 시멘트 처리효과가 미치는 영향에 대한 실험을 실시하였다.



[그림 2-80] 모래 및 시멘트로 처리된 Geotextile 층면

다양한 길이의 단층 보강재를 사용하여 보강된 90cm×25cm×30cm 모래 박스에 25cm×7.5cm 기초판의 지지력을 평가하였으며, 지오텍스타일에 시멘트 처리영역을 조성하여 접합부의 마찰과 접착력을 향상되었다.



[그림 2-81] 모래 및 시멘트가 혼합된 이중 Geotextile에 의한 얇은 기초 보강효과 실험

2.7.2 시멘트계 결합재

시멘트계 결합재의 경우 Cement, 규사, 물 등의 비율에 따라 응결시간이 차이가 난다. 시멘트계 결합재의 대표적으로 모르타르 배합을 들 수 있으며 급속응결 모르타르 배합표와 사용된 제원은 다음과 같다.

[표 2-34] 급속응결 모르타르 배합표 (예시)

재료	10L 기준	비고
W/B	43.4	
시멘트 (kg)	3.8	
물 (kg)	1.65	
규사 (kg)	17.4	

[표 2-35] Cement 제원

시험항목	시험결과	시험, 검사 기준치	비고
유하시간 (초)	58	60 이내	
플로 (mm)	300이상	225 이상	
응결시간 (시간:분)	초결	1 이상	
	종결	10 이내	
블리딩률(%)	0.00	0.5 이하	
팽창높이 (%)	1일	0.4 이내	
	3일		
	7일		
	28일		
압축강도 (N/mm ²)	1일	7.0 이상	
	3일	18.0 이상	
	7일	24.0 이상	
	28일	35.0 이상	
염화물량 (Kg/m ³)	0.089	0.3 이하	

[표 2-36] 규사 제원

종류	성분	크기(mm)	mesh	비중	비고
6호사	SiO ₂ (99.8%), Fe ₂ O ₃ (0.12%)	0.25-0.7	30-60	2.65-2.66	

시멘트계 결합재의 응결시간을 도출하기 위해 비카트 침 실험 실시하였다. 실험 방법은 먼저 시료에 표준주도를 얻을 적당한 물을 혼합한 후 원추형 링에 넣는다. 두 번째로 링을 판 위에 놓은후, 반죽 윗면과 플런저의 끝을 접촉시킨 후 가동지침을 0눈금에 맞춘다. 세 번째로 로드를 풀면 플런저가 반죽면에서 10±1mm점까지 내려가 멈출 때의 표준주도를 얻는다. 네 번째로 표준주도를 얻은 시험체는 응결시험때 까지 30분 동안 습기함에 보관한다. 다섯 번째로 플런저를 바꾸어 위로 가게하고, 밑에는 표준침을 위치한다. 여섯 번째로 습기함에서 꺼낸 시험체를 30분후부터 15분마다 침으로 25mm의 침입도를 얻을 때까지 시험을 계속한다. 마지막으로 이때까지의 시간을 초결시간이라고 하며, 완전히 침의 흔적이 나타나지 않을 때를 종결시간이라고 한다.

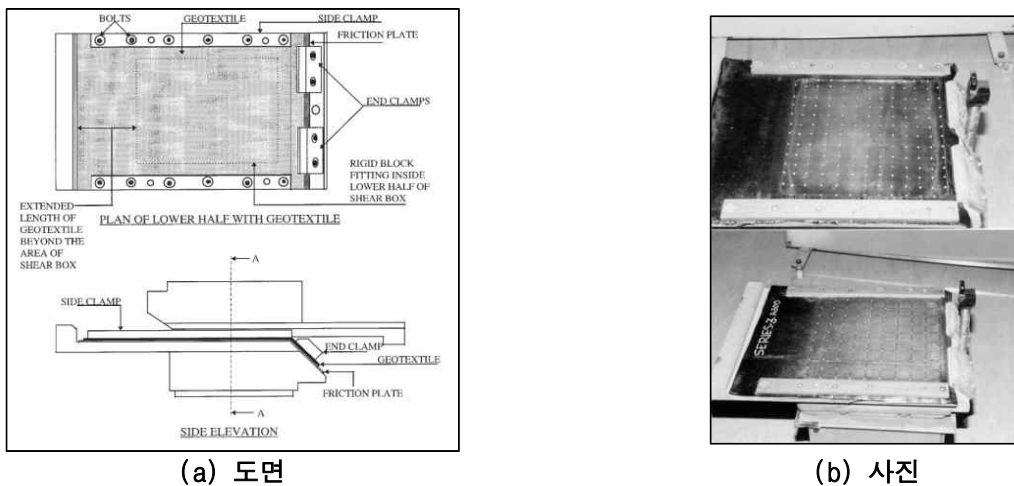


[그림 2-82] 비카트 침 실험

2.7.3 직접전단시험 시스템 설계

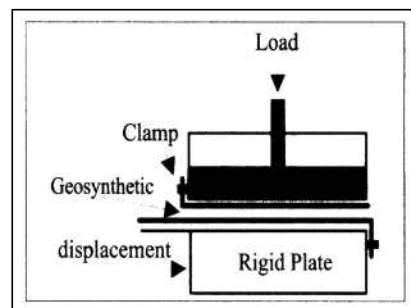
지오텍스타일 튜브의 강도측정을 위해서 직접전단시험을 하여야 하는데, 관련 선행연구를 통해서 본 연구에 맞는 직접전단시험 방법을 선택하여 설계하였다.

Soil-geotextile interface friction by direct shear tests (2000)의 선행연구에서는 상자 상/하부에 토양이 조성시 지오텍스타일의 처짐이 발생할 수 있으므로, 하부상자에는 강성체를 설치하였다. 일정한 면적의 전단강도 측정을 위해 하부 상자는 지오텍스타일면을 더 넓게 설치하였으며, 하부상자의 전단응력 반대 방향 끝단을 볼트를 이용하여 지오텍스타일을 고정하였다. 하부상자 지오텍스타일의 끝부분은 일정한 각도에서 고정하여 지오텍스타일의 왜곡을 방지한다.



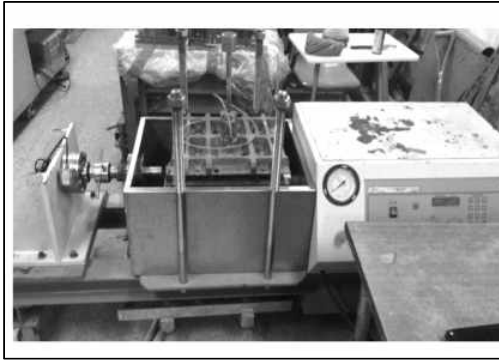
[그림 2-83] 직접전단시험기 도면 및 사진

토목섬유 차수재(GCL)와 지오펜브레인(GM)의 접촉 전단강도 평가 (2002)의 선행연구에서는 대형 직접전단 시험기를 사용하여 두 종류의 GCL과 지오펜브레인 사이의 접촉 강도를 평가하였으며, GCL 30cm×35cm, GM 30cm×45cm의 크기로 절단하여, 시편의 양 끝을 대형 직접전단시험기 상/하부 전단상자에 clamp로 고정 후 연직하중 재하하였다. 시험 중 접촉하는 전단면은 30cm×30cm로 일정하게 유지하였다.

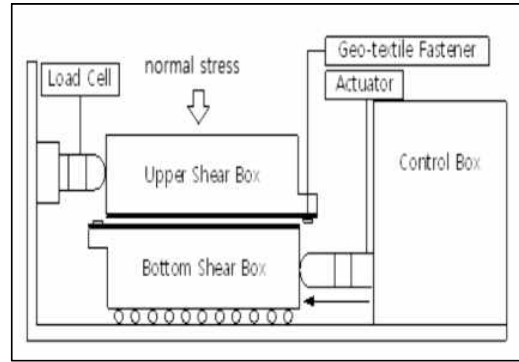


[그림 2-84] 시험기의 구조

HDPE 표면처리 지오펜브레인의 경계면 전단강도에 관한 연구 (2016)의 선행연구에서는 표면처리의 영향을 파악하기 위해 매끈한 지오펜브레인과 직포와의 경계면 전단강도를 측정하여 비교 및 분석하였다. 표면처리 지오펜브레인의 경계면 전단강도는 매끈한 지오펜브레인에 비해 2배까지 커졌으며, 수직응력 크기나 수침조건보다는, 표면처리 여부에 의해 더 큰 영향을 받았다.



(a) 사진

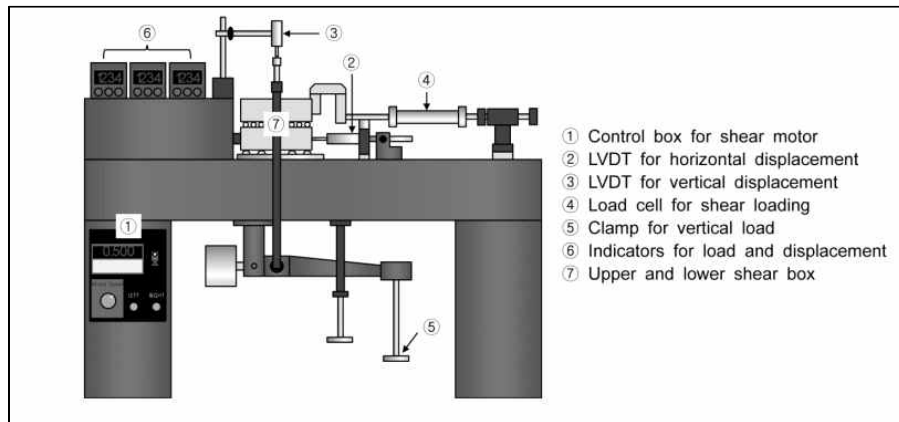


(b) 모식도

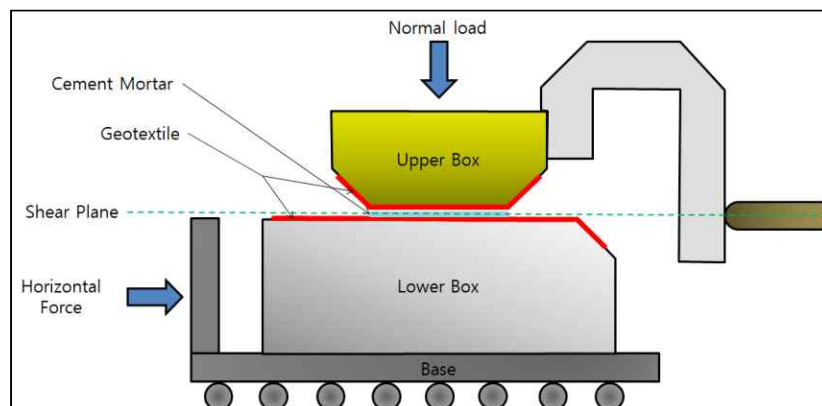
[그림 2-85] 대형직접전단시험기 사진 및 모식도

본 연구에서는 아래와 같이 직접전단시험기를 이용하였으며, 직접전단상자를 실험조건에 맞도록 설계하였으며 지오텍스타일과 결합용 cement mortar의 전단강도를 측정하기 위해 설계하였다.

일정한 면적의 지오텍스타일의 면적을 측정하기 위해 하부상자를 더 넓게 설계하였으며, 지오텍스타일의 고정 및 왜곡을 방지하기 위해서 일정한 경사에서 볼트로 고정하였다.



[그림 2-86] 본 연구과제에 사용된 직접전단시험기



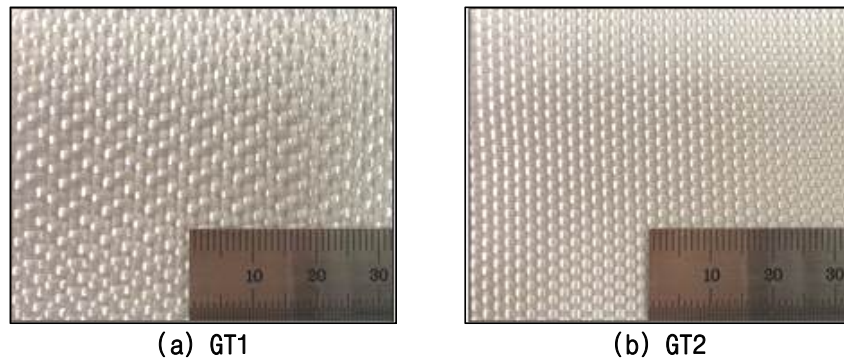
[그림 2-87] 경계면 조건을 고려한 직접전단상자 개념도

2.7.4 결합재 개발을 위한 사전 실험

지오텍스타일은 폴리에스테르로 제조된 직포 형태의 지오텍스타일을 이용하여 한 쌍의 지오텍스타일 접촉면 사이에 시멘트계 결합재의 적용 여부에 따른 마찰특성을 조사한다.

두 종류의 지오텍스타일 GT1과 GT2의 인장강도는 경사 방향(Machine Direction, MD)에서 각각 208kN/m와 201kN/m로 나타났으며, 위사 방향(Cross Machine Direction, CMD)의 인장강도는 GT1에서 252kN/m, GT2에서 230kN/m로 나타났다.

신율은 경사 방향에서 GT1, GT2가 각각 9.3%, 16.9%로 나타났으며, 위사 방향에서는 두 종류의 지오텍스타일에서 모두 약 11%로 유사하게 나타나며, GT1과 GT2의 유효구멍크기는 각각 219 μm 및 73 μm 로 나타났다.



[그림 2-88] 지오텍스타일 사진

[표 2-37] 지오텍스타일 특성

항목		GT1	GT2	비고
인장강도 [kN/m]	MD	208	201	
	CMD	252	230	
신율 [%]	MD	9.3	16.9	
	CMD	11.2	11.4	
유효구멍크기 [μm]		219	73	

시멘트계 결합재를 조성하기 위하여, 1종 보통 포틀랜드 시멘트 및 CSA 팽창재, 그리고 플라이애쉬를 사용하였으며, 모래는 0.25~0.8mm 사이의 표준사 및 0.075~0.25mm 입경의 규사를 사용하였다. 초기경화를 촉진하기 위하여, 알카리프리 액상 급결제를 사용하였다.

[표 2-38] 시멘트 특성

항목		결과값
분말도	비표면적 [cm^2/g]	3,630
	오토클레이브 팽창도 [%]	0.06
안정도	르샤틀리에 [mm]	0.5
	응결시간 [min]	285
압축강도 [MPa]	초결	330
	재령 3일	34.5
	재령 7일	46.5
	재령 28일	58.8

[표 2-39] CSA 팽창재 특성

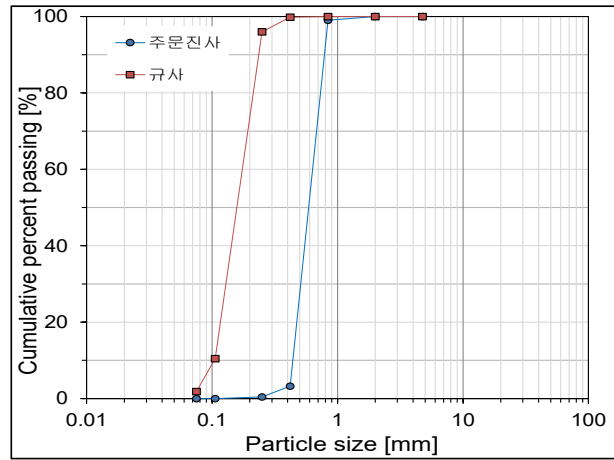
항목		결과값
비중		2.88
비표면적 [cm^2/g]		4,412
1.2 mm체 잔유율 [%]		0.3
응결시간[min]	초결	16.2
	중결	360
압축강도[MPa]	재령 3일	16.2
	재령 7일	26.7
	재령 28일	37.0
길이변화율[%]	재령 7일	0.033
	재령 28일	-0.002
	강열감량 [%]	2.7
산화마그네슘 [%]		2.8

[표 2-40] 플라이애쉬 특성

항목	결과값
밀도 [g/cm^3]	2.3
비표면적 [cm^2/g]	3,790
이산화규소 [%]	66.52
산화알루미늄 [%]	17.82
산화철 [%]	6.33
산화칼슘 [%]	3.47
삼산화황 [%]	0.00
산화마그네슘 [%]	0.00
산화칼륨 [%]	0.47
바나듐산화물 [%]	2.11

[표 2-41] 급결제 특성

항목	결과값
비중 [g/ml]	1.42 ± 0.14
pH	3 ± 1
Na ₂ O EQV [%]	1.0



[그림 2-89] 모래의 입도분포곡선

사전실험에 대표적인 3개의 배합비를 사용하였으며, 시멘트와 CSA 팽창재, 플라이애쉬, 모래, 실트를 각 배합에 맞게 건배합을 한 후 물을 첨가하여 혼합한다. 30초 정도 혼합된 시료에 급결제를 첨가한 후 1분 30초 정도 배합한다.

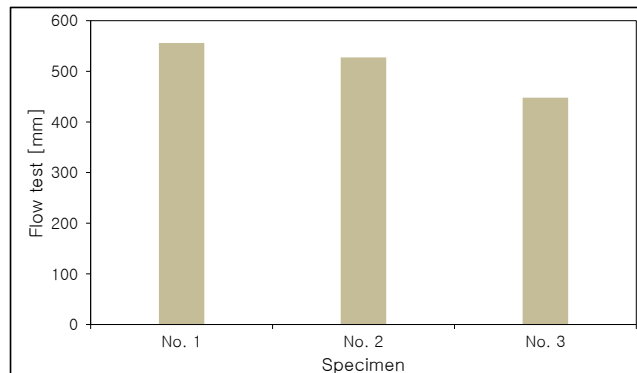
[표 2-42] 사전 실험에서 사용된 시멘트계 결합재의 배합비

시료	Cement [%]	CSA [%]	Fly ash [%]	Sand [%]	Accelerator [%]	Water [%]	비고
No.1	10.8	2.7	5.3	45.1	2.3	33.8	
No.2	11.2	2.8	5.5	46.9	2.3	31.3	
No.3	11.7	3.0	5.7	48.7	3	28.5	

시료의 특성을 파악하기 위해서 시료의 유동성 및 경화특성, 그리고 강도특성을 평가하기 위해, 플로우시험, 응결시간시험, 일축압축시험을 실시하였다.

가. 플로우시험

플로우시험은 ASTM D6103에 제시된 방법을 준용하였으며, No.1~3시료의 평균 플로우 시험 결과는 각각 556 mm, 528 mm, 448 mm로 나타났다.



[그림 2-90] 플로우 시험 결과

나. 응결시간시험

초기경화특성을 파악하기 위하여, ASTM C191에 따라 응결시간시험을 수행하였다.

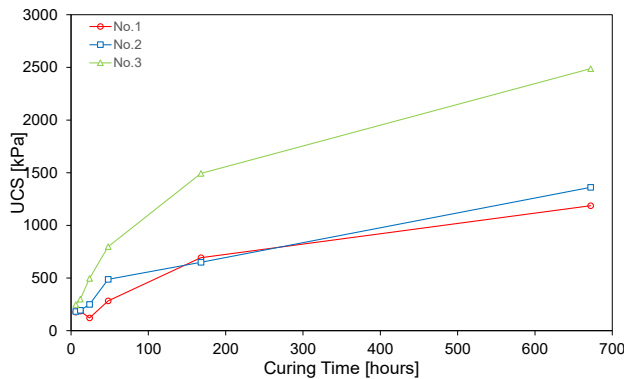
[표 2-43] 응결시간시험 결과

시료	초결 [min]	종결 [min]	비고
No.1	185	1,200	
No.2	132	1,110	
No.3	78	950	

다. 일축압축시험

일축압축시험을 위하여 직경 50mm 및 높이 100mm인 시료를 24시간 습윤 양생시킨 후, 28일 동안 수중양생을 실시하였다.

전반적으로 양생시간의 경과에 따라, 일축압축강도는 증가하는 경향을 보이며, 3개의 시료에서 1일차 강도가 300kPa 미만으로 나타났으며, 28일 강도는 1MPa 이상으로 나타났다.



[그림 2-91] 양생일에 따른 일축압축강도 변화

실험결과, 사전 실험의 시료는 양호한 유동성을 보이고 있으나, 전반적으로 경화시간이 길게 소요되며, 조기 강도 발현이 늦게 이루어짐에 따라 지오텍스타일 튜브의 결합재로 활용되기에 적합하지 않다고 판단되어, 다른 재료와 배합비를 추가로 시도할 필요가 있다.

2.7.5 시멘트계 결합재 개발

사전 실험을 결과를 통해 시멘트계 결합재를 조성하기 위하여, 초속경 시멘트 및 플라이애쉬를 사용하였다. 모래는 규사 6호사 및 8호사를 각각 2.67대 1의 무게비로 혼합하여 이용하였으며, 초기경화를 촉진하기 위하여, 알카리프리 액상 급결제를 사용하였다.

[표 2-46] 플라이애쉬(2종) 특성

항목		결과값
밀도 [g/cm ³]		2.20
분말도	비표면적 [cm ² /g]	3.850
	45 μm체 체잔분[%]	17.8
플로값 비 [%]		101
안정도	르샤트리에 [mm]	0.1
강열 감량 [%]		1.8
수분 [%]		0.2
이산화규소 [%]		62.9
삼산화황 [%]		0.1
총 산화칼슘 [%]		2.1
유리 산화칼슘 [%]		0.3
반응성 산화칼슘 [%]		2.1 이하
산화 마그네슘 [%]		0.8
총 인산염 [%]		0.3
수용성 인산염 [mg/kg]		27
염화물 [%]		0.01
총 알칼리 [%]		0.3

[표 2-44] 시멘트 특성

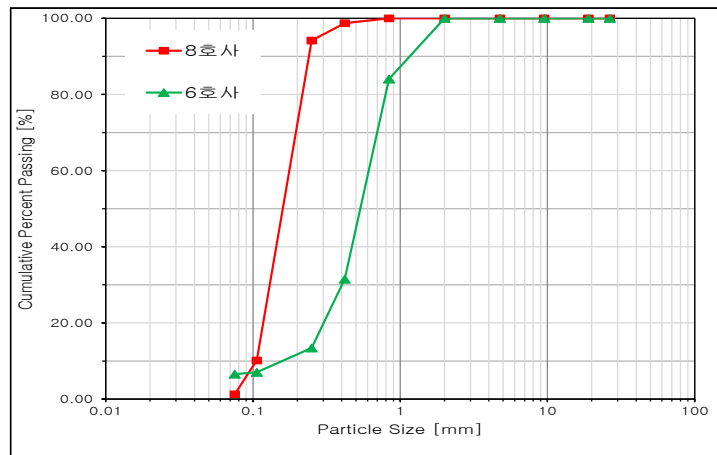
항목		결과값
플로우 시험 [mm]		225 이상
응결시간	초결	20분 이상
	종결	60분 이하
압축강도 [MPa]	재령 3hr	30 이상
	재령 6hr	40 이상
	재령 1일	45 이상
	재령 3일	50 이상
	재령 7일	55 이상
	재령 28일	60 이상
팽창율이[%]	재령 28일	0.0 ~ 0.4
블리딩율 [%]		0.5이하
염화물 [Kg/m ³]		0.3이하

[표 2-45] 모래 특성

항목	시험결과	
	규사 6호사	규사 8호사
D10	0.17	0.11
D30	0.40	0.14
D50	0.53	0.17
D60	0.61	0.18
CU	3.70	1.68
CC	1.58	0.95

[표 2-47] 급결제 특성

항목	시험결과
비중 [g/ml]	1.42 ± 0.14
pH	3 ± 1
Na ₂ O EQV [%]	1.0



[그림 2-92] 규사 6호사 및 8호사의 입도분포곡선 비교

재료 배합은 초속경 시멘트 16.4%와 플라이애쉬 12.3%, 2종류의 모래 45.2%를 건배합을 실시하고, 건배합된 시료에 물 25.1%를 첨가하여 혼합한다. 30초 정도 혼합한 시료에 급결제 0.986%를 첨가한 후, 약 1분 30초간 배합한다.

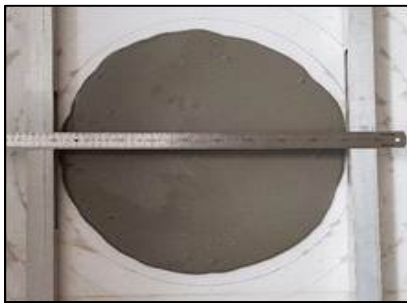
[표 2-48] 최종 선정된 시멘트계 결합재 배합비

Cement [%]	Fly ash [%]	Sand [%]	Accelerator [%]	Water [%]	비고
16.4	12.3	45.2	0.986	25.1	

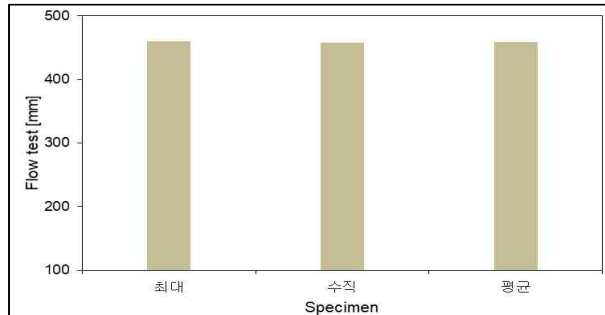
개발된 시멘트계 결합재의 유동성 및 경화특성, 그리고 강도 특성을 평가하기 위해, 플로우시험, 응결시간시험, 일축압축시험을 실시하였다.

가. 플로우시험

플로우시험은 ASTM D6103에 제시된 방법을 준용하였으며, 퍼진 시료의 최대 직경 및 수직방향의 직경을 측정하여 평균값을 산정하였다. 시험 결과, 플로우값은 459mm로 나타났다.



(a) 시험 사진

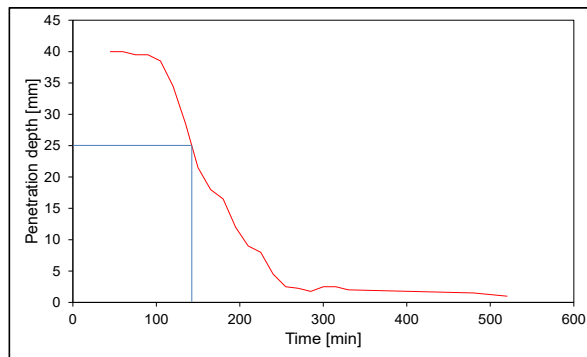


(b) 플로우 값

[그림 2-93] 플로우시험

나. 응결시간시험

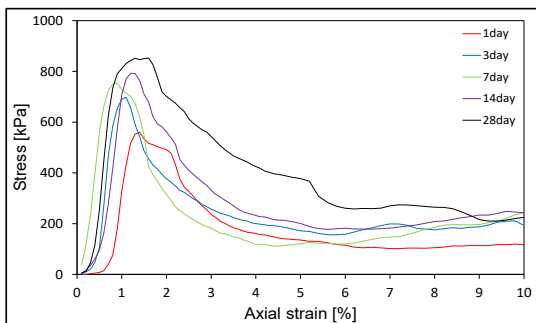
결합재의 초기 경화특성을 파악하기 위하여, ASTM C191에 따라 응결시간시험을 수행하였으며, 초결시간 및 종결시간은 각각 142분 및 520분으로 나타났다.



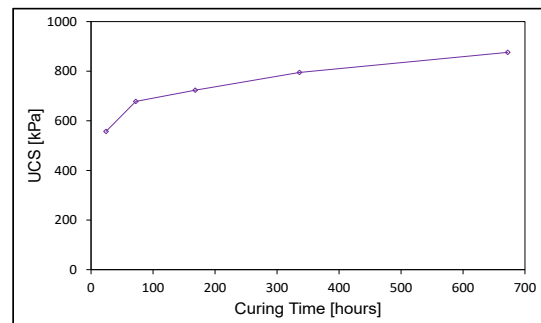
[그림 2-94] 응결시험 결과

다. 일축압축시험

양생 1일 및 28일의 일축압축강도는 각각 557kPa 및 876kPa로 나타났다.



(a) 응력-변형률 선도



(b) 양생일에 따른 일축압축강도

[그림 2-95] 일축압축시험 결과

실험결과, 최종 선정된 배합비로 조성된 시멘트계 결합재의 경우, 사전 실험의 시료보다 초기경화가 빠르게 진행되고, 초기 강도가 상당히 향상된 것을 알 수 있었다. 따라서, 가물막이 체체로 적용되는 지오텍스타일 튜브의 결합재로써 적합하다고 판단한다.

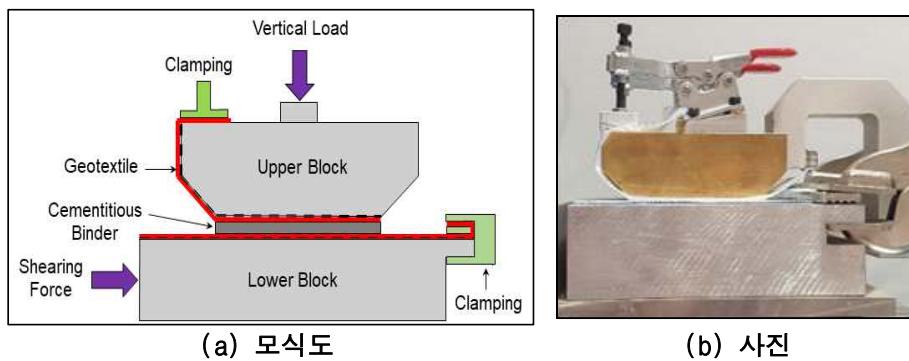
2.7.6 직접전단시험 실험

두 면의 지오텍스타일로 구성된 Geosynthetic Clay Liner (GCL)의 경계면 마찰특성 평가 시 활용되는 Standard Test Method for Determining the Internal and Interface Shear Strength of Geosynthetic Clay Liner by the Direct Shear Method (ASTM D6243)를 준수하기 위해 직접전단 실험기를 요구조건에 맞추어 수정하여 제작하였다.

두 면의 지오텍스타일 사이의 시멘트계 결합재가 결합된 시료의 마찰특성을 평가하기 위해 수정된 직접전단실험기를 이용하여 직접전단실험을 수행하였다.

상부상자와 하부상자는 수직응력의 재하로 인한 변형을 최소화하기 위해 강성이 큰 황동과 알루미늄으로 제작하였으며, 직접전단실험시 지오텍스타일을 고정하기 위하여 윗면의 지오텍스타일과 아랫면의 지오텍스타일은 각각 상부상자와 하부상자의 클램프를 이용하여 고정하였다.

지오텍스타일과 전단상자가 분리되지 않고 일체로 거동하기 위하여, 상부상자와 하부상자의 접촉면에 폭 1.0mm 깊이 0.5mm의 요철을 설계하였다.



[그림 2-96] 수정된 직접전단상자

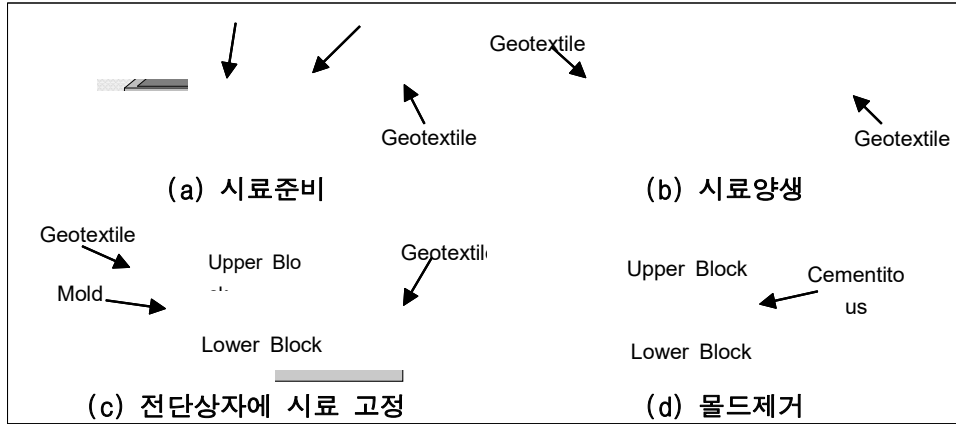
일정한 크기로 절단된 두 개의 지오텍스타일 사이에 시멘트계 결합재를 양생하기 위하여, 두께가 얇은 직사각형 형태의 분리된 몰드를 나사를 이용하여 연결한다. 조립한 몰드를 한 개의 지오텍스타일에 위치시킨 후 몰드의 내부에 시멘트계 결합재를 양생하여 가로, 세로 및 높이의 크기가 각각 100mm, 70mm, 4mm인 시료를 조성하였다.

조성된 결합재 위에 다른 한 개의 지오텍스타일을 덮음으로써, 두 개의 지오텍스타일 사이에 시멘트계 결합재가 밀착되도록 하였다. 두 개의 지오텍스타일과 부착된 시멘트계 결합재는 일정한 온도를 유지하며 1일부터 7일 사이의 계획된 기간 동안 수중에서 양생하였다.

양생한 시료를 하부상자의 중앙에 위치한 후, 아랫면 지오텍스타일의 한쪽 끝을 클램프를 이용하여 하부상자에 고정하였으며, 하부상자와 고정된 시료위에 상부상자를 시멘트계 결합재가 구성되어 있는 부분에 위치시킨 후, 윗면 지오텍스타일을 상부상자의 클램프를 이용하여 상부상자에 고정하였다. 시료의 손상을 줄이기 위해 적용된 몰드를 제거하였다.

직접전단실험기를 이용하여 각 시료에 32kPa, 60kPa, 116kPa의 수직응력을 재하 하였다. 수직변위가 일정한 값으로 수렴된 후, 전단속도를 1 mm/min으로 유지하며 전단실험을 시작하

였으며, 20 mm의 수평변위에 도달할 때까지 실험을 수행하였다.

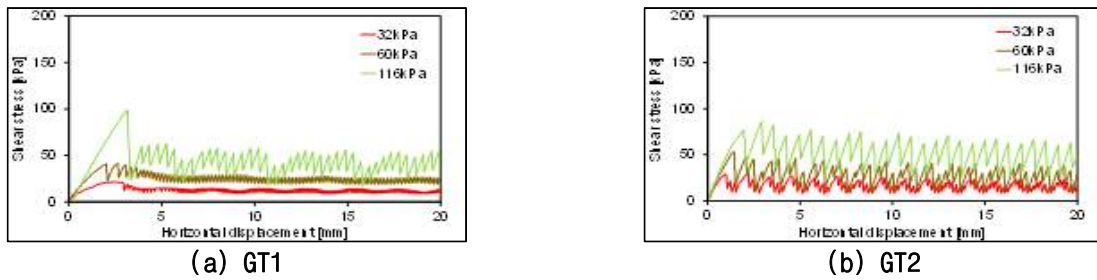


[그림 2-97] 시료준비 및 실험절차

가. 지오텍스타일 접촉면의 전단강도

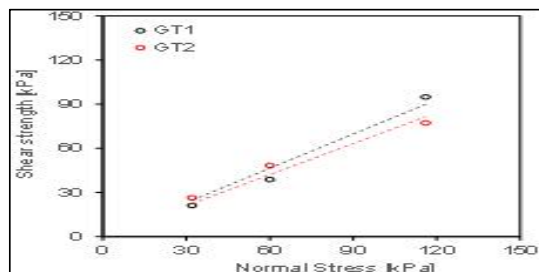
초기의 수평변위가 증가함에 따라 전단응력은 증가하는 것으로 나타났다. GT1의 경우, 전단응력은 수평변위가 증가함에 따라 침투상태에 도달한 후 대변형률에서 일정한 값으로 수렴하였다. 침투상태 이후, 전단응력의 감소는 수직응력이 증가할수록 크게 나타났다.

GT2의 경우, 초기의 전단응력 증가로 인한 침투상태가 상대적으로 뚜렷이 보이지 않고, 대변형률로 전개되면서 전단응력은 일정하게 유지되었다. 침투상태 이후, 가해진 수직응력의 크기에 따라 차이가 있으나, 두 종류의 지오텍스타일에서 모두 표면 거칠기의 영향을 받는 것으로 판단된다. 전체적으로 수직응력이 증가할수록 전단강도에 도달하는 수평변위는 증가하는 것으로 나타났다.



[그림 2-98] 지오텍스타일 접촉면 전단강도

수직응력과 전단강도의 관계는 원점을 지나는 직선의 형태로 나타났으며, 두 종류의 지오텍스타일에서 선형관계는 모두 0.99 이상의 상관계수를 보여진다. 두 직선의 기울기로부터, GT1 및 GT2의 마찰각은 각각 37.8° 및 35.1° 로 확인되었다.

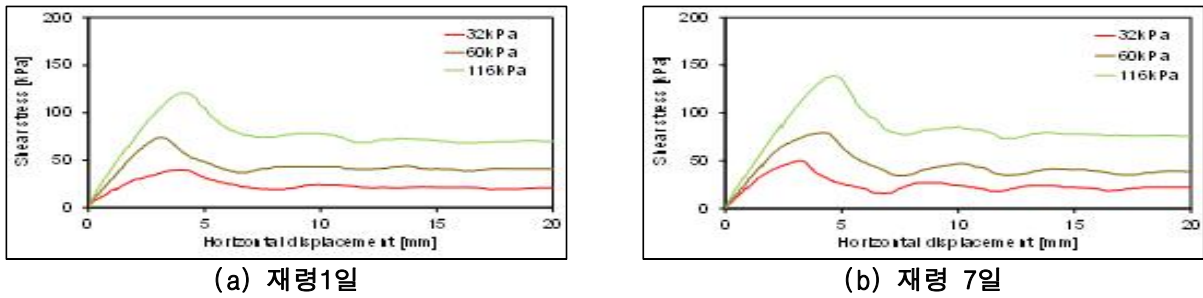


[그림 299] 두 개의 지오텍스타일의 전단응력-수직응력

나. 시멘트계 결합재가 적용된 지오텍스타일 접촉면의 전단강도

결합재가 미적용된 접촉면의 결과와 유사하게, 전단응력은 수평변위가 증가함에 따라 첨두 상태에 도달한 후 대변형률에서 일정한 값으로 수렴하였다. 지오텍스타일 사이에 시멘트계 결합재가 적용된 접촉면의 전단강도는 결합재가 적용되지 않았던 접촉면의 전단강도보다 상당히 증가하였다. 각 수직응력에서 전단강도에 도달하는 수평변위도 대체적으로 증가한다.

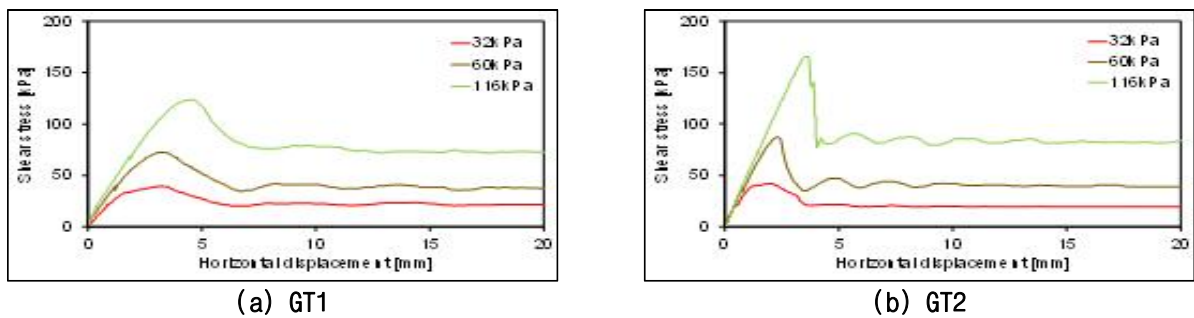
GT1의 경우 양생시간이 증가함에 따라 전단강도가 다소 증가하는 것을 알 수 있으나, 양생 시간에 따른 첨두상태의 수평변위의 변화는 일정한 양상을 보이지 않는다.



[그림 2-100] GT1에서 재령일에 따른 시료의 전단강도

시멘트계 결합재가 적용된 GT2의 접촉면에서 전단응력의 변화는 GT1의 접촉면에 비해 보다 뚜렷한 취성 파괴 양상을 나타냈다.

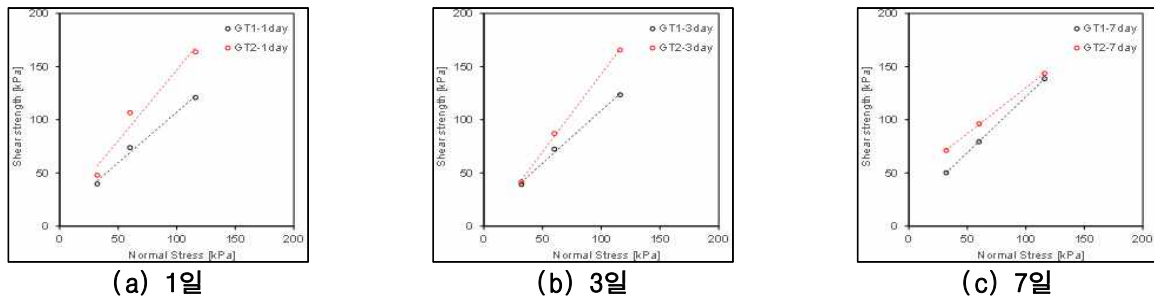
GT2의 접촉면에서 전단강도는 GT1의 접촉면보다 크게 나타났으며, 전단강도에 도달하는 수평변위는 GT1의 접촉면이 GT2의 접촉면보다 크게 나타났으며, 결합재가 미적용된 접촉면의 결과와 비교하면, 두 종류 지오텍스타일의 대변형률에서 수평변위에 따른 전단응력의 증감현상은 줄어든 것으로 나타났다.



[그림 2-101] 재령 3일 시료의 전단강도

양생후 7일까지 평가된 결과를 보면, 양생시간과 관계없이, 각 수직응력에 따른 전단 강도는 GT1의 접촉면보다 GT2의 접촉면에서 크게 나타났다. 결합재가 미적용된 접촉면의 결과와 유사하게, 두 종류의 지오텍스타일에서 수직응력에 따른 전단강도의 변화는 선형관계를 보여주었으며, 이때 상관계수는 모두 0.96 이상으로 나타났다.

시멘트계 결합재가 적용된 지오텍스타일 접촉면의 경우, 수직응력 및 전단강도의 관계에서 y절편이 도출되었으며, 이러한 수직응력과 전단강도의 강도관계를 Mohr-Coulomb 파괴 포락선을 이용하여 평가하면, 시멘트계 결합재가 적용된 접촉면의 경우, 대부분 겹보기 점착력이 발생한 것을 알 수 있다.



[그림 2-102] 시멘트계 결합재의 전단응력-수직응력

다. 지오텍스타일 접촉면의 마찰특성 비교

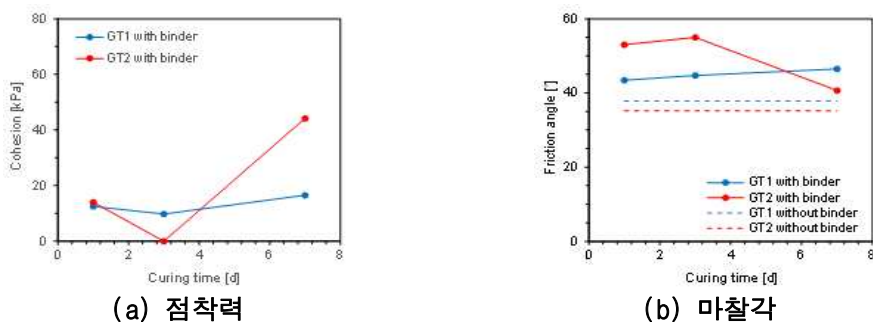
두 종류의 지오텍스타일에서 모두 시멘트계 결합재를 적용함에 따라 지오텍스타일 접촉면에서 겔보기 점착력이 발현되었으며, 마찰각도 증가하였다. 겔보기 점착력은 두 종류의 지오텍스타일에 서 양생시간에 따라 다소 변화되었으며, 양생 1일에 산정된 겔보기 점착력보다 양생 7일에 산정된 겔보기 점착력이 더 크게 나타났다.

GT1의 경우, 양생시간이 증가함에 따라 마찰각이 점진적으로 증가하였으며, GT2의 경우, 양생시간에 따른 증감이 일정치 않은 것으로 나타났으며, GT2의 양생후 7일에 산정된 마찰각이 크게 감소된 것을 알 수 있는데, 이는 선형의 상관관계 도출에 따라 y절편인 겔보기 점착력이 상대적으로 크게 산정되었기 때문인 것으로 판단된다.

비록 양생 7일에 GT2의 마찰각이 GT1보다 작게 산정되었을지라도, GT2의 전단강도는 주어진 수직응력에서 GT1의 전단강도보다 더 크게 나타났다. 선행연구의 결과로부터, GCL의 전단강도 및 GCL과 인접 토목섬유 간의 최대 마찰각은 8.4~37°의 범위를 보이며, 점착력은 0에 가까운 값으로 나타나고 있다. (전한용 등, 2014) 선행연구결과와 비교하면, 결합재를 적용한 접촉면의 전단강도는 크게 향상된 것을 알 수 있다.

[표 2-49] 지오텍스타일 접촉면의 마찰특성 비교

Curing time [day]	GT1		GT2	
	Cohesion [kPa]	Friction angle [°]	Cohesion [kPa]	Friction angle [°]
Without binder	0	37.8	0	35.1
1	12.5	43.4	14.0	53.0
3	9.8	44.7	0	55.0
7	16.5	46.4	44.1	40.7



[그림 2-103] 양생일자에 따른 강도특성 변화

본 연구에서 지오텍스타일 접촉면의 전단강도 향상을 위해 개발된 시멘트 결합재는 여러 층으로 지오텍스타일 튜브를 성토하는 가물막이 체체의 시공초기 안정성을 높이는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2.8 모형실험

2.8.1 토조 및 저류조 구축

1차년도에 도입된 모형실험 시스템을 토대로, 최종적인 단일 지오텍스타일 튜브의 채움 모형실험 시스템을 구축하였다.

이전 시스템의 동일한 펌프, 배합토조, 교반기, 아크릴 수조가 사용되었으며, 모형실험 중 발생된 장비의 문제점을 개선하였다.

지오텍스타일 튜브의 각 지점의 높이를 측정하기 위해 제작된 사각 프레임은 길이 80cm, 높이 4cm, 폭 4cm로써, 보다 많은 지점을 측정하기 위해 중앙부에 길이 25cm, 폭 3cm의 공간을 확보하였으며, 이전 시스템에서 사용된 역 Y-Type 주입모듈은 지오텍스타일 튜브 내에 끝단으로부터 중앙부에 이르는 순서로 주입되는 경향이 있어, 원형의 주입모듈로 대체하였다.



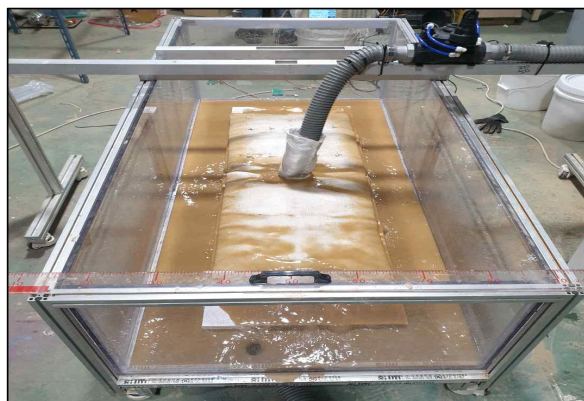
(a) 높이 측정용 프레임



(b) 주입모듈

[그림 2-104] 개선된 실험 부품

채움 단계별 지오텍스타일 튜브의 정확한 형상을 파악하기 위하여, 지오텍스타일 튜브와 주입구 모듈 사이에 고정부 없이 주입을 실시하였다.



[그림 2-105] 변경된 채움재 주입방식

실험순서는 먼저 교반장치를 사용하여 흙 50kg에 대하여 함수비 300%에 해당하는 물 150L 배합한다. 이후 교반기를 사용하여 흙 입자가 가라앉지 않도록 교반 실시한 후, 펌프를 작동시켜 지오텍스타일 튜브로 채움재 이송한다. 지오텍스타일 튜브 충전 후, 배수 과정의 순서로 반복 진행한다. 충전 및 배수 중에 지오텍스타일 튜브의 배수 시간 및 형상 측정을 실시하면서 진행되었다.

2.8.2 지오텍스타일 튜브의 수리 모형실험 시스템

수리 모형실험을 실시하는 경우 모형과 원형의 특성이 상사성을 갖추고 있어야 하며, 수리 모형실험은 실물과 상사비를 맞춘 모형에 실물과 같은 수리현상을 목적에 맞도록 구현하는 실험법을 사용하였다.

상사성에는 기하학적 상사성 (geometric similitude), 운동학적 상사성 (kinematic similitude), 동력학적 상사성 (dynamatic similitude)이 있다. 수리 모형실험의 목적 및 대상 영역의 수리적 특성, 실험조건을 고려하여 모형의 축척을 결정하여야 하며, 축소된 모형에는 기하학적 상사성이 적용되었으며, 저수지 및 댐에서의 흐름을 지배하는 힘은 중력과 관성력이므로, Froude 상사법칙을 적용하여 실험을 수행하였다.

본 과제에서 목표한 가물막이 제체의 높이(8m) 및 실험규모와 조건을 고려하여 1/30의 축척비를 적용하였으며, 적용된 축척비에 근거하여, 모형실험에서 제체의 높이는 26.7cm로 산정하였다.

지오텍스타일 튜브를 다단으로 쌓기 위하여 단일 지오텍스타일 튜브의 크기는 길이와 폭이 각각 55cm, 20cm가 되도록 조성하였다.

[표 2-50] Froude 상사법칙에 의한 수리량의 축척 환산값

수리량	환산식	축척 환산값	비고
길이 (Lr)	Lr	1/30	
면적 (Ar)	Lr ²	1/900	
시간 (Tr)	Lr ^{1/2}	1/5.48	
유속 (Vr)	Lr ^{1/2}	1/5.48	
유량 (Qr)	Lr ^{5/2}	1/4929	



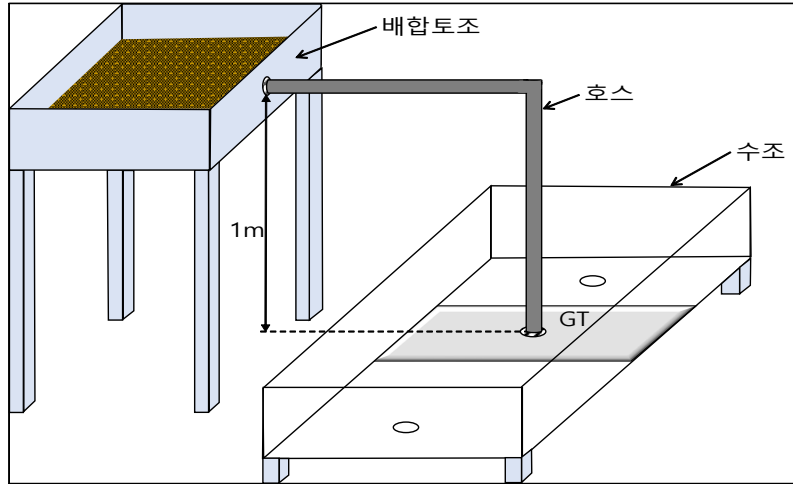
[그림 2-106] 다단 수리 모형실험에 사용된 지오텍스타일 튜브

[표 2-51] 다단 수리 모형실험에 사용된 지오텍스타일 튜브 제원

총길이	55cm	비고
마감부 길이	3cm	
폭	20cm	
주입구 위치	중앙	
주입구 직경	6cm	
재질	Polyester	
신율	15%	

가. 실험 장치

단일 지오텍스타일 튜브 실험에 사용된 과도한 펌프의 송출량으로 인해, 보다 축소된 크기의 지오텍스타일 튜브를 이용한 다단 수리 모형 제체 구성에 어려움 발생하여 채움 모형 실험과 달리, 수리적인 낙차를 이용하여 채움재를 주입하는 방식으로 변경하였다.



[그림 2-107] 주입방식 모식도

지오텍스타일 튜브를 다단으로 성토하고 일정 수위로 저수하기 위하여 수조 제작하였으며, 아크릴 수조의 길이는 102cm, 폭 42cm, 높이 60cm, 배출구 직경은 5cm로 제작하였다. 지오텍스타일 튜브에서 배출되는 물을 원활히 유도하기 위하여, 양쪽 수족 바닥에 배수구를 위치시키고 있다.



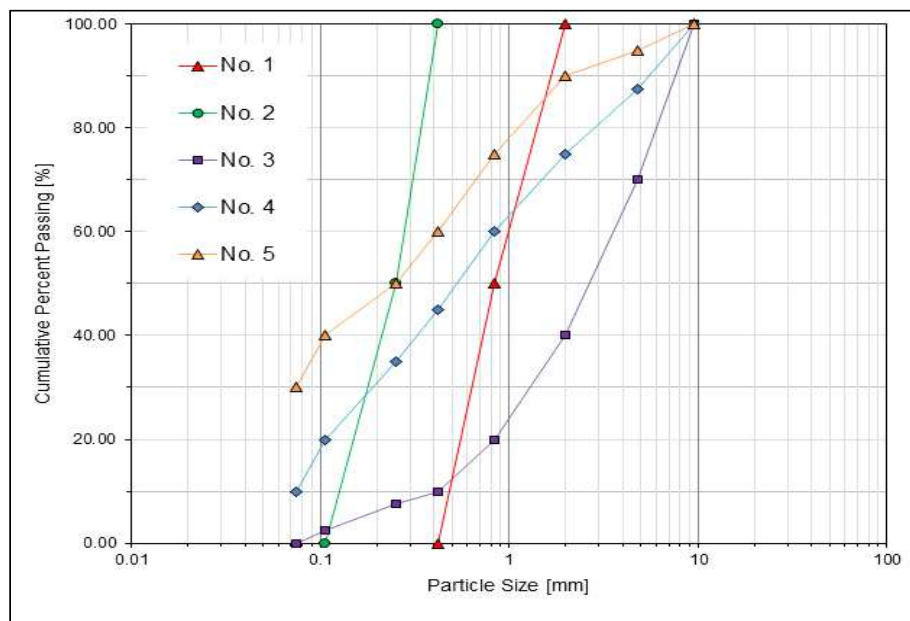
[그림 2-108] 수리 모형실험을 위한 아크릴 수조

2.8.3 단일 지오텍스타일 튜브의 채움 모형실험

퇴적토 준설에 따른 용수량 확보와 가물막이 제체의 성토 재료로 활용하기 위하여, 지오텍스타일 튜브의 내부 채움재를 저수지 준설토로 선정하였으며, 선행 연구를 통해, 국내 저수지의 준설토는 다양한 입도와 물성을 나타내는 것으로 파악하였다.

본 연구에서는 다양한 준설토의 특성을 반영하기 위해, 입도분포를 조절하여 채움재를 조성한 후, 지오텍스타일 튜브의 형상 및 시공 특성에 대해 조사하였다.

채움재로써, 상대적으로 균등한 입도분포를 가진 두 개의 시료 (No.1~2)와 양호한 입도분포를 가진 세 종류의 시료 (No.3~5)를 구성하였다. No.1~3 시료는 #200체의 통과량의 함량이 10% 미만이며, No.4~5 시료는 #200체의 통과량의 함량이 10% 이상으로 조성하였다.



[그림 2-109] 단일 지오텍스타일 튜브의 채움재로 사용된 5종류 시료의 입도분포

[표 2-52] 5종류 채움재의 입도분포 특성

구분	평균입경 [mm]	균등계수	200번체 통과량[%]	비고
No. 1	0.84	2	0	
No. 2	0.25	2.1	0	
No. 3	2.92	9.12	0	
No. 4	0.56	11.2	10	
No. 5	0.25	16.8	30	

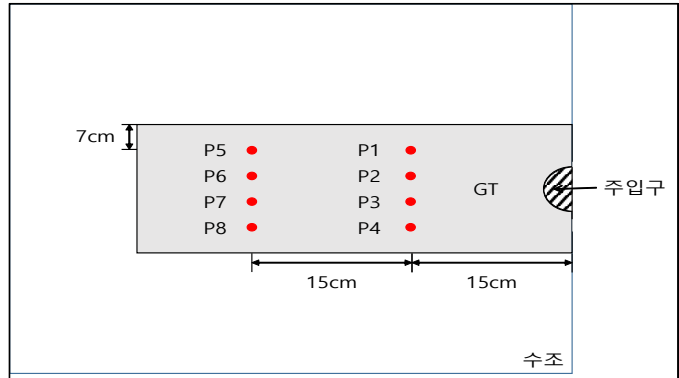
실험순서는 앞에서 수리 모형실험 시스템과 동일하다. 먼저 교반장치를 사용하여 흙 50kg에 대하여 함수비 300%에 해당하는 물 150L 배합한다. 교반기를 사용하여 흙 입자가 가라앉지 않도록 교반 실시한 후, 펌프를 작동시켜 지오텍스타일 튜브로 채움재 이송시킨다. 지오텍스타일 튜브 충전 후, 배수 과정의 순서로 반복 진행 한다. 충전 및 배수 중에 지오텍스타일 튜브의 배수 시간 및 형상 측정을 실시하며 진행되었다.

가. 측정지표 (지오텍스타일 튜브 형상, 채움 소요시간)

채움재의 종류 및 시공단계에 따른 지오텍스타일 튜브의 높이를 측정하기 위하여, 지오텍스타일 튜브의 중심에서 30cm 떨어진 지점에서 7cm 간격마다 측정지점을 표시하였다. 레이저 거리 측정기를 이용하여 지오텍스타일 튜브에 표시된 지점에 측정을 실시하였으며, 채움재가 주입된 지오텍스타일 튜브의 형상을 파악하기 위해 표시된 지점의 양 끝단의 폭을 측정하였다.



(a) 사진



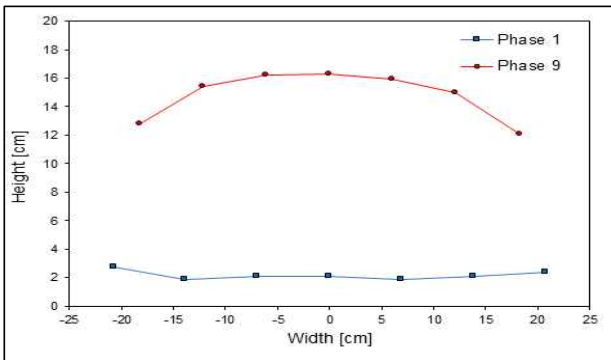
(b) 도면

[그림 2-110] 지오텍스타일 튜브의 폭 측정

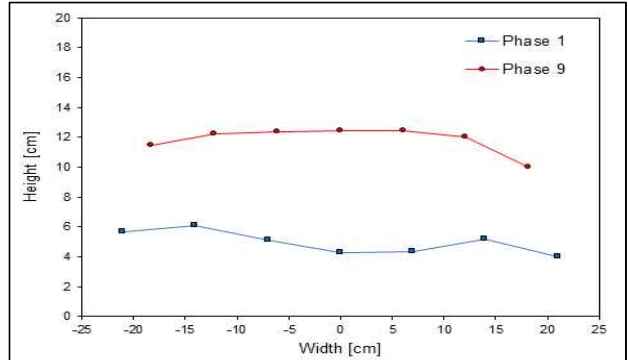
채움재의 종류에 따른 지오텍스타일 튜브의 주입 및 배수시간을 확인하기 위하여, 각 단계마다 채움재가 주입되는 시점부터 배수가 완료되는 시간을 기록하였다.

나. 실험 결과

지오텍스타일 튜브의 형상은 지오텍스타일 튜브에 채움재가 주입되면 높이는 증가하고 폭은 감소하는 형태의 거동을 보였다.



[그림 2-111] No. 3 채움재의 주입단계에 따른 형상변화



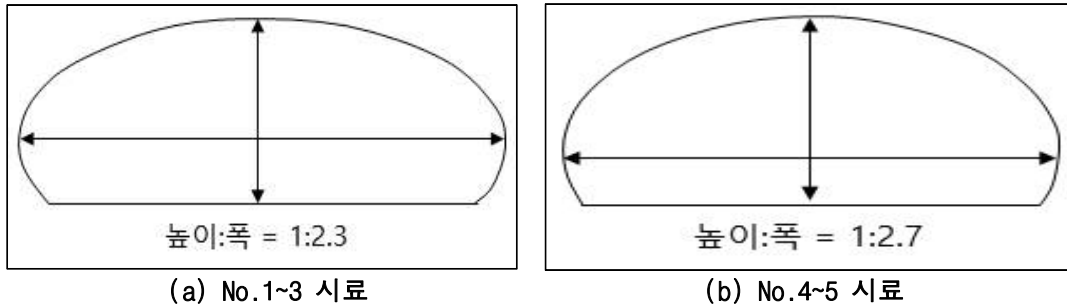
[그림 2-112] No. 5 채움재의 시간에 따른 형상변화

단일 지오텍스타일 튜브의 단면형상은 주입하는 채움재의 입도에 따라 다르게 나타난다.

[표 2-53] 채움재에 따른 형상의 높이 및 폭

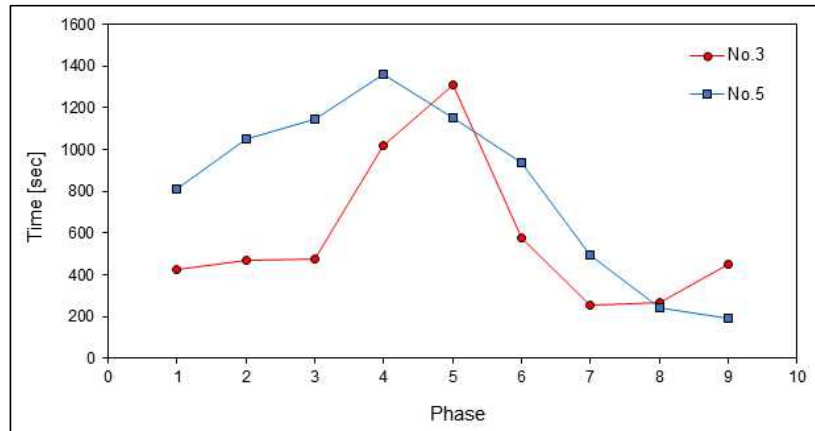
구분	형상 높이 [cm]	형상 폭 [cm]	높이 : 폭	비고
No. 1	14.43	34.00	1 : 2.36	
No. 2	15.08	35.88	1 : 2.37	
No. 3	15.26	34.25	1 : 2.24	
No. 4	12.63	36.50	1 : 2.88	
No. 5	13.93	36.25	1 : 2.60	

#200체의 통과량의 함량에 따라, 2그룹으로 형상 변화특성을 분류할 수 있다. No.1~3의 시료는 #200체의 통과량의 함량이 낮으며, 높이:폭의 비가 평균적으로 1:2.3으로 나타났으며, No.4~5의 시료는 #200체의 통과량의 함량이 높으며, 높이:폭의 비가 평균적으로 1:2.7로 나타났다.



[그림 2-113] 채움재에 따른 지오텍스타일 튜브의 단면형상

채움재의 종류에 따라, 단계별 채움 소요시간에 차이가 나타났다. 상대적으로 세립분이 적게 포함된 No.3 채움재를 주입한 경우, 초기 단계에서 채움 시간은 짧게 소요되었으며, 채움 시간이 극대화되는 단계가 지연되는 것으로 알 수 있었다. 세립분이 많이 포함된 No.5 채움재의 경우, 초기 단계부터 채움 시간이 더 길게 나타났으며, 채움 시간이 극대화되는 단계가 보다 빠르게 나타났다.



[그림 2-114] 채움재의 종류에 따른 단계별 채움 시간

채움재의 종류에 따라, 지오텍스타일 튜브의 조성을 위한 총소요시간에 차이가 나타난다. No.3 채움재를 주입한 경우가 No.5 채움재를 주입한 경우보다 채움 시간이 짧게 소요되며, No.3 채움재의 경우, No.5 채움재보다 #200체의 통과량이 작기 때문인 것으로 판단된다.

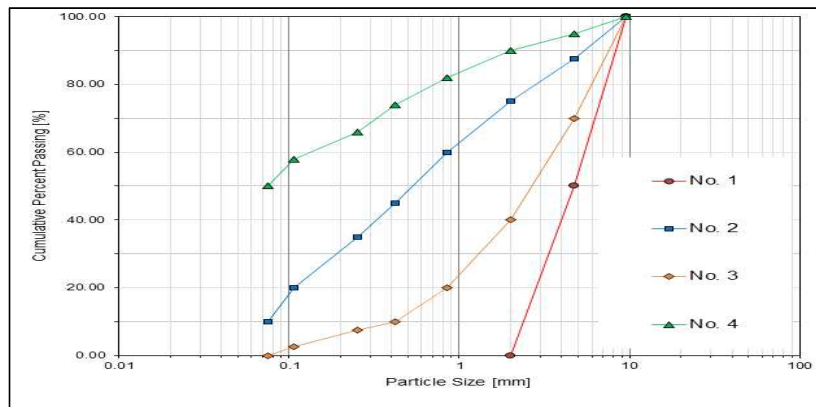
[표 2-54] 채움재별 지오텍스타일 튜브의 조성을 위한 총 소요 시간

구분	총소요시간 [sec]	비고
No. 1	621	
No. 2	576	
No. 3	562	
No. 4	2,910	
No. 5	6,692	

2.8.4 다단 지오텍스타일 튜브의 수리 모형실험

단일 지오텍스타일 튜브의 채움 실험을 통해 도출된 단면형상을 토대로, 지오텍스타일 튜브를 다단으로 성토하여 가물막이 체체를 조성할 수 있다. 지오텍스타일 튜브를 4단으로 성토 후 체체 높이에 따른 저수 시, 다단 지오텍스타일 튜브의 안정성(변위) 및 투수성(누수량)을 파악하였다.

균등한 입도분포를 가진 No.1 시료와 다양한 입도분포를 가진 No.2~4의 시료를 준비하였으며, No.1 및 No.3 시료는 #200체의 통과량이 없으며, No.2 및 No.4 시료는 #200체의 통과량이 10% 이상 포함되었다.

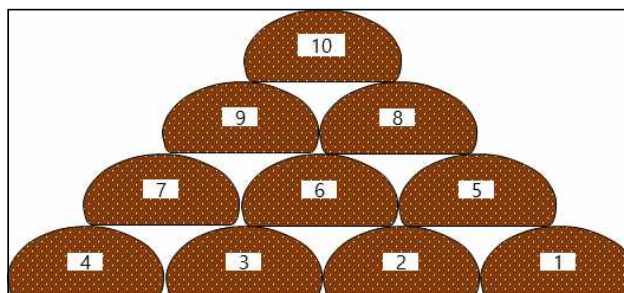


[그림 2-115] 다단 지오텍스타일 튜브의 채움재로 사용된 시료의 입도분포

[표 2-55] 4종류 채움재의 입도분포 특성

구분	평균입경 [mm]	200번체 통과량[%]	비고
No. 1	0.84	0	
No. 2	0.56	0	
No. 3	2.92	10	
No. 4	0.075	50	

모형 조성순서는 먼저 배합토조에 흙2kg에 대하여 함수비 300%에 해당하는 물 6 L를 배합한다. 이후 교반기를 사용하여 흙 입자가 가라앉지 않도록 교반 실시한 후, 토사 공급토조에 채움재를 공급하여 해당 지오텍스타일 튜브에 주입한다. 이후 위의 과정을 반복하여, 채움재가 주입된 지오텍스타일 튜브를 순서에 맞게 쌓아 올림 순으로 진행되었다.



[그림 2-116] 다단 지오텍스타일 튜브 시공순서도



[그림 2-117] 다단 지오텍스타일 튜브 조성 사진

가. 측정지표

지오텍스타일 튜브로 구성된 가물막이 제체의 투수성과 안정성을 평가하기 위해, 한국시설안전공단 및 농림축산식품부에서 제시된 필댐의 수직 및 수평변위, 누수량에 대한 기준을 검토하였다.

[표 2-56] 필댐 상태평가 항목 및 기준 (한국시설안전공단)

- 댐 마루

상태변화	평가유형	영향계수	평가기준	평가점수	평가 내용
침하	중요 결함	1.0	a	5	· 결함이 없는 최상의 상태
			b	4	· 침하 및 부등침하량이 10cm 이하로 경미한 상태
			c	3	· 과도한 침하 및 부등침하량이 10~50cm인 상태
			d	2	· 과도한 침하 및 부등침하량이 50cm 이상 · 댐마루 도로의 경사와 사면이 함몰된 상태
			e	1	· 과도한 침하 및 부등침하량이 50cm 이상 · 상시만수위 0.6m까지 진행된 매우 위험한 상태
수평 변위	중요 결함	1.0	a	5	· 결함이 없는 최상의 상태
			b	4	· 과도한 수평변위가 없는 양호한 상태
			c	3	· 과도한 수평변위의 징후가 존재하나 경미한 상태 (용기 0~50cm, 측방이동 0~30cm 변위 발생시)
			d	2	· 과도한 수평변위로 댐마루 도로의 변형이 심각한 상태 (용기 50cm 이상, 측방이동 30cm 이상 변위 발생시)
			e	1	· 과도한 수평변위로 댐마루 도로의 변형이 매우 위험한 상태 (용기 50cm 이상, 측방이동 30cm 이상 변위 발생시)

- 하류사면

상태변화	평가유형	영향계수	평가기준	평가점수	평가 내용
침하 및 변형	중요 결함	1.0	a	5	· 결함이 없는 최상의 상태
			b	4	· 침하깊이 0~10cm, 제체의 변형 0~10%인 상태
			c	3	· 침하깊이 10~50cm, 제체의 변형 10~50%인 상태
			d	2	· 침하깊이 50cm 이상, 제체의 변형 50% 이상인 상태
			e	1	· 침하깊이 50cm 이상, 제체의 변형 50% 이상 위험한 상태
누수량	중요 결함	1.0	a	5	· 댐체의 과도한 누수가 없는 최상의 상태
			b	4	· 댐체의 과도한 누수가 거의 없는 양호한 상태 (0.1 l/sec 이하)
			c	3	· 댐체의 과도한 누수의 징후가 시작되는 경미한 상태 (0.1~1.0 l/sec)
			d	2	· 댐체의 과도한 누수로 탁류 발생, 평소 누수량보다 증가시 (1.0 l/sec 이상)
			e	1	· 댐체의 과도한 누수로 탁류 발생, 누수의 온도변화가 심하고, 비강우시 누수량이 평소 누수량의 배 이상 증가 시 (1.0 l/sec 이상)

상사비를 적용한 모형실험이므로, 누수량과 안정성 기준을 근거로 기준치를 재 산정하였다.

[표 2-57] 상사비를 적용한 안정성 및 누수 기준

평가항목	기준	상사비 적용
침하	10 cm 이하	2.7 mm 이하
수평변위	30 cm 미만	10 mm 이하
총 저수량에 대한 누수량	1일당 총 저수량의 0.05% 미만	1일당 총 저수량의 0.05% 미만
길이당 누수량	100m당 1000 ml/sec 미만	0.024 ml/sec 미만

변위의 경우 지오텍스타일 튜브 중앙에 5 cm 간격으로 수직 및 수평 변위 측정 지점을 표시 하였으며, 배치된 다단 지오텍스타일 튜브에 일정 높이의 물을 저수시킨 후, 일정한 시간이 지난 후에 지오텍스타일 튜브의 변위량을 관찰하였다. 레이저 거리측정기를 이용하여, 지오텍스타일 튜브의 침하량과 수평변위를 측정하였다.



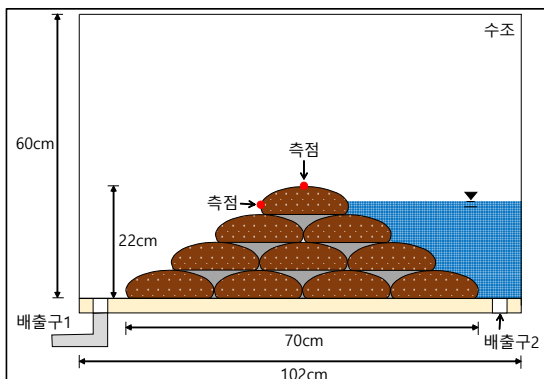
(a) 수직 변위



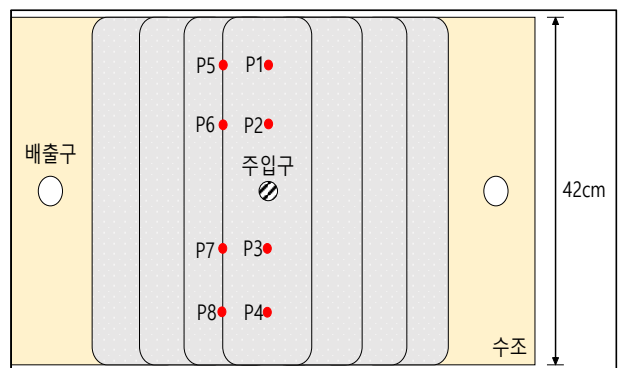
(b) 수평 변위

[그림 2-118] 변위 측정 사진

누수량의 경우 수조 중앙에 배치된 다단 지오텍스타일 튜브를 기준으로, 우측에 저수된 물이 지오텍스타일 튜브를 통과하여 좌측 배출구로 나오는 시간당 유량을 누수량으로 설정하였다. 동일한 수위에서 누수량을 측정하기 위해, 저수 후 10분이 경과된 시점에서 1분 동안 배출된 유량을 측정하였다.



(a)



(b)

[그림 2-119] 다단 지오텍스타일 튜브에 의해 저수된 물

나. 실험 결과

수직 및 수평 변위는 No.1 채움재의 경우, 일정 시간동안 물을 저수하지 못하였으므로, 변위 측정에서 제외하였다.

[표 2-58] 채움재의 종류에 따른 수직 침하량 및 수평 변위

구분	수직 침하량 [mm]					수평 변위 [mm]				
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	평균	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8	평균
No. 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
No. 2	-6.8	-2.1	4.8	2.9	-0.3	6.1	-3.2	-1.8	2.2	0.8
No. 3	3	0.2	-3.4	0	0.0	0	0.5	-0.3	0.5	0.2
No. 4	-0.9	-0.1	-1	1.7	-0.1	5.1	0.3	-0.8	-3.5	0.3

(수직 및 수평 변위에서 +는 하방향 침하 및 왼쪽 방향 이동을 의미함)

채움재의 종류와 관계없이 수직 침하 및 수평 변위가 발생하며, 그 크기는 위치에 따라 다르게 나타났다. 일부 지점에서는 앞서 제시한 기준값을 초과하는 경우도 있으나, 평균값을 기준으로 판단하면 전체적으로 수직 및 수평 변위에 대해 기준을 만족하고 있다.

누수량의 경우 채움재의 종류에 따라 누수량은 아래의 표와 같이 다르게 나타났다.

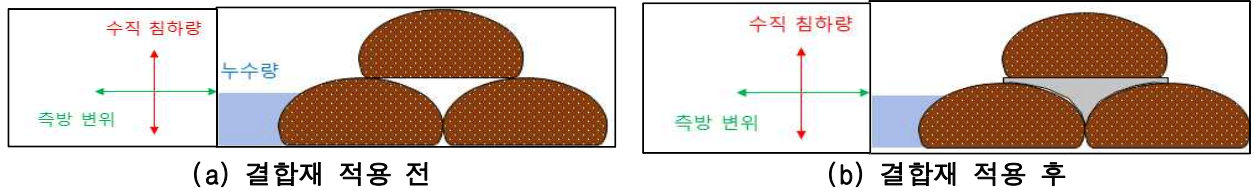
[표 2-59] 채움재의 종류에 따른 누수량

구분	측정된 누수량 (ml/sec)	상사비로 재 산정된 누수량 (ml/sec)	비고
No. 1	80	14.5	
No. 2	9.3	1.69	
No. 3	75	13.6	
No. 4	0.08	0.015	

No.4의 시료에서만 누수량 기준을 충족하며, 나머지 No.1~3의 시료에서는 누수량의 기준을 충족하지 못하는 것으로 나타났다. 다만, 앞서 제시된 누수량은 저수지에 대한 기준이므로, 가물막이 제체의 누수량 기준에 대한 별도의 검토가 필요하다.

2.8.5 결합재를 적용한 다단 지오텍스타일 튜브의 수리 모형실험

시멘트계 결합재는 다단으로 시공하는 지오텍스타일 튜브간의 전단강도를 증진시켜 안정성을 높이며, 지오텍스타일 튜브 사이에 발생하는 공간으로 침투하는 물을 차단하여 누수량을 감소시킬 수 있는지 조사하였다. 결합재의 적용 여부에 따른 누수량과 발생한 변위를 비교하였다.



[그림 2-120] 결합재 적용 여부에 따른 비교 실험 모식도

사전 실험으로 결합재 도포 후, 시공 시 발생하는 물에 의한 용해 없이 지오텍스타일 튜브의 다단 시공에 최적화된 시간을 도출하기 위한 사전 실험을 수행하였다. 지오텍스타일 튜브 위에 결합재를 도포한 후, 일정한 시간 간격으로 물에 넣어 결합재가 용해되는지 관찰하였다. 결합재가 용해되지 않고, 다음 단의 시공할 수 있는 시간은 결합재 도포 후 약 1시간으로 산정되었다.



[그림 2-121] 결합재 용해 시험

가. 실험재료

사용된 결합재의 배합비는 사전연구 결과의 비율을 사용하였으며, 지오텍스타일 튜브 제작 시, 각 층에 발생한 공간에 결합재를 도포하였다.



[그림 2-122] 지오텍스타일 튜브에 결합재를 적용한 모식도

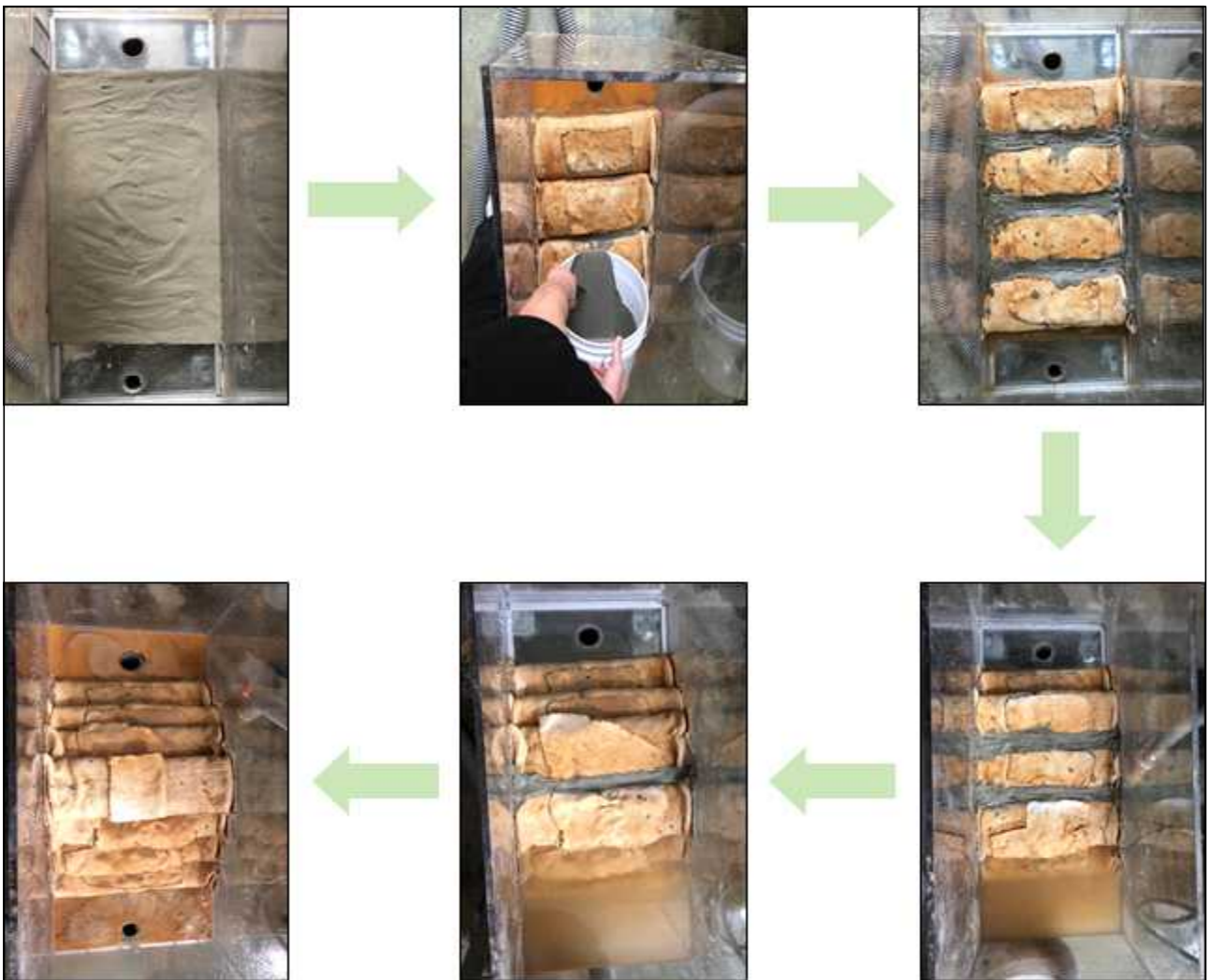
이전에 실시한 다단 지오텍스타일 튜브에 사용된 채움재에서 누수량이 기준치를 충족하지 못하는 No.1~3 시료 중, No.2 및 No.3 시료에 대해 결합재를 적용하여 수리 모형실험을 재수행하였다.

결합재와 채움재를 제외한 나머지 조건 및 시험장치는 이전에 실시한 다단 지오텍스타일 튜브 실험과 동일하다.

나. 실험체 제작

실험체 제작을 위해 먼저 가장 하단부에 결합재를 도포해 기본층을 제작한다. 이후 기본층 위에 지오텍스타일 튜브를 쌓기 위해 기존 다단 실험체 제작순서와 동일하게 진행된다.

우선 배합토조에 흙 2kg에 대하여 함수비 300%에 해당하는 물 6L를 배합한다. 흙 입자가 가라앉지 않도록 교반을 실시한 후, 토사 공급토조에 채움재를 공급하여 지오텍스타일 튜브에 주입한다. 이후 채움재가 주입된 지오텍스타일 튜브를 순서에 맞게 쌓아 올린다. 각 층 시공 후, 지오텍스타일 튜브 사이에 발생한 공간에 배합된 결합재를 도포한다. 1시간 경과 후, 결합재가 도포된 지오텍스타일 튜브위에 다음 층의 지오텍스타일 튜브를 제작한다. (위 절차를 4층 시공 완료할 때까지 반복함)



[그림 2-123] 결합재를 이용한 다단 지오텍스타일 튜브 조성 과정

다. 평가 기준 및 측정지표

다단 지오텍스타일 튜브의 수리 모형실험에서 상사비를 적용한 안정성 및 누수 기준을 따르며, 다단 지오텍스타일 튜브의 수리 모형실험의 변위측정 및 누수량 측정 방식 및 지표를 동일하게 적용하여 측정을 실시하였다.

라. 실험결과

변위 측정을 통해서 결합재를 적용하였을 때, 결합재를 적용하지 않은 경우보다 수직 침하량이 감소하였다.

[표 2-60] 채움재의 종류 및 결합재 적용에 따른 수직 침하량

구분		수직 침하량 [mm]				
		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	평균
No. 2	결합재 미적용	-6.8	-2.1	4.8	2.9	-0.3
	결합재 적용	0	0	-0.1	0	0.0
No. 3	결합재 미적용	3	0.2	-3.4	0	0.0
	결합재 적용	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.0

(수직 침하량에서 -는 높이 상승이며, +는 높이 하락임)

결합재를 적용하였을 때, 결합재를 적용하지 않은 경우보다 수평 변위가 감소하였다.

[표 2-61] 채움재의 종류 및 결합재 적용에 따른 수평 변위

구분		수평 변위 [mm]				
		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	평균
No. 2	결합재 미적용	6.1	-3.2	-1.8	2.2	0.8
	결합재 적용	0.2	-0.1	0	0	0.0
No. 3	결합재 미적용	0	0.5	-0.3	0.5	0.2
	결합재 적용	-0.2	0	0	0	-0.1

(수직 침하량에서 -는 높이 상승이며, +는 높이 하락임)

다단 지오텍스타일 튜브에 발생한 공간에 결합재를 적용하였을 때, 결합재를 적용하지 않은 경우보다 수직 침하량 및 수평 변위가 감소하는 것으로 보아 결합재가 다단 지오텍스타일 튜브의 안정성을 증대시키는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

누수량 측정 결과 채움재의 종류 및 결합재 적용에 따라 누수량이 다른 것으로 나타났다.

[표 2-62] 채움재의 종류 및 결합재 적용에 따른 누수량

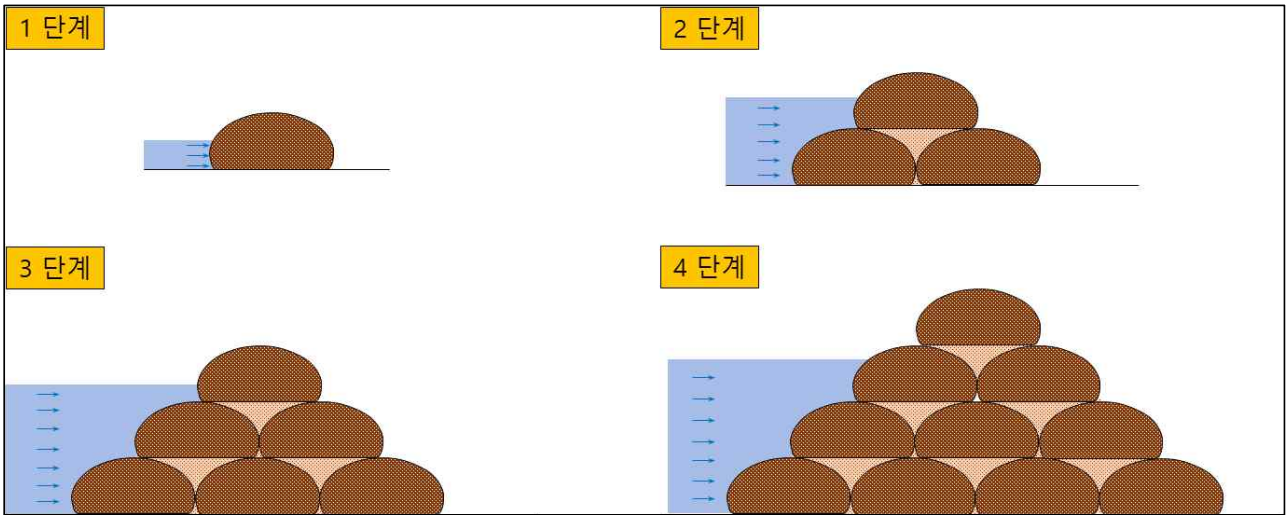
구분		측정된 누수량 (ml/sec)	상사비로 재 산정된 누수량 (ml/sec)	비교
No. 2	결합재 미적용	9.3	1.69	
	결합재 적용	5.8	1.07	
No. 3	결합재 미적용	75	13.6	
	결합재 적용	70	12.7	

실험에 사용된 두 시료는 앞 절에서 제시된 누수량 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타나지만, 결합재 적용 여부에 따라 비교 시 다단 지오텍스타일 튜브 사이의 공간에 결합재를 적용하면 누수되는 유량을 효과적으로 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

2.9 시공/운용을 모사한 안정성 평가

2.9.1 시공단계 모사

긴급 저수 시, 다단 지오텍스타일 튜브의 시공단계를 아래의 그림과 같이 나누어 가물막이 체체의 안정성 및 투수성을 파악하였다. 시공단계에 따른 다단 지오텍스타일 튜브의 안정성 파악을 위해, 각 층 시공 후 지오텍스타일 튜브의 변위 및 누수량을 측정하였다.



[그림 2-124] 시공단계에 따른 다단 지오텍스타일 튜브 안정성 평가

다단 지오텍스타일 튜브에서 사용한 No.1 채움재를 제외한, No.2~4 채움재를 사용하였다. No.2 및 No.3 채움재에 대해서 시공단계에 따른 결합재 유/무에 따른 안정성을 비교하였다.

각 단계별로 지오텍스타일 튜브에 채움재를 주입시킨 후, 일정한 수위를 유지시키며, 누수량 및 변위를 측정하였다. 결합재를 적용한 경우 결합재가 응결되는 1시간을 대기한 후, 일정한 수위를 유지시켜 누수량 및 변위를 측정하였다.

가. 평가 기준 및 측정지표

다단 지오텍스타일 튜브의 수리 모형실험에서 상사비를 적용한 안정성 및 누수 기준을 따르며, 다단 지오텍스타일 튜브의 수리 모형실험의 변위측정 및 누수량 측정 방식 및 지표를 동일하게 적용하여 측정을 실시하였다.

나. 실험결과

다단 지오텍스타일 튜브의 수리 모형실험에서 제시한 상사비를 적용한 기준과 동일한 기준을 적용하였다. 변위 변화량은 수직 침하량은 상대적으로 시공 초기 단계에서 크게 나타났다. 결합재 적용 시, 결합재를 적용하지 않은 경우보다 수직 침하량이 유사하거나 줄어드는 경향을 보여준다.

[표 2-63] 시공단계에 따른 수직 침하량

시료	결합재 적용 여부	시공단계	수직 침하량 [mm]				평균
			Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	
No. 2	미적용	1 단계	0.5	0.2	0.3	-0.4	0.2
		2 단계	0.2	0.3	0.4	0.6	0.4
		3 단계	-0.1	0.4	-0.2	0.1	0.1
		4 단계	-6.8	-2.1	4.8	2.9	-0.3
	적용	1 단계	0	0	0	0	0.0
		2 단계	0	0.1	0	0	0.0
		3 단계	0	0	0	0	0.0
		4 단계	0	0	-0.1	0	0.0
No. 3	미적용	1 단계	0.2	0.9	-0.6	-0.1	0.1
		2 단계	0.7	0.3	-2.9	-2.3	-1.1
		3 단계	-0.6	0	-0.1	-0.2	-0.2
		4 단계	3	0.2	-3.4	0	0.0
	적용	1 단계	0	0	0	0	0.0
		2 단계	0.2	1.2	0.8	4.3	1.6
		3 단계	-0.5	-0.2	-0.3	0.6	-0.1
		4 단계	-0.5	-0.7	0.7	0.6	0.0
No. 4	미적용	1 단계	-5	-1.4	-3.1	3.7	-1.5
		2 단계	0.4	1.7	0.1	6.3	2.1
		3 단계	-0.2	-0.1	-0.7	-1.8	-0.7
		4 단계	-0.9	-0.1	-1	1.7	-0.1

(수직 침하량에서 +는 하방향 변위를 나타냄)

전반적으로, 결합재 적용 시, 결합재를 적용하지 않은 경우보다 수평 변위가 감소하며, 세립분을 가장 많이 포함한 No. 4 채움재는 다른 시료보다 상대적으로 큰 수평변위가 나타났다.

[표 2-64] 시공단계에 따른 수평 변위

시료	결합재 적용 여부	시공단계	수평 변위 [mm]				평균
			Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	
No. 2	미적용	1 단계	0.5	1	-0.8	1.2	0.5
		2 단계	1.1	-0.8	2.3	1	0.9
		3 단계	-1.4	0.3	-0.5	0.6	-0.3
		4 단계	6.1	-3.2	-1.8	2.2	0.8
	적용	1 단계	-0.1	0.3	0.1	0.2	0.1
		2 단계	0.7	0.4	-0.1	0.5	0.4
		3 단계	0.5	-0.4	0.6	0.7	0.4
		4 단계	0.2	-0.1	0	0	0.0
No. 3	미적용	1 단계	0	-0.3	-0.8	0.2	-0.2
		2 단계	0.5	-0.6	-0.7	1	0.1
		3 단계	-2.2	1.4	3.9	-0.4	0.7
		4 단계	0	0.5	-0.3	0.5	0.2
	적용	1 단계	0	0	0	0	0.0
		2 단계	0.2	-0.1	0.3	1.3	0.4
		3 단계	-0.3	-0.9	0.1	-0.2	-0.3
		4 단계	-1.7	-0.4	0	-0.3	-0.6
No. 4	미적용	1 단계	4.6	1.4	1.9	2.4	2.6
		2 단계	-0.7	-0.9	-4	0.4	-1.3
		3 단계	-0.1	-6.9	-0.3	-1.6	-2.2
		4 단계	5.1	0.3	-0.8	-3.5	0.3

(수평 변위에서 +는 왼쪽방향(하류사면방향) 이동을 나타냄)

시공단계를 나누어 실험한 경우에도, 결합재를 적용한 다단 지오텍스타일튜브에서 보다 작은 수직 침하량과 수평변위가 발생하였다. 시공단계를 나누어 시공하는 경우에도 결합재를 적용하면 안정성 증대에 큰 효과를 기대할 수 있다.

누수량 측정결과 채움재의 종류 및 결합재 적용과 시공단계에 따라 누수되는 유량이 다른 것으로 나타났다. 결합재를 적용하지 않은 No. 3의 채움재를 제외한 나머지 채움재들은 시공 단계 1에서 누수량 기준을 만족한 것으로 나타났으나, 단계를 나누어 다단 지오텍스타일 튜브를 시공하는 경우, 4단계에서의 누수량은 모든 경우에서 제시된 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

[표 2-65] 시공단계에 따른 누수량

시료	결합재 적용 여부	시공단계	측정된 누수량 (ml/sec)	상사비로 재 산정된 누수량 (ml/sec)	비고
No. 2	미적용	1 단계	1.5	0.027	
		2 단계	2.3	0.42	
		3 단계	10.2	1.85	
		4 단계	9.3	1.69	
	적용	1 단계	0	0	
		2 단계	0.45	0.082	
		3 단계	4.53	0.82	
		4 단계	5.88	1.07	
No. 3	미적용	1 단계	3.98	0.72	
		2 단계	17.08	3.11	
		3 단계	56.17	10.21	
		4 단계	83.33	15.15	
	적용	1 단계	0.08	0.015	
		2 단계	5.5	1	
		3 단계	33.67	6.12	
		4 단계	71.67	13.03	
No. 4	미적용	1 단계	0.08	0.015	
		2 단계	0.5	0.09	
		3 단계	0.5	0.09	
		4 단계	1.67	0.3	

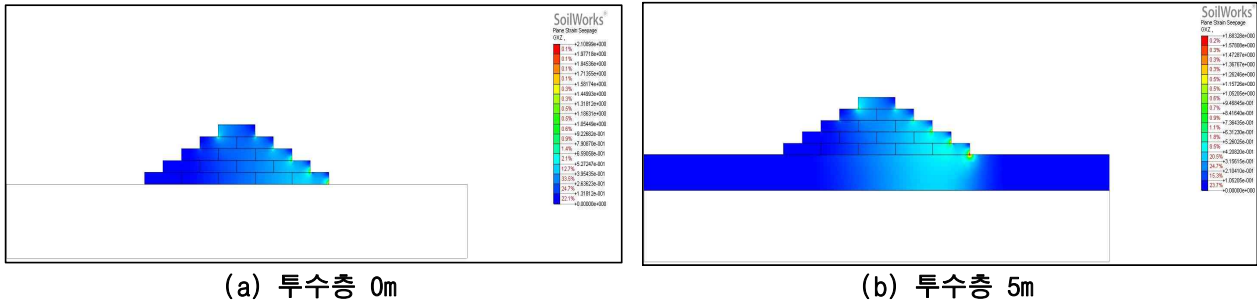
다단 지오텍스타일 튜브 사이의 공간에 결합재를 적용하면 누수되는 물의 양을 저감시킬 수 있다. 그러나, 단계를 나누어 다단 지오텍스타일 튜브를 시공하는 경우, 앞서 제시한 누수 기준에는 부족한 것으로 나타났다.

2.9.2 다양한 시공조건에 따른 수치해석

체체 및 기초는 침투수에 대해 안전하도록 설계하여야 하며, 이를 위해 침투해석이 필요하다. 가물막이 체체를 설계할 때 다양한 현장조건을 반영하기 위하여, 지반 조건 및 다단 지오텍스타일 튜브의 형상 변화를 통해 침투현상에 대한 수치해석을 실시하였다.

가. 해석 결과

해설결과 투수층의 두께를 0~5m로 변경시켜서 최대동수경사를 파악하였다.



(a) 투수층 0m

(b) 투수층 5m

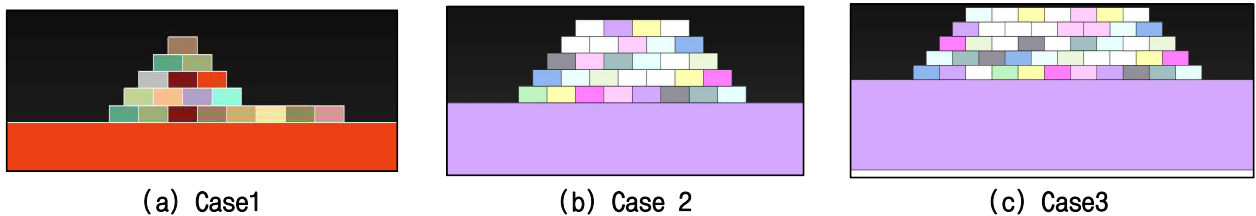
[그림 2-125] 투수층의 두께 변화

[표 2-66] 투수층 두께에 따른 동수경사 변화

투수층 두께(m)	투수계수			최대 동수경사		
	투수층	Geotube	기반암	수평	연직	전체
0	1.00E ⁻⁰⁹	1.00E ⁻⁰⁵	불투수층	1.94	0.53	2.11
1				1.37	0.78	1.82
2				1.37	0.68	1.75
3				1.37	0.53	1.67
4				1.37	0.55	1.68
5				1.37	0.55	1.68

투수층이 두께가 일정 범위를 넘을 경우, 최대 동수경사는 큰 차이가 없는 것으로 나타난다.

가물막이의 체체 형상이 변경 변경이 될 경우를 비교하기 위해 3가지 Case를 구분하여 비교 하였으며, 각 케이스별 형상 및 해석값은 아래의 그림과 표와 같다.



(a) Case1

(b) Case 2

(c) Case3

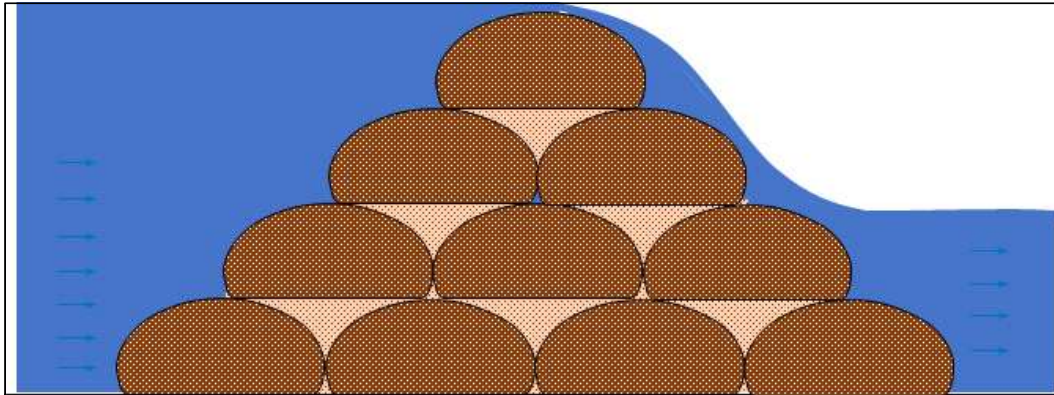
[그림 2-126] Case별 다단 지오텍스타일 튜브 형상

[표 2-67] Case 별 최대 동수경사

구분	투수계수			최대 동수경사		
	투수층	Geotube	기반암	수평	연직	전체
Case1	1.00E ⁻⁰⁷	1.00E ⁻⁰³	5.00E ⁻¹¹	1.27	1.37	1.92
Case2	1.00E ⁻⁰⁷	1.00E ⁻⁰³	5.00E ⁻¹¹	0.63	0.30	0.8
Case3	1.00E ⁻⁰⁷	1.00E ⁻⁰³	5.00E ⁻¹¹	0.48	0.23	0.63

2.9.3 월류시 제체 안정성

월류에 대한 다단 지오텍스타일 튜브의 안정성을 파악하기 위하여, 수리 모형실험을 실시한다.



[그림 2-127] 월류시 제체 안정성에 대한 평가

시공단계 모사와 같은 조건으로 No.1 채움재를 제외한, No.2~4 채움재를 사용하였으며, No.2 및 No.3 채움재에 대해서 월류 시, 결합재 유/무에 따른 안정성을 비교하였다.

각 단계별로 지오텍스타일 튜브에 채움재를 주입시킨 후, 각 단계에서 형성된 지오텍스타일 튜브보다 높은 수위를 조성하여 월류 실험을 진행하였다. 결합재를 적용한 경우, 결합재가 응결되는 1시간 대기 후, 각 단계에서 형성된 지오텍스타일 튜브보다 높은 수위를 약 10분간 유지하여 월류 실험을 진행하였다.

가. 평가 기준 및 측정지표

다단 지오텍스타일 튜브의 수리 모형실험에서 상사비를 적용한 안정성 및 누수 기준을 따르며, 다단 지오텍스타일 튜브의 수리 모형실험의 변위측정 및 누수량 측정 방식 및 지표를 동일하게 적용하여 측정을 실시하였다.

나. 실험결과

다단 지오텍스타일 튜브의 수리 모형실험의 변위측정 및 누수량 측정 방식 및 지표를 동일하게 적용하여 측정을 실시하였다. 변위 변화는 월류 시, 수직 침하량은 결합재를 적용하지 않은 경우에서 제체의 길이방향으로 위치별 수직 침하량이 크게 나타난다. 위치별 수직 침하량을 보면, 대체적으로 결합재를 적용한 시료에서 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

[표 2-68] 월류에 따른 수직 침하량

시료	결합재 적용 여부	수직 침하량 [mm]				평균
		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	
No. 2	미적용	-7	-2.5	5	3.3	-0.3
	적용	0.1	-0.1	-0.1	0	0.0
No. 3	미적용	3.2	0.5	-3.4	0.2	0.1
	적용	-0.5	-0.7	0.9	0.8	0.1
No. 4	미적용	-1.1	-0.5	-1.8	2.3	-0.3

(수직 침하량에서 -는 높이 상승이며, +는 높이 하락임)

No.2 시료의 경우 결합재 적용 시 수평 변위가 다소 감소하였으나, No.3 시료에서는 결합재 적용에 따른 효과가 뚜렷이 나타나지 않았다.

[표 2-69] 월류에 따른 수평 변위

시료	결합재 적용 여부	수평변위 [mm]				
		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	평균
No. 2	미적용	6.3	-3.3	-2	2.4	0.9
	적용	0.2	-0.1	0.1	-0.6	-0.1
No. 3	미적용	0	0.5	-0.3	0.5	0.2
	적용	-1.7	-0.4	0	-0.3	-0.6
No. 4	미적용	5.3	1.2	-1	-3.2	0.6

(수직 침하량에서 -는 높이 상승이며, +는 높이 하락임)

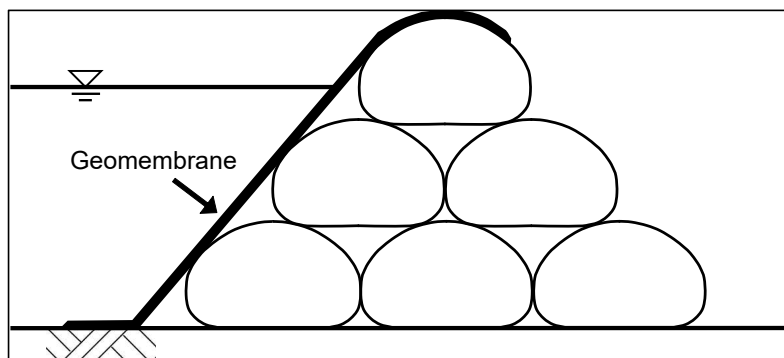
채움재의 종류에 따라 영향도가 다르지만, 월류 시에도 결합재를 적용하면 가물막이 제체의 안정성을 증대시키는데 도움이 될 것으로 판단된다.

2.9.4 긴급상황에 대비한 시나리오

시공/운영 중 안전성 평가를 토대로 시공 운영에 있을 수 있는 긴급상황을 선정하였다. 첫 번째는 누수 발생시, 두 번째는 월류 발생시로 선정하였으며 시공과 운영시 각각의 대체 방법을 제시하였다.

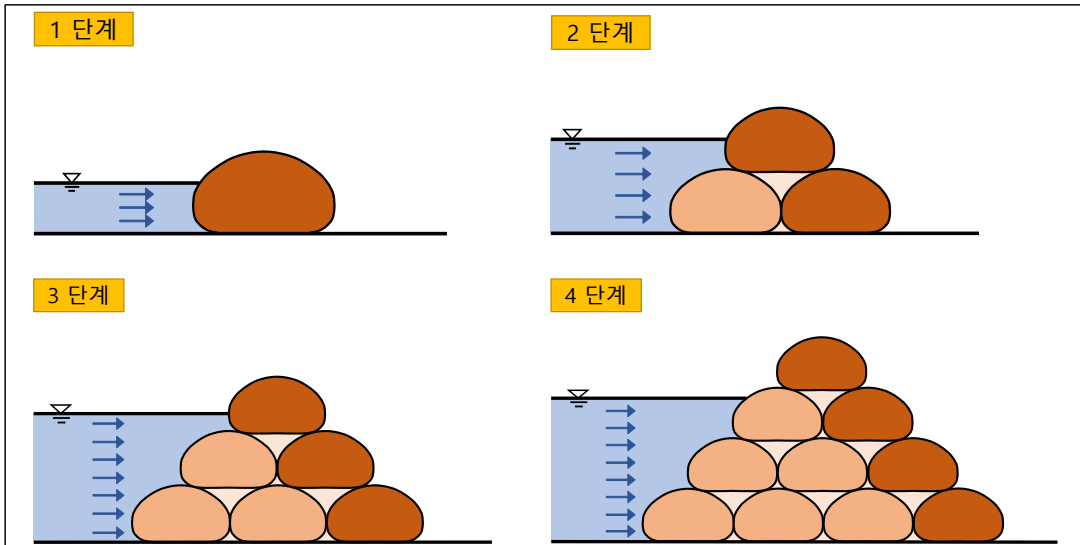
가. 시공 중 긴급 시나리오

다층 지오텍스타일 튜브 성토 시, 누수가 발생할 경우 지오멤브레인을 이용하여 누수발생을 저감할 수 있다. 아래 그림과 같이 지오멤브레인을 상류사면에 적용하여 발생하는 누수를 저감시킬 수 있다.



[그림 2-128] 차수매트를 이용한 제체보호기술

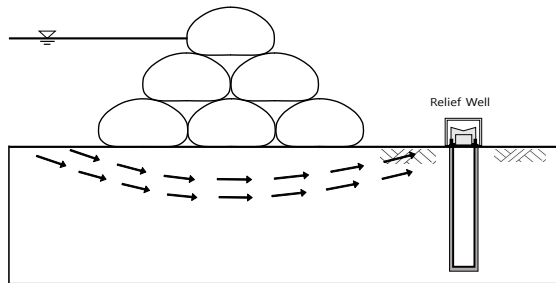
성토 시, 지오텍스타일 튜브 구조물에 월류가 발생할 위험이 감지된다면 아래의 그림과 같이 급속시공을 제안한다. 기존의 지오텍스타일 튜브 시공방법과는 다르게 급속으로 시공하면 계획높이까지 빠르게 도달하여 월류를 방지할 수 있다.



[그림 2-129] 급속시공을 통한 월류방지 기술

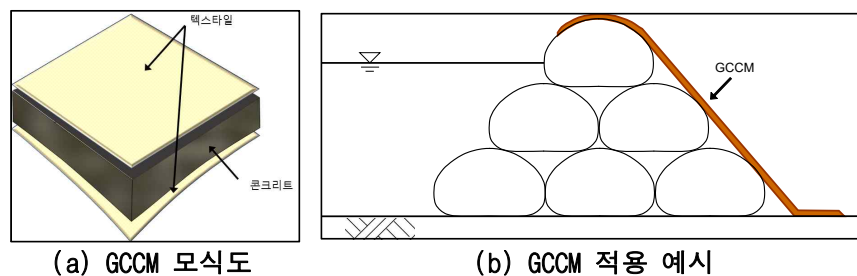
나. 운영 중 긴급 시나리오

시공된 지오텍스타일 튜브의 제체와 지오텍스타일 튜브들이 설치된 기초 지반에 누수가 발생할 수 있다. 누수 발생시 감압정을 통해서 침투 및 누수에 대한 안정성을 확보할 수 있는 침투수 처리 방법을 들 수 있다. 지오텍스타일 튜브가 설치된 하류측 지역에 감압정을 설치하여 간극수압을 저감시킴으로써 누수를 방지할 수 있다.



[그림 2-130] 감압정을 이용한 누수방지 기술

구조물로써 시공이 완료된 지오텍스타일 튜브에 월류가 발생할 경우 GCCM(Geosynthetic Concrete Composite Mat)를 이용하여 긴급보강할 수 있다. 월류로 인해 불안정한 상태의 지오텍스타일 튜브 구조체의 안정성을 높이는데 활용할 수 있다. 대규모 장비가 필요하지 않으며 협소한 공간에도 작업이 가능하여 긴급공사가 가능하다.



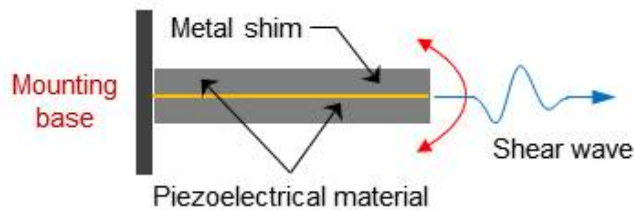
[그림 2-131] GCCM을 이용한 제체보호기술

2.10 가물막이 제체에 최적화된 매립식 전단파 센서/시스템 개발

동적특성을 평가하기 위하여 전단파를 측정할 수 있는 센서 및 시스템 구축이 필요하다. 측정되는 전단파 속도로부터 최대 전단탄성계수를 산정할 수 있으며, 이에 따라 내진해석에 활용 가능하다. 다양한 동적 하중에 따라 지오택스타일 튜브로 조성된 가물막이 제체의 안정성 분석 가능하다.

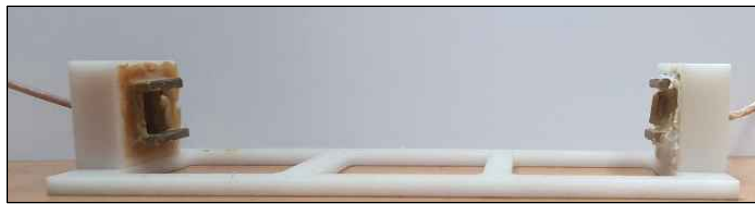
2.10.1 전단파 센서/시스템

전단파 센서는 벤더엘리먼트(bender element)라하며 황동판의 양면에 압전소자(Piezoelectric materials)가 코팅되어 있으며, 전기적 신호를 통해 벤더엘리먼트는 끝단에서 전단파를 발생시킨다. 전기적 간섭으로 인한 신호해석의 방해를 저감시키기 위하여, 병렬형식의 벤더엘리먼트를 제작하였다.



[그림 2-132] 병렬형식의 벤더엘리먼트

전단파 측정시스템으로 벤더엘리먼트가 안정적으로 전단파를 발생시키기 위해, 고정형 모듈을 설계하였다. 고정형 모듈은 플라스틱 계열 소재로 제작하였으며, 모듈의 제원은 길이 192 mm, 폭 50 mm, 높이 32 mm이다. 한 쌍의 벤더엘리먼트는 양 끝단이 마주 보도록 하여 각각 발신기 및 수신기의 역할을 수행할 수 있도록 제작되었다.

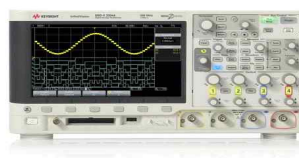


[그림 2-133] 측정모듈에 설치된 벤더 엘리먼트

측정 시스템 구성은 파형을 발생시키는 신호 발생기(Keysight, 33500b), 필터 증폭기(Krohn, model 3364), 오실로스코프 (Keysight, DSOX 2004a)로 구성하였다. 신호 발생기를 통해 10 V의 진폭과 20 Hz의 주파수의 구형파를 입력신호로 설정하였으며, 수신된 신호는 필터-증폭기에서 500 Hz~100 kHz 대역 사이의 신호만 통과되도록 필터링 된다.



(a) 신호 발생기

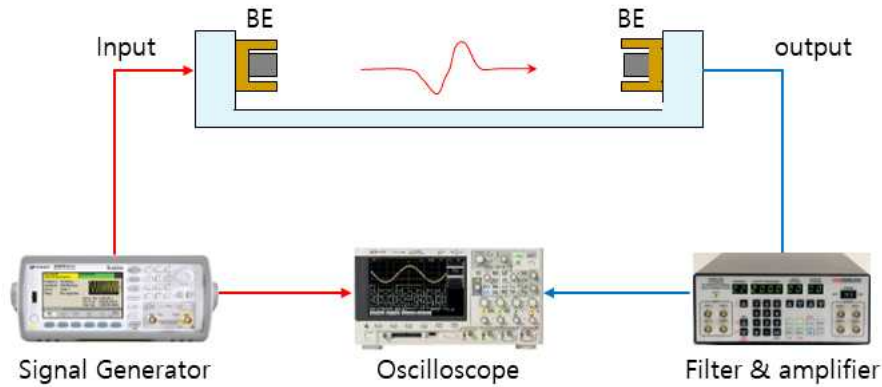


(b) 오실로스코프



(c) 필터 증폭기

[그림 2-134] 측정 시스템에 사용된 장비



[그림 2-135] 구축된 진단과 측정 시스템

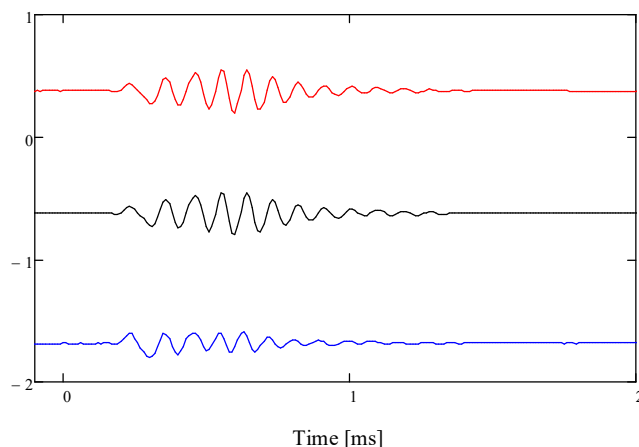
2.10.2 현장을 모사한 조건별 모형 제체의 동적특성 도출

지오텍스타일 튜브의 채움재에 종류에 따른 동적특성을 평가하기 위하여 진단과를 측정할 수 있는 센서 및 시스템을 구축하였다. 지오텍스타일 튜브의 시공 조건에 따라, 진단과를 측정하여 비교/분석하였다.

다만 지오텍스타일 튜브의 수리 모형실험에서 단일 지오텍스타일 튜브에 사용된 No.1~5 채움재를 사용하였다. 지오텍스타일 튜브에 채움재를 주입하기 전 벤더 엘리먼트가 설치된 측정 모듈을 지오텍스타일 내부에 고정시킨다. 이후 지오텍스타일 튜브와 동일한 충전 과정을 실시한다. 충전이 완료된 후, 지오텍스타일 튜브 내부에 설치된 벤더 엘리먼트를 이용하여 일정한 시간 간격으로 진단과 측정을 실시한다.

가. 실험 결과

진단과 측정은 펌프를 이용하여 채움재를 주입 시, 수압에 의해 벤더 엘리먼트에 미세한 손상을 유의해야 하며, 센서 시스템의 설계 보완 후, 아래의 그림과 같이 신호가 측정되었다. 향후, 현장에 설치되는 지오텍스타일 튜브에 본 연구에서 구축된 진단과 측정 시스템을 이용한다면, 시간에 따른 제체의 동적 특성을 모니터링 할 수 있을 것으로 기대된다.

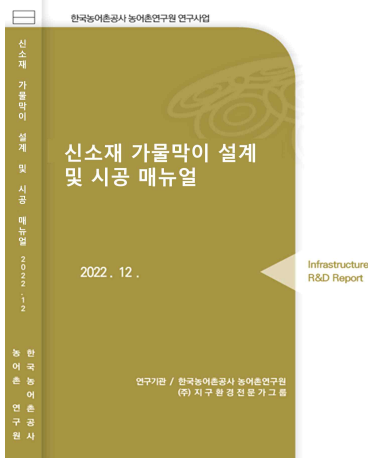


[그림 2-136] 진단과 센서를 이용한 신호 측정 결과

2.11 개발된 가물막이 공법에 대한 설계 및 시공 매뉴얼

본 연구 개발을 진행하면서 지오텍스타일 튜브를 이용한 가물막이 공법에 대한 설계, 시공 및 운영 등에 관한 기준이 부재하였으며, 본 연구의 결과를 토대로 매뉴얼을 개발 제시하였다. 자세한 내용은 별첨으로 제시 하였다.

개발된 매뉴얼은 크게 설계와 시공 매뉴얼로 구분된다. 설계 매뉴얼의 구성하였으며, 일반적인 지반신소재와 지오텍스타일 튜브에 대한 내용을 소개하는 개요 부분과 설계시 꼭 필요한 지오텍스타일 튜브 선정방법 및 고려사항, 채움재와 결합재의 내용을 설명한 재료부분, 지오텍스타일 튜브 설계시 필요한 가정 사항, 평가항목 및 안정성 검토 방법과 긴급상황 대응 방법으로 구성된 설계 부분으로 구분되어 있다. 시공매뉴얼 부분에서는 시공에 필요한 시공 장비 및 재료의 시방기준을 제시하고 있다.



(a) 매뉴얼 표지

제 1 장 설계 매뉴얼	1
제 1 장 개요	1
1. 지반신소재	1
가. 지오텍스타일	2
나. 지오텍스타일	3
2. 지오텍스타일 튜브	4
제 2 장 재료	7
1. 지오텍스타일 튜브	7
가. 지오텍스타일 입상	7
나. 고려사항	9
2. 채움재	10
가. 국내 채움시 확인도 작성	10
나. 고려사항	12
3. 결합재	18
4. 평가항목	18
5. 운영 및 유지	18
제 2 장 시공 매뉴얼	19
1. 가설사항	19
가. 가설사항	19
나. 평가항목	21
다. 운영 및 유지	23
2. 입상 지오텍스타일 튜브	25
가. 입상 평가	25
나. 입상 관리요령	25
다. 입상장 검토	26
3. 입상 지오텍스타일 튜브	27
가. 입상장 검토	27
나. 입상장	27
다. 사면 입상요령	29
4. 입상재 적용 검토	31
5. 긴급상황 대책 시나리오	34
가. 시공 중	34
나. 준공 중	35

(b) 목차 1

제 2 장 시공 매뉴얼	36
제 1 장 총칙	36
1. 감사 확립 사항	36
2. 제도사항	39
3. 시공사항	41
제 2 장 시공	40
1. 시공계획서	40
2. 계약관리요령	42
3. GeoTube시공	43
가. 시공의 특성 관리 기준	43
나. 시공의 시방 기준	44
4. 시공요령	45
5. 시공	46
6. 시공시 주의사항	58

(c) 목차 2

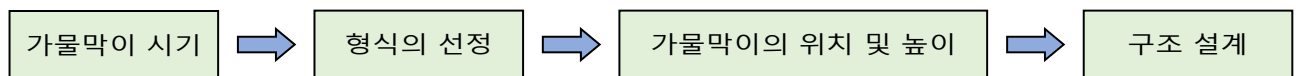
[그림 2-137] 신소재 가물막이 설계 및 시공 매뉴얼

2.11.1 신소재 가물막이 설계 매뉴얼

대부분의 내용은 앞에서 제시한 내용들을 참고하여 작성되었으며, 보고서에 작성되지 않은 부분도 있다. 다음 내용은 설계 매뉴얼 중 가물막이 설계 프로세스 및 설계시 고려사항에 대한 내용은 다음과 같다.

가. 가물막이 설계 프로세스

기존 가물막이 설계 프로세스는 가물막이는 효과적인 유수전환을 위해 합리적이고 경제적인 조합이 되도록 계획되어야 한다. 적합한 가물막이의 형상, 높이, 시기, 단면은 하천유량, 지형, 하천경사, 하상퇴적물의 깊이와 종류, 시공기간 및 가물막이 재료 등을 고려하여 결정한다. 일반적인 가물막이 설계 프로세스는 아래와 그림과 같다.



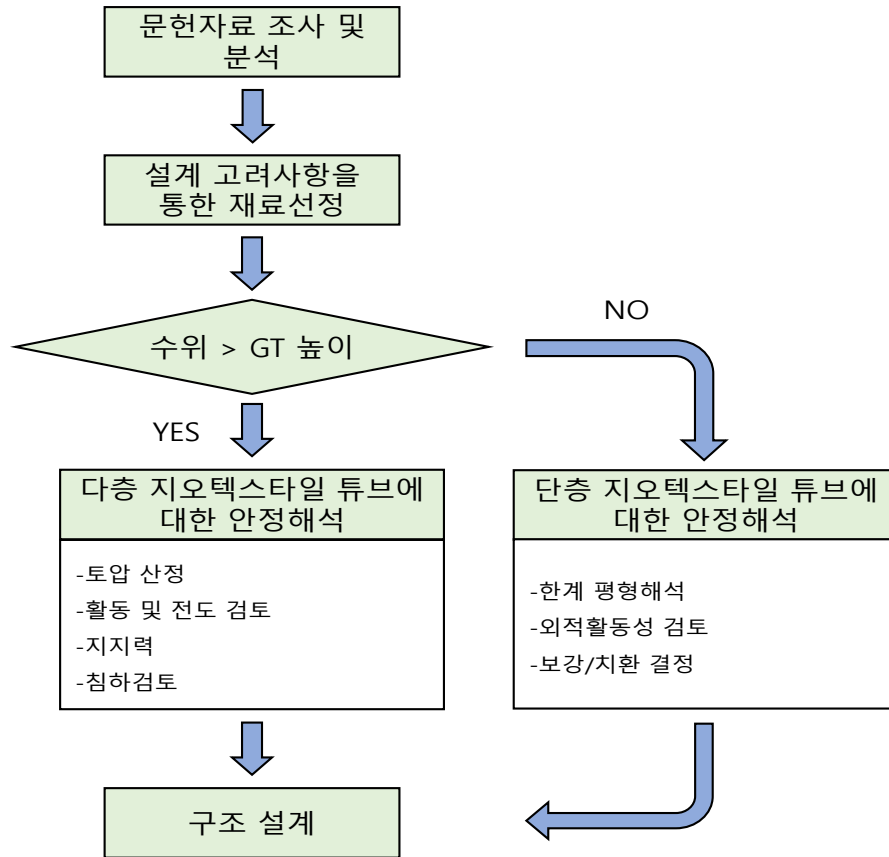
[그림 2-138] 일반적인 가물막이 설계 프로세스

가물막이 시기는 장기간 동안 갈수가 예상되는 시기를 택하는 것이 좋으며, 시공계획을 신중히 검토하여 가물막이 공사의 공기를 단축할 수 있어야한다. 가물막이 형식의 선정은 지형, 지질, 하상의 상황, 홍수유량, 공사의 규모 등을 고려해서 경제적이고 안전한 것을 선정해야 하며, 가물막이의 형식에 전면 물막이, 반물막이, 상류 가물막이와 하류 가물막이, 필댐 형식의 가물막이로 구분된다.

가물막이의 위치 및 높이 결정에 있어서 일반적인 사항을 열거하면 첫째 가물막이의 위치는 기존의 댐에 지장이 없어야 하며, 설치를 위해 작업공간이 충분히 확보된 곳으로 선정해야한다. 둘째 가물막이의 높이는 상·하류측 수위를 기준으로 해서 결정해야 한다.

가물막이의 구조 설계에 관한 일반 사항은 첫째 홍수시의 월류에 의해서 쉽게 파괴되지 않는 구조여야 하며, 둘째 가물막이가 댐 본체의 일부가 되는 경우에는 본체와 같은 정도로 정밀한 시공이 필요하다.

지오텍스타일 튜브를 이용한 가물막이 설계 및 시공 프로세스에 대한 설계 기준 및 시방서는 없으며, 따라서, 지오텍스타일 튜브를 이용한 가물막이 설계 순서는 해외 및 국내 설계사례를 참고하여 아래와 같이 제안한다.

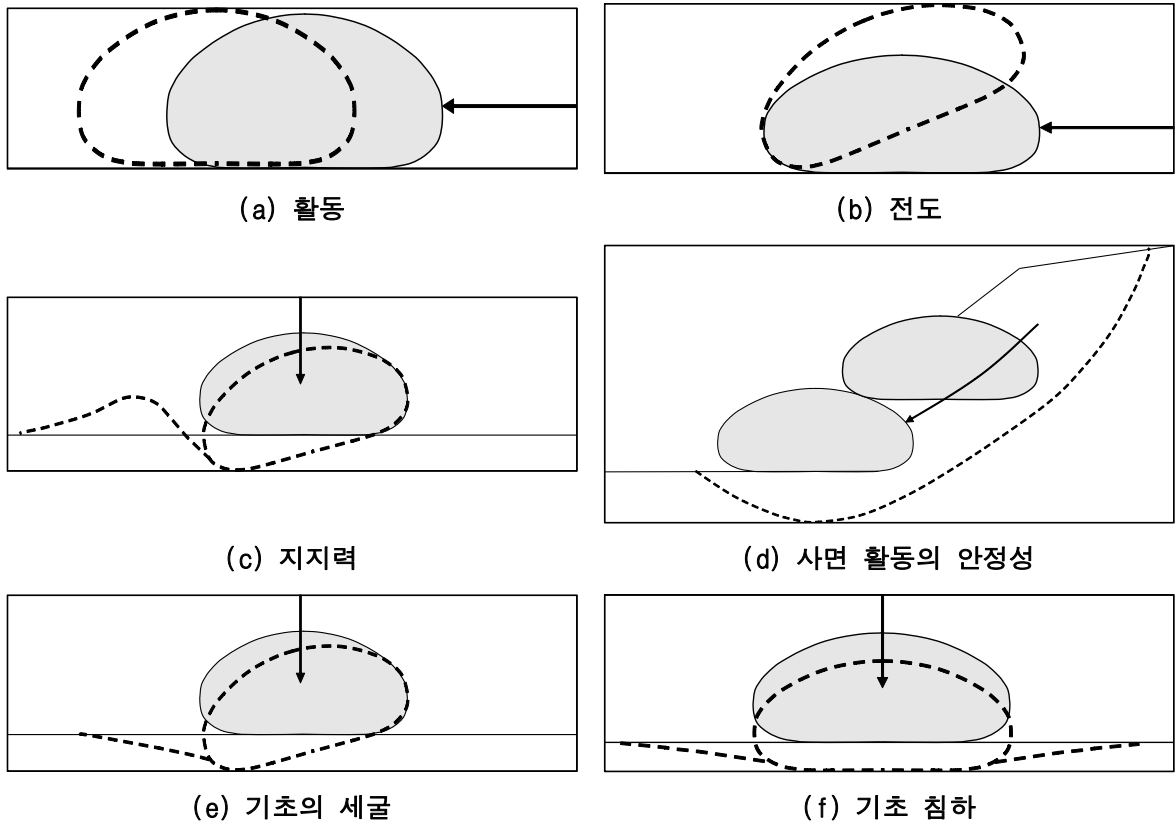


[그림 2-139] 지오텍스타일 튜브를 이용한 가물막이 설계 프로세스

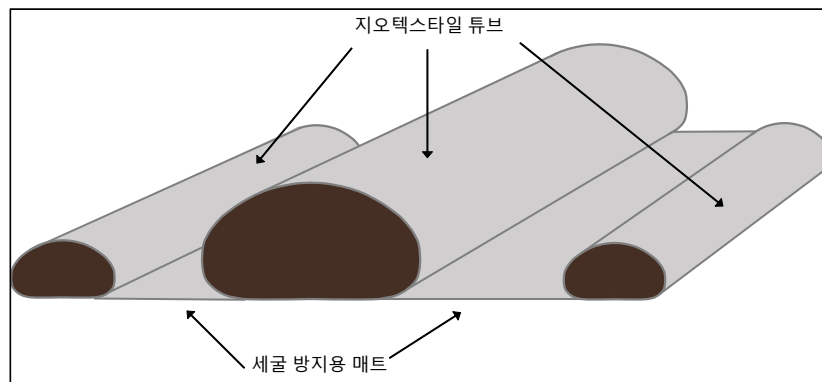
나. 지반신소재를 적용한 가물막이 설계시 검토 및 고려사항 제공

지오텍스타일 튜브는 중력식 구조체로 거동하는 것으로 고려하여 한계상태 설계법을 이용하며, 한계상태 설계법의 평가항목은 아래와 같이 외부인자 및 내부인자로 구분할 수 있다. 외부인자 평가항목으로 활동, 전도, 지지력, 사면활동에 대한 안정성, 기초의 세굴, 기초 침하로써 총 6가지 있다.

활동 및 전도의 경우 지오텍스타일 튜브는 높이에 비해 지반에 접촉되는 폭이 큰 형상을 나타내므로 구조적으로 안정적이다. 따라서 활동 및 전도에 대한 안정성 점검이 필요하며, 직경이 2 m보다 작은 경우에는 반드시 점검해야할 요소이다. 지지력은 연약지반 위에 지오텍스타일 튜브가 시공되거나, 다층으로 조성된 경우 설계시 고려할 항목이다. 사면활동에 대한 안정성은 성토 사면의 표면을 보호하기 위하여 다층의 지오텍스타일 튜브가 사용될 때 고려해야할 사항이며, 다층으로 조성된 지오텍스타일 튜브 구조물의 외부 수위와 지하수 수위의 변화를 모두 고려해야 한다. 또한 인접한 지오텍스타일 튜브 사이의 잠재적인 취약면을 평가해야 한다. 기초의 세굴은 지오텍스타일 튜브가 배치된 가장자리 부근의 지반이 침식되어 전도가 발생할 수 있다. 이에 채움재 충전 및 배치 후 세굴을 방지하기 위하여 필터매트를 설치하여야 하며, 필터매트가 수류에 쓸려가는 것을 방지하기 위하여 소형 지오텍스타일 튜브의 배치될 수 있도록 한다.

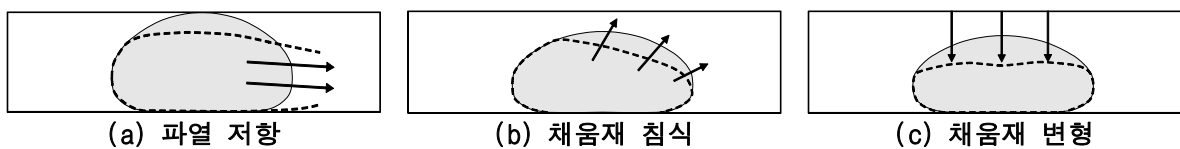


[그림 2-140] 지오텍스타일 설계 시, 외부인자 평가항목



[그림 2-141] 세굴 방지용 필터매트의 적용 예

지오텍스타일 설계시 내부인자 평가항목으로 표면 파열 저항, 채움재 침식, 채움재의 변형이 존재한다.



[그림 2-142] 지오텍스타일 설계 시, 내부인자 평가항목

다. 지오텍스타일 튜브의 안정성 분석

설계시 2차원 평면해석을 기본으로 하며, 길이방향에 직각방향만을 고려하는 2차원 평면변형상태이며, 지오텍스타일 튜브의 표면은 얇으므로 평균길이 당 단위중량은 무시한다. 또한 채움재로 채워진 지오텍스타일 튜브 내부는 수리학적 응력상태로 존재하며, 채움재와 지오텍스타일 튜브 내부의 전단응력은 발생하지 않음을 가정하고 안정성 분석을 실시한다.

지오텍스타일 튜브의 활동과 전도에 대한 안정성을 산정하는 식은 아래 식을 참고한다.

$$SF_{(활동)} = \frac{F}{P_h} = \frac{P_v \times \tan\phi'}{P_w \times h_{GT}} \quad \text{식 (2)}$$

여기서, P_h 는 수평력, F 는 수직력, P_v 는 상재하중과 지오텍스타일 자중에 의한 수직력, P_w 는 저수위에 의한 수압, h_{GT} 는 지오텍스타일 튜브 충전 후 높이, ϕ' 는 기초지반과 지오텍스타일 튜브의 포화시 접촉마찰각을 나타낸다.

$$SF_{(전도)} = \frac{M_R}{M_o} = \frac{P_v \times \frac{B'}{2}}{P_w \times \frac{h_{GT}}{2}} \quad \text{식 (3)}$$

여기서, M_R 는 저항모멘트, M_o 는 전도모멘트, P_w 는 저수위에 의한 수압, h_{GT} 는 지오텍스타일 튜브 충전 후 높이, P_v 는 상재하중과 자중에 의한 수직력, B' 는 지오텍스타일 튜브의 등가 직사각형 폭을 나타낸다.

지오텍스타일 튜브의 지지력에 대한 안정성을 산정하는 식은 아래와 같다.

$$SF_{(지지력)} = \frac{Q_u}{Q_a} = \frac{cN_c + \left(\frac{1}{2}\right)\gamma' B' N_\gamma}{\frac{F}{B' - 2e'}} \quad \text{식 (4)}$$

$$e' = \frac{P_w \times h_{GT}}{3F} \quad \text{식 (5)}$$

여기서, Q_u 는 하부지반의 극한 지지력, Q_a 는 허용 지지력, c 는 점착력, N_c , N_γ 는 포화 시 내부마찰각에 따른 지지력 계수, γ' 는 하부 기초지반의 수중단위중량, B' 는 수압에 의한 편심거리를 나타낸다.

이외의 항목의 내용에 대해서는 본 보고서의 내용과 중복되어 생략한다. (자세한 내용은 별첨을 참고하기 바란다.)



2.11.2 신소재 가물막이 시공 매뉴얼

대부분의 내용은 앞에서 제시한 내용들을 참고하여 작성되었으며, 보고서에 작성되지 않은 부분도 있다. 다음 내용은 시공 매뉴얼 중에서 시공 및 해체 프로세스 및 공법, 장비의 조합 결정방법은 다음과 같다.

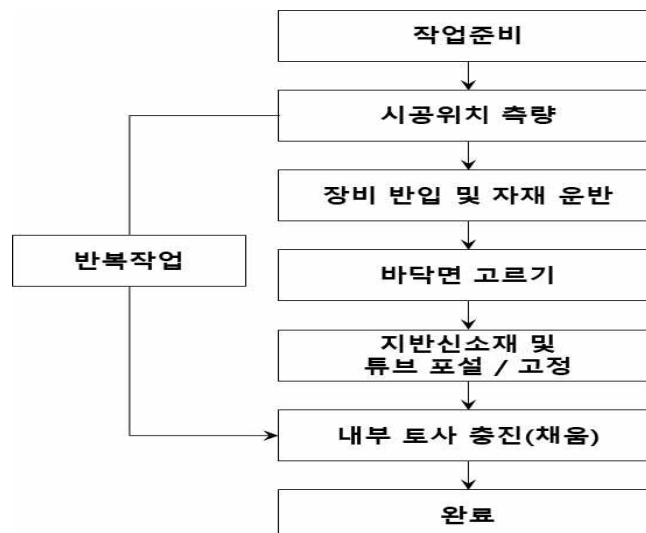
가. 지오텍스타일 튜브 시공 및 해체프로세스

지오텍스타일 튜브 시공은 크게 2가지 공법으로 구분된다. 펌프를 이용하여 직접 주입하는 가압식 주입식 시공방법과, 펌프 또는 굴착기 등을 이용해서 중력 호퍼 채움재를 넣고 자연 중력에 의해서 주입되는 중력 주입식 공법으로 구분된다. 아래 표는 시공공법의 장·단점을 비교한 표이다.

[표 2-70] 지오텍스타일 튜브 시공공법 비교

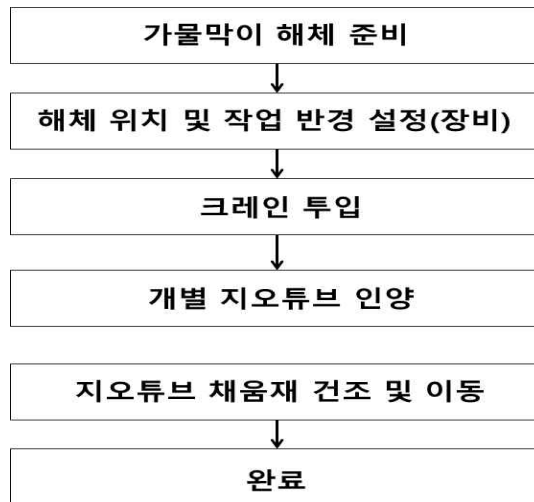
구분	가압 주입식 시공	중력 주입식 시공	비고
사진			
시공 방법	· 호퍼 또는 수조에 물과 골재를 혼합 후 펌프압력을 이용해 지오텍스타일 튜브에 채움재를 주입하는 방법	· 호퍼에 물과 채움골재를 동시에 넣고 중력으로 지오텍스타일 튜브에 채움재를 주입하는 방법	
장점	· 빠른 시공 및 공기단축 가능 · 압력으로 충분한 채움재 주입가능 · 설계 높이 형성에 유리 · 적합한 물, 골재 비율 유지 가능	· 단순한 장비 조합으로 손쉬운 시공 · 상대적으로 낮은 현장사고 발생위험	
단점	· 압력 발생으로 봉합부 파손우려 · 지오텍스타일 튜브 원단물성 및 크기, 현장 여건에 따른 장비(펌프) 용량 산정 필요	· 상대적으로 더딘 시공 · 압력이 없어 충분한 높이 형성에 불리 · 물, 골재 비율 조절에 불리 · 주입관 막힘 우려	

지오텍스타일 튜브 공법의 시공순서는 소요자재 및 인력, 중장비 확보 등 시공성 등을 확보하고 다음과 같은 시공프로세스에 따라 시공한다.



[그림 2-143] 지오텍스타일 튜브 시공프로세스

지오텍스타일 튜브 해체 시는 장비를 이용한 해체 공법으로 이 사용된다. 해체시 지오투브 안의 충전물의 경우 물을 머금고 있는 상태이며, 일반적으로 20%이상의 무게 증가가 된다. 지오텍스타일 튜브 공법의 해체순서는 다음과 같은 시공프로세스에 따라 해체한다.



[그림 2-144] 지오텍스타일 튜브 해체 프로세스

지오텍스타일 튜브 해체 시 나온 채움재는 튜브 내에 있어 이송 및 재활용이 용이하다.

나. 지오텍스타일 튜브 시공 및 해체 장비 조합 선정

지오텍스타일 튜브 공법 시공 및 해체를 위한 장비는 다음과 같이 구성된다.

[표 2-71] 지오텍스타일 튜브 공법 시공 및 해체 장비

구분	사진	내용
굴착기		<ul style="list-style-type: none"> · 용적 : 08급 이상 (버킷 용도 : 0.86m³) · 용도 : 장비 설치 및 충전물 주입 지오텍스타일 튜브 사용
중력식 호퍼		<ul style="list-style-type: none"> · 용적 : 5m³ 이상 · 용도 : 지오텍스타일 튜브 내 충전물 주입용
주입관(호스)		<ul style="list-style-type: none"> · 직경 150 ~ 300mm · 용도 : 지오텍스타일 튜브 내 충전물 주입용

구분	사진	내용
주입펌프		<ul style="list-style-type: none"> · 토출량 : 80m³/h이상 · 용도 : 지오텍스타일 튜브 내 충전물 주입용
발전기		<ul style="list-style-type: none"> · 용량 : 30 kW 이상 · 용도 : 주입펌프 발전용
크레인		<ul style="list-style-type: none"> · 용량 : 300ton 급 크롤러 크레인 · 용도 : 지오텍스타일 튜브 해체 인양시 사용

지오텍스타일 튜브 크기에 따른 수처리 용량 및 골재량 산정하여 장비를 조합하여야 한다. 글로벌 선도업체 자료를 바탕으로 설치 계획한 지오텍스타일 튜브의 수처리 물량 및 채움골재 물량 산정하였다.

[표 2-72] 지오텍스타일 튜브 규격에 따른 수처리 물량 및 채움골재 물량 자료

지오텍스타일 튜브 크기			설계			수처리 물량			채움골재 물량			비고
둘레 (m)	직경 (m)	길이 (m)	높이 (m)	폭 (m)	폭/높이 (%)	1기당 (m ³ /h)	단위길이당 (m ³ /h/m)	단위면적당 (m ³ /h/m ²)	1기당 (m ³)	단위길이당 (m ³ /m)	단면비율 (m ³ /m ²)	
3.8	1.2	40.0	0.6	1.1	180.0	45.2	1.1	0.3	34.9	0.9	0.8	글로벌 선도업체 자료를 기준으로 산정
6.9	2.2	7.9	1.5	2.7	180.0	19.1	2.4	0.4	22.9	2.9	0.8	
9.1	2.9	15.2	1.8	3.7	200.0	73.4	4.8	0.5	81.8	5.4	0.8	
9.1	2.9	27.4	1.8	3.7	200.0	134.6	4.9	0.5	148.3	5.4	0.8	
12.2	3.9	30.5	2.1	4.9	228.6	247.7	8.1	0.7	275.2	9.0	0.8	
13.7	4.4	30.5	2.1	5.8	271.4	289.0	9.5	0.7	321.1	10.5	0.7	
15.2	4.9	30.5	2.1	6.4	300.0	330.3	10.8	0.7	367.0	12.0	0.7	
18.3	5.8	30.5	2.3	7.9	346.7	440.4	14.4	0.8	489.3	16.1	0.6	
22.9	7.3	30.5	2.4	10.1	412.5	605.5	19.9	0.9	672.8	22.1	0.5	
24.4	7.8	30.5	2.4	11.0	450.0	688.1	22.6	0.9	764.6	25.1	0.5	
27.4	8.7	30.5	2.6	12.5	482.4	794.4	26.1	1.0	879.2	28.8	0.5	

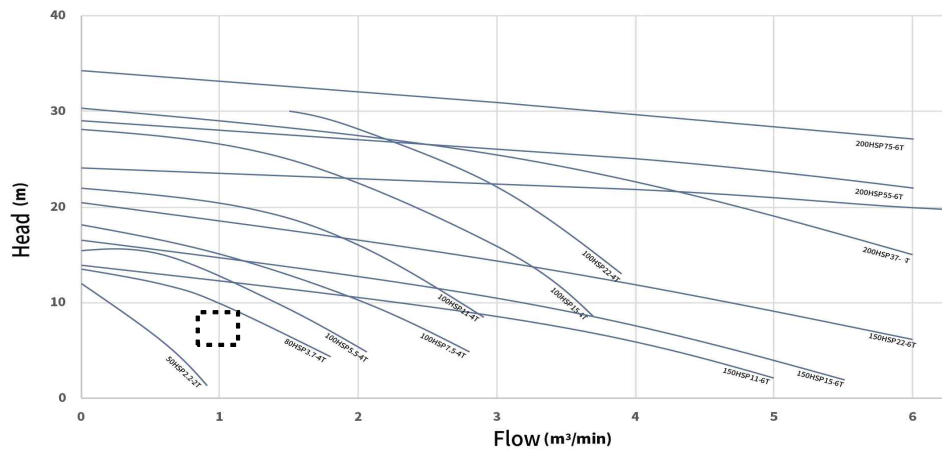
선도업체 자료에 따르면 지오텍스타일 튜브 단면이 작아질수록 지오텍스타일 튜브 단위면적당 수처리 물량이 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 동등한 투수성능으로 설계한 당사 원단을 사용해 만든 지오텍스타일 튜브 역시 유사한 경향을 보일 것으로 판단된다. 설치 계획한 지오텍스타일 튜브의 크기를 고려해 지오텍스타일 튜브 단위면적당 수처리 물량을 $0.3\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ 로 설정하였으며 설치 계획한 지오텍스타일 튜브 1기가 배수 가능한 물량은 시간당 $45.2\text{m}^3/\text{h}$ 이다.

지오텍스타일 튜브 단면을 둘레를 기준으로 원형으로 가정하고 시공 후 채움골재 단면을 원형과 비교했을 때 비율(시공후 단면/원형단면)은 지오텍스타일 튜브 단면이 작을수록 커지는 경향을 보이며, 이에 설치 계획한 지오텍스타일 튜브의 크기를 고려해 채움골재 물량을 추정하면 지오텍스타일 튜브 1기당 약 34.9m^3 의 골재가 필요할 것으로 예상된다.

총 6기의 지오텍스타일 튜브 시공을 위해 209.4m^3 의 자연상태 골재 필요하다. 골재의 흐트러진 상태에서 체적변화할증 및 시공할증(모래질 흙 1.3 및 시공할증 1.1)을 고려하여 약 300m^3 의 골재소요가 예상된다.

펌프산정시 주입량을 추정하며 일반적인 지오텍스타일 튜브 시공 시 적용하는 골재(골재+물)비율(0.15:1)을 적용해 시간당 주입량을 산정하면 $53.2\text{m}^3/\text{h}$ (물 $45.2\text{m}^3/\text{h}$ + 골재 $8.0\text{m}^3/\text{h}$)이다.

토목 공사에 사용하는 샌드펌프 제원을 바탕으로 설치 계획한 지오텍스타일 튜브 시공은 아래 그림의 파란 점선 구간이 될 것으로 예상된다.



[그림 2-145] 수중샌드펌프 용량 및 양정에 따른 토출량

	D	HP	H(m)	Q(m ³ /min)	RPM	V
50HSP2.2-2T	Ø50	3	12	0.25	3600	
80HSP3.7-4T	Ø80	5	10	1.0		
100HSP5.5-4T		7.5	10	1.4		
100HSP7.5-4T		10	15	1.0		
100HSP11-4T	Ø100	15	20	1.2	1800	
100HSP15-4T		20	25	1.5		
100HSP22-4T		30	30	1.5		
150HSP11-6T		15	8			220
150HSP15-6T		20	10		1200	380
150HSP22-6T	Ø150	30	15	3.2		440
150HSP37-4T		50	25		1800	
200HSP37-6T		50	15			
200HSP55-6T	Ø200	75	22	6.0	1200	
200HSP75-6T		100	27			
250HSP75-8T	Ø250	100	18	10.0	900	

[그림 2-146] 수중샌드펌프 용량별 토출량

펌프 사용 환경 및 펌프제원을 바탕으로 5마력, 최대양정에서 토출량 1.0m³/min 선정하였다.

주입량 추정에서 소운반이 필요한 골재량은 8.0m³/h 이며, 버킷 0.2m³ 용량의 소형 굴착기가 골재 약 25.0m³/h 소운반 가능(품셈 뒤채움 기준)하다.

따라서 장비조합은 공기산정을 고려하여 총 300m³의 골재를 주입해야 하며, 펌프 1대의 토출량을 고려한 시간당 골재 주입물량은 8.0m³/h. 순수 주입 시간은 37.5시간, 지오텍스타일 튜브 1기당 6.25시간이다. 준비 및 정리 시간을 고려해 5마력 펌프 1대 사용 시 지오텍스타일 튜브 1기 시공에 1일 소요되며 실시공 총 6일 소요된다. 인원/장비동원 및 철수 각 1일을 더해 총 공기 8일이 예상된다.

최종 장비조합은 펌프 및 굴착기 제원을 기준으로 5마력 펌프 2기 + 2.0m³ 굴착기 1기로 설치 계획한 지오텍스타일 튜브 6기 설치 시 가장 효율적일 것으로 예상하며 이때 공기는 실시공 3일이며, 인원/장비 동원 및 철수 각 1일로 총 5일이 예상된다.

이외의 항목의 내용에 대해서는 본 보고서의 내용과 중복되어 생략한다.

2.12 실대형 현장 실험

본 연구에서는 현장 실험 수준의 규모를 갖추기 위하여 토조를 제작하였으며(2.2m(W)x 2.2m(H)x6m(L)) 외부 영향을 최소화한 실규모 실험을 진행하였다. 경제적인 여러 형태의 실험군 비교를 통해 지오텍스타일 튜브의 차수 성능 평가를 검증하는 것을 목표로 한다. 3개의 실험군 (흙제방, 지오텍스타일 튜브, 결합재를 적용한 지오텍스타일 튜브)에 대한 차수성능을 비교·검토하며 월류 시 가물막이에 대한 안정성 검토를 동시에 수행하였다. 이를 정리하면 다음 표와 같다.

[표 2-73] 실대형 현장 실험 목표

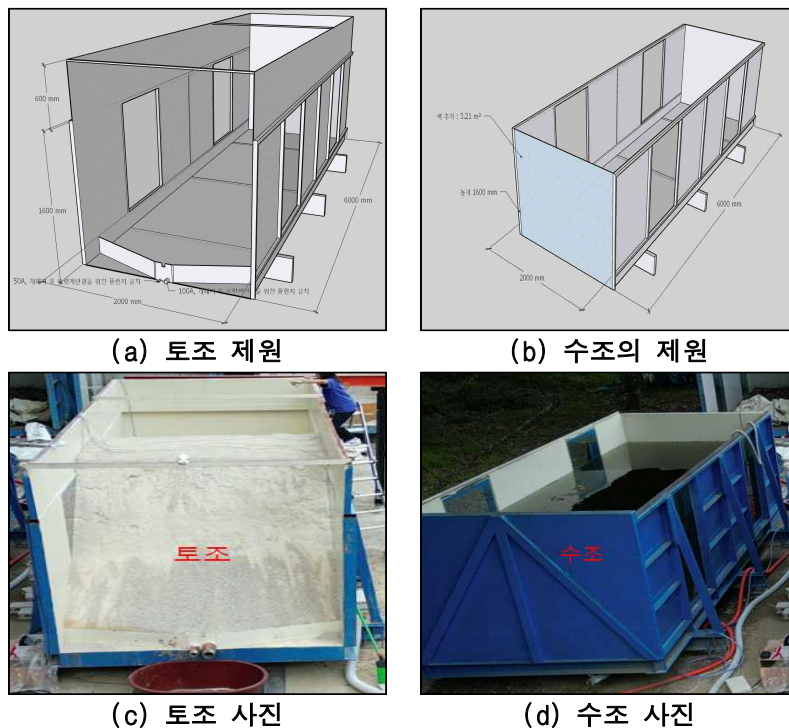
구 분		비 고
실험 목적	실험 조건	
차수성능 비교	흙 제방	시공공법 검증 병행
	지오텍스타일 튜브	
	결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브	
월류 시 가물막이 안정성 검토	흙 제방	시공공법 검증 병행
	지오텍스타일 튜브	
	결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브	

또한 지오텍스타일 튜브 및 결합재의 시공방법에 대한 검증도 병행 실시하였다.

2.12.1 실험 준비

가. 실험 토조 및 수조

토조는 침투시험을 위한 실험체 세팅에 사용하고, 수조는 토조 배면에 원활한 물을 공급하기 위해 미리 물을 저장하는 용도로 사용한다.



[그림 2-147] 토조 및 수조

나. 믹싱 탱크

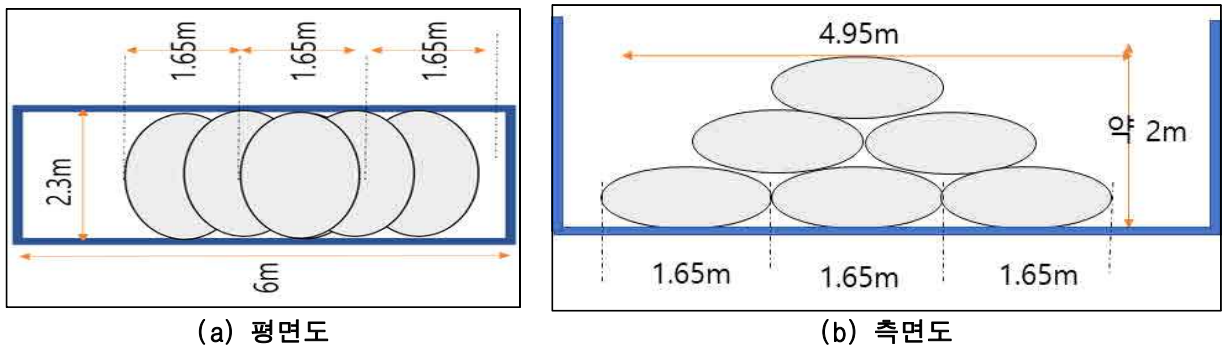
지오텍스타일 튜브 시공시 채움재와 물의 배합비를 1:3 으로 혼합하여 펌핑 할 수 있도록 4개의 전기 드릴믹서를 네 모서리부분에 달 수 있도록 탱크를 준비하였다.



[그림 2-148] 믹싱 탱크

다. 지오텍스타일 튜브

실험에 사용된 지오텍스타일 튜브의 재질은 폴리프로필렌(PP)를 사용하였으며, 지오텍스타일 튜브는 실험토조의 폭 2.2m, 길이 6.0m, 높이 2.2m에 3단 적층 높이를 고려하여 하며, 지오텍스타일 튜브 크기는 배치 크기를 고려하여 제작되었으며, 주입구는 최소 박음질 크기를 고려하여 중앙에 지경 30cm로 제작되었다.



[그림 2-149] 지오텍스타일 튜브 배치도

[표 2-74] 지오텍스타일 튜브 제원

총길이	250cm
마감부 길이	25cm
폭	200cm
주입구 위치	중앙
주입구 직경	30cm
재질	Polyester
신율	15%



라. 채움재

선행연구를 기반으로 규사를 혼합하여 사용하였으며, 다음과 표와 같은 혼합비를 사용하였다.

[표 2-75] 규사 종류 및 혼합비율

입경(mm)	생산지	중량비	비고
9.5~4.75	광명소재 1호사	42.5%	
4.75~2	광명소재 2호사	6.5%	
2~0.84	광명소재 3호사	31%	
0.84~0.25	광명소재 6호사	10.5%	
0.25~0.106	광명소재 7호사	2%	
0.106~0.075	광명소재 8호사	7.5%	
계		100%	

지오텍스타일 튜브 채움재 및 흙제방에 사용되는 규사는 동일한 혼합비로 사용하였으며, 지오텍스타일 튜브 채움 시 굴착기를 통해 혼합된 혼합규사를 4개의 믹서가 달려있는 토조에 넣어 채움재와 물의 배합비를 1:3 으로 혼합하여 사용하였다. 흙제방의 경우 굴착기를 통해 혼합된 혼합규사를 사용하였다.



(a) 규사 모습



(b) 규사 혼합 모습

[그림 2-150] 규사 및 혼합모습

마. 결합재

시공된 지오텍스타일 튜브 사이의 빈 공간을 채우기 위한 결합재로 선행연구에서 사용된 CLSM 배합비를 사용하였다.

[표 2-76] 결합재 종류 및 혼합비율

구분	제품	배합비(%)
Cement	초속경 시멘트 QP600	16.422
Fly ash	맥스콘 소재	12.3
Sand	광명소재 규사 6호사(32.9%), 8호사(12.3%) 사용	45.2
Accelerator	유림씨엔시 액상지수제	0.986
Water	약 15℃, 수돗물 사용	25.1



(a) Cement



(b) Fly ash



(c) Sand



(d) Accelerator

[그림 2-151] 결합재 종류별 모습

바. 채움재 주입펌프

지오텍스타일 튜브 안에 채움재를 주입할 수 있도록 이송할 수 있는 펌프 선정하였으며, 모의실험을 통해 필요한 주입펌프 선정(오수용 슬러리 펌프 중 3마력 이상 필요) 하였다. 2마력 미만의 경우 채움재가 원활한 이송이 되지 않는다.

[표 2-77] 채움재 주입펌프 제원

모델명	GD-2200I	
출력	2.2KW/3HP	
정격전압	AC 380V	
정격전류	5.4A	
상/주파수	삼상/60Hz	
최대양정	20M	
최대유량	300L/min	
토출관	80mm	


사. 물공급 펌프

믹싱 탱크 및 배면 배면에 물을 채울 때 사용하며, 율류 실험 시 많은 양의 물을 공급 시 사용하였다. 실험 중 침사지에서 물 수조로 물을 이송할 때 사용한다.


[표 2-78] 물공급 펌프 1 (수조에서 믹싱탱크) 제원

모델명	GD-1505MA	
출력	1.5kW/2HP	
정격전압	AC 220V	
상/주파수	단상/60Hz	
최대양정	21M	
최대유량	550L/min	
토출관	80mm	

[표 2-79] 물공급 펌프 2 (수조에서 배면) 제원

모델명	TAGS-755(A)	
출력	750W/1HP	
정격전압	AC 220V	
상/주파수	단상/60Hz	
최대양정	18M	
최대유량	240L/min	
토출관	65mm	

[표 2-80] 물공급 펌프 3 (침사지에서 수조) 제원

모델명	SP-1950A	
출력	1.5kW/2HP	
정격전압	AC 220V	
상/주파수	단상/60Hz	
최대양정	22M	
최대유량	490L/min	
토출관	50mm	

아. 기타 물공급 배관 및 부속품

50m, 65m, 80m 크기의 펌프에 맞는 투명 주름배관, 호수밴드 및 캡록 등이 있다.



(a) 투명 주름배관



(b) 호수밴드




(c) 캡록

[그림 2-152] 물공급 배관 및 부속품

자. 교반기(전기 드릴믹서)

믹싱탱크의 네 모서리 부분에 고정하여, 지오텍스타일 튜브 채움재와 물을 교반할 때 사용한다.


[표 2-81] 교반기 제원

모델명	D-23	
출력	1,150W	
정격전압	AC 220V	
상/주파수	단상/60Hz	
RPM	500회/min	

차. 압력트랜스미터

흙제방 실험체 내에 압력변화를 실시간으로 측정하며, 누전방지를 위해 테이핑 및 방수스프레이 도포하여 설치하였다.



[표 2-82] 압력트랜스미터의 제원

모델명	PR-23 RY	
Pressure ranges	0~5 bar	
Analog output	4~20 mA	

카. 레이저 스캐너

레이저 스캐너를 이용하여 3차원 변위를 측정할 수 있다.


[표 2-83] 레이저 스캐너의 제원 및 출력 결과물

모델명	BLK360		
레이저 측정 원리	Pulse		
파장(nm)	830		
최소 측정거리(m)	0.6		
최대 측정거리(m)	60		
측정 오차(mm)	±6		
최대 측정각 (수직)	300		
최대 측정각 (수평)	360		
최대 측정 Rate(kHz)	360		
최소 스캐닝 시간 (min)	4		

타. 로드셀

누적된 누수의 무게를 시간당 유량 측정 할 수 있다.


[표 2-84] 로드셀 및 디지털인디케이터 제원

모델명	CBFSA-300			
정격용량(R.C.)	300kg			
정격출력(R.O.)	1.0±0.01mV/V			
인가전압	3~5V			
허용과부하	150%			
모델명	BS-105-4			
로드셀 인가전압	DC5V, 60mA			
입력신호범위	0mV~30mV			
입력노이즈	±0.3 μVpp 이하			
Analog output	DC 0 ~ 10V			

파. DAQ(Data acquisition) Device

로드셀 및 압력트랜스미터에서 얻은 값을 PC에 저장할 수 있는 데이터로거를 사용하였다.


[표 2-85] DAQ Device의 제원

모델명	DEWE-43A	
채널수	8	
입력	전압, 풀 브리지	
샘플링 속도	동시 200kS/sec	
전압 범위	$\pm 10V.$, $\pm 1V$, $\pm 100mV$ $\pm 10mV$	
전원	DC 9~36V	


하. 드론과 CCTV

실험시 영상 취득시 사용하였다.

[표 2-86] 드론의 제원

모델명	DJI MINI 3 PRO	
동영상 화질	최대 4K/60fps	
사진 화질	48MP JPEG	
최대 전송거리	12km	

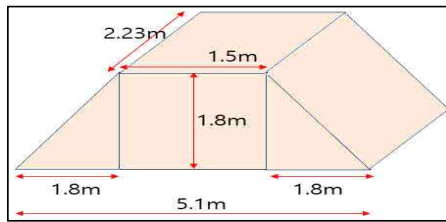
[표 2-87] CCTV 제원

모델명	HNO-E60	
화질	1080p Full HD	
디지털줌	4배(모바일)	
광학렌즈 각도	110°	
IR 가시거리	12m	
네트워크	Wi-Fi	
전원	DC 5V	

2.12.2 실험체 시공

가. 흙제방

시공할 실험체 흙제방의 제방고 1.8m, 제방저폭 5.1m, 마루폭 1.5m, 제방길이 2.23m이다.



(a) 제방 제원 설명도



(b) 실제 시공 제방 모습

[그림 2-153] 시공할 제방 제원 및 모습

시공순서는 다음과 같다.

토조 벽면에 제방제원에 맞게 마킹(a) → 굴착기를 통해 혼합할 규사와 물을 다짐 함수비에 맞게 혼합 실시(b) → 굴착기로 혼합규사 토조에 투하(c) → 높이 30cm 간격으로 모양 및 다짐 작업 실시(d) → 다짐작업 실시 후 현장밀도시험을 위한 시료 채취(현장밀도시험을 통한 다짐도 계산)(e) → 압력트렌스미터 설치(f)한다. 이후 (b)~(f)를 반복하여 제방높이(1.8m)까지 시공하였다. 아래 그림은 시공순서를 나타낸다.



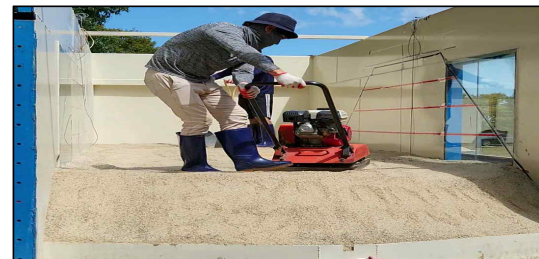
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

[그림 2-154] 제방 시공 순서에 따른 모습

나. 지오텍스타일 튜브

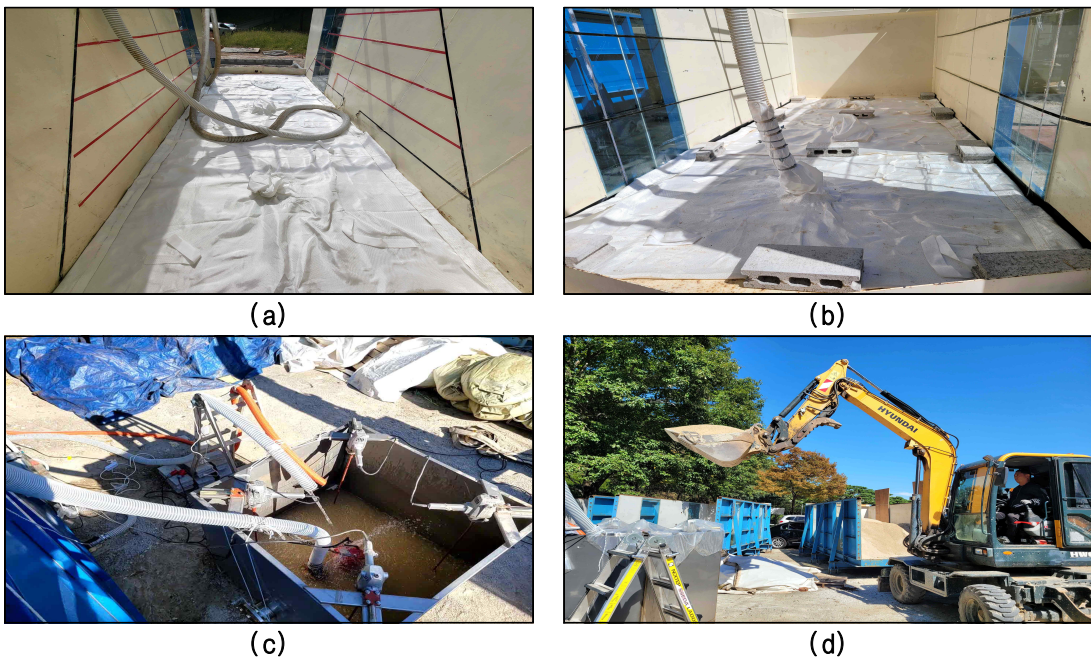
지오텍스타일 튜브 안에 채움재 시공은 펌프를 통한 다이렉트 주입 방법으로 실시하였다. 시공은 다음 그림과 같이 물은 순환하도록 되어있으며, 채움재는 믹싱탱크에서 펌프를 통해서 지오텍스타일 튜브 안에 채운다.



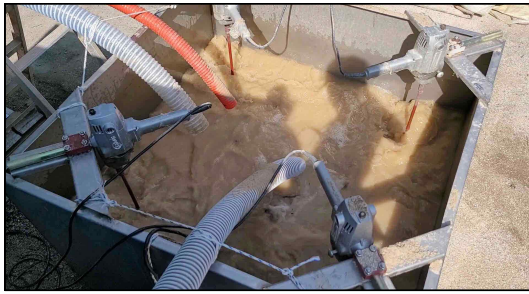
[그림 2-155] 지오텍스타일 튜브 시공시 재료별 동선 및 개략도

시공순서는 다음과 같다.

토조에 지오텍스타일 튜브 배치 및 움직이지 않게 고정(a) → 주입할 지오텍스타일 튜브 주입구를 주입배관에 고정(b) → 믹싱탱크에 물 주입(물공급 펌프 사용) 및 교반기 작동(c) → 굴착기를 통해 혼합된 규사를 믹싱탱크에 투하(d) → 일정시간 교반 후 채움재 공급펌프 가동(e) → 주입배관을 통해 지오텍스타일 튜브 안에 채움재 공급(f) → 초기 주입 (g) : 초기 주입은 지오텍스타일 튜브가 평평하게 퍼질 수 있도록 위치를 조정하며 작업을 수행 → 채움 작업(h) : 목표 높이까지 채움재 채움 → 주입호수 분리 후 주입구 봉합(입도분포 확인을 위한 시료 채취 후)(i) → 배수작업(j) (1차 배수는 1시간 30분 이상 실시)을 실시한다. 이후 (b)~(j)까지 작업을 반복하여 다른 지오텍스타일 튜브도 시공하였다.



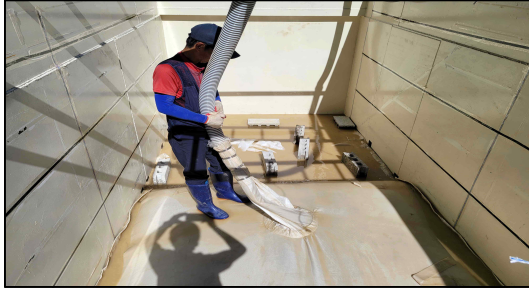
[그림 2-156] 지오텍스타일 튜브 시공 순서에 따른 모습 <계속>



(e)



(f)



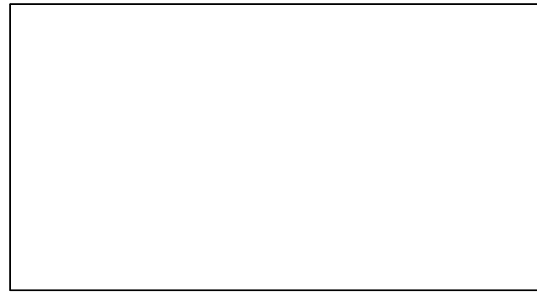
(g)



(h)



(i)



(j)

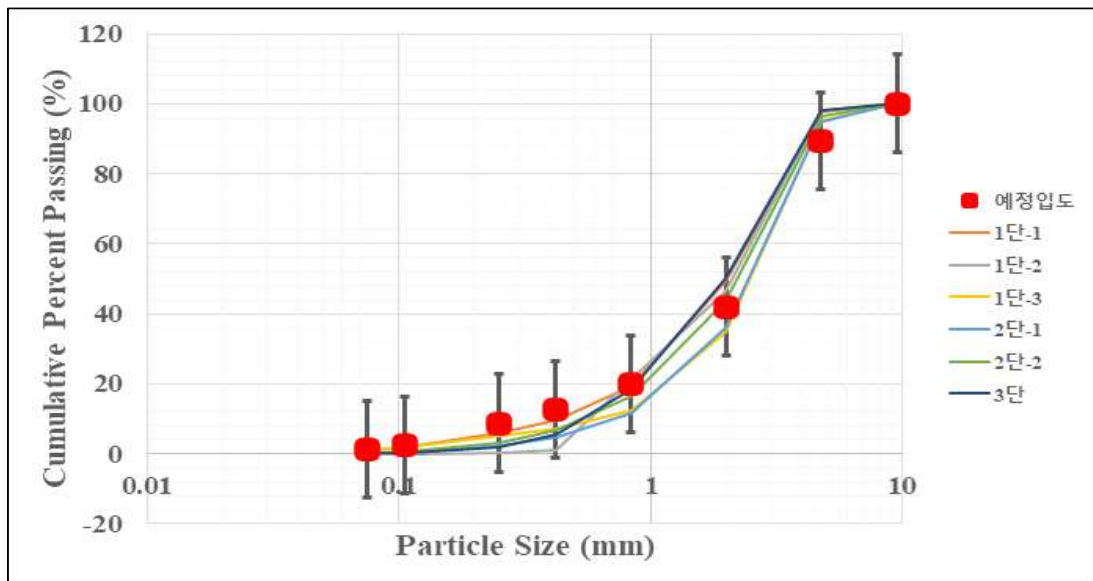
[그림 2-155] 지오텍스타일 튜브 시공 순서에 따른 모습 <계속>

시공된 지오텍스타일 튜브의 모습 및 입도분포 결과는 다음과 같다.



각 지오텍스타일 튜브 별 위치 및 명칭(입도분포 결과 확인 위함)

[그림 2-157] 지오텍스타일 튜브 시공모습



[그림 2-158] 시공된 지오텍스타일 튜브의 입도분포 결과 그래프

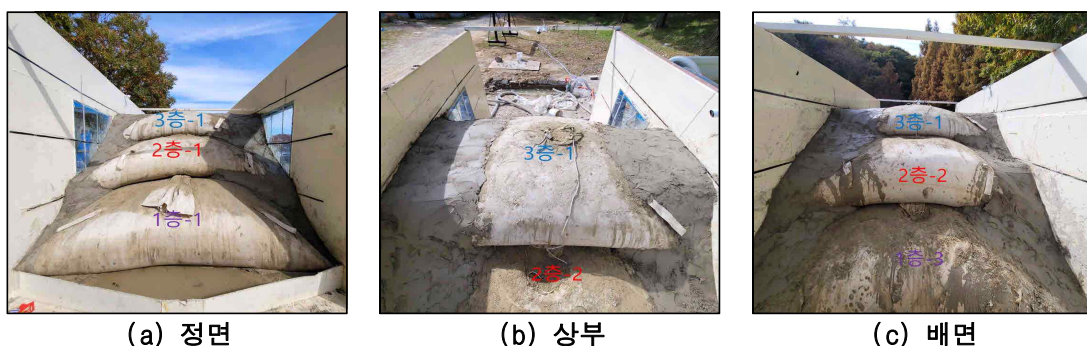
선행연구에서 제공한 지오텍스타일 튜브 적정 입도분포곡선을 통해 골재합성방법(Rothfuchs-Faury 방법)으로 1호사~8호사의 중량비를 산정하였다.

산정된 중량비를 통해 체분석실험을 진행하고 입도분포곡선을 작성한 결과, 지오텍스타일 튜브 적정 입도분포와 거의 일치하는 것으로 나타난다. 시공된 지오텍스타일 튜브의 입도분포와 예정입도 비교 결과, 지오텍스타일 튜브 안의 입도분포가 예정입도 신뢰구간 95% 안에 포함되어 거의 일치하는 것으로 나타난다.

다. 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브

지오텍스타일 튜브뿐만 아니라 결합재(유동성 채움재)까지 같이 시공 시 기존 지오텍스타일 튜브 시공순서는 같으며 다만 추가로 시공된 2개의 지오텍스타일 튜브 사이에 결합재를 사전에 연구된 CLSM 배합비에 맞게 혼합 후 결합재가 굳기 전에 공간에 채운 후 굳힌다. (2단 지오텍스타일 튜브 시공 전 1단에 있는 지오텍스타일 튜브 사이의 공간)이후 결합재가 굳으면 다시 일반 지오텍스타일 튜브 시공순서대로 시공한다.

시공된 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브의 모습 및 입도분포 결과는 아래의 다음과 같다.

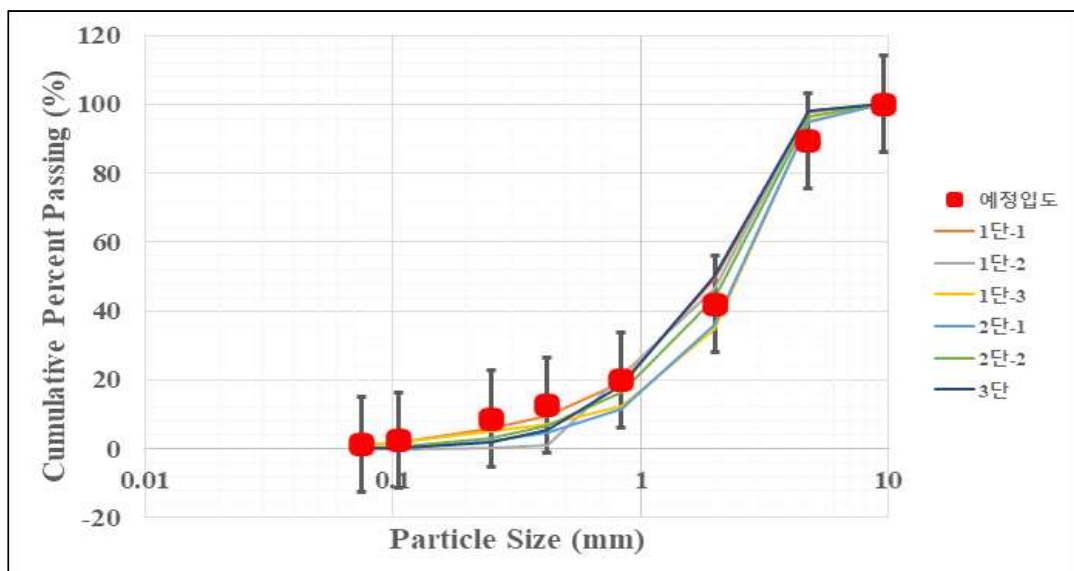


[그림 2-159] 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 시공모습

지오텍스타일 튜브 사이에 결합재를 시공순서 및 모습은 아래 그림과 같다.



[그림 2-160] 결합재 시공 모습



[그림 2-161] 시공된 지오텍스타일 튜브의 입도분포 결과 그래프

예정입도 신뢰구간 95% 안에 포함되어 거의 일치하는 것으로 나타난다.

2.12.3 실험방법

지오텍스타일 튜브로 구성된 가물막이 제체의 투수성과 안정성을 평가하기 위해, 한국시설안전공단 및 농림축산식품부에서 제시된 필댐의 수직 및 수평변위, 누수량에 대한 기준을 검토하였으며, 상사비는 실험에서 적용하지 않았으며, 기준은 다음과 같다.

[표 2-88] 필댐 댐마루 상태평가 항목 및 기준

상태변화	평가유형	영향계수	평가기준	평가점수	평가 내용
침하	중요 결함	1.0	a	5	· 결함이 없는 최상의 상태
			b	4	· 침하 및 부등침하량이 10cm 이하로 경미한 상태
			c	3	· 과도한 침하 및 부등침하량이 10~50cm인 상태
			d	2	· 과도한 침하 및 부등침하량이 50cm 이상 · 댐마루 도로의 경사와 사면이 함몰된 상태
			e	1	· 과도한 침하 및 부등침하량이 50cm 이상 · 상시만수위 0.6m까지 진행된 매우 위험한 상태
수평변위	중요 결함	1.0	a	5	· 결함이 없는 최상의 상태
			b	4	· 과도한 수평변위가 없는 양호한 상태
			c	3	· 과도한 수평변위의 징후가 존재하나 경미한 상태 (용기 0~50cm, 측방이동 0~30cm 변위 발생시)
			d	2	· 과도한 수평변위로 댐마루 도로의 변형이 심각한 상태 (용기 50cm 이상, 측방이동 30cm 이상 변위 발생시)
			e	1	· 과도한 수평변위로 댐마루 도로의 변형이 매우 위험한 상태 (용기 50cm 이상, 측방이동 30cm 이상 변위 발생시)

[표 2-89] 필댐 댐사면 상태평가 항목 및 기준

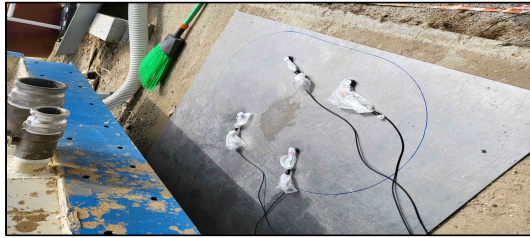
상태변화	평가유형	영향계수	평가기준	평가점수	평가 내용
침하 및 변형	중요결함	1.0	a	5	· 결함이 없는 최상의 상태
			b	4	· 침하깊이 0~10cm, 제체의 변형 0~10%인 상태
			c	3	· 침하깊이 10~50cm, 제체의 변형 10~50%인 상태
			d	2	· 침하깊이 50cm 이상, 제체의 변형 50% 이상인 상태
			e	1	· 침하깊이 50cm 이상, 제체의 변형 50% 이상 위험한 상태
누수량	중요결함	1.0	a	5	· 댐체의 과도한 누수가 없는 최상의 상태
			b	4	· 댐체의 과도한 누수가 거의 없는 양호한 상태(0.1ℓ/sec 이하)
			c	3	· 댐체의 과도한 누수의 징후가 시작되는 경미한 상태(0.1~1.0ℓ/sec)
			d	2	· 댐체의 과도한 누수로 탁류 발생, 평소 누수량보다 증가 시 (1.0ℓ/sec 이상)
			e	1	· 댐체의 과도한 누수로 탁류 발생, 누수의 온도변화가 심하고, 비강우시 누수량이 평소 누수량의 배 이상 증가 시(1.0ℓ/sec 이상)

[표 2-90] 필댐 제체 안정성 및 누수 기준 (월류 실험)

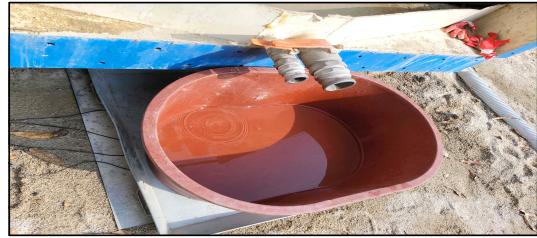
평가항목	기준
침하	10 cm 이하
수평변위	30 cm 미만
총 저수량에 대한 누수량	1일당 총 저수량의 0.05% 미만
길이당 누수량	100m당 1000 ml/sec 미만

가. 누수량 측정

유출수량 측정을 통해 정량적인 차수성 검토 및 비교하였다. 수조 중앙에 배치된 다단 지오텍스타일 튜브 및 흡제방을 기준으로, 배면에 저수된 물이 실험체를 통과하여 입구부 배출구로 나오는 시간당 유량을 누수량으로 설정한다. 유출된 물을 용기에 담고, 시간 당 무게 증가량을 측정하였다. 로드셀을 이용하여 디지털 계측실시간 계측도 병행하였다.



(a) 4개의 로드셀을 이용한 무게 측정



(b) 용기를 통한 시간당 무게 측정



(c) 디지털 계측(사진을 이용한 수기 측정)



(d) 디지털 계측(계측기 이용)

[그림 2-162] 누수량 측정 방법

동일한 수위에서 누수량을 측정하기 위해, 저수 후 10분이 경과된 시점에서 1분 동안 배출된 유량을 측정하였다.

나. 변위 및 변형 측정

레이저 스캐너를 통해 3차원 스캔데이터를 활용하여 변위 및 변형을 검토하였다. 측정은 물 채우기 전, 물 채운 후, 실험 종료 후 수시로 스캔, 단면 분석 후 위치별 변위 변화량 계산하였다.



추출된 포인트 클라우드를 통해 수직 및 수평 변위 확인

[그림 2-163] 변위량 확인 방법

다. 월류 안정성

월류실험은 30분간 일정한 수위를 유지한 후 10분간 월류하고, 이 사이클을 5회 반복하며, 체체의 변형 양상을 관찰(레이저 스캐너를 이용) 하였으며, 3차원 스캔 데이터를 통해 실험 전, 물 채운 후, 월류 실험 후 수시로 스캔, 단면 분석 후 위치별 변위 변화량 계산(변위 측정방법과 동일)하여 측정한다.

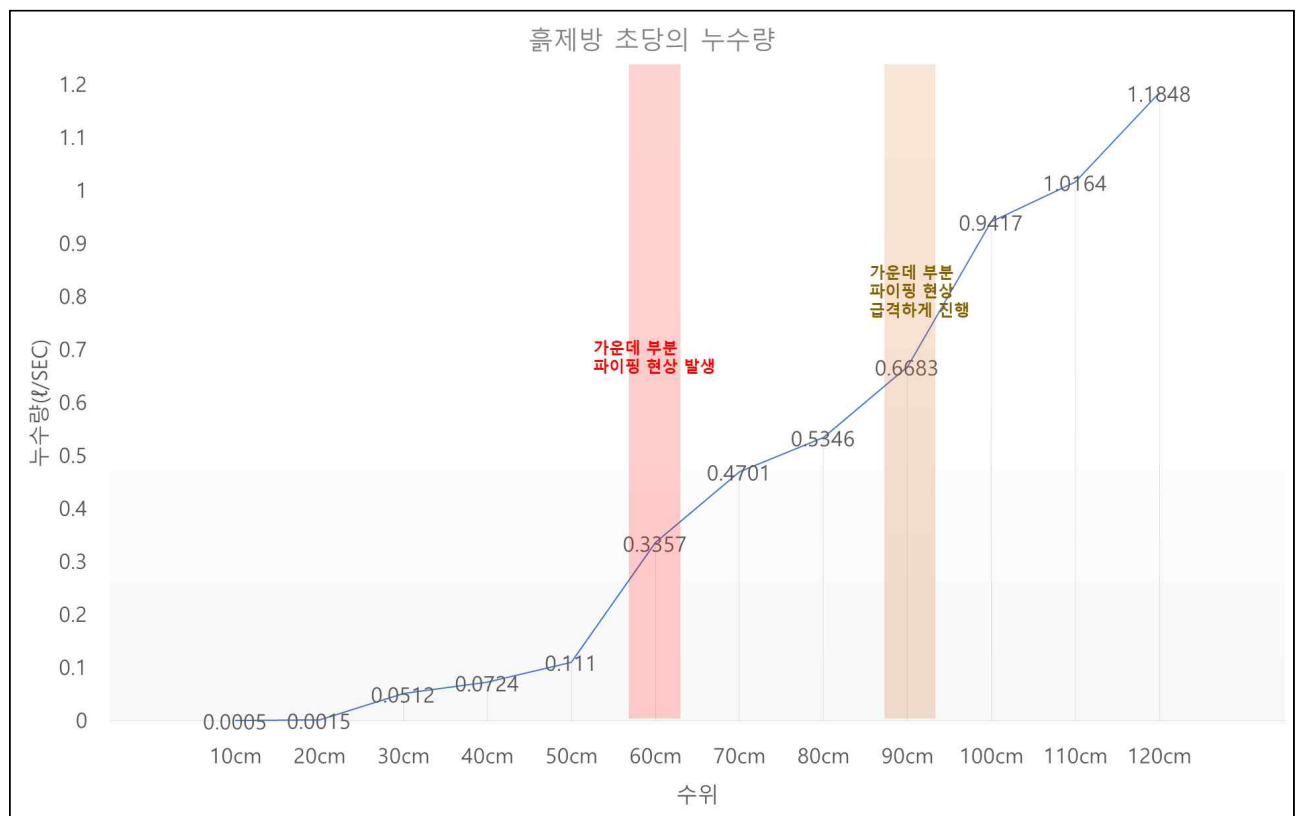
2.12.4 실험결과

가. 누수량 측정

3가지 케이스에 대한 누수량 측정결과는 아래 표와 그림과 같다.

[표 2-91] 흡제방 누수량 측정결과

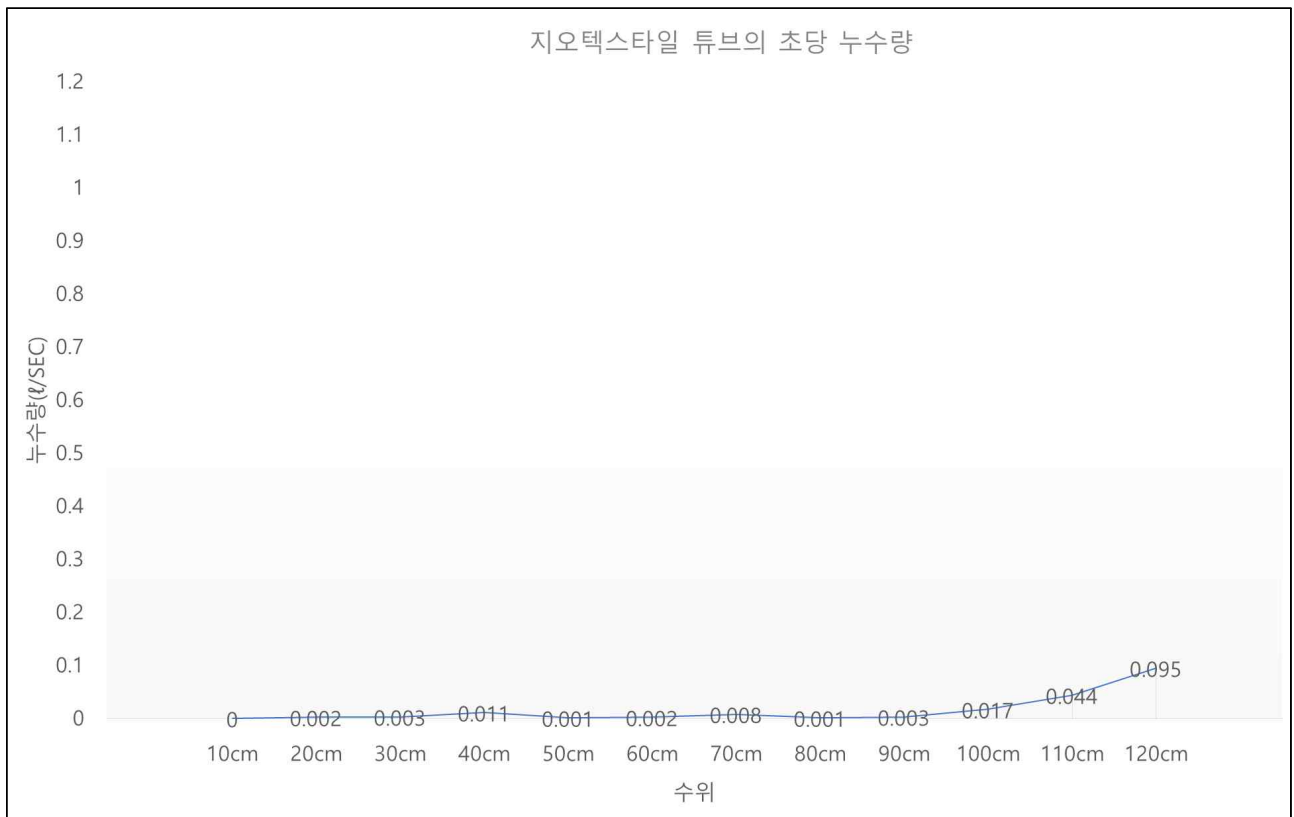
구분	토조 물량(m ³)	계측 시간(s)	측정누수량(kgf)	초당누수량(l/sec)	비고
수위 10cm	0.143	317	0.04	0.0005	
수위 20cm	0.308	822	0.35	0.0015	
수위 30cm	0.495	710	10.10	0.0512	
수위 40cm	0.704	710	14.28	0.0724	
수위 50cm	0.935	107	3.30	0.1110	
수위 60cm	1.188	479	44.67	0.3357	
수위 70cm	1.463	535	69.86	0.4701	
수위 80cm	1.760	320	47.52	0.5346	
수위 90cm	2.079	287	53.28	0.6683	
수위 100cm	2.420	159	41.59	0.9417	
수위 110cm	2.783	210	59.29	1.0164	
수위 120cm	3.168	159	52.33	1.1848	



[그림 2-164] 흡제방 누수량 측정결과 그래프

[표 2-92] 지오텍스타일 튜브 누수량 측정결과

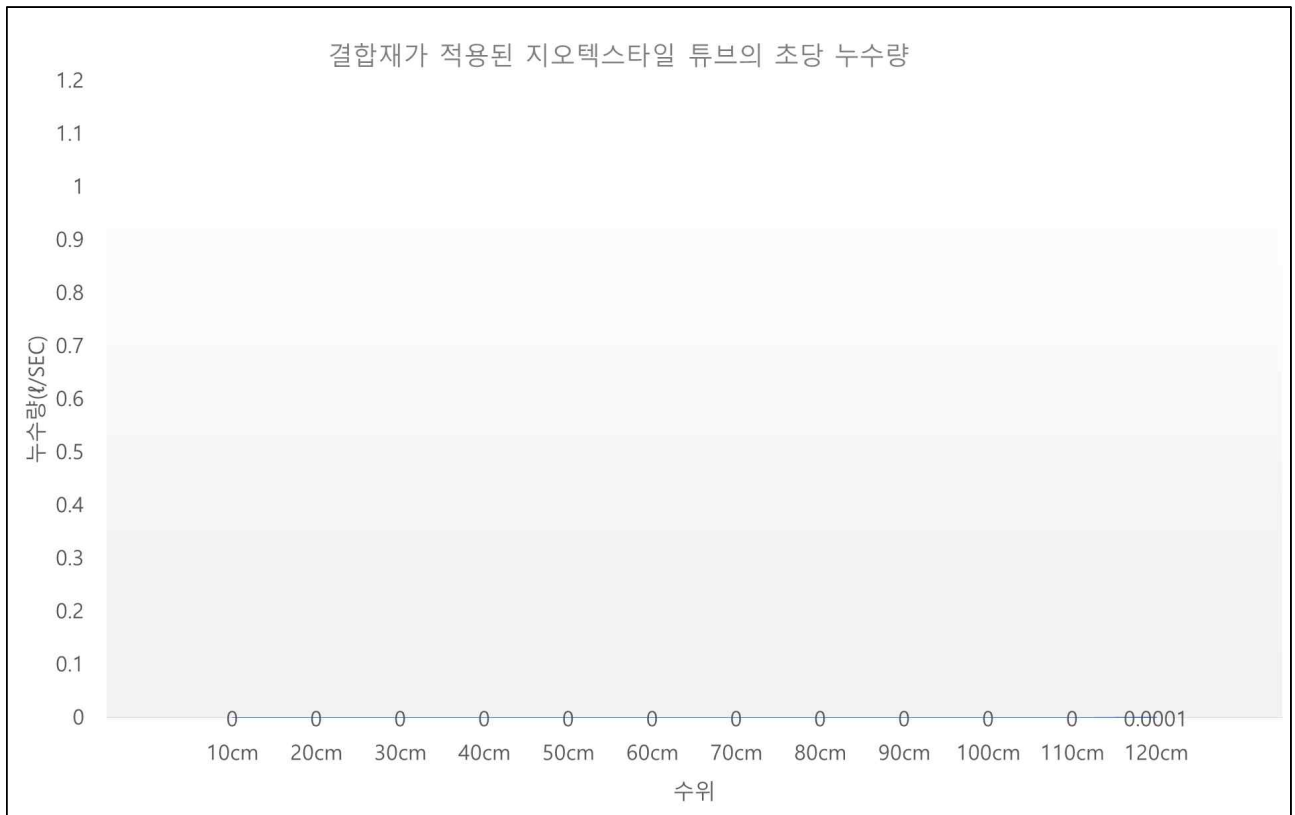
구분	토조 몰량(m³)	계측 시간(s)	측정누수량(kgf)	초당누수량(l/sec)	비고
수위 10cm	0.11	60	0.00	0.000	
수위 20cm	0.22	60	0.12	0.002	
수위 30cm	0.33	60	0.17	0.003	
수위 40cm	0.44	60	0.63	0.011	
수위 50cm	0.55	60	0.04	0.001	
수위 60cm	0.66	60	0.07	0.002	
수위 70cm	0.77	60	0.50	0.008	
수위 80cm	0.979	60	0.11	0.001	
수위 90cm	1.287	60	0.20	0.003	
수위 100cm	1.595	60	0.99	0.017	
수위 110cm	1.903	60	2.65	0.044	
수위 120cm	2.211	60	5.71	0.095	



[그림 2-165] 지오텍스타일 튜브 누수량 측정결과 그래프

[표 2-93] 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 누수량 측정결과

구분	토조 몰량(m³)	계측 시간(s)	측정누수량(kgf)	초당누수량(l/sec)	비고
수위 10cm	0.471	60	0.00	0.0000	
수위 20cm	0.706	60	0.00	0.0000	
수위 30cm	0.942	60	0.00	0.0000	
수위 40cm	1.177	60	0.00	0.0000	
수위 50cm	1.412	60	0.00	0.0000	
수위 60cm	1.648	60	0.00	0.0000	
수위 70cm	1.894	60	0.00	0.0000	
수위 80cm	1.960	60	0.00	0.0000	
수위 90cm	2.350	60	0.00	0.0000	
수위 100cm	2.740	60	0.00	0.0000	
수위 110cm	3.128	60	0.00	0.0000	
수위 120cm	3.518	60	0.04	0.0001	



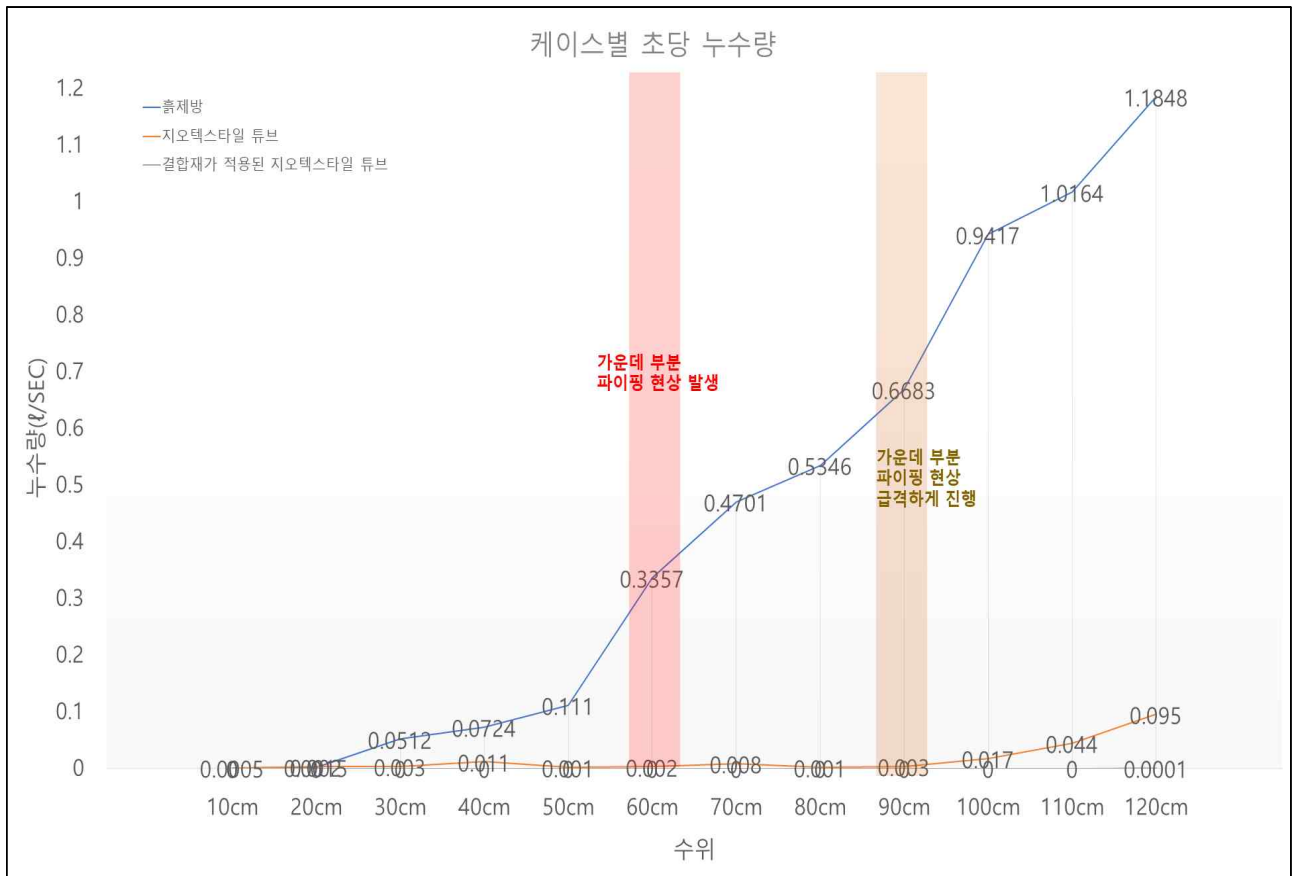
[그림 2-166] 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 누수량 측정결과 그래프

흙제방의 경우 수위 약 60cm 부터 토출구 부분의 파이핑 현상이 일어났으며, 이후 수위가 높아짐에 따라 중심부 및 토조 벽면부분에 파이핑 현상이 심해짐에 따라 많은 누수량이 발생하였다.

결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브의 경우 배면의 물이 지오텍스타일 튜브를 통과하여 누수가 발생하는데, 지오텍스타일 튜브사이의 공간을 결합재로 인해 지오텍스타일 튜브의 차단벽이 생겼으며, 이에 지오텍스타일 튜브만 있는 경우보다 누수가 발생하지 않았다.

제방길이 100m기준 누수량으로 환산해서 비교할 경우, 흙제방의 경우 초당 누수량이 약 60 l로 댐체 상태평가 등급 e에 해당되며, 지오텍스타일 튜브만 시공한 경우 초당 누수량 약 0.85 l로 댐체의 과도한 누수가 없는 양호한 상태인 b등급에 해당되고, 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 시공한 경우는 누수량이 없는 최상의 상태인 a등급에 해당된다.

같은 배합의 흙일 경우 단순 제방보다는 지오텍스타일 튜브 및 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브로 시공하는 경우가 단순 초당 누수량 차이만으로 생각하면 약 70배 이상의 차단능력을 가진다고 할 수 있다.



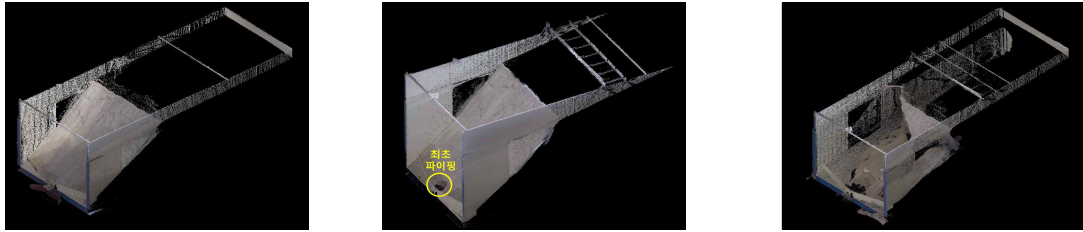
[그림 2-167] 누수량 측정결과 그래프

나. 변위 및 변형 측정

실험 전, 누수량 측정 실험 중, 월류 실험 후의 스캔 포인트 클라우드를 통해 동일 위치별 변위 변화량 계산 하였으며, 실험 전, 실험 중, 실험 후의 단면적 및 체적 계산을 통한 변형량도 계산하였다.

흙제방의 경우 누수량 측정과정 가운데 파이핑 현상이 진행되었다. 수위가 올라감에 따라 파이핑 현상에 심해졌으며 월류 실험 배면 물채움 작업을 진행하면서 수위 160cm전에 제방 붕괴되었다.

포인트 클라우드를 통해서도 파이핑 현상이 가운데 부분부터 시작되어 진행되어 제방 붕괴되었음을 알 수 있다.

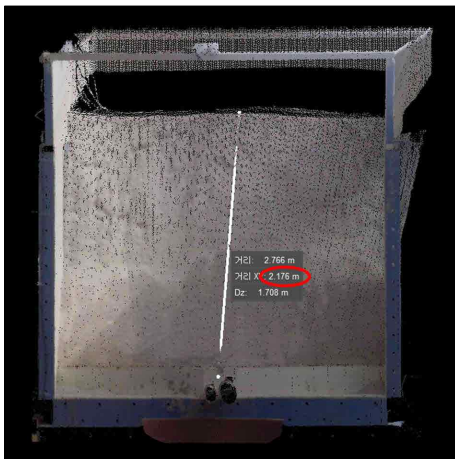


(a) 실험 전 모습 (b) 실험 중 모습(파이핑 현상 발생) (c) 실험 후 모습(제방 무너짐)

[그림 2-168] 포인트 클라우드를 통한 흙제방 변화 모습

지오텍스타일 튜브도 동일하게 비교하였으며, 체적 변화의 경우 사면에 한정하여 MeshLab 프로그램을 이용하여 산정 하였다.

흙제방의 경우 실험전 기준으로 수평, 수직 기준점을 아래 그림과 같이 비교하였다.

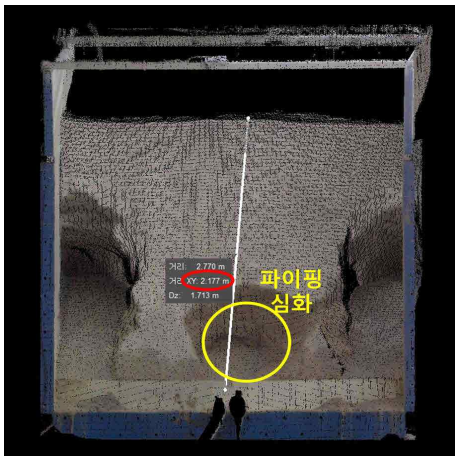


(a) 실험 전 마루 수평 거리



(b) 실험 전 마루 수직 거리

[그림 2-169] 실험 전 흙제방 수평, 수직 기준점 측정

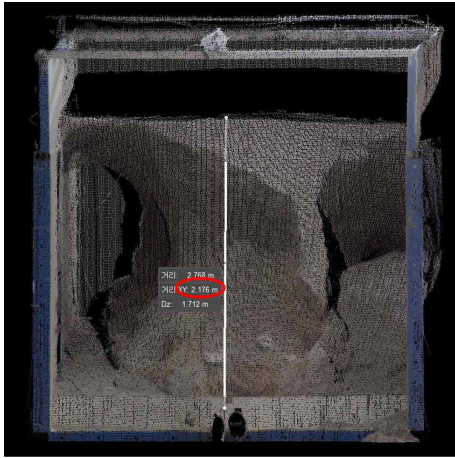


(a) 누수량 측정 실험 중 마루 수평 거리

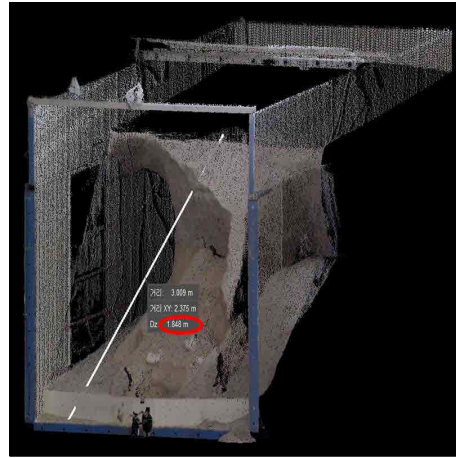


(b) 누수량 측정 실험 중 마루 수직 거리

[그림 2-170] 실험 중 흙제방 수평, 수직 기준점 측정



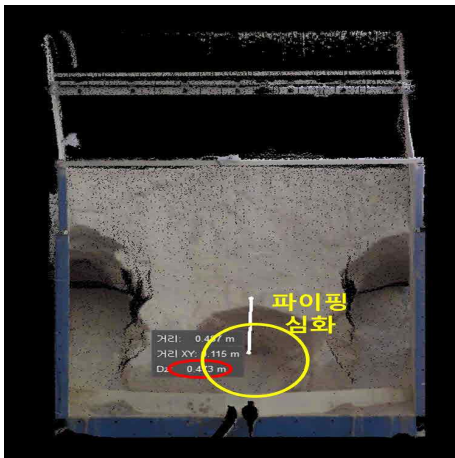
(a) 실험 후 마루 수평 거리



(b) 실험 후 마루 수직 거리

[그림 2-171] 실험 후 흙제방 수평, 수직 기준점 측정

사면 침하량 및 변형량의 경우 사면 경사면에서 침하된 바닥까지의 거리로 구하였으며, 사면의 체적변화량은 MeshLab 프로그램을 통한 체적산정 하였다. 아래의 그림은 사면의 침하량 및 체적 변화를 비교한 그림이다.

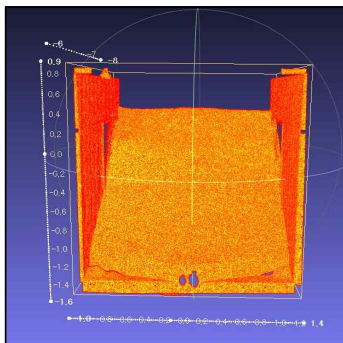


(a) 실험 중 사면 침하량

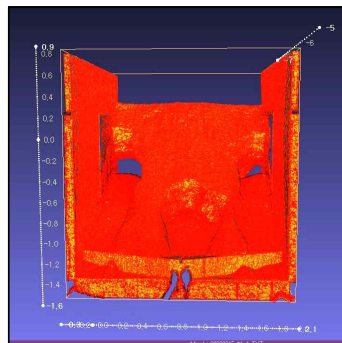


(b) 실험 후 사면 침하량

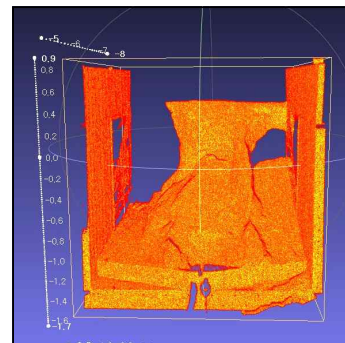
[그림 2-172] 흙제방 사면 침하량 측정



(a) 실험 전 모습



(b) 실험 중 모습(파이핑 현상 진행)



(c) 실험 후 모습(제방 무너짐)

[그림 2-173] 흙제방 사면 체적 변화 계산(MeshLab)

아래의 표는 흙제방에 대한 누수량, 변위량, 체적 변화량 측정 결과이다.

[표 2-94] 흙제방 변위 및 변형 측정결과

구분	실험 전(기준)	누수량 측정 중	제방 붕괴 후	비고
마루 수평 변위 측정	2.176m	2.177m (+0.1cm)	2.176m(-)	토출구 벽면에서 수평 거리
마루 수직 변위(침하) 측정	1.854m	1.853m (-0.1cm)	1.848m (-0.6cm)	바닥에서 수직 거리
사면 수직 변위(침하) 측정	-	0.473m (47.3cm)	0.571m (57.1cm)	사면 경사면에서 침하된 바닥까지의 거리
체적 변화	4.526m ³	3.445m ³ (-1.081m ³)	3.061m ³ (-1.535m ³)	MeshLab 프로그램을 통한 체적산정

아래의 표는 지오텍스타일 튜브만 시공한 경우의 누수량, 변위량, 지오텍스타일 튜브 변형량을 나타낸 것이다.

[표 2-95] 지오텍스타일 튜브 변위 및 변형 측정결과

구분	실험 전(기준)	실험 중	실험 후	비
지오텍스타일 튜브 수평 변위량	2.198m	2.200m (-0.2cm)	2,200m (-0.2cm)	토출구 벽면에서 수평 거리
지오텍스타일 튜브 수직 변위(침하)량	1.743m	1.742m (-0.1cm)	1.742m (-0.1cm)	바닥에서 수직 거리
지오텍스타일 튜브 변형량	약 1.67m ²	약 1.67m ²	약 1.67m ²	중심부 캐드 스케치를 통한 면적 산정

지오텍스타일 튜브만 시공한 경우는 실험전 기준으로 수평, 수직 기준점을 아래 그림과 같이 비교하였다.



(a) 실험 전 수평 거리

(b) 실험 전 수직 거리

[그림 2-174] 실험 전 지오텍스타일 튜브 수평, 수직 기준점 측정

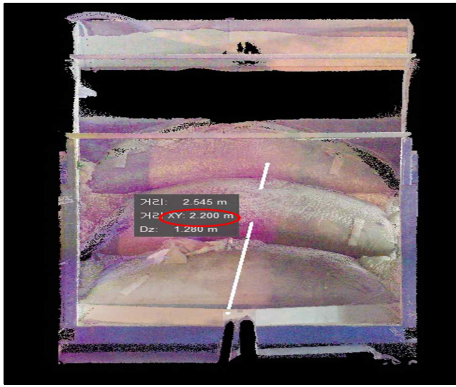


(a) 누수량 측정 실험 중 수평 거리

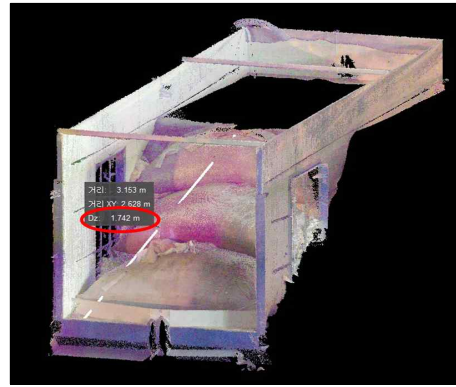


(b) 누수량 측정 실험 중 수직 거리

[그림 2-175] 실험 중 지오텍스타일 튜브 수평, 수직 기준점 측정



(a) 월류 실험 후 수평 거리



(b) 월류 실험 후 수직 거리

[그림 2-176] 실험 후 지오텍스타일 튜브 수평, 수직 기준점 측정

지오텍스타일 튜브의 경우 중심부 단면적 변화량을 비교하였다.

구분	중심부 단면	단면적 계산
실험 전		$0.0935+0.1544+0.1291+0.7408+0.5645=1.67334$
실험 중		$0.0935+0.1544+0.1291+0.7408+0.5645=1.67334$
실험 후		$0.0935+0.1544+0.1291+0.7408+0.5645=1.67334$

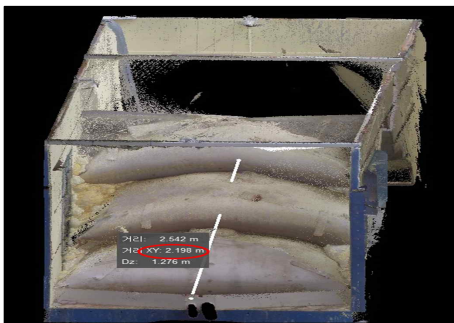
[그림 2-177] 지오텍스타일 튜브 중심부 단면 변형 확인

결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브의 경우 누수량, 변위량, 지오텍스타일 튜브 변형량을 아래의 표와 그림을 나타낸 것이다.

[표 2-96] 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 변위 및 변형 측정결과

구분	실험 전(기준)	실험 중	실험 후	비고
지오텍스타일 튜브 수평 변위량	1.765m	1.763m (-0.2cm)	1.763m (-0.02cm)	토출구 벽면에서 수평 거리
지오텍스타일 튜브 수직 변위(침하)량	1.865m	1.864m (-0.1cm)	1.865m (-)	바닥에서 수직 거리
지오텍스타일 튜브 변형량	2.10m ²	2.10m ²	2.10m ²	중심부 캐드 스캐치를 통한 면적 산정

지오텍스타일 튜브와 결합재를 같이 시공한 경우의 실험전 기준으로 수평, 수직 기준점을 아래 그림과 같이 비교하였다.



(a) 실험 전 수평 거리



(b) 실험 전 수직 거리

[그림 2-178] 실험 전 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 수평, 수직 기준점 측정



(a) 누수량 측정 실험 중 수평 거리



(b) 누수량 측정 실험 중 수직 거리

[그림 2-179] 실험 중 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 수평, 수직 기준점 측정



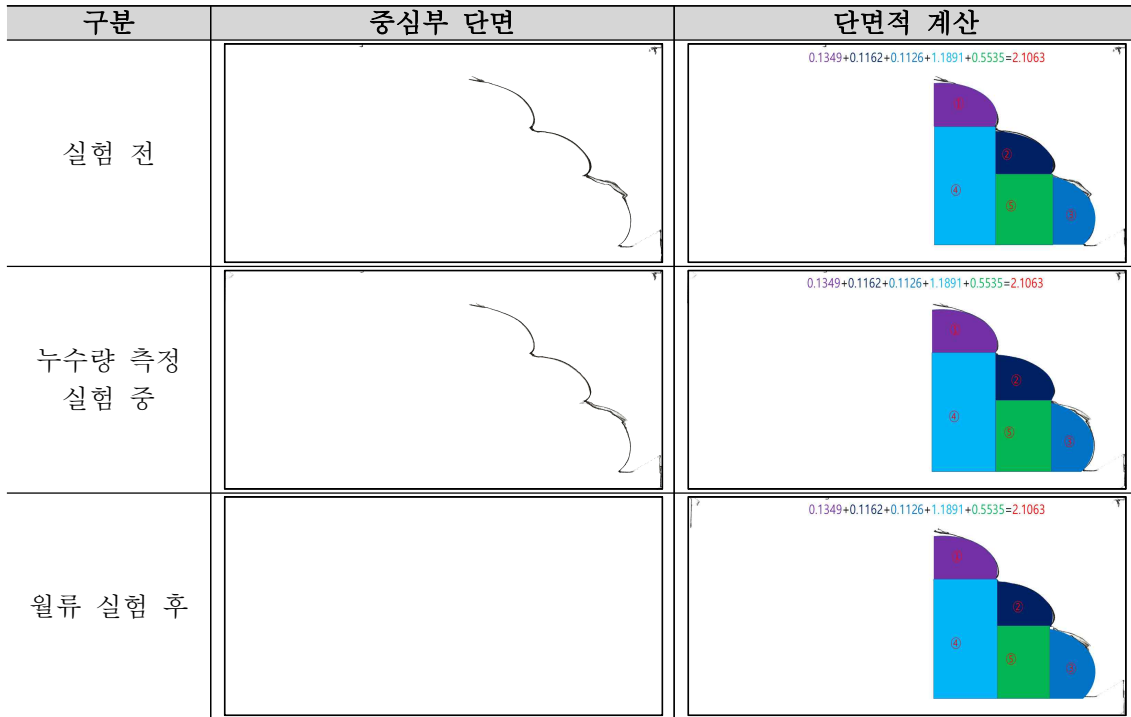
(a) 월류 실험 후 수평 거리



(b) 월류 실험 후 수직 거리

[그림 2-180] 실험 후 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 수평, 수직 기준점 측정

결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브의 경우 중심부 단면적 변화량을 비교하였다.



[그림 2-181] 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 중심부 단면 변형 확인

다. 안정성 및 누수량 검토 결과

3차원 클라우드를 통해 지오텍스타일 튜브, 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브와 흡제방 시공한 실험체의 실험 전, 실험 중, 실험 후의 수직변위, 수평변위, 단면적 및 체적을 비교할 수 있었다.

[표 2-97] 케이스별 변위 및 변형 측정결과

구분	마루 침하량	마루 수평변위	사면침하 및 변형	비고
흡제방	0.6cm 침하	변화 없음	57.1cm 침하 / 32.37%변형	상태등급 : d등급
지오텍스타일 튜브	0.2cm 침하	0.1cm 이동	침하 및 변형 없음	상태등급 : a등급
결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브	0.2cm 침하	변화 없음	침하 및 변형 없음	상태등급 : a등급

실제 포인트 클라우드를 통한 비교의 경우 동일한 지점을 클릭한다고 하더라도 동일한 지점의 점이라기 어려우며, 비교시 오차가 발생할 수 있다. 마루의 수평 수직 변위의 경우, 1~2mm 정도의 변화량을 측정하였다.

위에서 설명한 포인트 비교 오차라고 볼 수 있으며, 흡제방의 경우 실험 후 마루의 수직 변위가 6mm로 하강한 하였으며, 수평 변위는 경미한 것으로 측정되었다. 지오텍스타일 튜브 및 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브의 경우 변화가 mm단위로 측정 오차라고 생각되며, 결합이 없는 최상의 상태 a등급이라고 볼 수 있으며, 흡제방의 경우 사면의 침하 및 변형이 되었으며, 침하깊이 기준으로는 침하깊이 50cm 이상으로 d등급 정도이며, 제체의 변형에서는 변형 10~50%인 32.37%로 c등급으로 지오텍스타일 튜브 및 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브의 경우와 비교하여 아주 큰 차이를 보여준다.

라. 월류실험

흙제방의 경우, 누수량 측정중에 가운데 토출부 부분의 파이핑 현상 시작되어, 심해졌으며, 월류 실험을 위한 배면 물채움 작업 중 수위 160cm에서 무너졌다. 아래 그림은 흙제방 붕괴 과정을 나타내고 있다.



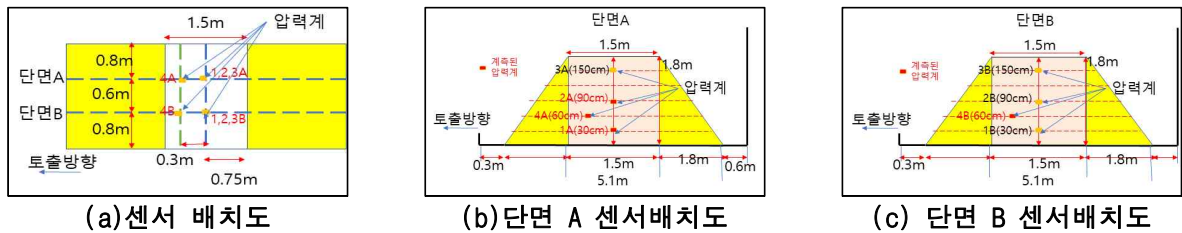
(a) 토출구 파이핑 현상 시작 (b) 토출구 파이핑 현상 심화 (c) 월류 실험 준비 중 배면 물채움



(d) 흙제방 붕괴 전 모습 (e) 흙제방 붕괴 모습

[그림 2-182] 흙제방 파이핑 현상 및 붕괴 모습

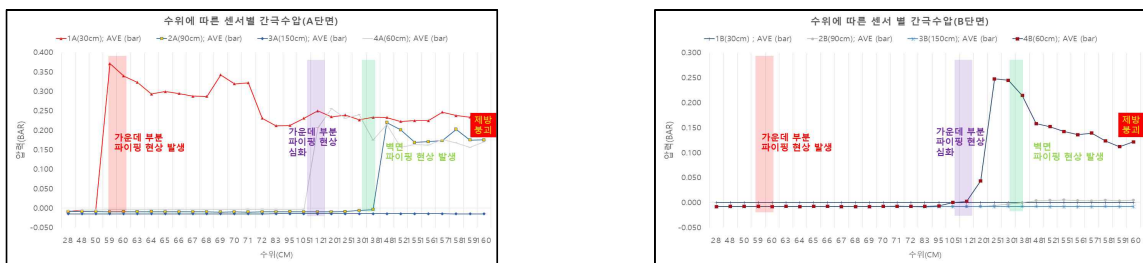
센서 배치도에 따라 센서의 위치를 확인 할 수 있으며, 수위에 따른 흙제방의 간극수압 및 그에 따른 이슈사항(파이핑 현상 등)을 확인할 수 있었다.



(a)센서 배치도 (b)단면 A 센서배치도 (c) 단면 B 센서배치도

[그림 2-183] 흙제방의 압력트랜스미터 배치도

계측된 센서는 30cm에 위치한 1A, 60cm에 위치한 4A와4B, 90cm에 위치한 2A총 4개의 센서 값을 취득하였으며, 나머지 센서는 계측되지 않았다. 계측된 센서 값은 아래의 표와 그림과 같다.



(a)단면 A의 수위에 따른 센서별 간극수압 및 이슈사항 (b)단면 B의 수위에 따른 센서별 간극수압 및 이슈사항

[그림 2-184] 수위에 따른 간극수압 및 이슈사항

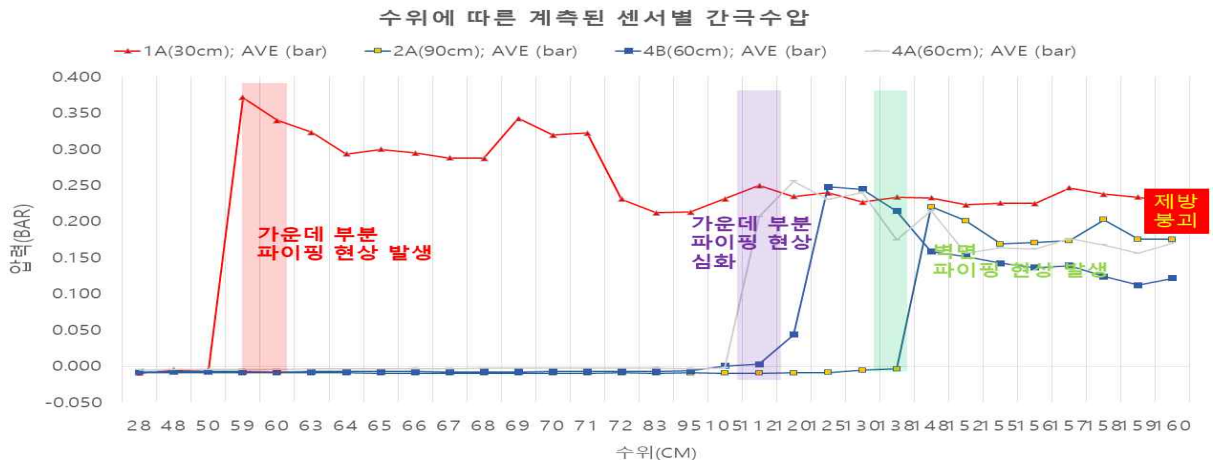
[표 2-98] 수위에 따른 계측 압력값

수위(cm)	28	48	50	59	60	63	64	65
배면 물량(t)	0.456	0.887	0.935	1.162	1.188	1.268	1.295	1.323
1A(30cm)(bar)	-0.010	-0.005	-0.005	0.371	0.340	0.323	0.293	0.300
2A(90cm)(bar)	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.009	-0.010
4A(60cm)(bar)	-0.005	-0.005	-0.005	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004
4B(60cm)(bar)	-0.008	-0.007	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008

수위(cm)	66	67	68	69	70	71	72	83
배면 물량(t)	1.350	1.378	1.406	1.435	1.463	1.492	1.521	1.853
1A(30cm)(bar)	0.295	0.288	0.287	0.343	0.320	0.322	0.231	0.212
2A(90cm)(bar)	-0.010	-0.010	-0.010	-0.010	-0.010	-0.010	-0.010	-0.010
4A(60cm)(bar)	-0.004	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003
4B(60cm)(bar)	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.008	-0.007	-0.007	-0.007







수위(cm)	95	105	112	120	125	130	138	148
배면 물량(t)	2.247	2.599	2.858	3.168	3.369	3.575	3.916	4.363
1A(30cm)(bar)	0.213	0.231	0.250	0.235	0.239	0.227	0.234	0.233
2A(90cm)(bar)	-0.009	-0.010	-0.010	-0.009	-0.009	-0.006	-0.004	0.220
4A(60cm)(bar)	-0.003	-0.003	0.206	0.256	0.231	0.240	0.175	0.215
4B(60cm)(bar)	-0.006	0.000	0.003	0.044	0.248	0.245	0.214	0.158

수위(cm)	152	155	156	157	158	159	160
배면 물량(t)	4.548	4.689	4.736	4.784	4.832	4.880	4.928
1A(30cm)(bar)	0.223	0.225	0.225	0.247	0.238	0.234	0.227
2A(90cm)(bar)	0.201	0.169	0.171	0.174	0.202	0.175	0.175
4A(60cm)(bar)	0.156	0.164	0.162	0.176	0.167	0.156	0.170
4B(60cm)(bar)	0.152	0.142	0.136	0.139	0.124	0.112	0.122



[그림 2-185] 수위에 따른 간극수압 및 이슈사항

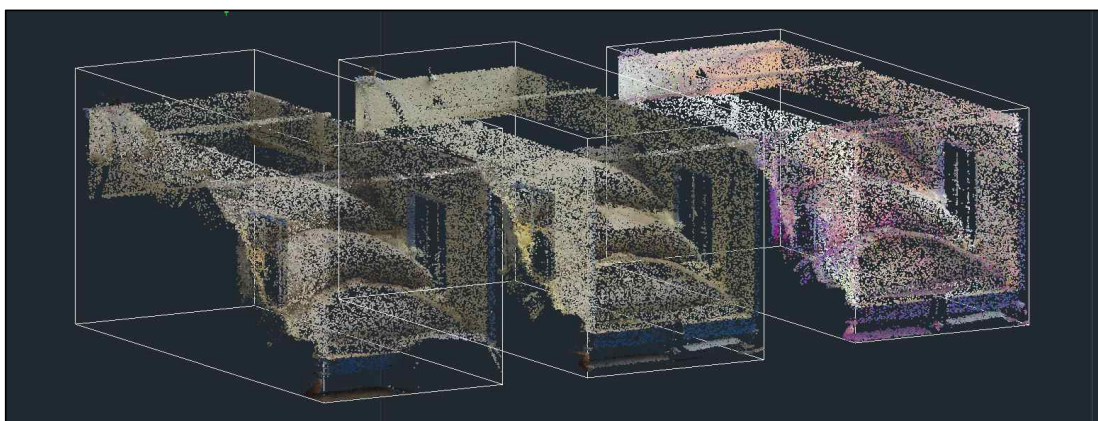
지오텍스타일 튜브만 시공한경우의 월류 안정성 검토 실험의 모습은 아래 그림과 같다.

구분	월류 전	월류 중	월류 후
마루			
사면			

[그림 2-186] CCTV를 통한 지오텍스타일 튜브 월류 실험 모습






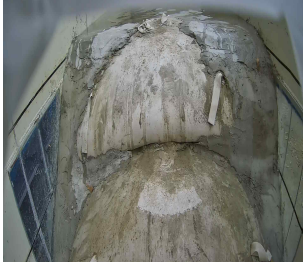


[그림 2-187] 지오텍스타일 튜브 월류 실험 전경



[그림 2-188] 지오텍스타일 튜브 실험 전, 중, 후 변위 및 변형 검토

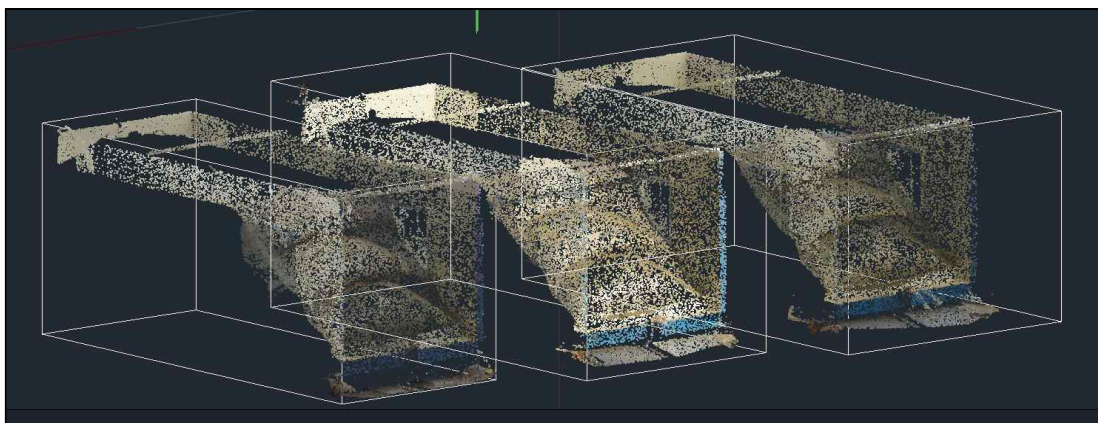
결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브의 경우 월류 안정성 검토 실험의 모습은 아래 그림과 같다.

구분	월류 전	월류 중	월류 후
마루			
사면			

[그림 2-189] CCTV를 통한 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 월류 실험 모습



[그림 2-190] 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 월류 실험 전경



[그림 2-191] 지오텍스타일 튜브결합재 실험 전, 중, 후 변위 및 변형 검토

마. 월류시 제체 안정성 평가

월류 안정성은 제체 안정성 및 누수 기준으로 비교 하며, 침하와 수평변위의 경우 변위 측정 시 비교 되었으며, 길이당 누수량은 누수량 측정의 결과를 가지고 사용하였다. 총 조수량에 대한 누수량으로 안정성 검토하는 경우는 총 저수량을 계산하여 비교하는 것이 불가능하다고 생각되어 안정성 검토 결과에서 제외하고 평가를 하였다.

[표 2-99] 케이스별 월류 안정성 검토 결과

평가항목	기 준	흙제방	지오텍스타일 튜브	결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브	비고
침하	10 cm 이하	57cm	0.2cm	0.2cm	
수평변위	30 cm 미만	0.1cm	0.1cm	0cm	
길이당 누수량	100m당 1000 ml/sec 미만	약 60,000 ml	850 ml	0 ml	
평가결과		불충족	충족	충족	

월류 안정성은 지오텍스타일 튜브와 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브의 케이스만 실험할 수 있었으며, 침하, 수평변위가 거의 존재하지 않는 것으로 볼 수 있다. 흙제방의 경우 월류 실험 전 배면 물 채우는 과정에 토조 양쪽 벽면에 파이핑 현상이 심하게 발생하였으며, 왼쪽 벽면이 완전히 무너져 월류 실험을 할 수 없었다.

지오텍스타일 튜브와 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브로 시공할 경우 흙제방보다 월류 안정성도 보장된다고 볼 수 있다

2.12.5 소결

흙제방, 지오텍스타일 튜브, 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브의 3가지 케이스에 대해서 필댐 상태평가 항목 및 기준 (한국시설안전공단)으로 가물막이 체체의 투수성과 안정성을 평가를 실시하였다. 누수량 및 월류 후 변위 변화 실험 결과 요약하면 아래의 표와 같다.

[표 2-100] 케이스별 필댐 상태평가에 대한 결과 및 종합등급

구분	마루 침하량	마루 수평변위	사면 침하 및 변형	사면누수량	비고
흙제방	0.6cm 침하 (b등급)	변화 없음 (a등급)	57.1cm 침하 (d등급) / 32.37%변형 (c등급)	1.1848 ℓ/sec (d등급)	상태등급 : d등급
지오텍스타일 튜브	변화 없음 (a등급)	변화 없음 (a등급)	침하 및 변형 없음 (a등급)	0.095 ℓ/sec (b등급)	상태등급 : b등급
결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브	변화 없음 (a등급)	변화 없음 (a등급)	침하 및 변형 없음 (a등급)	누수없음 (a등급)	상태등급 : a등급

흙제방의 월류 실험 전에 제방이 구멍이 발생하였으나, 구멍이 마루 부분의 변화에는 영향을 거의 미치지 않았으나, 사면 침하 및 변형량이 발생하였으며, 과도한 누수량에 의해 상태등급 d등급으로 판단된다.

지오텍스타일 튜브와 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브의 경우 변위와 변형은 측정오차로 인정하고 변화가 없었으며, 지오텍스타일 튜브의 경우 과도한 누수가 거의 없는 양호한 상태이 0.1 ℓ/sec 이하로 b등급으로 판단되며, 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브의 경우 누수도 없는 a등급으로 판단된다. 상태평가 등급으로 비교시 흙제방 d등급, 지오텍스타일 튜브 b등급, 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 a등급이며, 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브가 월등히 상태가 좋은 것으로 나타났다.

월류 안정성에 대해서는 필댐 체체 안전성 및 누수 기준으로 비교하였을 하여 안정성을 확인할 수 있었다.

[표 2-101] 케이스별 월류 안정성 검토 결과

평가항목	기 준	흙제방	지오텍스타일 튜브	결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브	비고
침하	10 cm 이하	57cm	0.2cm	0.2cm	
수평변위	30 cm 미만	0.1cm	0.1cm	0cm	
길이당 누수량	100m당 1000 ml/sec 미만	약 60,000 ml	850 ml	0 ml	
평가결과		불충족	충족	충족	

케이스별 월류 안전성 검토 결과 지오텍스타일 튜브와 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브의 경우 안정성을 확보하였다.

2.12.6 시공 경제성 검토

본 연구과제에서 제안한 공법에 대한 경제성 평가는 아직 불확실한 면이 있어, 본 보고서에는 토체와 대형마대를 이용하는 가물막이 공법, 토체와 강널말뚝(sheet pile)를 이용한 가물막이 공법, 지오텍스타일 튜브를 이용한 공법의 시공비용을 비교하였다. 나아가 앞에서 언급한 안정성 확보를 통한 편익도 고려하여 추가 비교함으로써 전반적인 경제적 이득에 대하여 설명하고자 한다. 참고로 경제성 평가에 활용된 제방의 제원은 다음과 같다.

[표 2-102] 경제성 평가에 활용된 제방의 제원

제방길이	제방폭	둑마루폭	제방고	사면경사	비고
15 m	10 m	3 m	3 m	1:2	

제방의 제원을 기준으로 투입비용을 계산하면 토체와 대형마대를 이용하는 가물막이 공법의 경우 다음 표와 같으며, 여기서 산출된 비용은 지오텍스타일 튜브 실험을 실시한 명지대학교에서 연구한 「친환경 신소재를 이용한 고강도제방 기술개발 연구단」의 『바이오폴리머 신소재 제방 내부침식 평가 및 기술 가이드』에서 수행한 실규모 실험 제방을 축조할 때 소요된 항목을 참고하였으며, 실제 제방축조 비용과는 다를 수 있다.

토체와 강널말뚝(Sheet Pile)을 이용하는 가물막이 공법의 경우, 나라장터에서 발주 공고중 가물막이 공사 내역서를 참고하여 제방의 제원에 맞춰 계산하였으며, 지오텍스타일 튜브를 이용한 가물막이 공법의 경우, 본 보고서에 실험시 사용한 내역을 토대로 계산하였다.

또한 제방에 사용한 흙 재료비 및 운전 및 시공인건비등은 포함하지 않았다. 이유는 지오텍스타일 튜브 시공 공법의 경우 현장의 모래를 사용하는 것이기 때문에 흙 재료비용은 제외하였으며, 중기 사용료의 경우 운전 및 시공 인력을 포함한 가격으로 계산하였다.

재료비의 경우 조달청 가격정보(2022년 기준)이며, 지오텍스타일 튜브의 경우 판매단가 기준으로 계산하여, 각 시공별 경제성 분석을 실시하였으며, 요약 및 자세한 내용은 아래의 표와 같다.

[표 2-103] 가물막이 공법별 축조비용 산정

(단위 : 원)

구분	시공비 합계	중기사용료	재료비	인건비	작업일수	비고
토체+대형마대	17,025,000	10,240,000	2,150,000	1,680,000	4일	
토체+강널말뚝	124,110,000	16,880,000	75,544,000	9,320,000	6일	
지오텍스타일 튜브	26,627,000	9,690,000	9,325,000	3,000,000	4일	
결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브	38,194,000	9,690,000	18,515,000	3,360,000	4일	

[표 2-104] 토체와 대형마대를 이용하는 가물막이 공법 축조비용

(단위 : 원)

품명	규격	수량	단위	단가	금액
1. 작업별 중기사용료					10,240,000
정지작업	굴착기	12	식	500,000	6,000,000
운반작업	15 톤 트럭	8	식	500,000	4,000,000
다짐작업	진동로우더 1 톤	4	식	60,000	240,000
2. 재료비					2,150,000
PP마대	1 ton	430	개	5,000	2,150,000
3. 인건비					1,680,000
관리인력	-	4	인	200,000	600,000
보통인부	-	8	인	180,000	1,080,000
소계					14,070,000
기타제잡비					1,407,000
공급가액					15,477,000
부가세					1,548,000
합계금액					17,025,000

[표 2-105] 토체와 강널말뚝을 이용하는 가물막이 공법 축조비용

(단위 : 원)

품명	규격	수량	단위	단가	금액
1. 작업별 중기사용료					16,880,000
말뚝(H-Pile) 천공 및 박기& Sheet pile 박기	천공장비(40 Ton)	3	식	600,000	1,800,000
	오거(해머, 60 kW)	3	식	500,000	1,500,000
	발전기(450 kW)	3	식	1,000,000	3,000,000
	압축기(25.5 m³/Min)	3	식	600,000	1,800,000
	굴착기	3	식	500,000	1,500,000
	크레인	3	식	800,000	2,400,000
	15 톤 트럭	3	식	500,000	1,500,000
띠장 및 버팀보 설치	크레인	1	식	800,000	800,000
물푸기	건설용 수중펌프	1	식	600,000	600,000
	디젤엔진(12kW)	1	식	300,000	300,000
운반작업	15 톤 트럭	3	식	500,000	1,500,000
다짐작업	진동로우더 1 톤	3	식	60,000	180,000
2. 재료비					75,544,000
H 형강	300x300x10x15m/m, 94.0kg/m	24	본	870,000	20,880,000
강널말뚝 (Sheet Pile)	400×100×10.5mm, 48.0kg/m	43	본	1,228,000	52,804,000
띠장	L=10m, H=300~500	30	m	20,000	600,000
버팀보	300x300x10x15	9	본	140,000	1,260,000
3. 인건비					9,320,000
관리인력	-	7	인	200,000	1,400,000
특별인부	-	12	인	300,000	3,600,000
보통인부	-	24	인	180,000	4,320,000
소계					101,744,000
기타제잡비					10,174,000
공급가액					111,918,000
부가세					11,192,000
합계금액					124,110,000

[표 2-106] 지오텍스타일 튜브를 이용하는 가물막이 공법 축조비용

(단위 : 원)

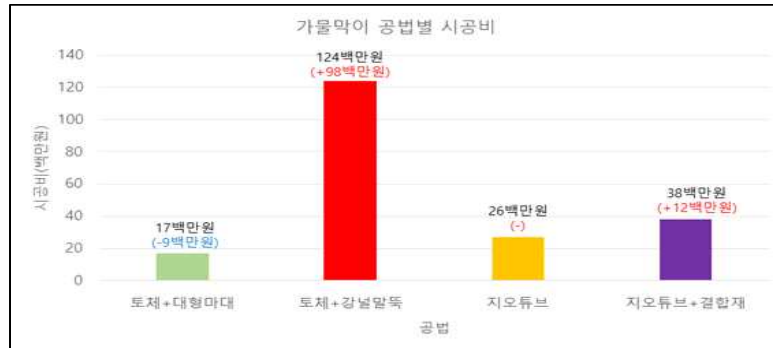
품명	규격	수량	단위	단가	금액
1. 작업별 증기사용료					9,690,000
지오텍스타일 튜브 시공작업	굴착기	6	식	500,000	3,000,000
	이송펌프(3Ph, 배관)	6	대	600,000	3,600,000
	발전기(100kW)	3	식	430,000	1,290,000
	크레인	1	식	800,000	800,000
	15톤 트럭	2	식	500,000	1,000,000
2. 재료비					9,325,000
지오텍스타일 튜브	3m(D) x 1m(L) (15m, 2단 쌓기(3개))	45	m	185,000	8,325,000
호퍼(믹싱호퍼)	3mx2mx1m (6m³)	1	대	1,000,000	1,000,000
3. 인건비					3,000,000
관리인력	-	6	인	200,000	1,200,000
보통인부	-	10	인	180,000	1,800,000
소계					22,015,000
기타제잡비					2,201,000
공급가액					24,216,000
부가세					2,411,000
합계금액					26,627,000

[표 2-107] 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브를 이용하는 가물막이 공법 축조비용

(단위 : 원)

품명	규격	수량	단위	단가	금액
1. 작업별 증기사용료					9,690,000
지오텍스타일 튜브 시공작업	굴착기	6	식	500,000	3,000,000
	이송펌프(3Ph, 배관)	6	대	600,000	3,600,000
	발전기(100kW)	3	식	430,000	1,290,000
	크레인	1	식	800,000	800,000
	15톤 트럭	2	식	500,000	1,000,000
2. 재료비					18,515,000
지오텍스타일 튜브	3m(D) x 1m(L) (15m, 2단 쌓기(3개))	45	m	185,000	8,325,000
결합재(시멘트 등)	혼합비에 따름	63	m³	130,000	8,190,000
호퍼(믹싱호퍼)	3mx2mx1m (6m³)	2	대	1,000,000	2,000,000
3. 인건비					3,360,000
관리인력	-	6	인	200,000	1,200,000
보통인부	-	12	인	180,000	2,160,000
소계					31,565,000
기타제잡비					3,157,000
공급가액					34,722,000
부가세					3,472,000
합계금액					38,194,000

제방의 개보수 공사의 가물막이 공법 중 일반적으로 토체와 대형 마대쌓기 또는 토체와 강널말뚝(Sheet Pile)을 이용하는 공법과 지오텍스타일 튜브를 이용한 공법의 경제성 분석을 실시하였다.



[그림 2-192] 가물막이 공법별 시공단가

지오텍스타일 튜브로 시공하는 공법(약 2,600만원)은 토체와 대형 마대로 하는 공법(약 1,700만원) 보다는 약 900만원, 지오텍스타일 튜브와 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 공법(약 3,800만원)은 약 2,100만원 정도의 공사비용이 많이 들어가지만 작업일수는 동일하다.

지오텍스타일 튜브로 시공하는 공법과 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브로 시공하는 공법은 토체와 강널말뚝(Sheet Pile)로 하는 공법(12,400만원) 보다는 약 8,500~9,200만원 정도의 차이 공사비용이 적게 들어가며, 작업일수는 작업일수 또한 2일이나 빨리 시공할 수 있다.

비록 토체와 대형마대로 가물막이 공법이 낮은 비용으로 공사는 가능하나 안정성 면에서는 지오텍스타일 튜브 또는 결합재가 적용된 지오텍스타일 튜브 시공에 비교할 수 없으며, 약 900만원 시공단가를 차이를 생각했을 경우, 안정성이 우수한 지오텍스타일 튜브로 시공하는 좋다고 판단된다.

토체와 강널말뚝으로 시공하는 가물막이의 경우 높은 재료비와 긴 작업일수로 인해 많은 시공비가 들어감에 따라서 동일한 조건에서 시공할 경우, 안정적으로 우수하며, 시공단가가 싼 지오텍스타일 튜브 또는 지오텍스타일 튜브와 결합재로 시공하는 것이 좋다고 판단된다.

2.12.7 실대형 실험 결론

제방의 개보수 공사의 가물막이 공법으로 지오텍스타일 튜브를 이용하여 시공 방법에서부터 시공 후 제체의 안정성, 시공의 경제성 분석을 통해서 지오텍스타일 튜브를 이용한 가물막이 공법의 타당성을 검토하였다.

시공방법의 경우, 현장에서 사용할 시공 가능한지를 검토하였으며, 3마력 이상의 펌프로 어디서든 시공이 가능할 것으로 생각되며, 결합재와 같이 사용 할 경우는 현장 시공을 고려해서 그라우팅 장비를 통한 주입방법이 좋을 것으로 판단된다.

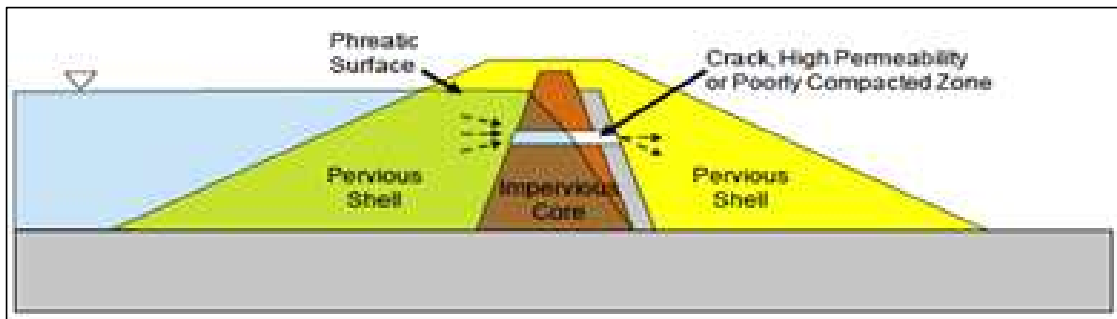
경제성 분석으로 지오텍스타일 튜브로 시공하는 것이 토체와 대형마대로 쌓아올린 제방 시공단가 보다 약 900만원 정도 비싸지만, 제체의 안정성을 고려할 경우, 시공단가 이상의 효과를 낼 것으로 생각된다.

3. 농업용수 용수확보를 위한 감압정 설계, 시공 프로세스 개발

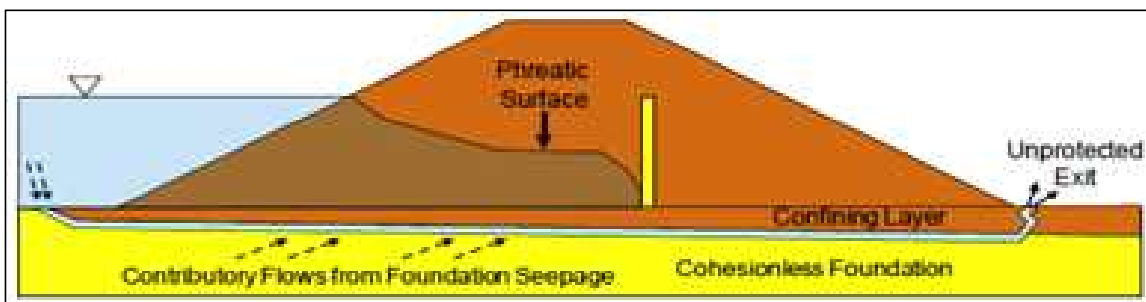
3.1 감압정의 필요성

필댐은 크게 2가지 원인에 의하여 안전성에 위협을 받는다. 첫 번째는 상류 유역에서 유입되는 홍수량이 여수토를 통한 배제량 보다 많아 필댐 내의 수위가 상승하여 발생하는 제체 월류 (overtopping)에 의한 것이고, 두 번째는 필댐 내의 물이 제체 또는 제체의 기초부를 통과하면서 내부의 흙 입자를 가지고 나오면서 발생하는 내부 침식(internal erosion)에 의한 것이다.

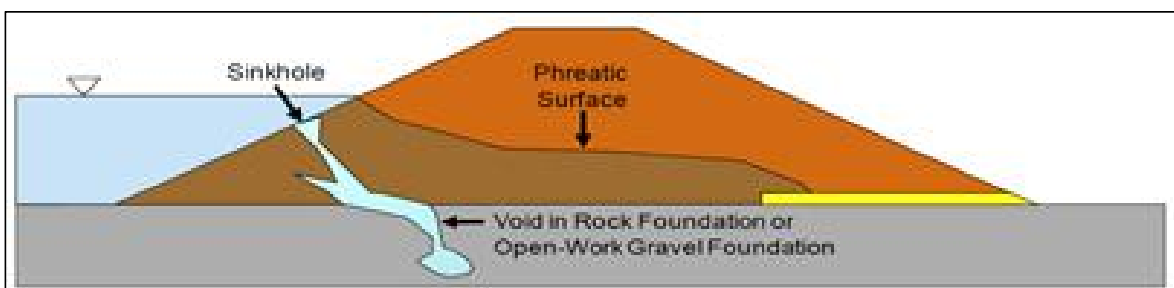
필댐의 내부 침식은 침식이 발생하는 그 위치나 경로에 따라 크게 제체를 통한 내부침식, 제체의 기초를 통한 침식, 제체와 제체의 기초를 통한 침식, 제체와 기초간의 접합부를 통한 침식, 제체와 제체내에 매설된 구조물 접합부를 통한 침식 5가지로 나눌 수 있다(USBR and USACE, 2012, FEMA 2005, 2008 and Fell et al., 2008)



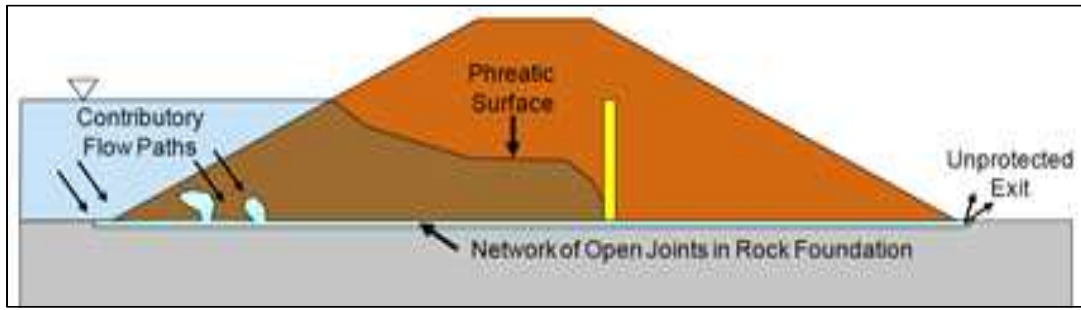
[그림 3-1] 제체를 통한 내부침식



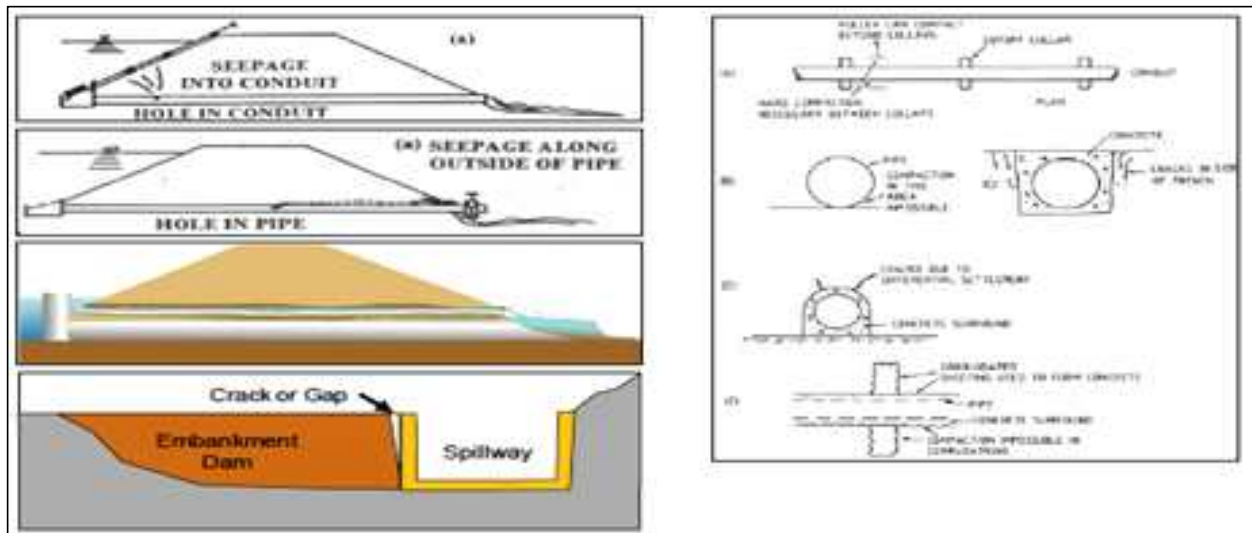
[그림 3-2] 제체의 기초를 통한 침식



[그림 3-3] 제체와 제체의 기초를 통한 침식



[그림 3-4] 제체와 기초간의 접합부를 통한 침식



[그림 3-5] 제체와 제체 내에 매설된 구조물의 접합부를 통한 침식

필댐의 내부 침식 5가지 유형 중, 기초부(기초부와 제체 접합부를 통한 침식 포함)를 통한 내부 침식은 국내의 경우 주로 그라우팅을 통한 보강 위주로 이루어지고 있는 실정이다. 하지만 이는 시간 경과에 따른 그라우트재의 용탈로 누수 및 내부 침식 현상이 재발하는 등 항구적인 보강으로 이어지지 못하고 있는 실정이다.

따라서 제체 및 기초지반의 누수 및 침식 방지에 대한 항구적인 공법으로 적용가능한 감압정 시스템을 도입하고 필댐의 안정성을 높여 농업용수의 추가적인 확보가 가능하다.

3.2 감압정 설치 목적

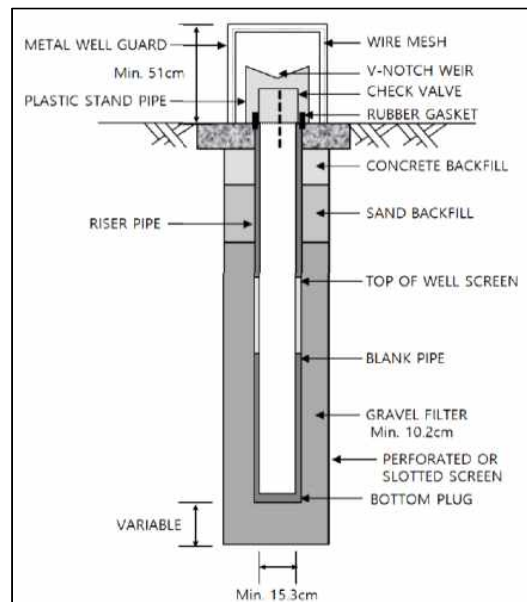
국내의 댐설계기준(2011)에서는 필댐의 안정조건으로 다음을 제시하고 있다. 마지막에 제시되어 있는 ‘제체 및 기초지반이 투수에 안전할 것’을 구체적으로 표현하면, 댐 또는 기초지반을 통과하는 침투수가 토립자를 유동시켜서 댐이 손상되는 일이 없도록 해야 함을 의미하며 필댐의 안정조건은 다음과 같다.

첫째 제체가 활동하지 않을 것, 둘째 안정적 여유고를 확보하여 저수가 댐 마루를 월류하지 않을 것, 셋째 비탈면이 안정되어 있을 것, 넷째 기초지반이 압축에 대해서 안전할 것, 다섯째 제체 및 기초지반이 투수에 안전할 것이 안정조건이다.

댐 설계기준에서는 필댐의 안정조건과 더불어 땀댐의 기초로서 다음 조건을 만족할 것을 요구하고 있다. 첫째 충분한 전단강도를 가질 것, 둘째 변형 침하량이 적을 것, 셋째 침투수량이 충분히 적을 것, 넷째 침투과괴를 일으키지 않을 것, 다섯째 지진시 액상화 현상을 일으키지 않을 것이다.

필댐의 안정 및 기초설계 조건으로서, 제체 및 기초지반의 침투수량이 충분히 적고, 침투과괴를 일으키지 않아 침투수로 인하여 필댐이 손상되지 않도록 요구하고 있다.

필댐에서의 감압정이란 필댐 하부지반을 통하여 발생하는 압력을 감소하기 위하여 수직으로 설치되어 스크린이 포함된 관정을 말하며, 감압정 주변 토사의 유입을 방지하기 위하여 필터 재료가 스크린을 둘러싸고 있는 형태로 구성되며, 이러한 감압정 시스템은 필댐의 내수위로 인한 하류부의 압력수두를 저감시켜 제체의 안정성을 높이는 것을 목적으로 적용된다.



[그림 3-6] 감압정 모식도 (USACE, 1992)

3.3 감압정 설계 및 설치 해외사례 검토

3.3.1 해외(미국USACE) 감압정 사용 이력

미공병단(USACE)에서는 댐과 제방의 하류 선단(또는 선단과 접한 원지반) 비탈의 양압력을 줄이기 위하여 감압정을 사용하고 있다. 초창기의 감압정은 몬타나주에 있는 Fort Peck 댐, 미시시피주에 있는 Arkabutla 댐, Black Bayou 제방을 대상으로 설치되었고, 감압정 사용의 유용성, 경제성, 실용성 등을 확인하였다.

초기에 설치된 감압정 중의 하나인 Fort Peck 댐 감압정은 하류 비탈의 과도한 압력을 줄이기 위하여 사용되었다. 수두계를 설치하여 피압수두를 측정하였으며, 사용된 감압정 케이싱의 직경은 6인치, 15미터 간격으로 3미터 깊이까지 관입하여 설치되었다.

이 당시 감압정 필터부는 2가지로 설치되었다. 감압정 하부 3미터까지 깨끗한 자갈을 포설하여 감압정 입구의 필터 역할을 하도록 하는 경우와 6인치 케이싱에 슬롯을 설치하여 well screen을 만드는 경우이다.

well screen을 설치한 경우에는 별도의 필터가 설치되지 않아 스크린을 둘러싼 세립토의 퇴적 문제를 해결하기 위하여 서징(surgings) 작업을 필요로 하였다. 서징을 거친 감압정은 안정된 상태가 되었고, 필요한 압력 완화를 제공한 것으로 조사되었다(Slichter 1945).

미공병단에서 감압정의 사용과 관련한 설계매뉴얼은 1952년에 처음 발행된 이후 수 차례의 개정을 거쳐 1992년 EM 1110-2-1914로 통합되었다. 이 EM에는 감압정 시스템의 설계, 시공 및 유지보수에 대한 지침을 제공하고 있다.

3.3.2 해외(미국USACE) 감압정 사용 현황

미공병단(USACE)에서는 감압정 사용 관행에 대한 조사가 12개의 주제에 대하여 미공병단 7개 지역구를 대상으로 2016년도에 이루어졌다. 이 지역구에 설치된 감압정은 약 6,000여개이고 84%는 제방에 설치되어있고 16%는 댐에 설치되어있다. 이 조사 결과에서 우리가 참고할 만한 내용은 다음과 같다.

가. 표준 설치사양

감압정 케이싱 재질은 나무, 주철, 강철, PVC, 섬유유리 등 광범위하게 사용되었으나 후자의 두 가지는 펌프의 시험 및 청소 시 발생하는 압력을 견딜 수 있을 정도로 충분히 견고하지 않다고 조사되었다.

나. 흐름 측정, Flow Measurements

대다수의 지역구에서는 댐이나 하천의 수위가 높은 경우, 감압정의 화학적 보수 전·후, 펌프 테스트 하는 동안 각각 유량(흐름)을 측정하고 있다고 답했다. 유량 측정으로 가장 간단한 방법은 실린더와 스톱워치를 사용하였다.

다. 유지관리와 세척

유지관리는 2년에서 5년 사이에 발생한다는 것이 가장 일반적인 반응이었다. 특정 지역은 10년마다 관리를 하기도 하였다. 감압정의 능력이 설계의 85% 미만인 경우 세척이 필요하였으며, 세척 후의 감압정 능력이 85% 미만으로 유지되면 교체할 예정이다.

라. 감압정 세척 방법

감압정 세척은 기계적, 화학적, 열적인 방법이 포함된다. 기계적 방법(브러싱, 서징, 플러징, 분사, 에어리프팅)은 항상 수행되며 비용대비 가장 효과적이다. 일부 지역에서는 세척 전후에 다운홀 카메라를 사용하여 육안으로 검사한다.

마. 설계 관행

감압정에 대한 설계관행은 EM 1110-2-1914를 따른다. 설계는 시추조사, 지질조사, 시료에 대한 실내시험 결과에 근거하며 설계 시 감압정의 효율은 80%로 가정하였다.

3.3.3 해외(미국USACE) 감압정 설계 사례 : HHD 사례 연구

본 연구에서는 해외의 감압정 설계 적용사례로 미국 플로리다 남부에 위치한 Herbert Hoover Dike를 검토하였다.



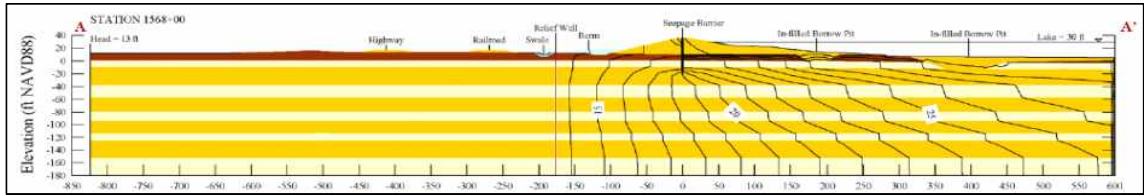
(a) 미국 플로리다 남부 Lake Okechobee 위치 (b) Herbert Hoover Dike 프로젝트의 제방 (c) 1A 구간(오른쪽 하단 분홍색 구간)

[그림 3-7] Herbert Hoover Dike 프로젝트 위치

Herbert Hoover Dike는 1930년대와 1960년대 두 단계에 걸쳐 건설되었고, 기초는 일반적으로 조밀하고 미세한 석영, 실트 및 미사질 모래, 유기질 토양으로 구성되었고, 본 사례 연구의 대상인 Herbert Hoover Dike의 1A구간 제방의 치수는 폭 14ft, 저폭 250ft, 내측경사 1:6, 외측경사 1:3, 제정 높이 25ft이다.

Herbert Hoover Dike의 기초지반 조건은 연직방향으로 매우 가변적이며, 일반적으로 다양한 실트 함량을 가진 기초 모래와 여러 개의 석회암층 및 사암층으로 구성되며, 유기질이 풍부한 재료의 연속 블랭킷으로 덮여있다.

1A구간의 투수계수는 정수두 펌핑시험에 의해 42.5(ft/day)로 추정되었다. 그리고 1A 구간에서 무기물질의 밀도는 다른 지구와 유사하지만 블랭킷의 많은 부분을 구성하는 ft와 유기질 실트는 대부분의 무기물질에 비해 밀도가 훨씬 낮아 상승압력에 대한 저항력이 작다.



(a) HHD의 측점 1568+00에 대한 유한요소 침투해석 모델



(b) 위성사진

[그림 3-8] Herbert Hoover Dike 프로젝트에 해석지점

Herbert Hoover Dike가 가지고 있는 가변적이고 상대적으로 투수성이 높은 제방과 기초, 지표부 블랭킷의 낮은 밀도, 누수 구멍의 존재, 부족한 차수벽 등의 여러 불안정 요소에 의하여 1990년대 중후반의 두 차례의 고수위조건(30년 빈도에 해당하는 홍수위인 17ft)에서 수많은 싱크홀, 누수, 보일링, 파이핑 등이 관찰되었다.

USACE에서는 과도한 누수 발생과 그로 인한 인명손실의 가능성에 대한 증대 우려로 Screening Portfolio Risk Analysis(SPRA)를 통하여 Herbert Hoover Dike를 보강이 긴급한 시설물로 선정하였다. 이에 대한 위험저감 대책으로는 제체 및 기초지반의 일부구간까지의 차수벽 설치와 감압정 시스템 및 제외 측의 누수방지 Berm설치가 제시되었다.

여기서, 제시된 차수벽의 깊이는 제체으로부터 55~65ft정로 모든 지하수의 흐름을 차단하지는 않지만 제방 내의 기존 파이핑 경로와 침투성이 높은 기초 지층까지를 차단하기 위한 의도로 제시되었다

제외측의 누수방지 berm은 독 높이의 4배 길이의 폭(독이 25ft 높이인 경우 폭은 100ft)을 가지는 것으로 제시되었다. 더불어 블랭킷 하부의 양압력을 낮추기 위하여 완전 관통형 감압정 (fully-penetrating relief wells)이 제시되었고 감압정의 간격은 하부지반 조건에 따라 다양하게 제시되었다.

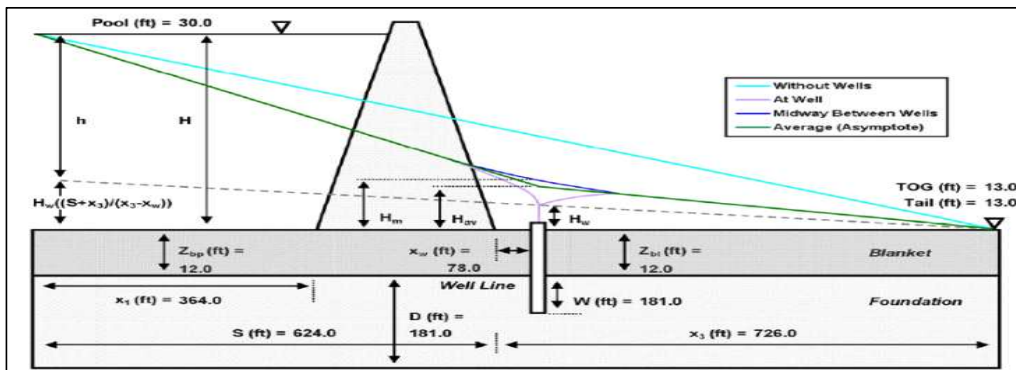
감압정 시스템 설계를 위하여 USACE 기준에 부합하게 엑셀 프로그램으로 계산하였고 Geo-slope사의 SEEP/W 소프트웨어를 사용하여 검토하였다. 이 작업을 위하여 감압정 시스템의 ‘적절한 단면’을 HHD프로젝트의 세부 설계 기준을 만족하고, 공학적 판단(engineering judgment)을 만족하며, 신뢰성 있고 경제적으로 효율적인 단면을 구성하고자 한다.

Herbert Hoover Dike 개보수설계 기준은 HHD 프로젝트의 개보수를 만족하기 위한 설계기준은 다음과 같다.

유한요소 침투해석의 대표단면은 아래의 그림과 같다. 각 하부지층과 제체의 두께와 투수계수 값은 각각의 단면의 대표값들로 이상화하여 입력한다. 이 후 USACE 설계 지침에 따라 Excel 프로그램으로 설계를 수행하였다. 그리고 이 엑셀 프로그램은 수계산과 유한요소 해석 모델링에 의하여 검증된다. 마지막으로 이 모델 단면은 과거 최고 수위 조건인 17ft에서 과거에 발생한 누수, 분사 및 파이핑 현상이 구현한다.

[표 3-1] 수위조건별-지점별 안전율 요구 기준(HHD 사례)

구 분	지점별 요구 안전율			비 고
	Toe	Toe에서 외측으로 150ft 떨어진 곳	Toe에서 외측으로 300ft 떨어진 곳	
프로젝트 표준 수위(25ft)조건	3.0	1.6	1.1	해당수위 12시간 지속 조건
최고수위(30ft)조건	1.5	1.5	1.1	



[그림 3-9] 감압정 설계를 위한 입력 파라미터 개념도

엑셀 프로그램에서의 입력 값은 하중 섹션, 블랭킷 섹션, 감압정 섹션으로 나누어져 입력하도록 되어 있다.

하중 섹션의 입력 요소는 수위조건, 댐 하류부 지면 표고, 제체의 폭, 감압정 설치 라인, 누수경로의 입/출구이다. 블랭킷 섹션의 입력 요소는 각 지층의 투수계수, 두께, 단위중량이다. 감압정 섹션의 입력 요소는 감압정 시스템의 스크린 직경, 필터, riser 표고, 효율 등을 입력하여 감압정의 유효 반경 계산값이다.

안전율 계산은 엑셀 프로그램에 각 섹션들의 입력 요소들을 입력하여 감압정 순 수두 (net head, h), 감압정 손실에 대하여 수정된 감압정 단면에서의 평균 순 수두 (average net head, h_{av}), 감압정 손실에 대하여 수정된 감압정 간의 중간 단면에서의 순 수두 (net head midway, h_m), 감압정 효율 (well efficiency, E_w), 감압정 총 손실 (total well losses, H_w), 감압정 단면에서의 평균 순 수두 (average net head, H_{av}), 감압정 간의 중간에서의 순 수두 (net head midway, H_m)를 구하여 상향 압력에 대한 안전율 (FS uplift)와 감압정 라인에서의 상향압력에 대한 안전율 (FS uplift-a)를 계산한다. 여기서 계산된 안전율은 각 지점에서 요구하는 안전율과 비교하여 적합 여부를 검토하게 된다.

3.3.4 필댐 감압정 설치 필요조건 도출

앞의 case study 검토결과 댐에서의 감압정 설치 조건은 다음과 같다.

첫째 댐체 하부에 투수지반이 존재하는 경우, 둘째 투수성 토층 속으로 침투하는 물에 의해 높은 간극압이 발생하여 댐 본체의 안정에 문제가 우려되는 경우, 셋째 투수지반을 통하여 침투, 분사 및 파이핑 현상이 우려되는 경우, 마지막으로 필댐 체체 내부의 세립자 이동을 억제하고 침투수를 안전하게 제체밖으로 배제하여 간극수압을 저하시키기 위한 드레인이 필요한 경우이다.

감압정을 시공하기 위해서는 감압정 직경은 15~60센티미터, 간격은 15~30미터를 지표에서 하부 투수지반에 대하여 천공한다. 감압정 직경의 약 1/2 정도인 유공관을 매입하고 간극을 필터재료로 충전한다. 감압정으로 부터의 유출수는 감압정의 유출구보다 낮은 배수도랑에 자연 배수시킨다.

3.3.5 감압정 설계 적용 시 검토사항

댐 설계기준에 의하면 필댐의 제체 및 기초는 침투수에 대하여 안전하도록 설계하여야 한다고 명시되어 있다.

필댐의 제체 및 기초는 누수를 완전히 차단할 수는 없기 때문에 침투수압, 동수경사 등을 검토해야 한다. 침투수압은 차수존의 성질, 댐의 형식 및 규모에 영향을 받고, 또한 허용누수량은 필댐의 목적 및 안전성에 따라 다르기 때문에 따로 정하지는 않으나 어느 한도를 넘어서면 분사현상(quick sand)과 보일링(boiling) 및 파이핑(piping) 등의 침투로 인한 파괴요인이 되므로 신중한 검토와 대책이 필요하다.(댐 설계기준, 2001)

파이핑 원인은 대상재료의 불균일성이나 지질조건의 사소한 변화, 시공상 부주의 등에 의한 경우가 많으므로 이론적인 취급은 곤란하지만 보통은 한계유속에 의한 검토 방법과 한계동수경사를 구하여 분사현상의 발생가능성을 검토하여 안전여부를 판정한다.

감압정 설계 적용 시 검토 기준으로 댐 설계기준을 참고하면, 분사현상을 일으키는 한계동수경사는 테르자기에 의하여 제시된 다음 식으로 계산한다.

$$\text{한계동수경사 } i_c = h / d = G_s - 1 / 1 + e \quad \text{식 (6)}$$

여기서 i_c : 한계동수경사

h : 저수지 전수두(m)

d : 분사지점의 수두(m)

G_s : 토립자의 비중

e : 흙의 간극비

분사현상에 대한 저항력은 소성지수가 큰 재료일수록 큰 경향이 있으며 점착력이 없는 세립자의 한계동수경사 (i_c)는 0.5~0.8로 고려한다. 침투류 해석에 의하여 산출한 동수경사가 한계동수경사의 1/2 이하가 되도록 해야 하는 것으로 댐 설계기준(2001)에 명시되어 있다.

3.4 감압정 규모 결정을 위한 수치해석

감압정 직경 및 간격 설계를 위해서는 침투류 해석의 유선망 방법으로는 단면의 기하학적 형상 및 복잡한 경계조건을 고려하는데 한계가 있어 현재는 유한요소법이나 유한차분법을 등의 수치해석기법이 활용되고 있다(Cho, 2012). 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 침투해석을 수행하였다. 유한요소해석 침투에 사용되는 지배미분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right] + Q = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad \text{식 (7)}$$

여기서, H 는 전수두(m), k_x 는 x 방향의 투수계수(m/sec), k_y 는 y 방향의 투수계수(m/sec), k_z 는 z 방향의 투수계수(m/sec), Q 는 흙의 단위 체적당 단위시간당 물의 유출입량($\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{sec}$), Θ 는 체적함수비, t 는 시간(sec)이다.

흙속에서 물이 상향 침투가 발생하면 유효응력이 감소하고, 유효응력이 0인 조건에 도달하면 흙의 안정상태가 파괴되는 파이핑(Piping) 현상이 발생한다. 유효응력이 0이 되는 동수경사(i)를 한계동수경사(i_{cr})라 한다. 한계동수경사에 의한 안전율은 다음과 같이 검토한다.

$$i_{cr} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} = (1 - n)(G_s - 1) \quad \text{식 (8)}$$

$$F_s = \frac{i_{cr}}{i} \quad \text{식 (9)}$$

여기서, γ 는 토립자의 수중단위중량(kN/m^3), γ_w 는 물의 단위중량(kN/m^3), G_s 는 토립자의 비중, e 는 흙의 간극비, n 은 흙의 간극률이다.

3.4.1 수치해석 조건

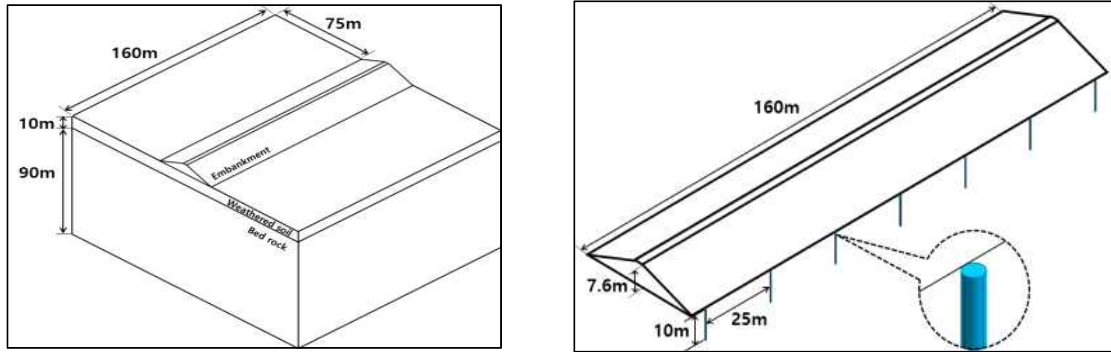
저수지 제방의 형식은 균일형으로 가정하였으며 하부지반은 침투류 흐름이 발생하는 풍화토 지층(10m)과 침투류 흐름이 발생하지 않는 연암층(90m)으로 가정하여 분석하였다. 저수지 제방의 높이는 농업생산기반정비사업 통계연보를 분석하여 농업용 저수지 평균 높이 7.6m로 결정하였다(MAFRA, KRC, 2018).

상류사면과 하류사면의 경사도는 1:2.5, 댐마루 폭은 2.6m이고, 제방의 길이는 160m로 설정하였다. 감압정의 직경은 0.1m, 0.2m, 0.3m, 0.4m, 0.5m 등 5가지 조건으로 적용하였으며 설치간격은 5m, 10m, 25m, 50m 등 4가지 조건으로 침투해석을 수행하였다.

해석에 사용된 지반의 물성치는 농업용 저수지 30개 지구의 비상대처계획(EAP) 자료를 참조하여 제방과 하부지반 풍화토의 투수계수를 결정하였다.

침투류 해석을 위한 불포화 함수특성의 체적함수비와 부간극수압의 관계는 농업용저수지 설계 자료를 참조하여 결정하였다. 저수지 제방의 수위조건은 상시만수위(4.6m) 조건으로 가정하여 정상류 수치해석을 수행하였다.

감압정의 직경, 설치 간격, 수위조건 등을 고려하여 해석을 수행하였으며, 감압정 효과분석을 위한 해석모델과 조건은 다음 그림과 표에 나타내고 있다.



(a) Homogeneous type

(b) Relief well(diameter=0.5m, space=25m)

[그림 3-10] 수치해석 모델

[표 3-2] 수치해석 조건

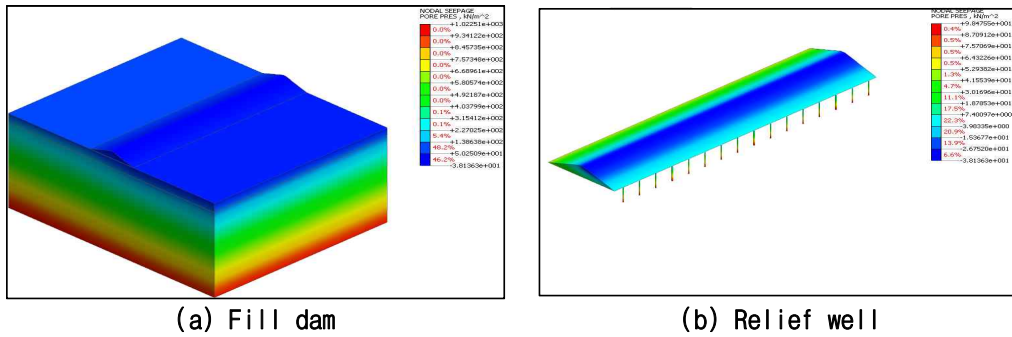
Classification		Homogeneous earth fill dam
Fill dam	Height(m)	7.6
	Width(m)	2.6
	Slope(V:H)	1:2.5
	Length(m)	160
Permeability	Embankment(m/sec)	1.0×10^{-7}
	Weathered soil(m/sec)	1.0×10^{-3} , 1.0×10^{-5} , 1.0×10^{-7}
	Bed rock(m/sec)	5.00×10^{-11}
Relief well diameter(m)		0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
Relief well depth(m)		10
Space between relief wells(m)		5, 10, 25, 50
Upstream water head(m)		4.6(N.H.W.L.)

감압정의 직경, 설치간격에 따른 제방의 안정성 향상 효과를 분석하기 위해 3차원 유한요소 침투해석 프로그램 midas GTS NX를 사용하였다.

침투해석 요소망의 크기는 일본 하천설계기준에서 제안하는 제방 높이의 1/10이하로 설정하였으며 (Jin et al., 2011; Byun et al., 2012), 제방 횡단면에서 분석지점은 제방 하류사면을 검토하였다. 하류사면과 풍화토층의 분석위치는 사면 끝단부에서 좌방향 0.5m, 제방과 하부지반과의 경계면으로부터 상부와 하부 0.1m 지점에서 각각 분석하였다.

제방 횡단면에서 정의한 각 지점에 대한 감압정 미설치 조건으로 제방 종단방향의 전체구간에 대한 간극수압과 동수경사를 분석하였다(감압정 직경을 0m로 해석).

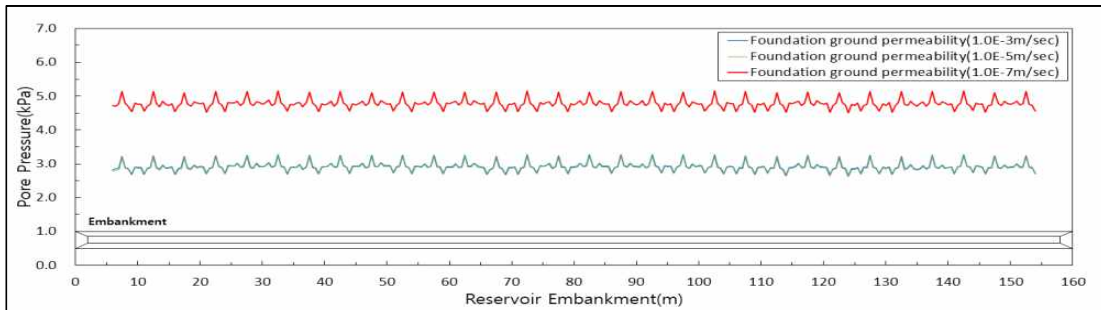
감압정 설치 유무에 따른 침투거동을 분석하기 위하여 감압정의 직경 및 설치 간격을 변화시켜 제방하류사면 간극수압을 분석하였으며, 감압정 설치조건에 따른 간극수압의 결과 예시는 아래 그림에 나타내고 있다.



[그림 3-11] 간극수압의 수치해석 결과 예시

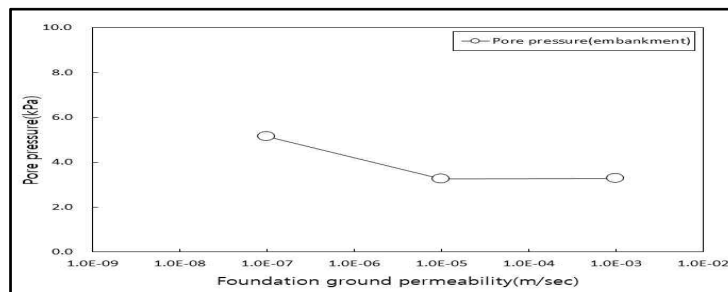
3.4.2 수치해석 결과

아래 그림은 저수지 하부지반의 투수계수에 따른 제방 하류사면의 종방향 간극수압을 나타내고 있으며 하부지반의 투수계수가 $1.0E^{-3}m/sec$ 과 $1.0E^{-5}m$ 에서는 유사하게 간극수압이 나타났으며, 평균값은 2.92kPa, 2.90kPa로 평가되었으며, 하부지반의 투수계수가 $1.0E^{-7}m/sec$ 에서는 간극수압의 평균값은 4.78kPa로 평가되었다.



[그림 3-12] 하부지반 투수계수에 따른 저수지 하류사면 종방향 간극수압

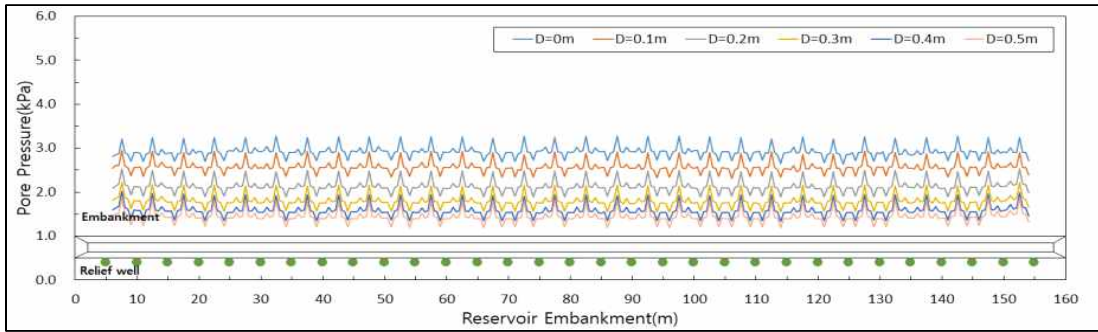
아래 그림은 저수지 하부지반의 투수계수에 따른 제방 하류사면의 최대간극수압 분석 결과가 제시되어 있으며, 하부지반의 투수계수가 증가함에 따라 저수지 제방 하류사면의 간극수압은 감소하는 것으로 평가되었다.



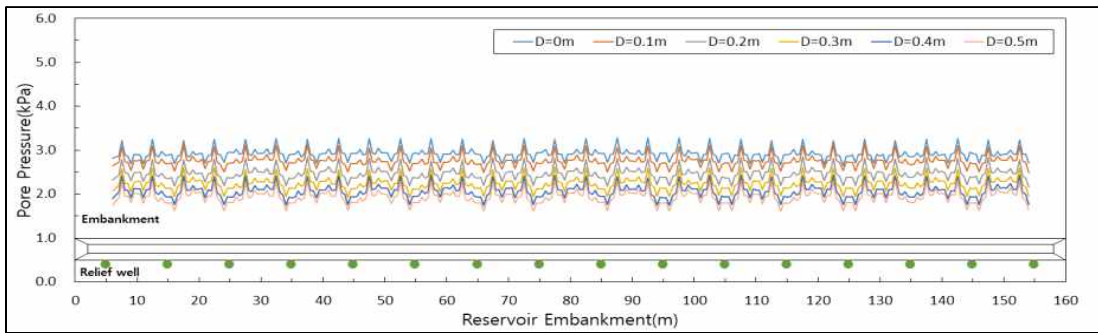
[그림 3-13] 하부지반 투수계수에 따른 저수지 하류사면 최대간극수압

아래 3개의 그림은 만수위 조건 하류사면 분석 지점에서 제방 종단방향으로 감압정의 설치 간격과 직경에 따른 간극수압의 분포를 나타내고 있다. 각 그림에서 맨 위에 위치한 선은 감압정이 설치되지 않은 경우(감압정 직경을 0으로 해석)의 간극수압을 나타낸 것이다.

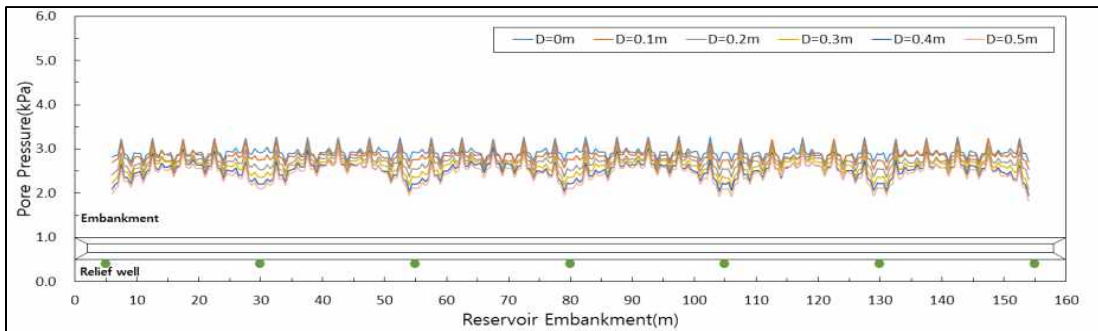
감압정이 설치된 위치에서 제방에 작용하는 간극수압은 급격히 감소되었으며, 감압정과 감압정 사이에서 간극수압 감소는 상대적으로 적은 것으로 평가되었다. 감압정이 설치된 제방의 최대간극수압은 감압정과 감압정 사이의 중간지점에서 나타났고, 최소간극수압은 감압정이 설치된 위치에서 나타났다.



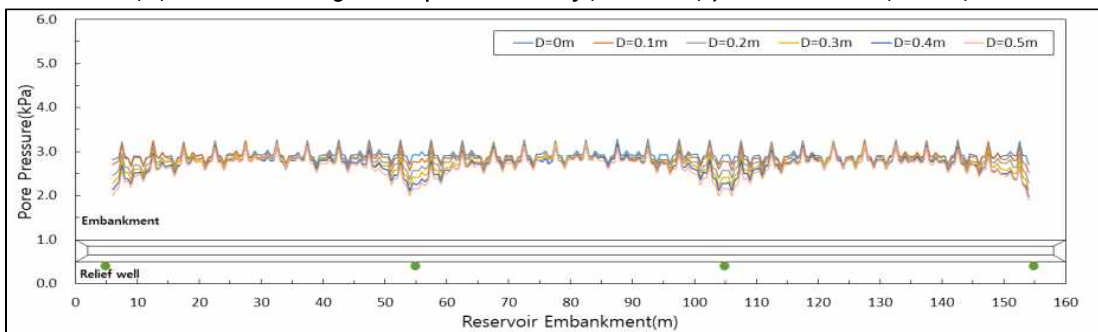
(a) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-3}$), Relief well($S=5m$)



(b) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-3}$), Relief well($S=10m$)

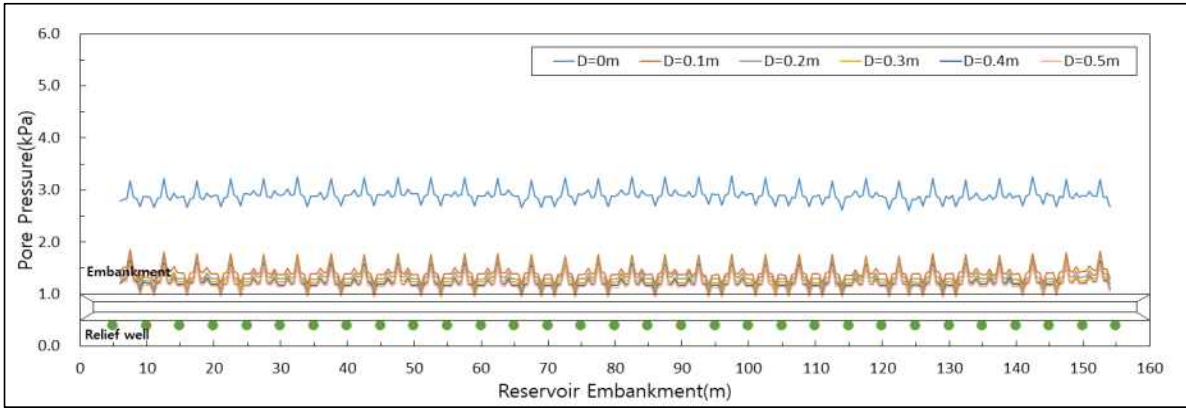


(c) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-3}$), Relief well($S=25m$)

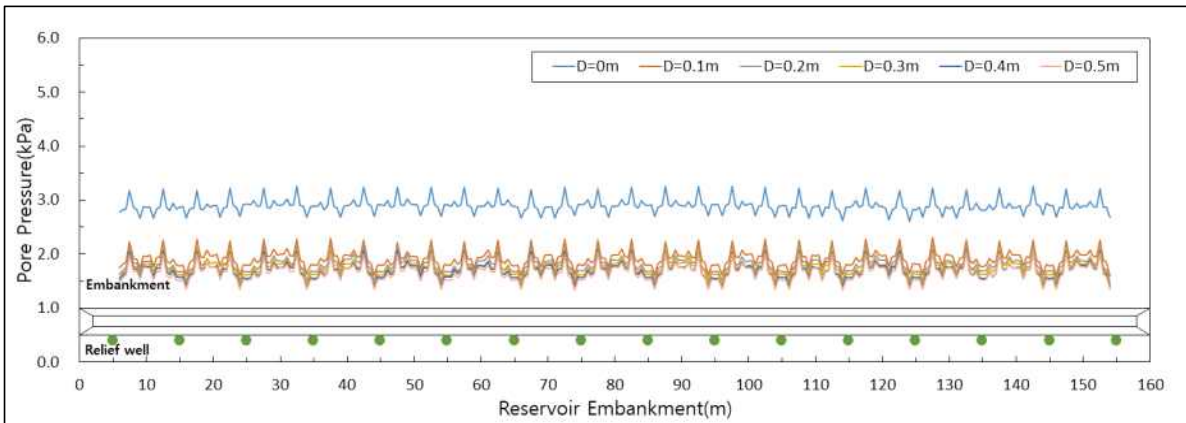


(d) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-3}$), Relief well($S=50m$)

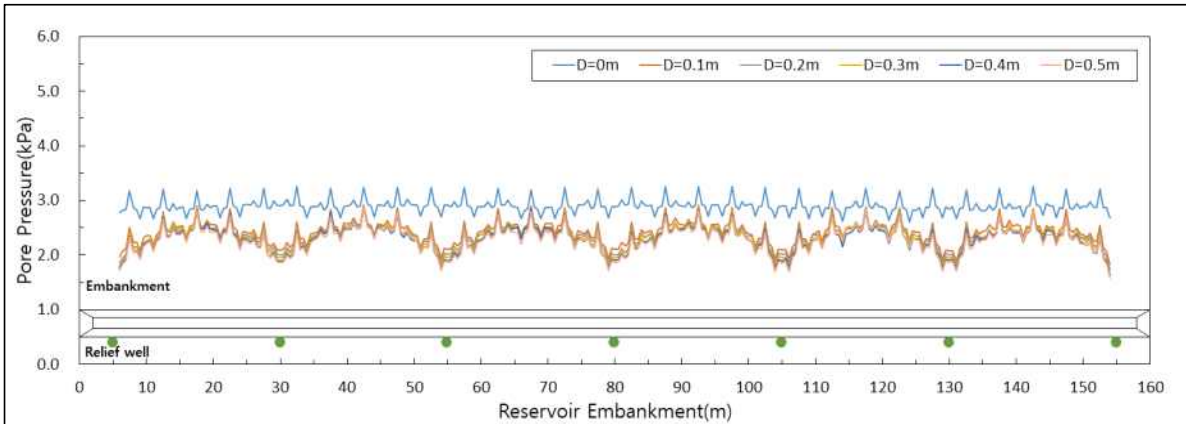
[그림 3-14] 하부지반 투수계수($1.0E^{-3}m/sec$)의 저수지 하류사면 종방향 간극수압



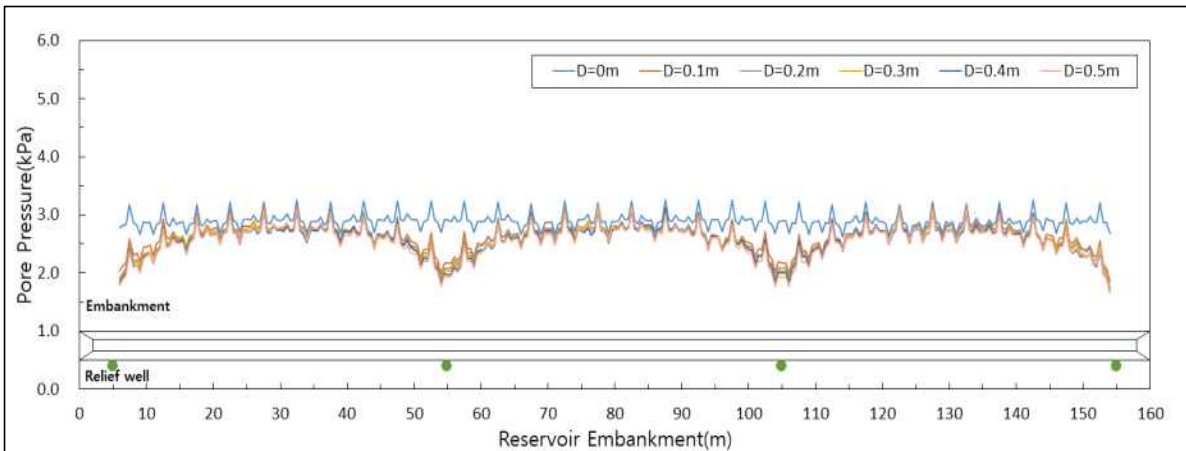
(a) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-5}$), Relief well($S=5m$)



(b) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-5}$), Relief well($S=10m$)

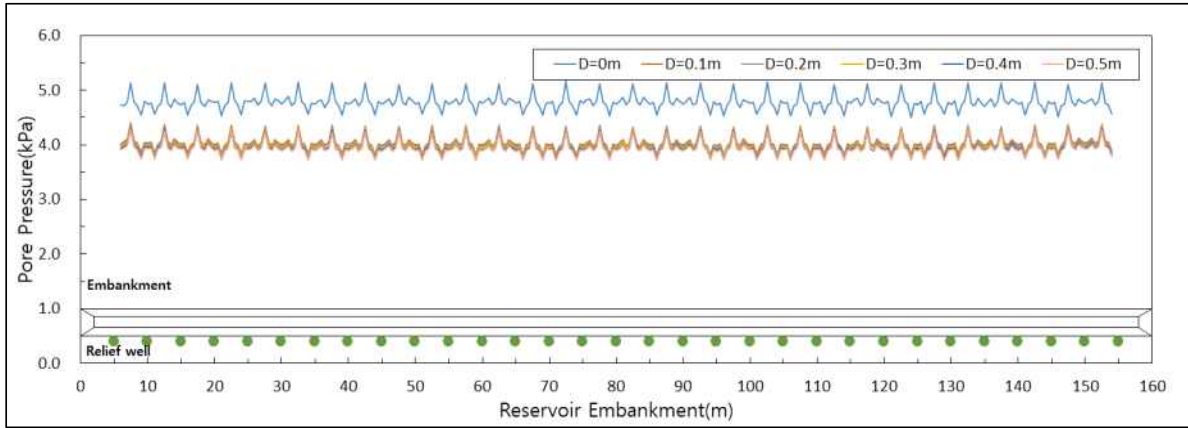


(c) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-5}$), Relief well($S=25m$)

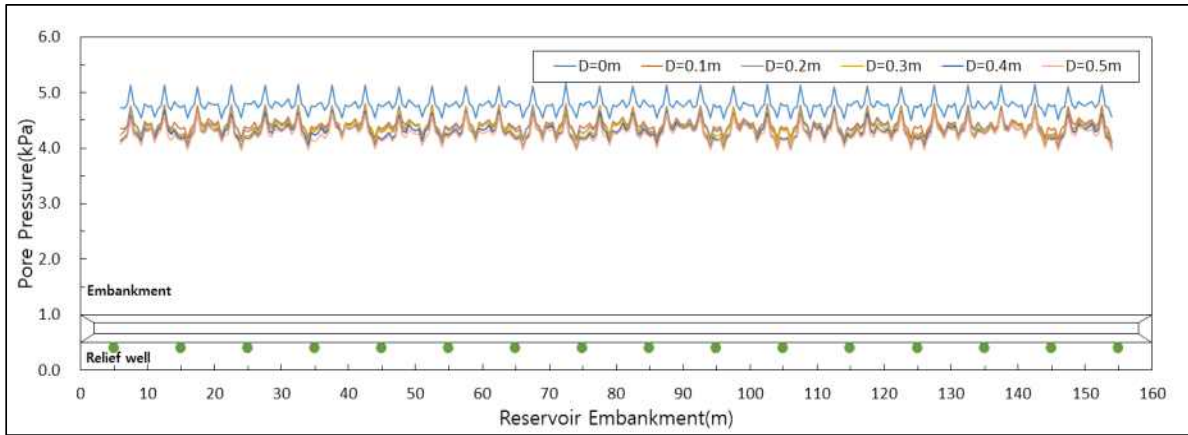


(d) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-5}$), Relief well($S=50m$)

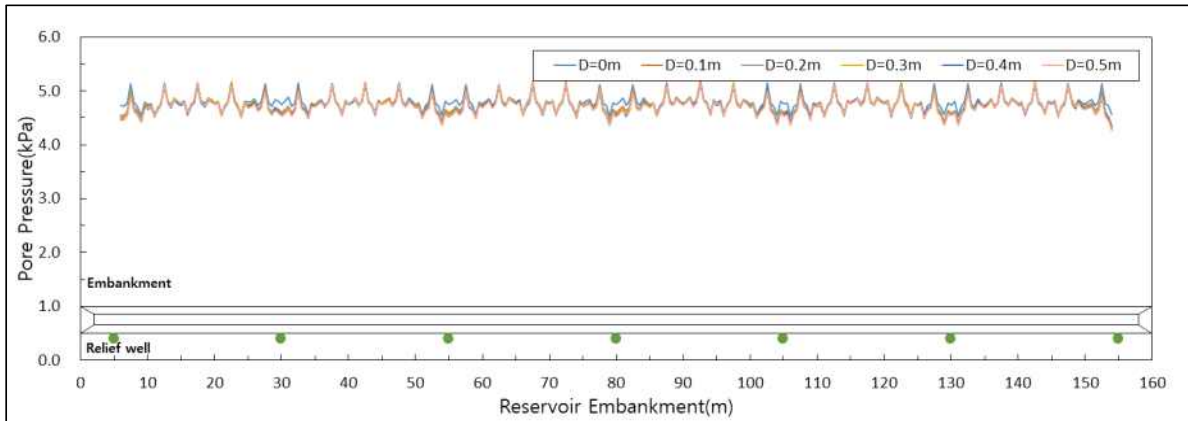
[그림 3-15] 하부지반 투수계수($1.0E^{-5}m/sec$)의 저수지 하류사면 종방향 간극수압



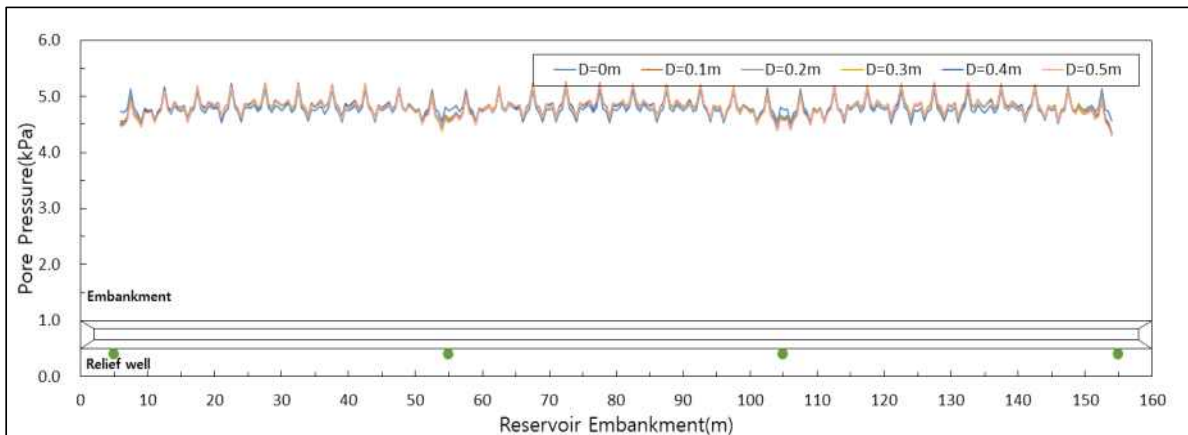
(a) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-7}$), Relief well($S=5m$)



(b) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-7}$), Relief well($S=10m$)



(c) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-7}$), Relief well($S=25m$)

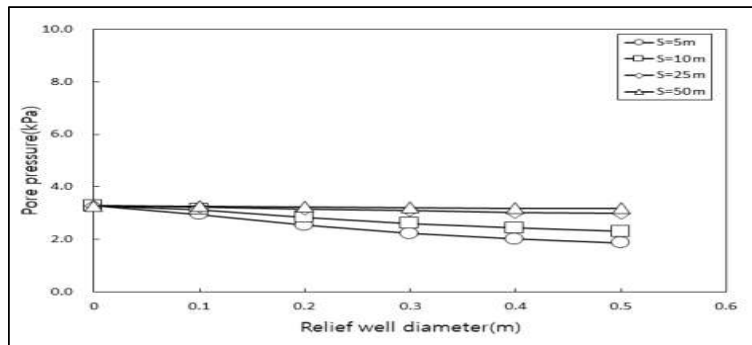


(d) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-7}$), Relief well($S=50m$)

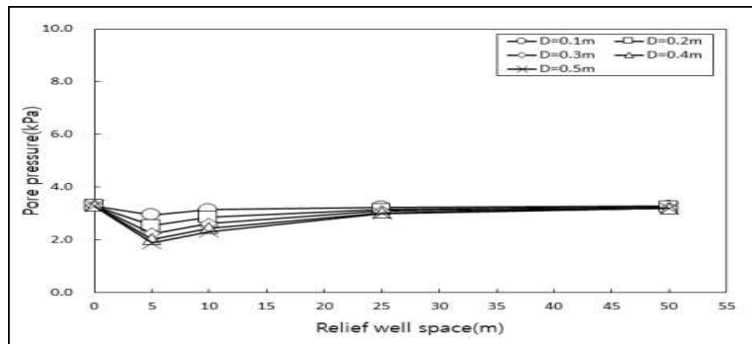
[그림 3-16] 하부지반 투수계수($1.0E^{-7}m/sec$)의 저수지 하류사면 증방향 간극수압

아래 그림은 하부지반의 투수계수가 $1.0E^{-3}m/sec$ 에서 감압정의 설치간격, 직경변화에 따라 상시만수위 조건에서 하류사면에 작용하는 종단방향 최대간극수압과 감소비를 나타내고 있다.

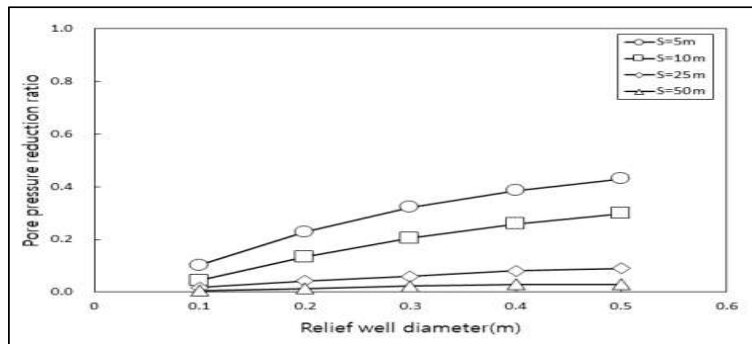
감압정이 설치되지 않은 조건에서 상시만수위 시 제방 하류사면에 작용하는 최대간극수압은 3.28kPa로 평가되었다. 상시만수위 조건에서 감압정 직경 0.1m, 설치간격 50m에서 3.26kPa로 최소 0.6% 감소하였고, 직경 0.5m, 설치간격 5m에서 1.87kPa로 최대 43.0% 감소하는 것으로 평가되었다.



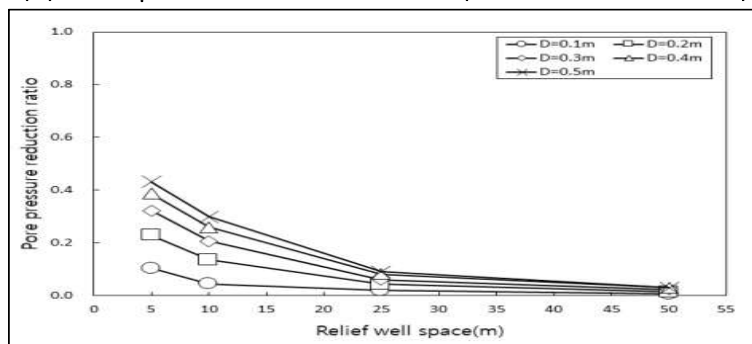
(a) Pore pressure(relief well diameter)



(b) Pore pressure(relief well space)



(c) Pore pressure reduction ratio(relief well diameter)

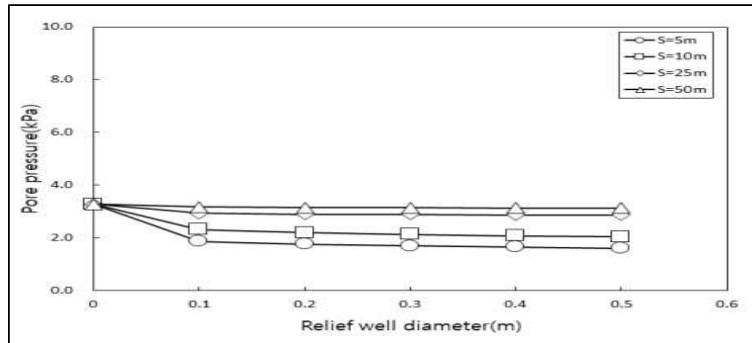


(d) Pore pressure reduction ratio(relief well space)

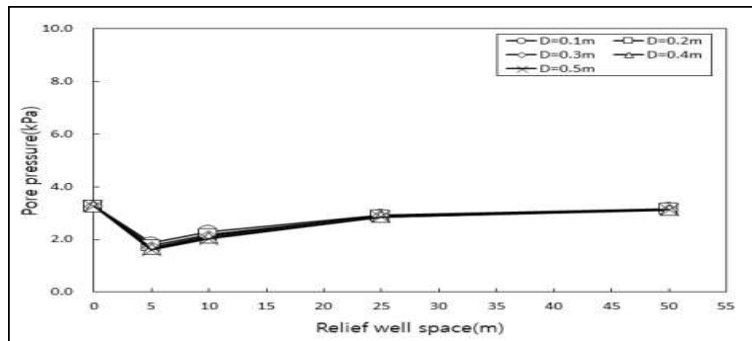
[그림 3-17] 하부지반 투수계수($1.0E^{-3}m/sec$)의 저수지 하류사면 최대간극수압 변화

아래 그림은 하부지반의 투수계수가 $1.0E^{-5}m/sec$ 에서 감압정의 설치간격, 직경변화에 따라 상시만수위 조건에서 하류사면에 작용하는 종단방향 최대간극수압과 감소비를 나타내고 있다.

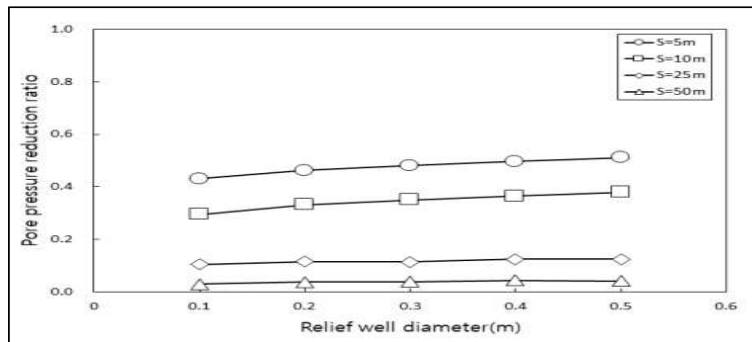
압정이 설치되지 않은 조건에서 상시만수위 시 제방 하류사면에 작용하는 최대간극수압은 3.26kPa로 평가되었다. 상시 만수위 조건에서 감압정 직경 0.1m, 설치간격 50m에서 3.17kPa로 최소 3.1% 감소하였고, 직경 0.5m, 설치간격 5m에서 1.60kPa로 최대 51.1% 감소하는 것으로 평가되었다.



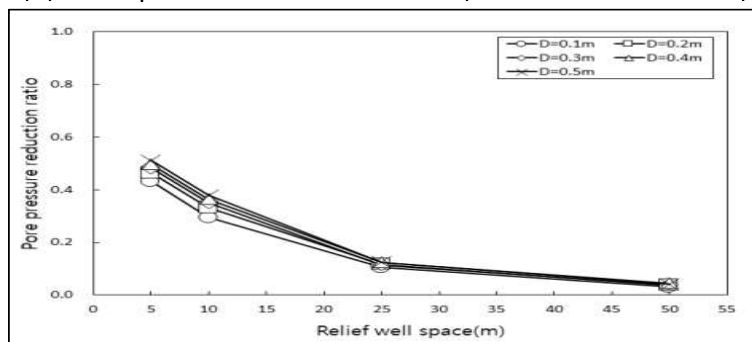
(a) Pore pressure(relief well diameter)



(b) Pore pressure(relief well space)



(c) Pore pressure reduction ratio(relief well diameter)

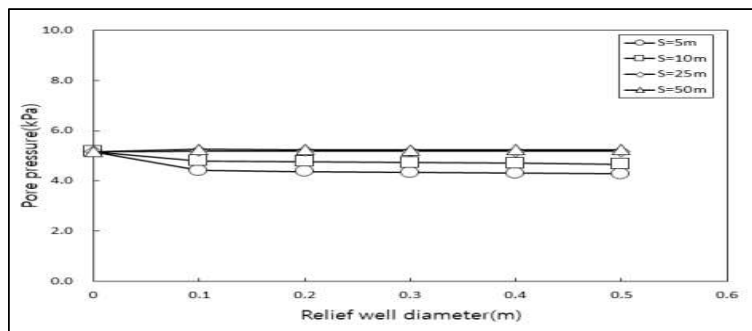


(d) Pore pressure reduction ratio(relief well space)

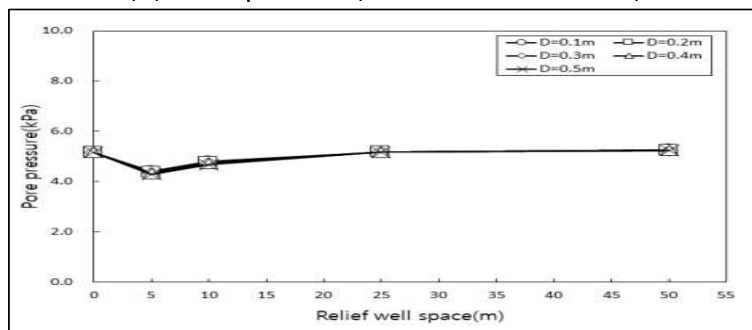
[그림 3-18] 하부지반 투수계수($1.0E^{-5}m/sec$)의 저수지 하류사면 최대간극수압 변화

아래 그림은 하부지반의 투수계수가 $1.0E^{-7}m/sec$ 에서 감압정의 설치간격, 직경변화에 따라 상시만수위 조건에서 하류사면에 작용하는 종단방향 최대간극수압과 감소비를 나타내고 있다. 감압정이 설치되지 않은 조건에서 상시만수위 시 제방 하류사면에 작용하는 최대간극수압은 5.16kPa로 평가되었다.

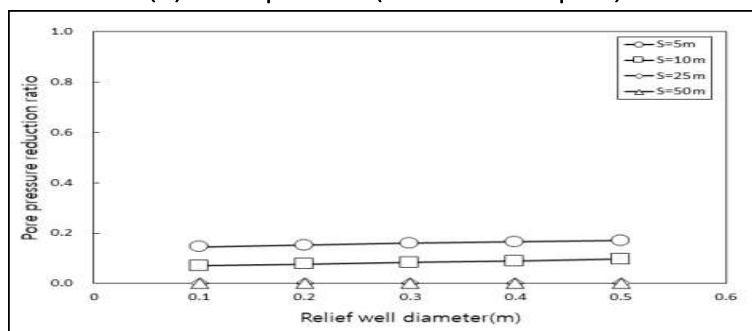
상시만수위 조건에서 감압정 직경 0.1m~0.6m, 설치간격 25m, 50m에서 감압정을 설치하지 않은 조건과 유사한 간극수압이 나타났고, 직경 0.5m, 설치간격 5m에서 4.28kPa로 최대 17.0% 감소하는 것으로 평가되었다.



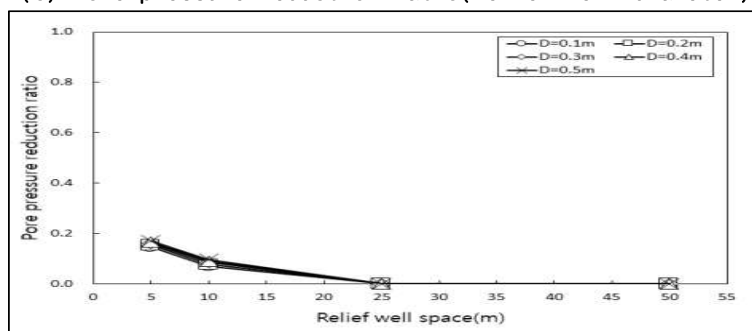
(a) Pore pressure(relief well diameter)



(b) Pore pressure(relief well space)



(c) Pore pressure reduction ratio(relief well diameter)

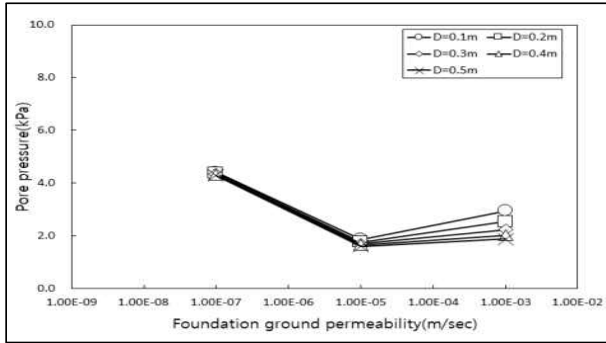


(d) Pore pressure reduction ratio(relief well space)

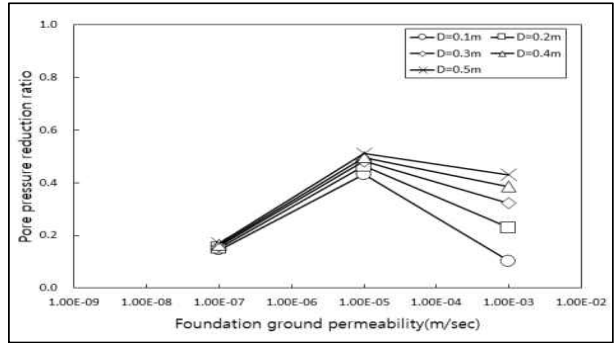
[그림 3-19] 하부지반 투수계수($1.0E^{-7}m/sec$)의 저수지 하류사면 최대간극수압 변화

아래 그림은 하부지반의 투수계수 변화에 따른 감압정 직경별 간극수압의 변화를 나타내고 있다.

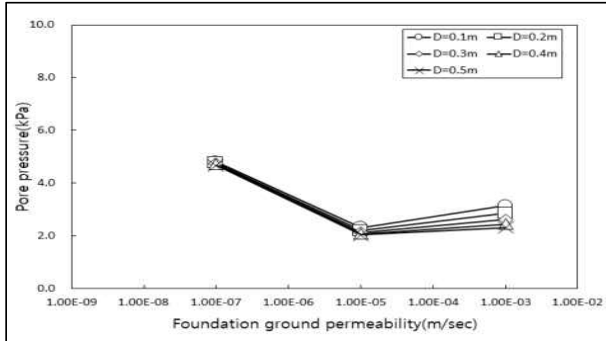
하부지반의 투수계수가 $1E^{-5}m/sec$ 에서 감압정의 설치에 따른 간극수압의 감소 효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 하부지반의 투수계수 $1E^{-7}m/sec$ 에서는 모든 감압정 간격에서 감압정의 직경이 간극수압의 감소에 미치는 영향은 작은 것으로 나타났다. 하부지반의 투수계수 $1E^{-3}m/sec$ 에서는 대부분의 감압정 간격에서 감압정의 직경이 간극수압의 감소에 영향을 미치는 것으로 평가되었다.



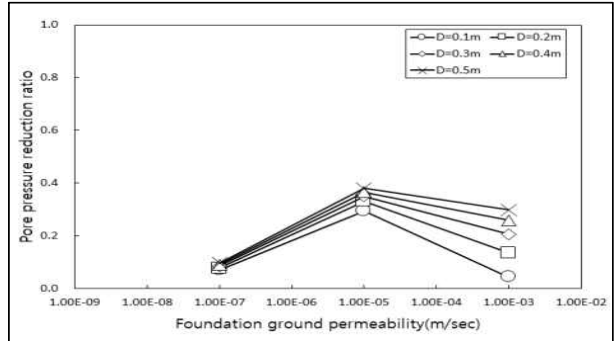
(a) Pore pressure(relief well space=5m)



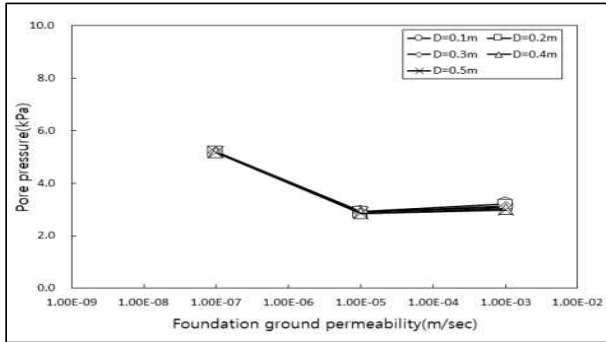
(b) Pore pressure reduction ratio(relief well space=5m)



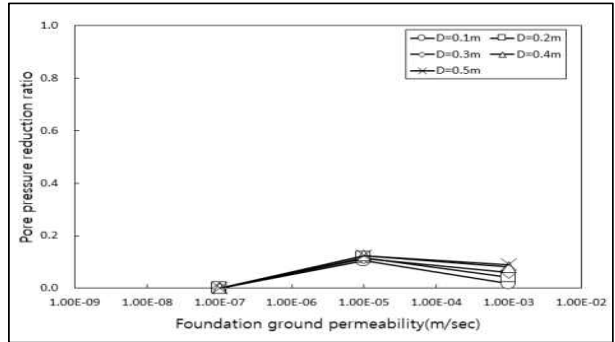
(c) Pore pressure(relief well space=10m)



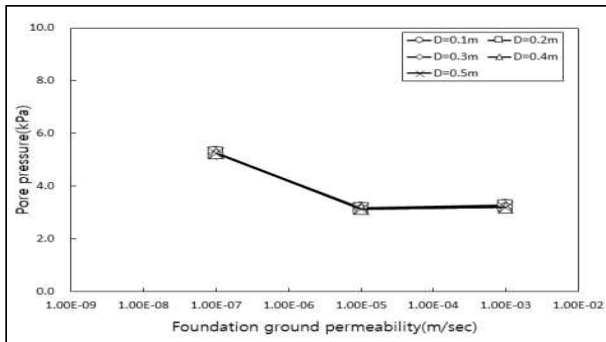
(d) Pore pressure reduction ratio(relief well space=10m)



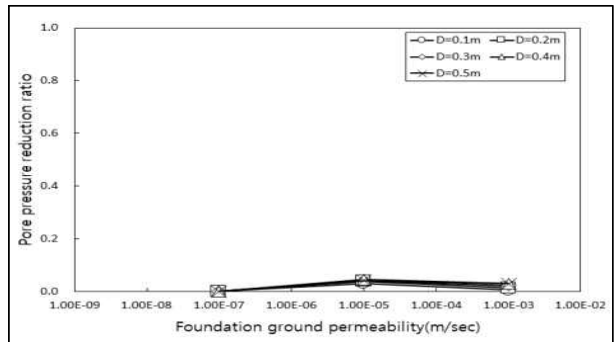
(e) Pore pressure(relief well space=25m)



(f) Pore pressure reduction ratio(relief well space=25m)



(g) Pore pressure(relief well space=50m)

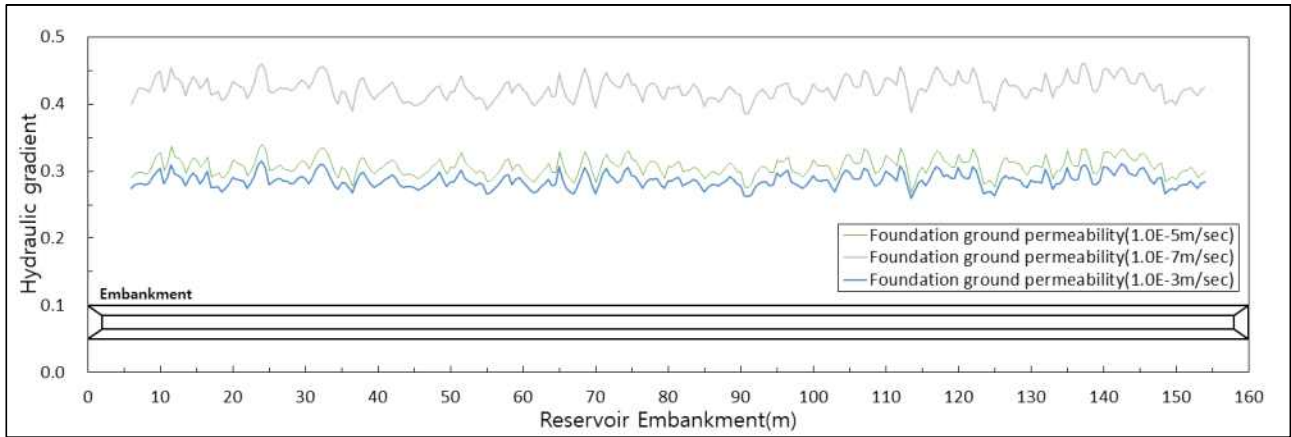


(h) Pore pressure reduction ratio(relief well space=50m)

[그림 3-20] 하부지반 투수계수에 따른 저수지 하류사면 최대간극수압 변화

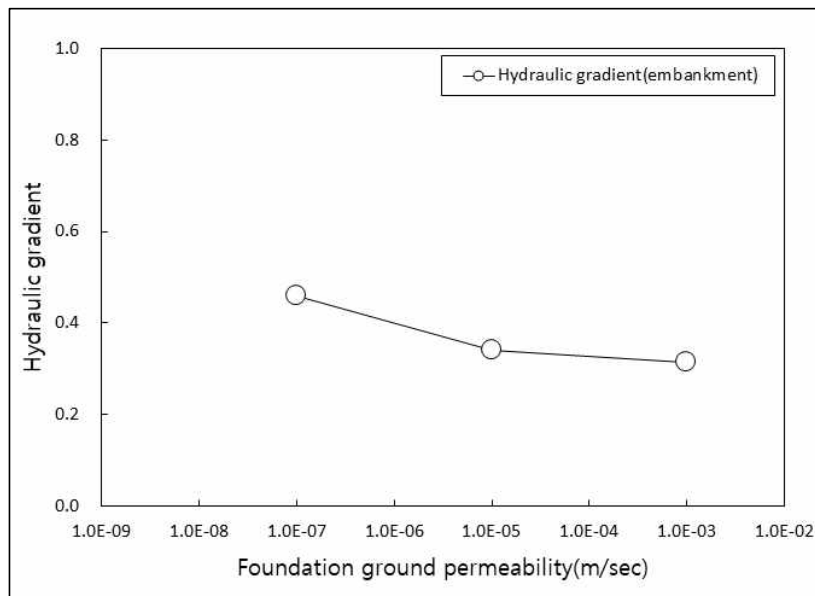
아래 그림은 저수지 하부지반의 투수계수에 따른 제방 하류사면의 종방향 간극수압을 나타내고 있다.

하부지반의 투수계수가 $1.0E^{-3}m/sec$ 과 $1.0E^{-5}m/sec$ 에서는 유사하게 간극수압이 나타났으며, 평균값은 2.92kPa, 2.90kPa로 평가되었다. 하부지반의 투수계수가 $1.0E^{-7}m/sec$ 에서는 간극수압의 평균값은 4.78kPa로 평가되었다.



[그림 3-21] 하부지반 투수계수에 따른 저수지 하류사면 종방향 동수경사

아래 그림은 저수지 하부지반의 투수계수에 따른 제방 하류사면의 최대동수경사 분석 결과가 제시되어 있다. 하부지반의 투수계수가 증가함에 따라 저수지 제방 하류사면의 동수경사는 감소하는 것으로 평가되었다.

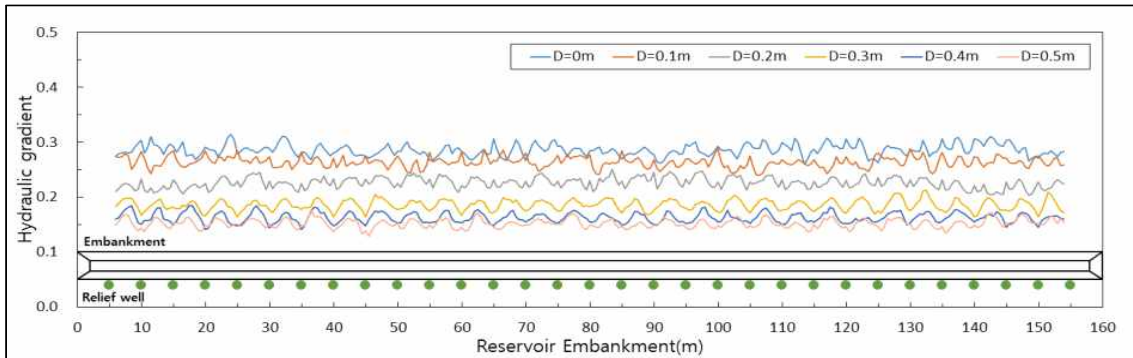


[그림 3-22] 하부지반 투수계수에 따른 저수지 하류사면 최대동수경사

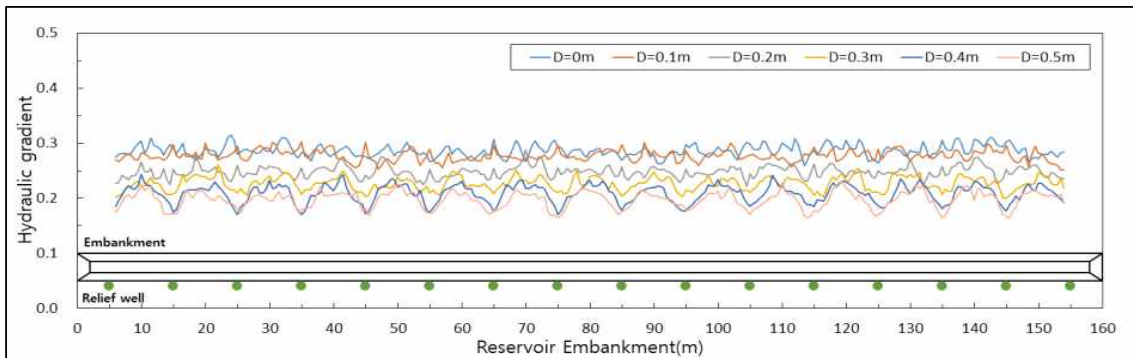
아래 3개의 그림은 만수위 조건 하류사면 분석 지점에서 제방 종단방향으로 감압정의 설치 간격과 직경에 따른 동수경사의 분포를 나타내고 있으며, 동수경사의 변화는 감압정이 설치된 위치에서 제방에 작용하는 동수경사가 급격히 감소되는 것으로 나타났으며, 감압정과 감압정 사이에서는 상대적으로 더 적은 것으로 평가되었다.

감압정이 설치된 제방의 최대동수경사는 감압정과 감압정 사이의 중간지점에서 나타났고, 감압정이 설치된 위치에서 동수경사가 가장 적은 것으로 나타났다.

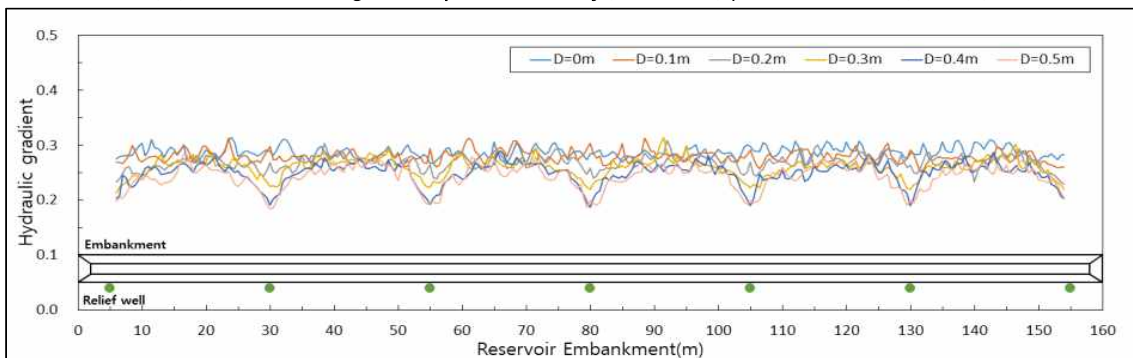
감압정의 설치에 따른 상대적인 효과를 분석하기 위하여 감압정이 설치되지 않은 조건(감압정 직경을 0으로 해석)과 비교하였다.



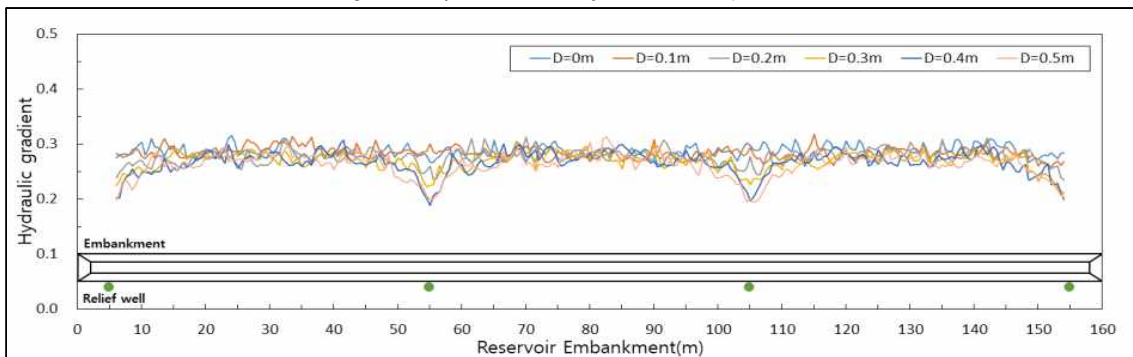
(a) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-3}$), Relief well($S=5m$)



(b) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-3}$), Relief well($S=10m$)

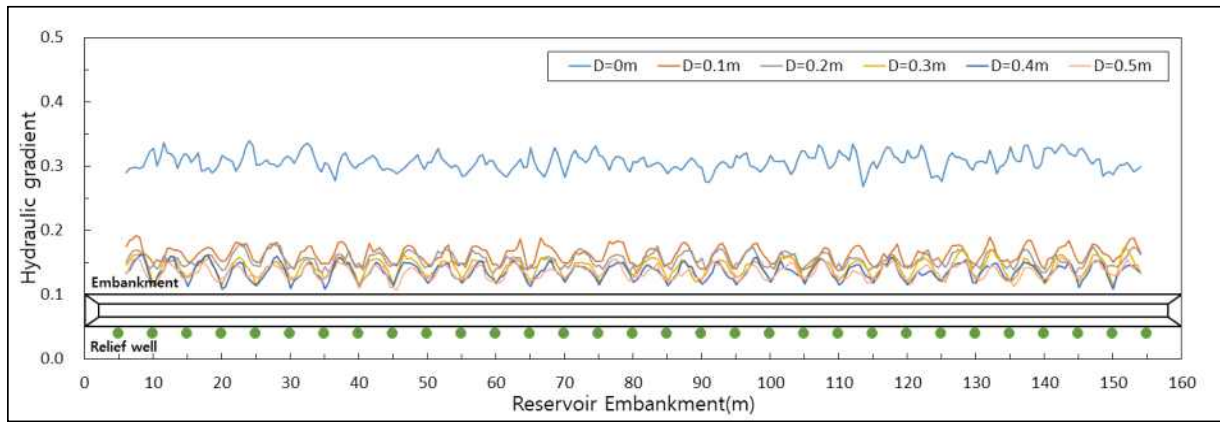


(c) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-3}$), Relief well($S=25m$)

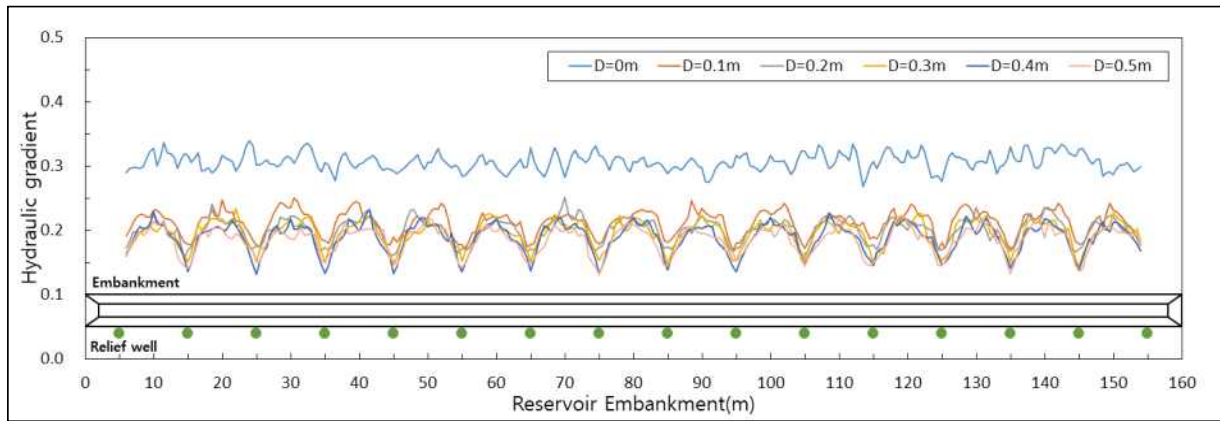


(d) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-3}$), Relief well($S=50m$)

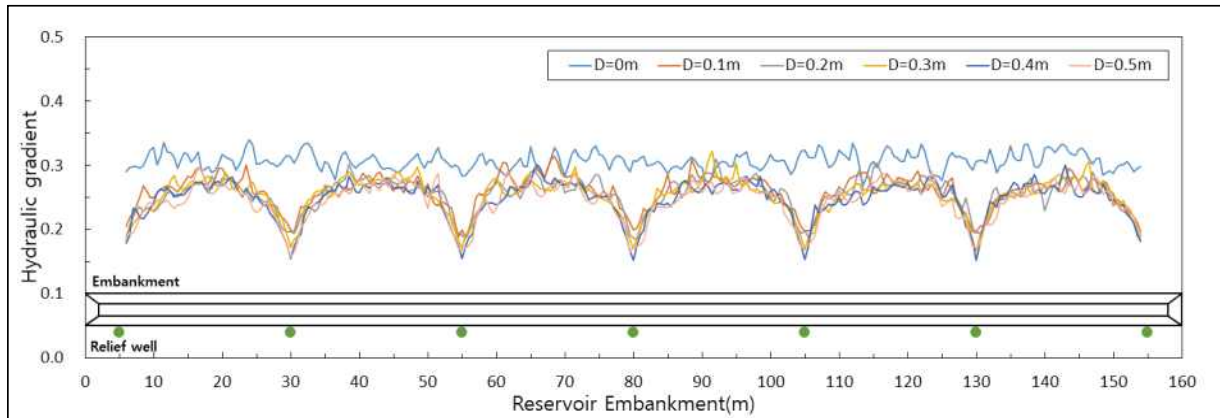
[그림 3-23] 하부지반 투수계수($1.0E^{-3}m/sec$)의 저수지 하류사면 종방향 동수경사



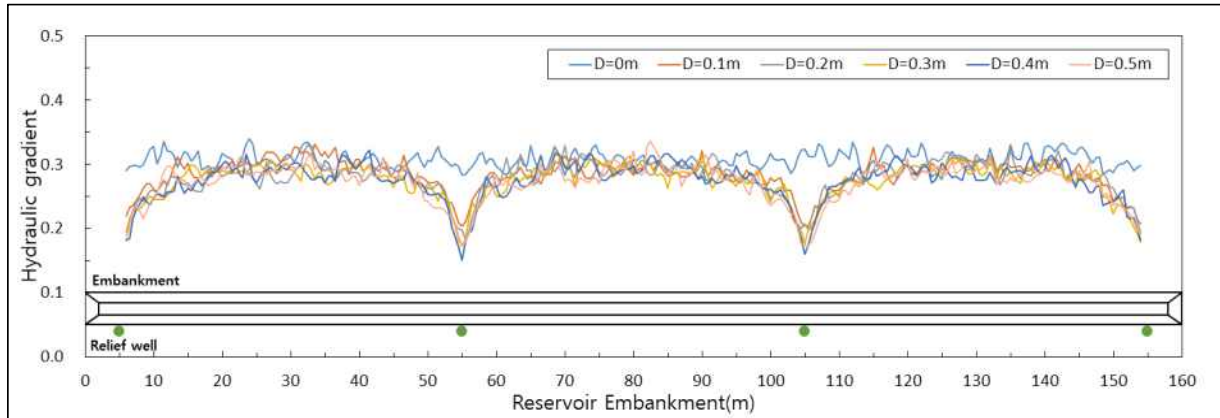
(a) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-5}$), Relief well($S=5m$)



(b) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-5}$), Relief well($S=10m$)

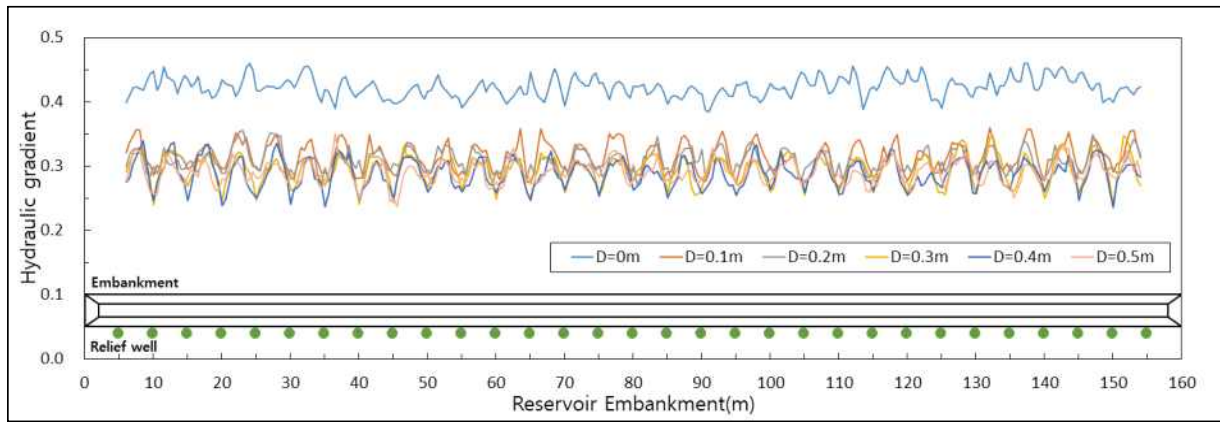


(c) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-5}$), Relief well($S=25m$)

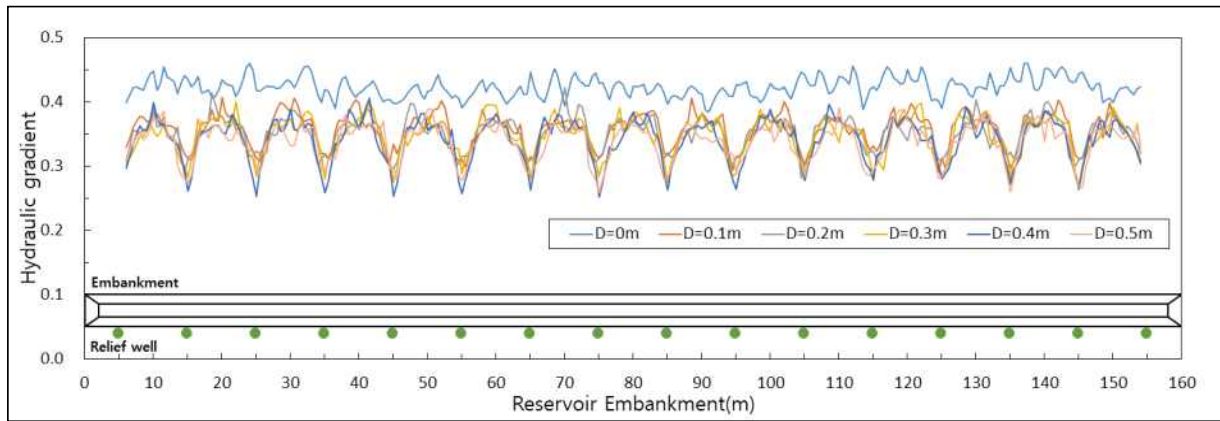


(d) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-5}$), Relief well($S=50m$)

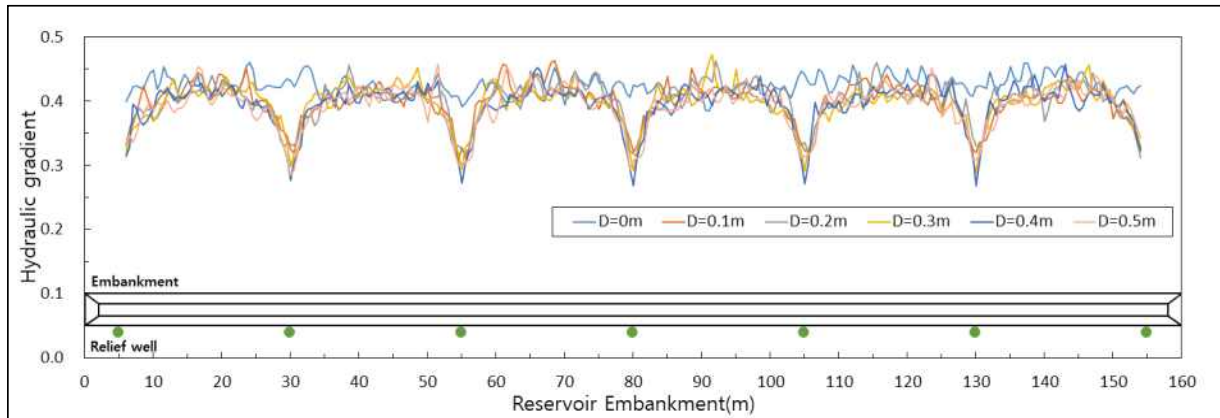
[그림 3-24] 하부지반 투수계수($1.0E^{-5}m/sec$)의 저수지 하류사면 증방향 등수경사



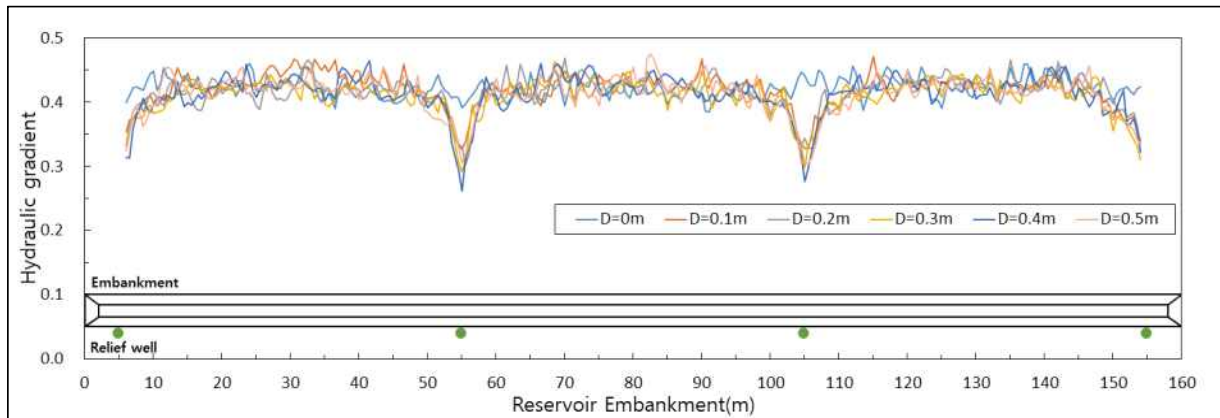
(a) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-7}$), Relief well($S=5m$)



(b) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-7}$), Relief well($S=10m$)



(c) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-7}$), Relief well($S=25m$)

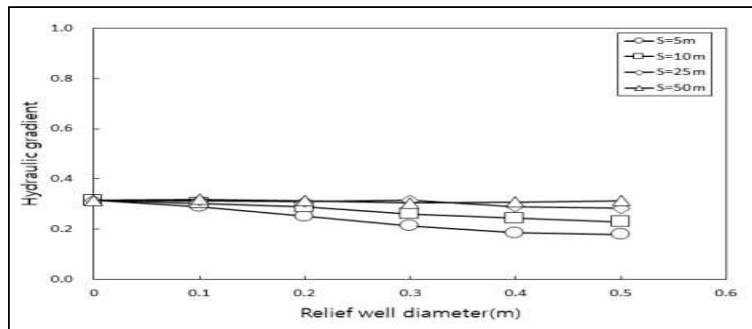


(d) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-7}$), Relief well($S=50m$)

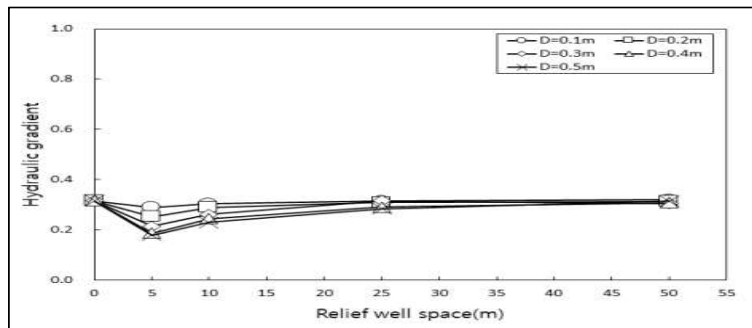
[그림 3-25] 하부지반 투수계수($1.0E^{-7}m/sec$)의 저수지 하류사면 종방향 등수경사

아래 그림은 하부지반의 투수계수가 $1.0E^{-3}m/sec$ 에서 감압정의 설치 간격, 직경의 변화에 따라 만수위 조건의 하류사면에서 동수경사와 동수경사의 감소비를 나타내고 있다.

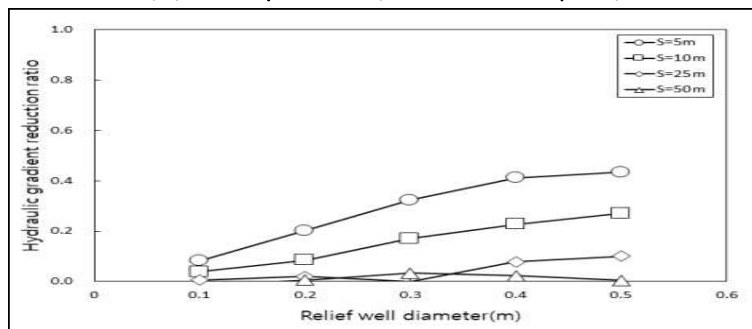
감압정이 설치되지 않은 만수위(감압정 직경을 0으로 해석)에서 제방하류사면에 작용하는 최대유출 동수경사는 0.315로 평가되었으며, 최대 유출동수경사를 분석하면 다음과 같으며 감압정이 설치된 위치에서는 감압정의 직경 0.1m, 설치간격 50m에서 감압정이 설치되지 않은 조건과 유사하게 평가되었고, 직경 0.5m, 설치간격 5m에서 0.178로 최대 43.47% 감소하는 것으로 평가되었다.



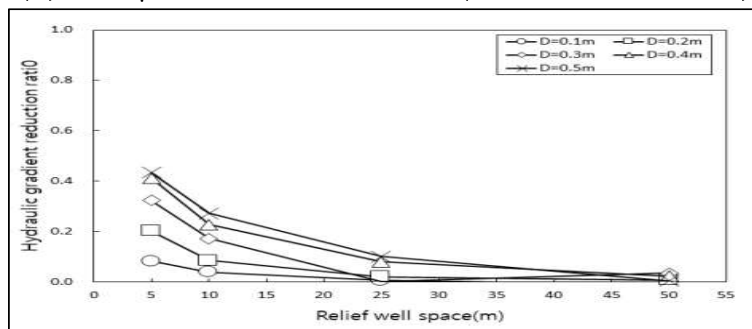
(a) Pore pressure(relief well diameter)



(b) Pore pressure(relief well space)



(c) Pore pressure reduction ratio(relief well diameter)

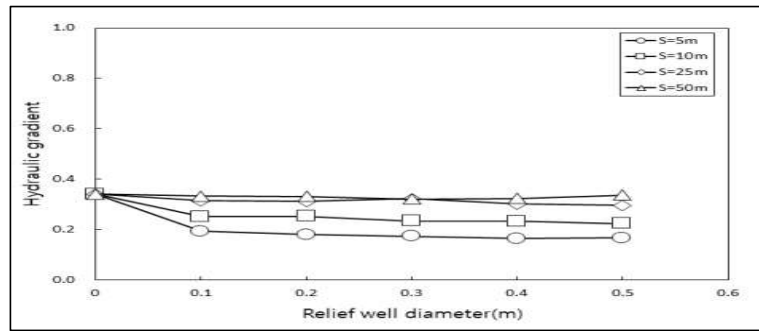


(d) Pore pressure reduction ratio(relief well space)

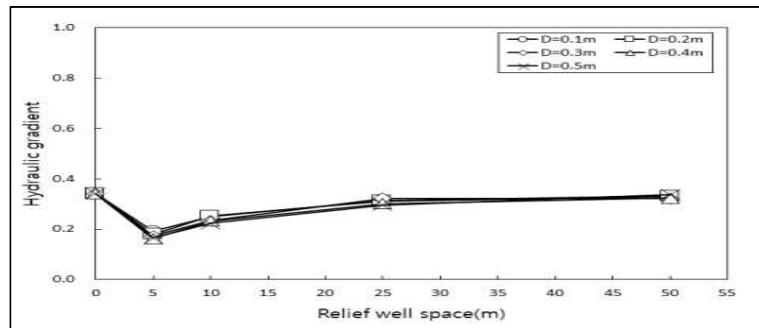
[그림 3-26] 하부지반 투수계수($1.0E^{-3}m/sec$)의 저수지 하류사면 최대동수경사 변화

아래 그림은 하부지반의 투수계수가 $1.0E^{-5}m/sec$ 에서 감압정의 설치 간격, 직경의 변화에 따라 만수위 조건의 하류사면에서 동수경사와 동수경사의 감소비를 나타내고 있다.

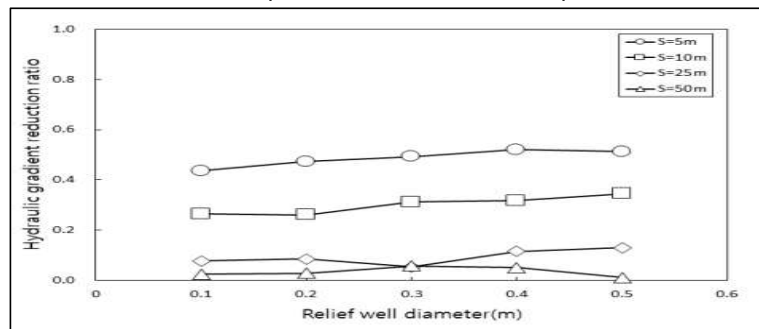
감압정이 설치되지 않은 만수위(감압정 직경을 0으로 해석)에서 제방하류사면에 작용하는 최대유출동수경사는 0.340로 평가되었으며, 최대유출동수경사를 분석하면 다음과 같으며 감압정이 설치된 위치에서는 감압정의 직경 0.1m, 설치간격 50m에서 0.332로 최소 2.5% 감소하는 것으로 평가되었고, 직경 0.5m, 설치간격 5m에서 0.166으로 최대 51.3% 감소하는 것으로 평가되었다.



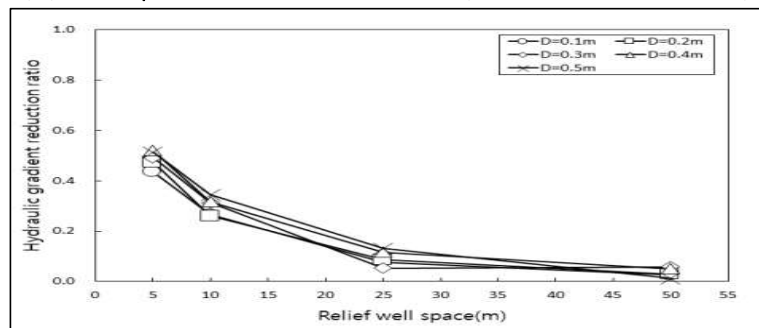
(a) Pore pressure(relief well diameter)



(b) Pore pressure(relief well space)



(c) Pore pressure reduction ratio(relief well diameter)

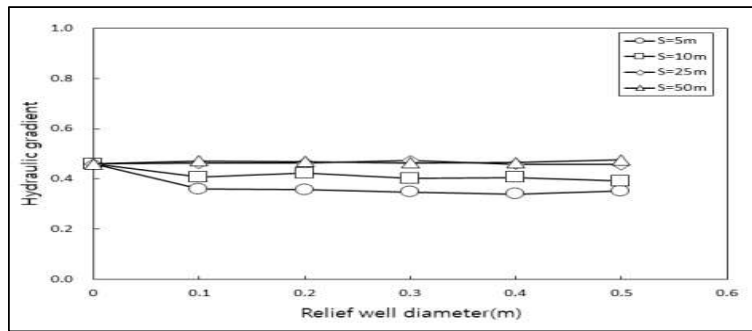


(d) Pore pressure reduction ratio(relief well space)

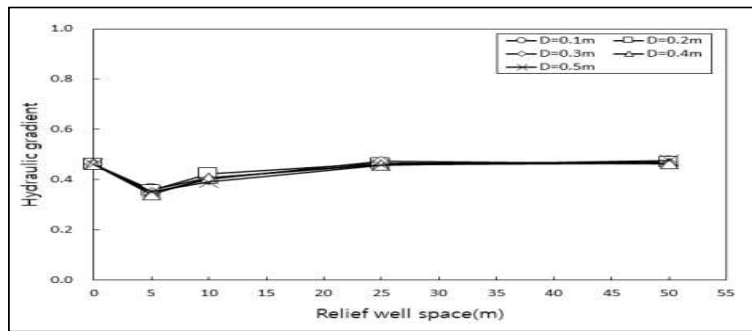
[그림 3-27] 하부지반 투수계수($1.0E^{-5}m/sec$)의 저수지 하류사면 최대동수경사 변화

아래 그림은 하부지반의 투수계수가 $1.0E^{-7}m/sec$ 에서 감압정의 설치 간격, 직경의 변화에 따라 만수위 조건의 하류사면에서 동수경사와 동수경사의 감소비를 나타내고 있다.

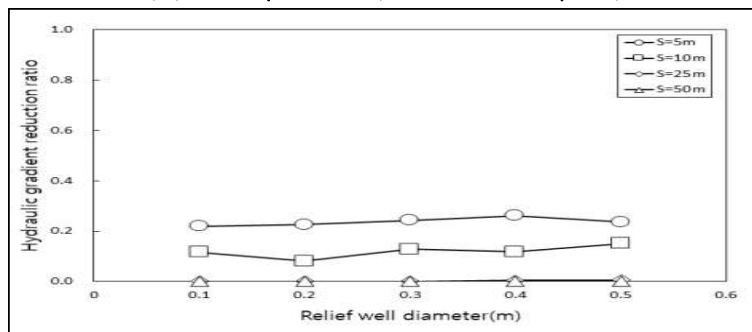
감압정이 설치되지 않은 만수위(감압정 직경을 0으로 해석)에서 제방하류사면에 작용하는 최대유출동수경사는 0.460으로 평가되었으며, 최대유출동수경사를 분석하면 다음과 같으며 감압정이 설치된 위치에서는 감압정 직경 0.1m~0.6m, 설치간격 25m, 50m에서 감압정을 설치하지 않은 조건과 유사한 동수경사가 나타났고, 직경 0.5m, 설치간격 5m에서 0.351로 최대 23.7% 감소하는 것으로 평가되었다.



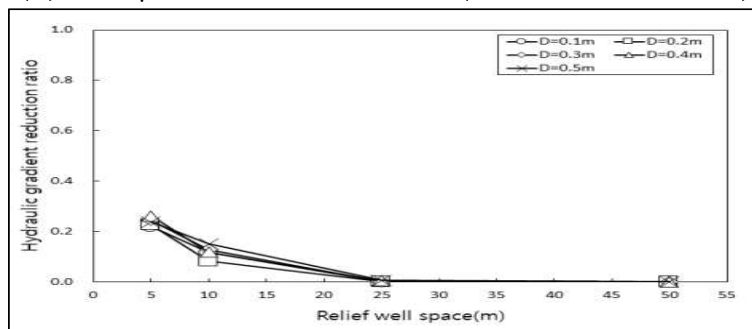
(a) Pore pressure(relief well diameter)



(b) Pore pressure(relief well space)



(c) Pore pressure reduction ratio(relief well diameter)



(d) Pore pressure reduction ratio(relief well space)

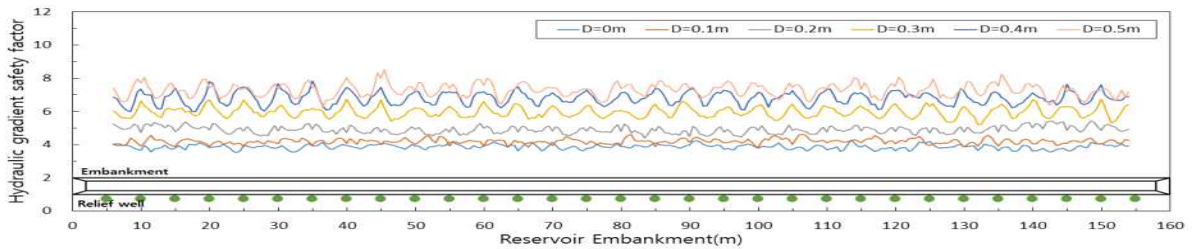
[그림 3-28] 하부지반 투수계수($1.0E^{-7}m/sec$)의 저수지 하류사면 최대동수경사 변화

아래 3개의 그림은 만수위 조건 하류사면 분석 지점에서 제방 종단방향으로 감압정의 설치 간격과 직경에 따른 동수경사 안전율의 분포를 나타내고 있다.

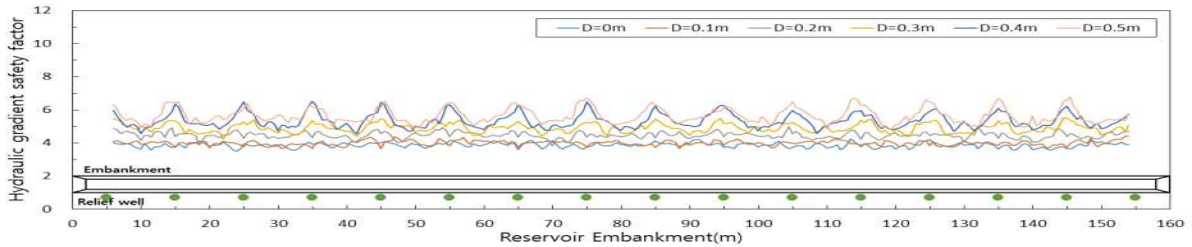
제방 안정성을 평가하기 위해 하류사면에서 발생하는 유출동수경사와 한계동수경사(i_{cr})의 비교를 통해 하류사면의 파이핑에 대한 안정성을 평가하였으며, 한계동수경사는 30개 저수지의 비상대처계획(EAP) 자료를 참고하여 평균값 1.106을 활용하였다.

만수위 조건의 하류사면 분석 지점에서 제방 종단방향으로 감압정이 설치되지 않은 조건(감압정 직경을 0으로 분석)에서 파이핑 안전율을 기준으로 감압정의 직경, 간격을 조건으로 설치하였을 경우 파이핑 안전율의 증가비를 연속적인 그래프로 표시하였다.

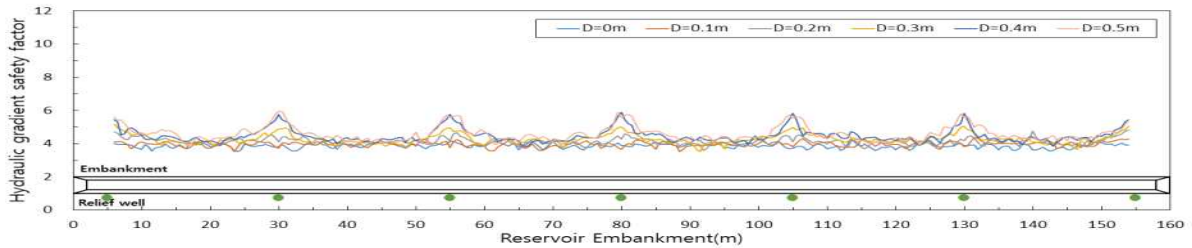
그림에서 나타나듯이 파이핑 안전율은 감압정 설치 위치에서 최대로 증가하는 것으로 나타났고, 감압정과 감압정 사이의 제방에서도 감압정이 설치되지 않은 경우에 비해 상대적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 따라서, 균일형 저수지 제방에서 적정 직경과 간격으로 감압정을 설치하면 제방의 파이핑에 대한 안정성 증가가 가능하다.



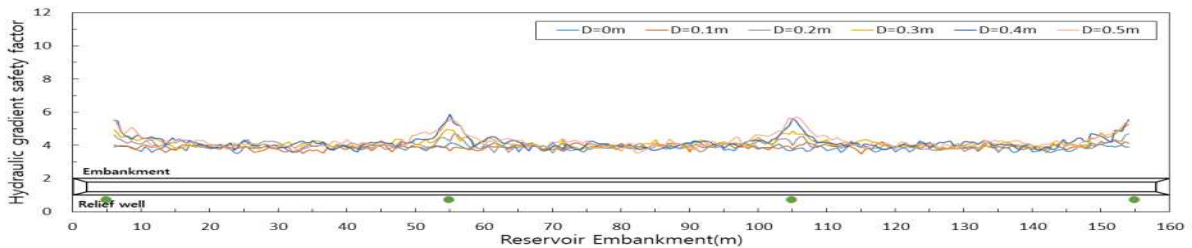
(a) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-3}$), Relief well($S=5m$)



(b) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-3}$), Relief well($S=10m$)

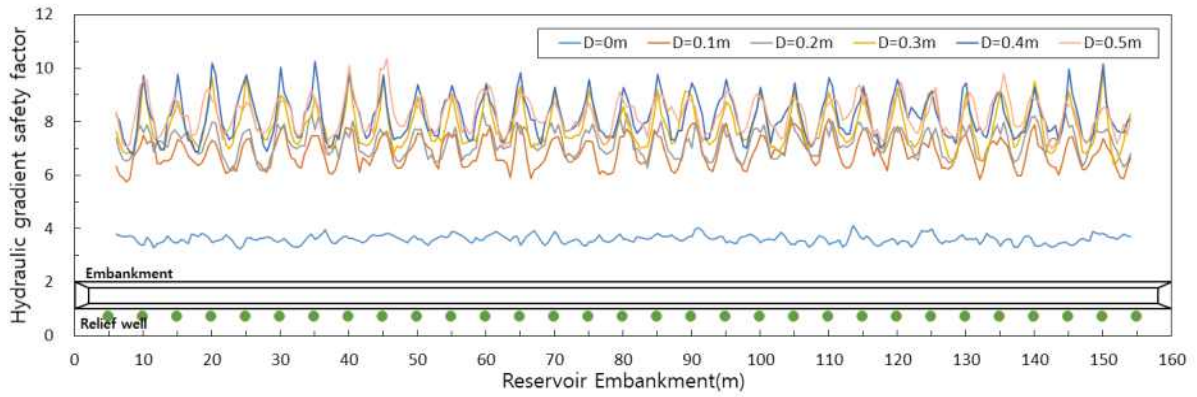


(c) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-3}$), Relief well($S=25m$)

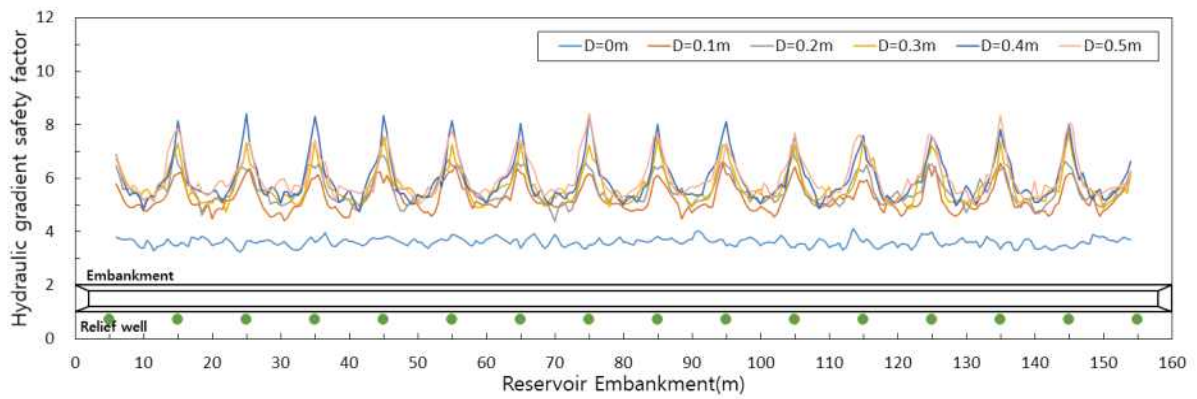


(d) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-3}$), Relief well($S=50m$)

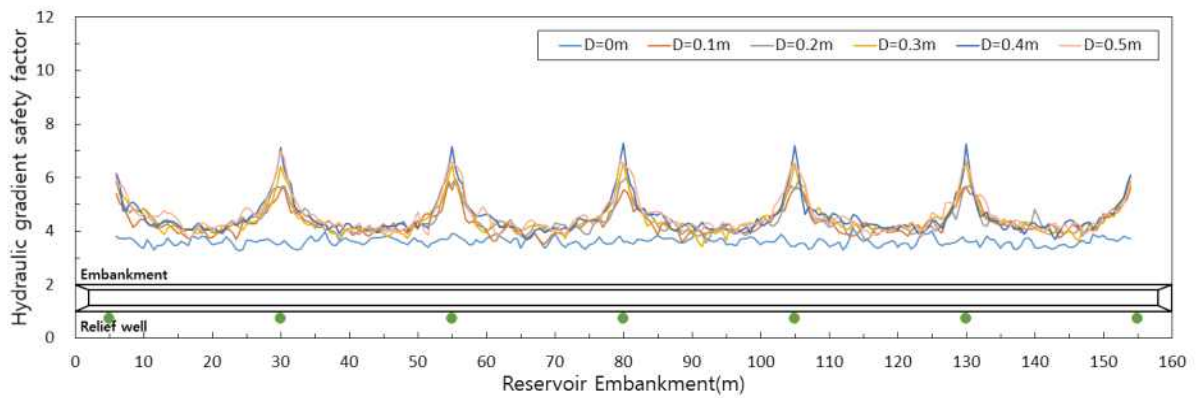
[그림 3-29] 하부지반 투수계수($1.0E^{-3}m/sec$)의 저수지 하류사면 종방향 동수경사 안전율



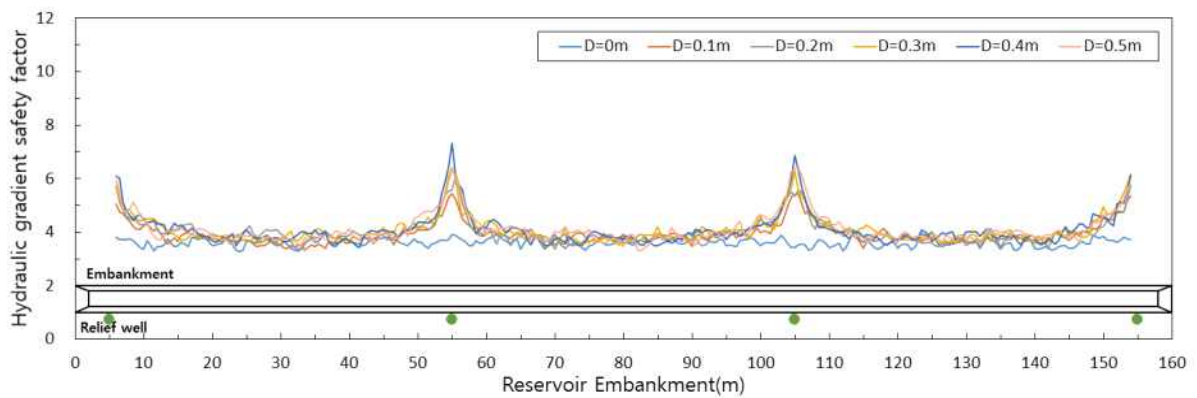
(a) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-5}$), Relief well($S=5m$)



(b) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-5}$), Relief well($S=10m$)

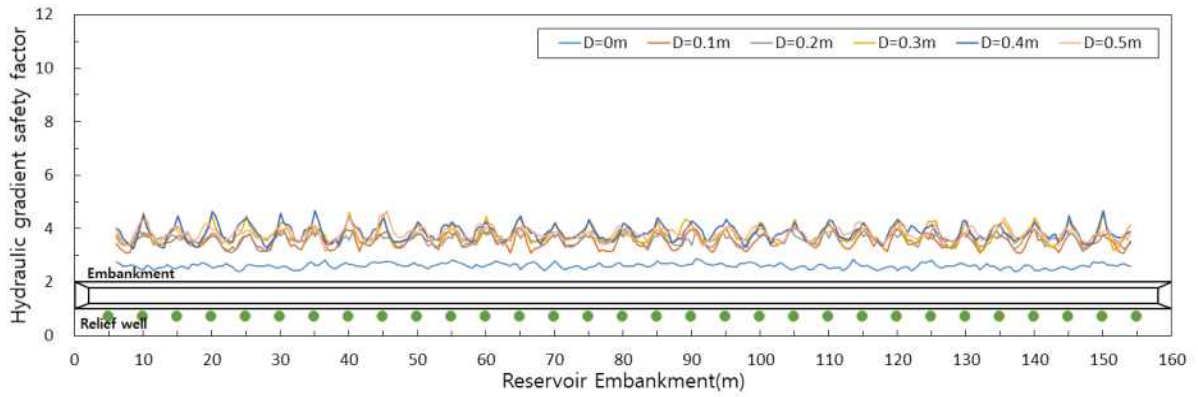


(c) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-5}$), Relief well($S=25m$)

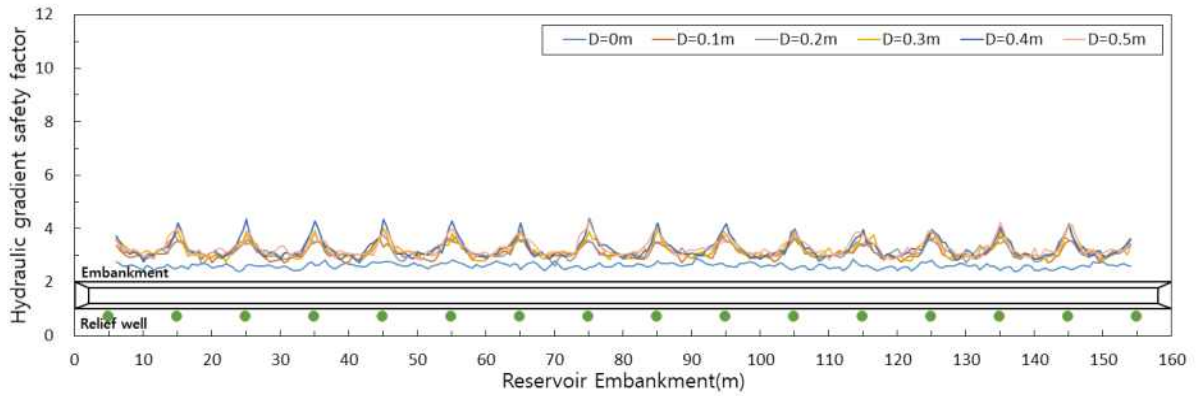


(d) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-5}$), Relief well($S=50m$)

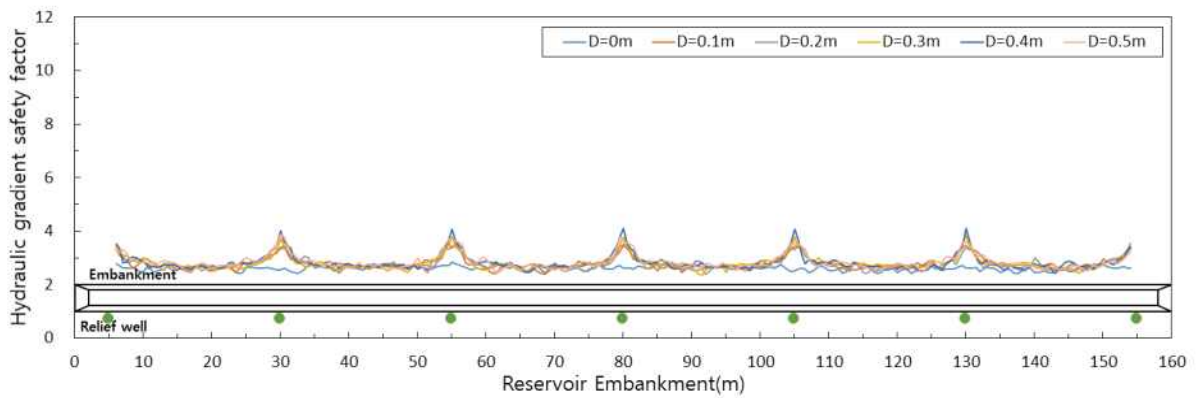
[그림 3-30] 하부지반 투수계수($1.0E^{-5}m/sec$)의 저수지 하류사면 증방향 동수경사 안전율



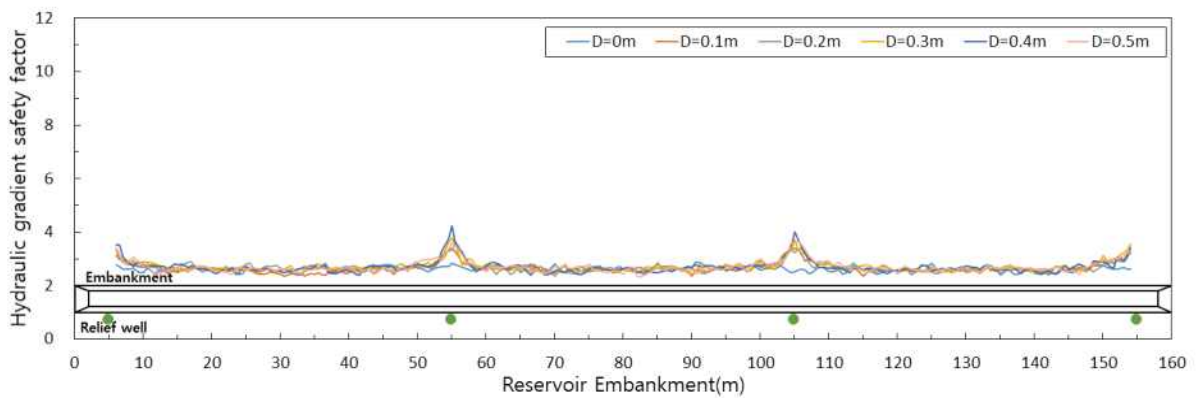
(a) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-7}$), Relief well($S=5m$)



(b) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-7}$), Relief well($S=10m$)



(c) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-7}$), Relief well($S=25m$)



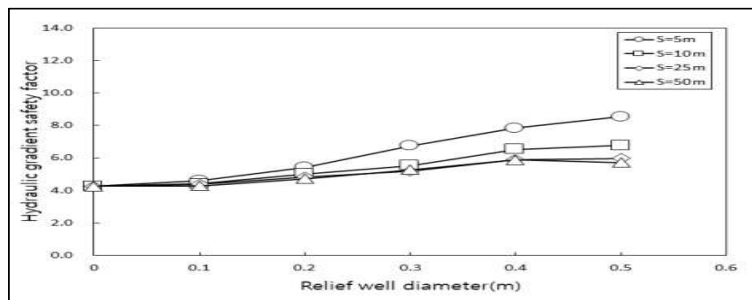
(d) Foundation ground permeability($k=1.0E^{-7}$), Relief well($S=50m$)

[그림 3-31] 하부지반 투수계수($1.0E^{-7}m/sec$)의 저수지 하류사면 종방향 동수경사 안전율

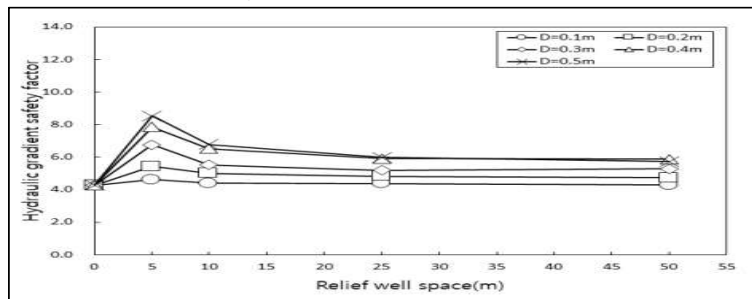
아래 그림은 하부지반의 투수계수가 $1.0E^{-3}m/sec$ 에서 감압정 직경과 설치간격에 따른 제방 하류사면에서 파이핑 안전율의 최대값과 안전율 증가비를 나타내고 있다.

감압정이 설치되지 않은 제방 하류사면에서 파이핑 안전율은 4.26으로 평가되었다. 안전율은 감압정 직경 0.1m, 설치간격 50m에서 4.28로 최소 0.6% 증가하였고, 직경 0.5m, 설치간격 5m에서 8.53으로 최대 100.6% 증가하는 것으로 평가되었다.

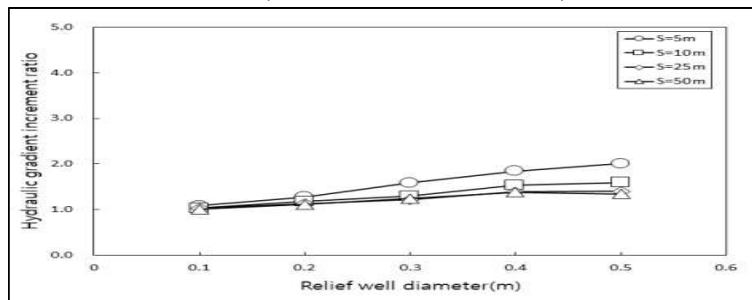
동수경사와 파이핑 안전율을 분석한 결과, 감압정의 직경과 설치간격에 따라 유출동수경사는 감소하고 파이핑 안전율은 증가하는 것으로 평가되었다. 아래 그림에 나타난 바와 같이 동수경사의 감소와 파이핑 안전율의 증가는 감압정 직경 0.2m 이하와 설치간격 25m 이상에서는 효과가 감소하는 것으로 나타나고 있다.



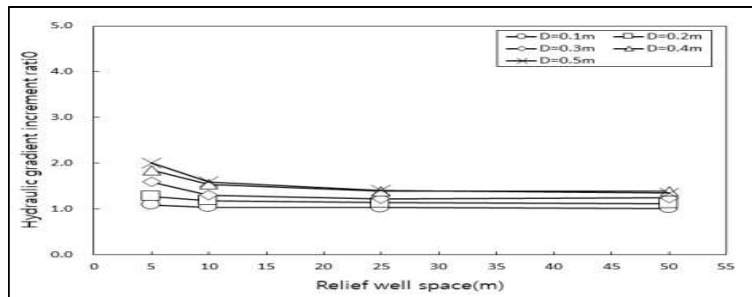
(a) Pore pressure(relief well diameter)



(b) Pore pressure(relief well space)



(c) Pore pressure reduction ratio(relief well diameter)

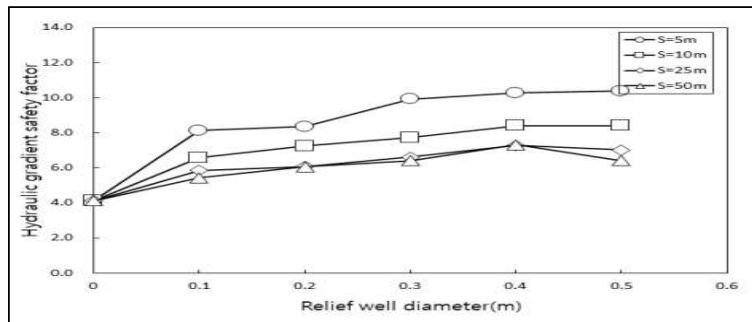


(d) Pore pressure reduction ratio(relief well space)

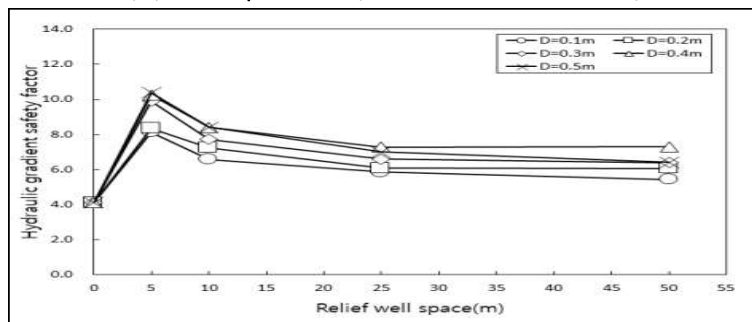
[그림 3-32] 하부지반 투수계수($1.0E^{-3}m/sec$)의 저수지 하류사면 동수경사 안전율 변화

아래 그림은 하부지반의 투수계수가 $1.0E^{-5}m/sec$ 에서 감압정 직경과 설치간격에 따른 제방 하류사면에서 파이핑 안전율의 최대값과 안전율 증가비를 나타내고 있다. 감압정이 설치되지 않은 제방 하류사면에서 파이핑 안전율은 4.12로 평가되었다.

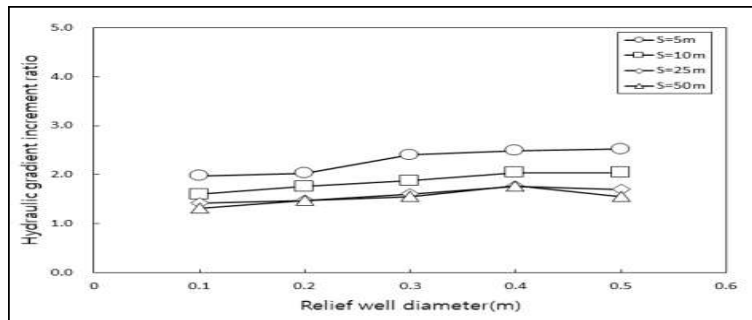
안전율은 감압정 직경 0.1m, 설치간격 50m에서 5.43로 최소 31.7% 증가하였고, 직경 0.5m, 설치간격 5m에서 10.38로 최대 151.9% 증가하는 것으로 평가되었다. 동수경사와 파이핑 안전율을 분석한 결과, 감압정의 직경과 설치간격에 따라 유출동수경사는 감소하고 파이핑 안전율은 증가하는 것으로 평가되었다.



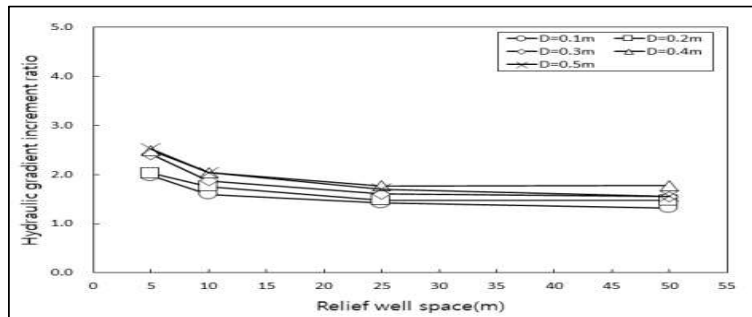
(a) Pore pressure(relief well diameter)



(b) Pore pressure(relief well space)



(c) Pore pressure reduction ratio(relief well diameter)

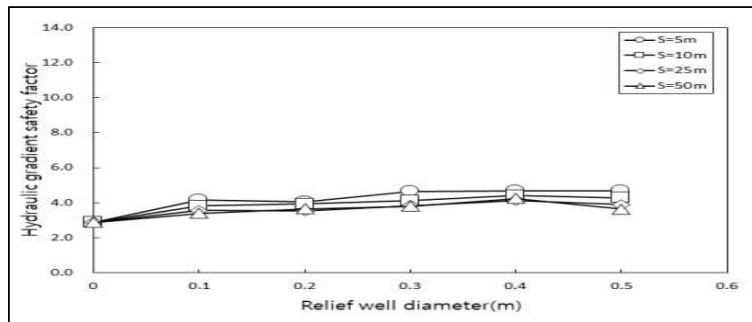


(b) Pore pressure reduction ratio(relief well space)

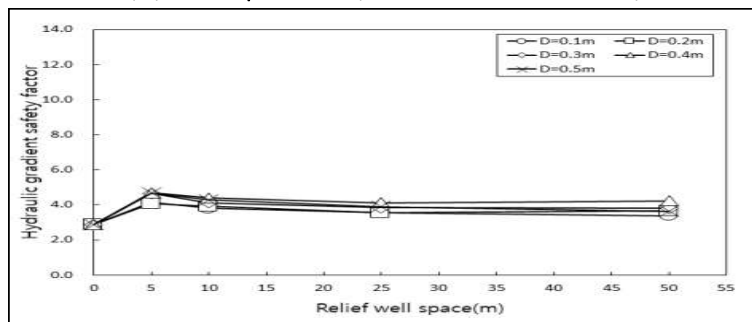
[그림 3-33] 하부지반 투수계수($1.0E^{-5}m/sec$)의 저수지 하류사면 동수경사 안전을 변화

아래 그림은 하부지반의 투수계수가 $1.0E^{-7}m/sec$ 에서 감압정 직경과 설치간격에 따른 제방 하류사면에서 파이핑 안전율의 최대값과 안전율 증가비를 나타내고 있다. 감압정이 설치되지 않은 제방 하류사면에서 파이핑 안전율은 2.88로 평가되었다.

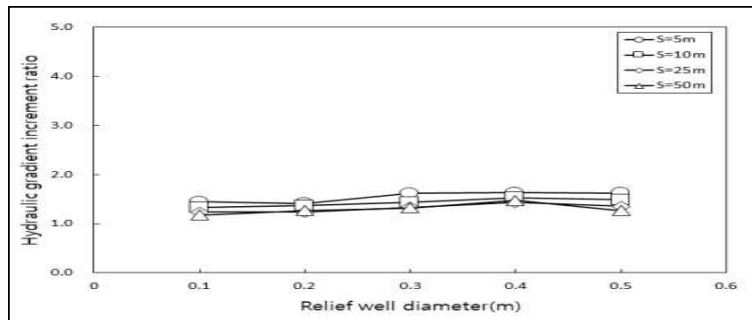
안전율은 감압정 직경 0.1m, 설치간격 50m에서 3.39로 최소 17.8% 증가하였고, 직경 0.5m, 설치간격 5m에서 4.67로 최대 62.6% 증가하는 것으로 평가되었다. 동수경사와 파이핑 안전율을 분석한 결과, 감압정의 직경과 설치간격에 따라 유출동수경사는 감소하고 파이핑 안전율은 증가하는 것으로 평가되었다.



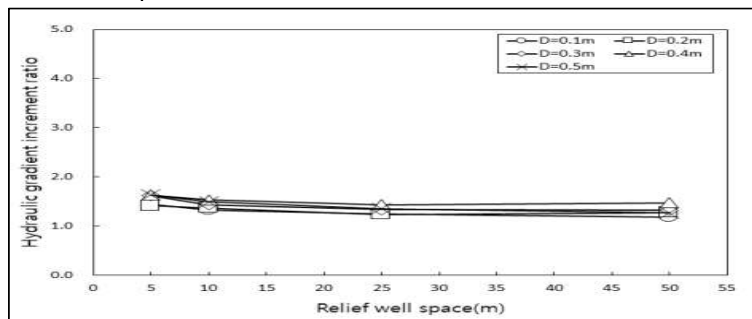
(a) Pore pressure(relief well diameter)



(b) Pore pressure(relief well space)



(c) Pore pressure reduction ratio(relief well diameter)

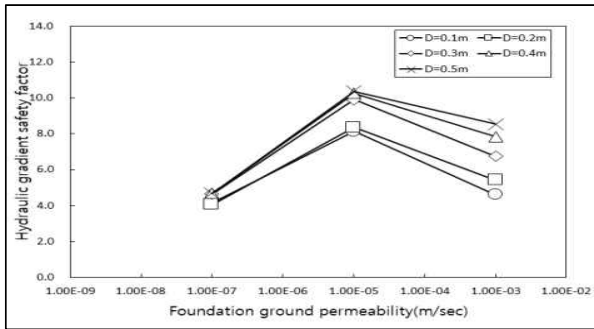


(d) Pore pressure reduction ratio(relief well space)

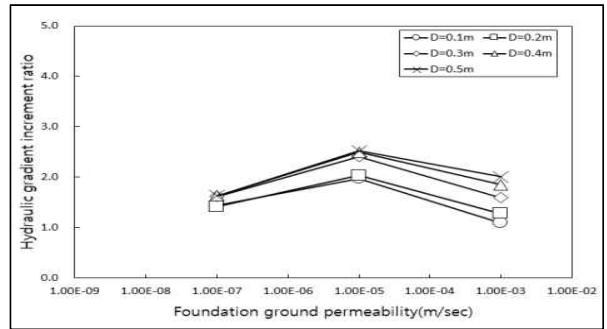
[그림 3-34] 하부지반 투수계수($1.0E^{-7}m/sec$)의 저수지 하류사면 동수경사 안전율 변화

아래 그림은 하부지반의 투수계수 변화에 따른 감압정 직경별 동수경사의 안전율의 변화를 나타내었다.

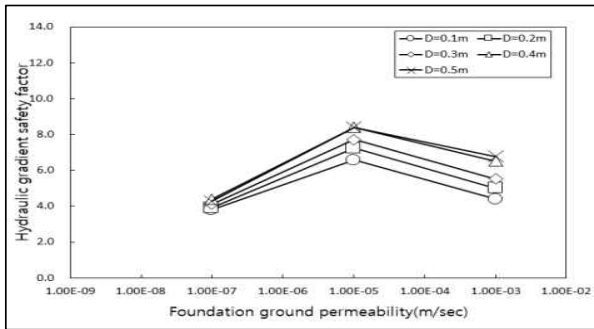
하부지반의 투수계수가 $1E^{-5}m/sec$ 에서 감압정의 설치에 따른 안전율의 증가 효과가 가장 큰 것으로 나타났으며, 하부지반의 투수계수 $1E^{-7}m/sec$ 에서는 모든 감압정 간격에서 감압정의 직경이 안전율의 증가에 미치는 영향은 작은 것으로 나타났으며, 하부지반의 투수계수 $1E^{-5}m/sec$, $1E^{-3}m/sec$ 에서는 감압정 간격과 감압정의 직경이 동수경사 안전율의 증가에 영향은 미치는 것으로 평가되었다.



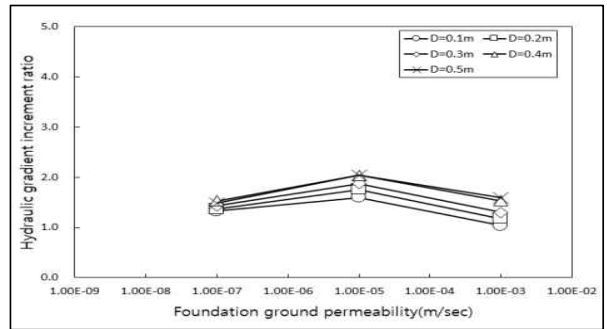
(a) Pore pressure(relief well space=5m)



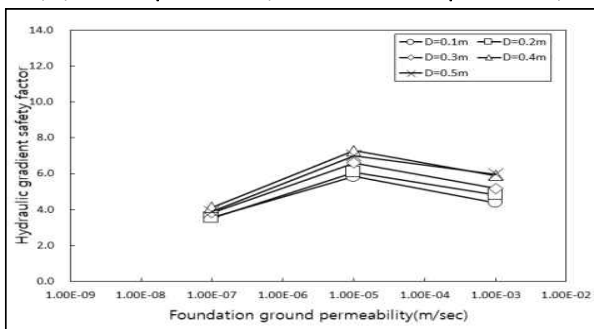
(b) Pore pressure reduction ratio(relief well space=5m)



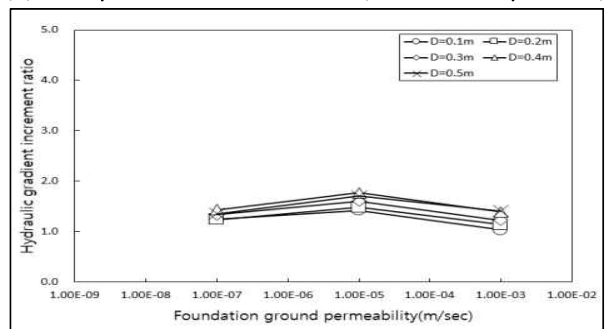
(c) Pore pressure(relief well space=10m)



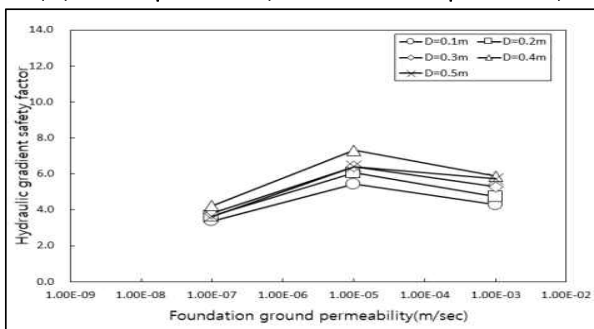
(d) Pore pressure reduction ratio(relief well space=10m)



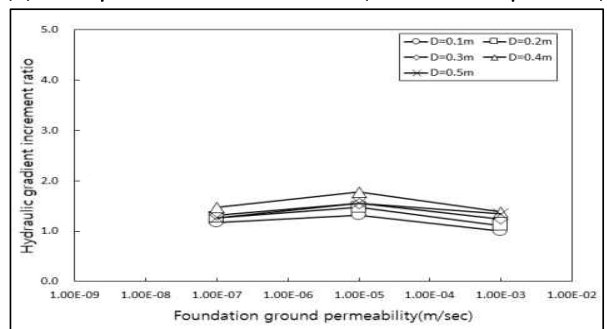
(e) Pore pressure(relief well space=25m)



(f) Pore pressure reduction ratio(relief well space=25m)



(g) Pore pressure(relief well space=50m)



(h) Pore pressure reduction ratio(relief well space=50m)

[그림 3-35] 하부지반 투수계수($1.0E^{-7}m/sec$)의 저수지 하류사면 동수경사 안전율 변화

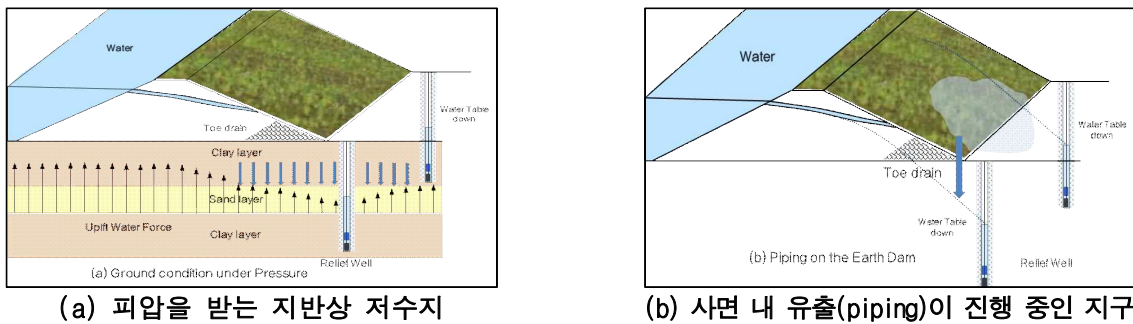
3.5 농업용 저수지 감압정 유지관리 및 테스트베드 구축

3.5.1 감압정 테스트베드 지구선정 시 고려사항

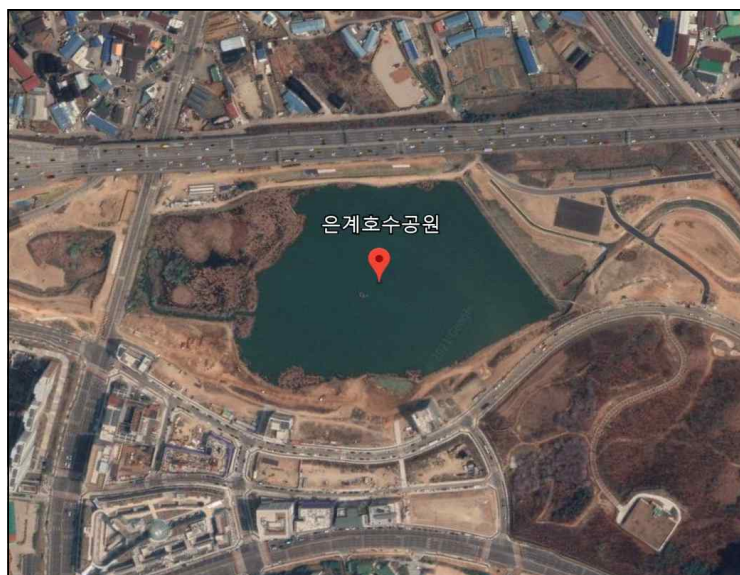
저수지나 제방을 투수성 지반 위에 축조하는 경우, 투수성 지반 속으로 침투하는 물에 의해 높은 간극압이 발생하여 저수지 체체의 안정성에 문제가 발생하며 이는 농업용수 용수확보 측면에서의 문제로 이어진다.

이러한 침투수를 안전하게 저수지의 체체 밖으로 빼내기 위한 역할을 위해 감압정 시설이 필요하다. 감압정 시스템 설계 시 고려해야 하는 요소는 투수성 기초의 투수계수, 투수성 지반의 깊이와 지층의 구성, 감압정 시스템의 제원, 양압력에 대한 허용 안전율, 투수성 기초를 통한 허용 유출량이다.

감압정이 없는 조건에서 하류 토우를 따라 발생할 수 있는 수두를 결정하고, 그 수두를 주어진 안전율을 고려하여 요구되는 수두 값 이하로 낮추는 방법으로 감압정 시스템을 결정하고 있다. 이를 바탕으로 본 과업에서의 감압정 테스트베드는 은계호수공원(구 소래저수지)로 선정하였다. 아래 그림은 감압정 설치 시 효과검증이 용이한 지반 조건과 테스트베드로 선정된 은계호수공원의 위치를 나타내었다.



[그림 3-36] 감압정 설치시 효과검증이 용이한 지반조건



[그림 3-37] 테스트베드 대상지(은계호수공원)

3.5.2 선정지구 지반조사 및 결과

은계호수공원(구 소래저수지) 제당에 감압정을 설치하기 전 지반 상태를 파악하여 시공계획, 모니터링 계획 등에 활용하기 위한 자료수집과 검토를 목적으로 지반조사를 시행하였다. 아래 표는 지반조사 항목 및 수량은 아래의 표와 같다.

[표 3-3] 지반조사 항목 및 수량

구분	조사항목	단위	수량	비고
현장 조사	시추조사	공	1	
	불교란시료 채취	회	1	
현장시험	표준관입시험	식	1	
실내시험	토질물성시험	회	1	
	삼축압축시험	회	1	
	실내투수시험	회	1	

가. 현장조사 및 현장 시험

현장 조사를 통한 지층 분포현황 및 지층 구성상태 파악, 시추조사 및 현장시험의 종합분석을 통한 상세 지반 특성을 검토하기 위하여 시추조사 및 표준관입시험을 실시하였다.

시추조사는 지층의 성상과 지층의 지반 공학적 특성, 기반암의 분포상태 및 풍화도 등을 파악하며 토질 시료를 채취하여 설계 및 시공에 필요한 제반의 지반 공학적 자료제공을 위해 실시한다. 표준관입시험은 관입저항치(N)로부터 지층의 연경도 및 상대밀도를 확인하고, 교란 시료를 채취하여 육안판별 및 물성 시험 시료로 이용을 위해 실시하였다.

또한, 시추조사 시 불교란시료 채취를 통해 연약 점성토층의 지층 특성을 확인하고, 물성 및 역학 시험 시료를 제공하였다. 아래 그림과 표는 현장 조사 위치 및 현황을 정리하였다.



[그림 3-38] 현장조사 위치

[표 3-4] 현장조사 위치 현황

공 번	좌표계	X(N)	Y(E)	Z(m)	비고
BH-1	GRS80 좌표계	538,402.206	183,018.309	18.65	중부원점 도, 분, 초
	위경도 좌표계	37-26-41.51	126-48-29.14		

회전 수세식(Rotary Wash Type) 시추기를 사용하여 NX(Ø=76mm) 규격으로 시행하였으며 공벽 붕괴 방지를 위해 풍화암층까지 Casing을 삽입하고 천공하였다.

Split Spoon Sampler를 이용하여 1.0~1.5m 간격으로 토사 시료를 채취하였으며 D-3 Core Barrel 및 Diamond Bit를 사용하여 암석 시료를 채취하였다. 채취된 암석 코어는 육안관찰로 암석 내에 분포된 불연속면과 충전물 등을 파악하고, 절리의 분포상태, TCR, RQD 등의 암반 특성을 평가할 수 있는 자료를 조사하여 시추 주상도에 기재하였으며 채취된 토사 및 암석 시료는 시료 상자에 공변, 심도, 지층명, 색상 등을 기록하였다.

시추조사 결과 과업 구간 지층은 상부로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토의 순으로 구성되어 있으며 매립층은 제방 성토층으로 지표면 아래 3.4m의 두께로 분포하고 있다. 구성토질은 황갈색의 색조를 띠는 실트질 점토(CL)로 분류되며 습윤의 함수 상태를 보이며 표준관입시험 결과 N값은 3/30~4/30(회/cm)로 연약한 연경도를 보인다.

퇴적층은 원지반 퇴적층으로 매립층 하부에 2.6m의 두께로 분포하고 있다. 구성토질은 암회색의 색조를 띠는 실트질 점토(CL)로 분류되며 습윤의 함수 상태를 보이며 표준관입시험 결과 N값은 0/30~9/30(회/cm)로 매우 연약~견고한 연경도를 보인다.

풍화토는 원지반 풍화 잔류토로 퇴적층 하부에서 출현하고 있다. 구성토질은 암갈색의 색조를 띠는 실트질 모래(SM)로 습윤상태의 함수 상태를 보이며 표준관입시험 결과 N값은 10/30~17/30(회/cm)로 보통 조밀한 상대밀도를 보인다. 시추조사는 심도 9.0m에서 종료하였으며 매립층, 퇴적층, 풍화토로 구성되었다. 아래 표는 시추조사 현황 및 지층 분포를 나타내었다.

[표 3-5] 시추조사 현황 및 지층분포

공 변	매립층(m)	퇴적층(m)	풍화토(m)	합 계(m)	지하수위 (GL. (-)m)
BH-1	3.4	2.6	3.0	9.0	시추심도 이하

표준관입시험은 63.5kg의 해머를 낙하고 76cm에서 자유 낙하시켜 Split Spoon Sampler를 30cm 관입시키는데 소요되는 타격 횟수(N)를 측정, 15cm씩 3단계로 실시하며, 1단계 15cm 관입 시 소요되는 타격수는 예비타로 간주하여 고려하지 않으며 본 타격 시험의 관입량 30cm를 전후 각 15cm씩 나누어 타격수(N치) 기록하였다.

지층이 조밀 또는 견고하여 30cm 관입이 곤란할 때는 50회까지 타격하고, 그 당시의 관입량을 표시하고 50/5(50회 타격에 5cm 관입)와 같이 기록하였으며 지층이 변하는 구간 또는 매 1.0~1.5m마다 연속적으로 시행하였다.

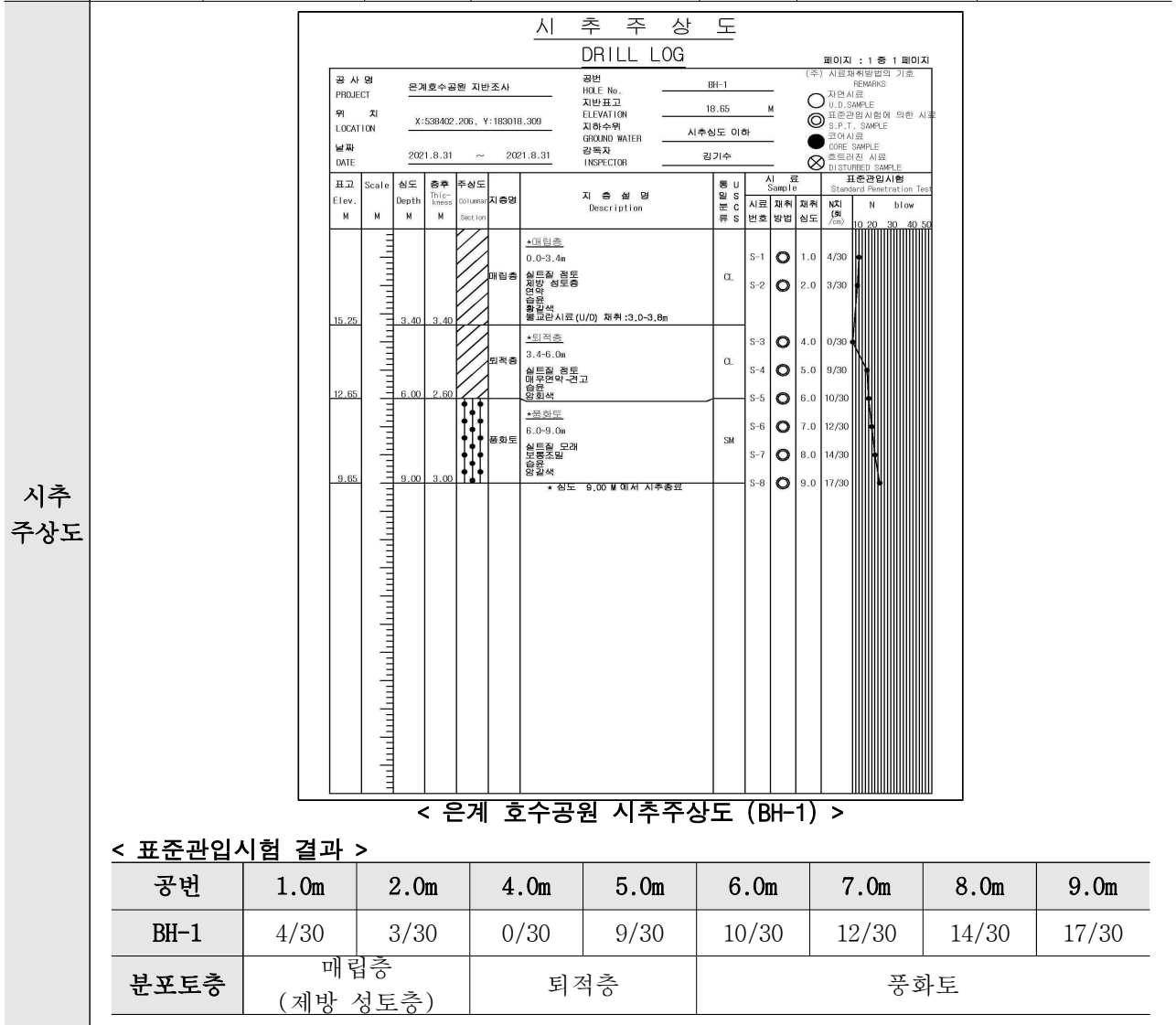
나. 시험결과

시추조사 결과, 과업 구간 지층은 상부로부터 매립층, 퇴적층, 풍화토의 순으로 구성되어 있다.

매립층은 제방 성토층으로 표준관입시험 결과 N값은 3/30~4/30(회/cm)로 연약한 연경도를 보인다. 퇴적층은 원지반 퇴적층으로 표준관입시험 결과 N값은 0/30~9/30(회/cm)로 매우 연약~견고한 연경도를 보인다. 풍화토는 원지반 풍화 잔류토로 퇴적층 하부에서 출현하고 있다. 표준관입시험 결과 N값은 10/30~17/30(회/cm)로 보통 조밀한 상대밀도를 보인다. 시추작업과 함께 표준관입시험을 실시하여 지층의 상대밀도 및 연경도 파악하였으며 아래 표는 시험 결과를 정리한 표이다.

[표 3-6] 현장조사 및 시험 결과

공 번	지 층	심 도 [GL.(-)m]	두께(m)	구성토질	통일 분류	상대밀도 /연경도	N치/ TCR/RQD(%)
BH-1	매립층	0.0~3.4	3.4	실트질 점토	CL	연약	3/30~4/30
	퇴적층	3.4~6.0	2.6	실트질 점토	CL	매우연약~건고	0/30~9/30
	풍화토	6.0~9.0	3.0	실트질 모래	SM	보통조밀	10/30~17/30



실내시험은 연약 점성토층의 지층 특성을 확인하고, 불교란시료를 채취하여 물성 및 역학 시험 시료 제공한다.

시추공과 약 1.0m 이격 하여 별도의 시추공을 천공한 후 점성토층의 불교란시료 샘플(U/D : Undisturbed Sample)을 채취 후 채취한 시료는 즉시 밀봉하여 진동을 최소화하여 운송한 뒤 실내시험을 실시하였다.

시추조사 시 채취된 시료 중 대표적인 시료를 선별하여 흙의 물리적·역학적 특성 파악하는 시험이다. 토사의 함수 상태를 파악하는 함수비, 토사의 비중을 측정하는 비중, 토질 분류, 물리적 특성, 공학적 특성을 추정하는 액·소성한계, 입도분석과 토질 분류, 토사의 입도 조성을 파악하는 체분석을 실시하였다.

채취 심도는 3.0~3.8m이며 함수비는 26.6% 비중은 2.681, 액성한계(LL) 43.2%, 소성한계(PI) 18.8%이며 아래 표는 시추조사 시 채취된 불교란시료(U/D)에 대해 물성 시험을 실시하여 물리적 특성을 파악한 결과를 정리한 표이다.

[표 3-7] 토질 물성 시험 결과

공 변	채취심도 (m)	함수비 (%)	비중 (Gs)	Atterberg Limits(%)		Grain Size Distribution(%)			통일 분류
				LL	PI	0.425mm	0.075mm	0.005mm	
BH-1	3.0~3.8	26.6	2.681	43.2	18.8	88.4	80.5	34.9	CL

지반개량에 의한 전단강도 증가량을 계산하는 삼축압축시험(CU)과 분포 토층의 투수 계수(K)산정을 위한 실내 투수시험을 실시하였다.

아래 표는 시추조사 시 채취된 불교란시료(U/D)에 대해 역학 시험을 실시하여 공학적 특성을 파악한 결과를 정리한 표이다.

[표 3-8] 토질 역학 시험 결과

공 변	채취 심도 (m)	삼축압축시험(CU)				실내 투수 시험 투수계수 (k, cm/sec)	통일분류
		전응력		유효응력			
		C(kPa)	ϕ (°)	C' (kPa)	ϕ' (°)		
BH-1	3.0~3.8	23.3	9.9	4.1	30.6	6.94E-07	CL



(a) 시추 전경(BH-1)



(b) 시추 전경(BH-1)



(c) 표준관입시험(BH-1)



(d) 시료 채취(BH-1)



(e) 불교란시료 채취(BH-1)



(f) 시료 상자(BH-1)

[그림 3-39] 현장시험 과정

3.5.3 감압정 시험시공

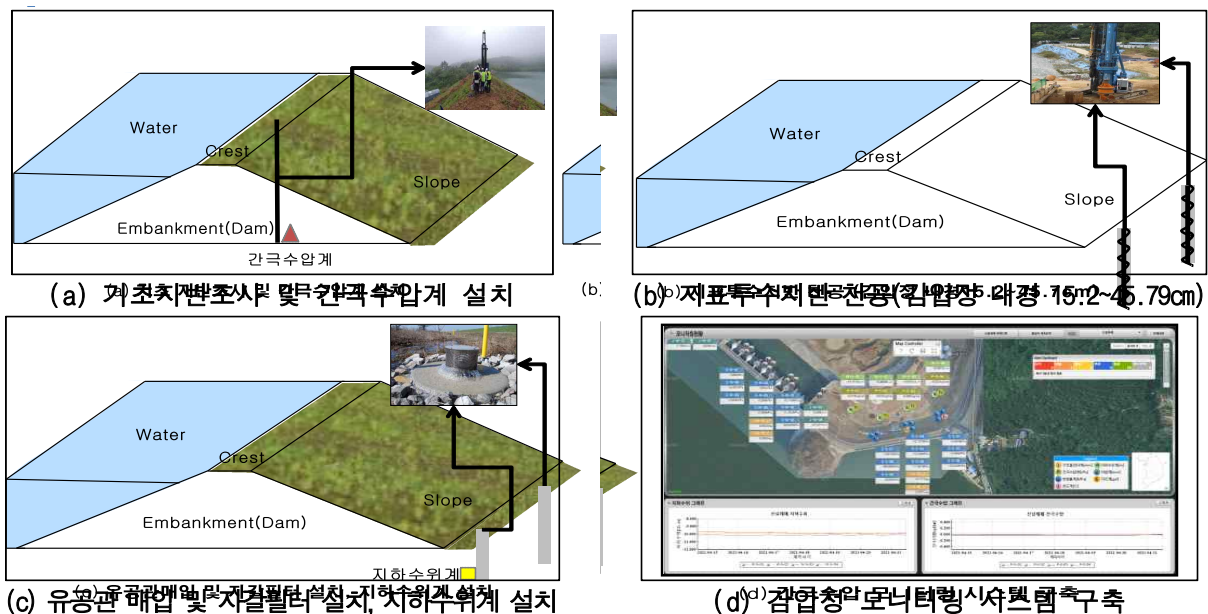
감압정은 설치 후 반드시 우물의 유량과 모래의 침투량을 확인해야 한다. 양수시험의 결과는 우물의 효과를 확인할 뿐만 아니라 시간에 따른 성능변화, 효율의 저하를 평가하는 데 사용된다. 본 과업에서는 은계호수공원 제당 하부 지층에서의 과잉간극수압을 측정 및 감압정을 이용한 배수량과의 상관관계를 확인하기 위해 감압정을 시공하였다. 아래 표는 감압정 및 지반조사 위치를 나타낸 표이다.

[표 3-9] 감압정 시공위치

위치		감압정 설계심도(m)	감압정 및 지반조사 위치도
X	Y		
374449.350	126808.335	5m(제당 하부)	
374446.854	126808.201	5m(제당 하부)	

감압정은 청소, 모래 조사, 배출 용량 결정을 위한 펌핑을 위해 상부에 접근할 수 있는 위치 설치하여야 한다.

감압정은 설치를 위한 보링(Boring), 지하수 유입을 위한 스크린 또는 구멍 뚫린 파이프, 기초지반 흙의 유입과 침식을 방지하기 위한 필터, 지표면으로 물을 보내기 위한 라이저 파이프, 설치에 해로운 외부재료의 역류 및 유입을 방지하기 위한 체크밸브, 지표수에 의한 재충전을 방지하기 위한 뒷채움, 흙의 유입을 막기 위한 바닥 플러그, 지하수에 해로운 이물질의 역류 및 유입을 방지하기 위한 라이저 파이프, 지하수 유입을 방지하기 위한 체크 밸브로 구성된다. 아래 그림은 감압정의 시공순서를 그림으로 나타내었다. 지반 천공부터 보호 펜스 설치까지의 전 과정을 나타내었다.



[그림 3-40] 감압정 시험시공 순서도



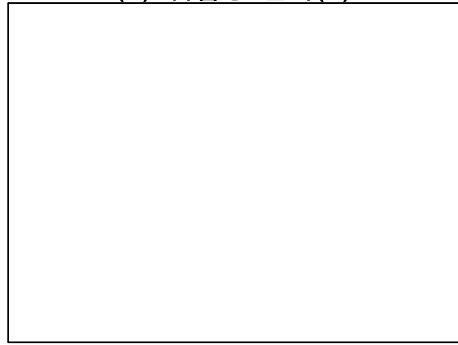
(a) 설치 위치 천공



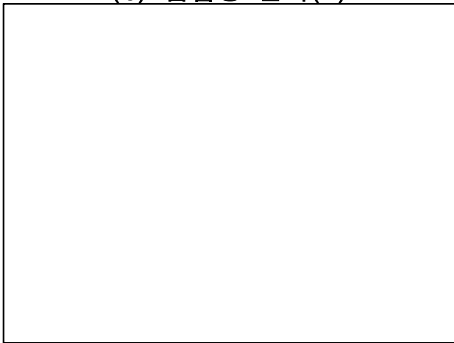
(b) 감압정 설치(1)



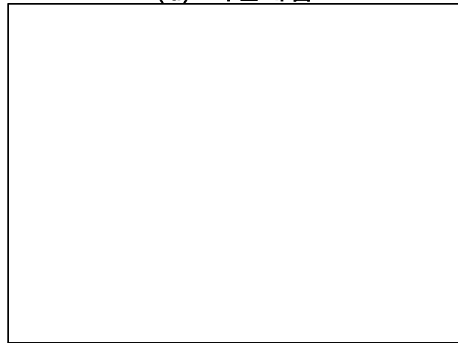
(c) 감압정 설치(2)



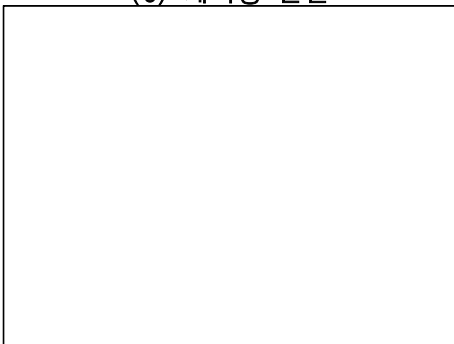
(d) 자갈매립



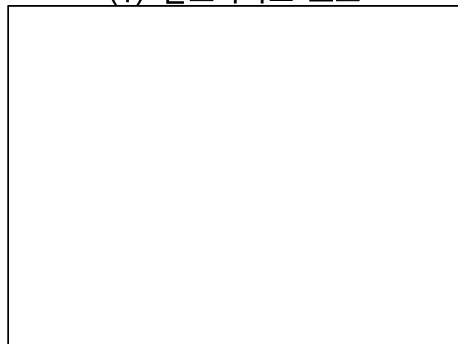
(e) 케이싱 인발



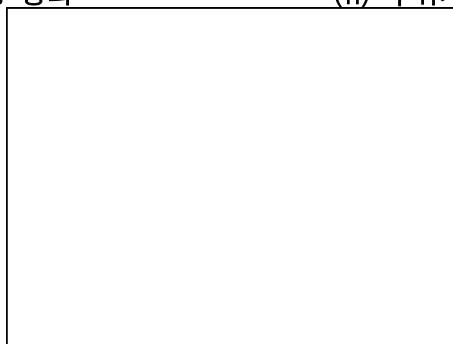
(f) 벤토나이트 도포



(g) 현장 정리



(h) 수위계 및 펌프설치



(i) 보호 펜스 설치

[그림 3-41] 감압정 시공 과정

3.5.4 효과 분석을 위한 계측시스템 구축

감압정 설치 및 유지관리 시 발생하는 주변 지반 및 인접 구조물의 거동을 파악하여 설계, 시공 및 유지관리에 활용토록 하며 감압정 설치로 인한 체체 내 안정성과 경제성을 확보하고 주변 지반 및 인접 구조물의 안전을 기함에 목적이 있다.

감압정은 필 댐 하부지반을 통하여 발생하는 압력을 감소하기 위하여 수직으로 설치되어 스크린이 포함된 관정을 말하며 감압정 주변 토사의 유입을 방지하기 위하여 필터 재료가 스크린을 둘러싸고 있는 형태로 구성되어 있다.

이러한 시스템은 필 댐의 내수위로 인한 하류부의 압력 수두를 저감시켜 체체의 안정성을 높이는 것을 목적으로 하며 초기 설치 시 체체 내 침윤선 파악 및 감압정에 따른 수위 변화, 간극수압을 파악하여 설계, 시공 및 유지관리에 활용토록 하며 감압정의 안정성과 경제성을 확보하고 설치 시 효과를 파악하고자 한다. 아래 그림은 은계호수공원 감압정 설치에 따른 계측기 설치 및 모니터링 위치를 나타내었다.



[그림 3-42] 감압정(은계호수공원) 계측 모니터링 위치

계측항목의 선정은 규모 혹은 지반 조건 등에 따라서 달라지기 때문에 구체적인 계측 결과의 활용목적, 평가수법을 명확하게 수립한 후 필요한 계측항목을 선정하였다.

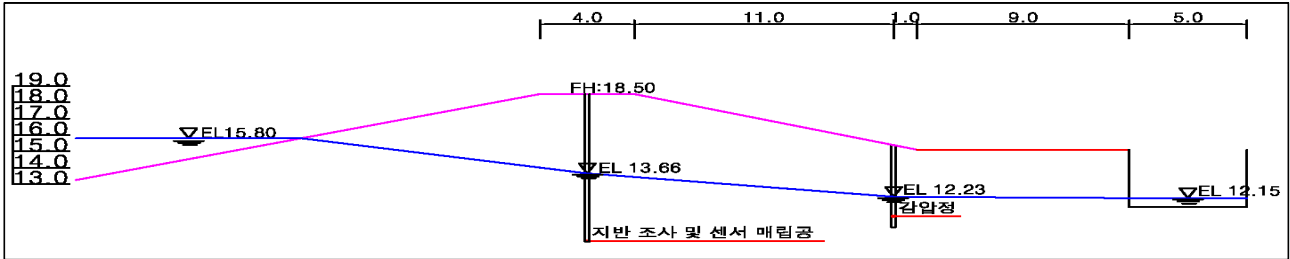
감압정 설치에 따라 필 댐의 내수위로 인한 하류부의 압력수두를 저감시켜 체체의 안정성을 파악하는 것이 목적이며 초기 설치 시 체체 내 침윤선 파악 및 감압정 설치에 따른 수위 변화를 측정하였다. 감압정 설치지역에 계측항목, 계측기의 종류와 성능 등을 결정하였으며 아래 표는 감압정 설치에 따른 계측항목 및 목적을 정리하였다.

[표 3-10] 계측항목 및 목적

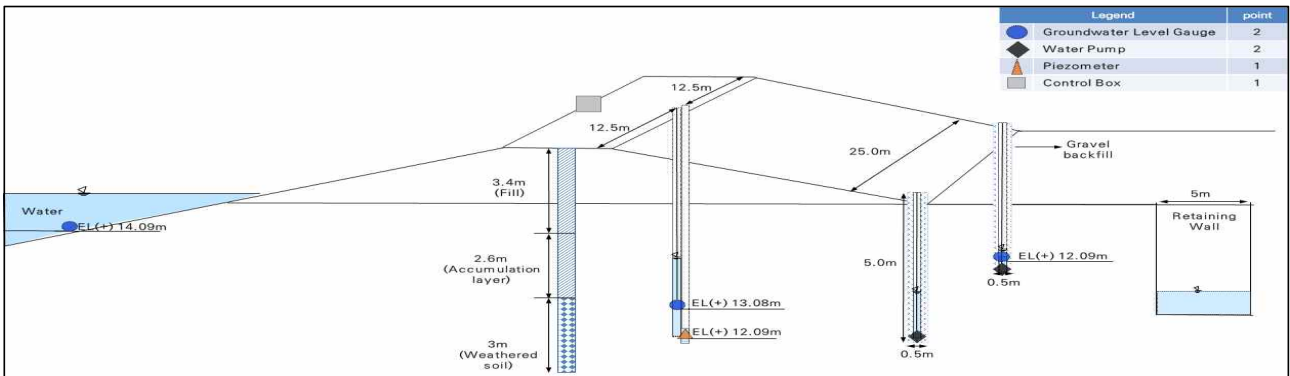
계측항목	계측기	규격	수량	설치 목적	비고
수위	지하수위계	개소	2	초기 설치 시 체체내 침윤선 파악 및 감압정에 따른 수위 변화 측정	체체(1), 감압정(1)
수압	간극수압계	개소	1	수위 변화에 의한 간극수압의 변화 측정	내측 수위
유량	펌프유량계	개소	1		

계측 위치 선정은 경제성, 시공성을 고려하여 감압정 주변 및 수위 거동을 대표할 수 있는 최소한의 위치를 선정하여 최대효과를 얻도록 해야 한다.

계측기 배치 시에는 설계 및 시공조건을 고려하여 배치하며 일반적으로 설계에서 표준 단면으로 설정한 곳을 선정하며 계측 결과 해석 시 상호 관련된 계측항목에 대응되는 계측기는 가능한 근접시켜 배치하고 필요 항목의 계측치가 연속해서 얻어지도록 배치하였다. 아래 그림은 감압정 계측 센서 배치 및 수위선을 나타내었다.



[그림 3-43] 감압정 등수두선



[그림 3-44] 감압정 센서 배치도

아래 표는 감압정 설치에 따른 계측 항목에 대한 센서 규격 및 사진을 정리하였다.

[표 3-11] 계측기 사양

구분	규격	사 진
간극수압계 지하수위계 수위계	<ul style="list-style-type: none"> · 0 ~ 50psi 측정 범위의 진동현식 Type · 최소 측정단위 : 0.025% F.S이하 · Maximum Over Load : 150% 이상 · 사용온도 : -20℃~+80℃ · 정확도 : ±0.1% F.S 이내 · Filter Pore Size : 60μm · 외경 : Stainless Steel 133×19.1mm · 측정케이블 : AWG20 코일형 석도석 4코어 차폐, 염해방지용 폴리우레탄 피복 	
테이프식 지하수위계 폴리에틸렌 60μm 가공	<ul style="list-style-type: none"> · 분해능 : 1mm · 측정길이 : 50m · Stand Pipe : Hi-3P판 · Stand Pipe 내경 : 50mm · Stand Pipe 두께 : 4.5mm 	
감압정 펌프	<ul style="list-style-type: none"> · 모델명 : DPW80-12 · 입력전압 : DC 12V · 압상고 : 7m · 처리용량 : 4,800(L/h) · 입출경 : 25mm 	

지하수위계는 제체 내 침윤선 파악 및 감압정에 따른 수위 변화 측정을 위해 설치하며 진동현식 Type을 채택하였다. 지층이 균질하고 흙의 투수성이 크고, 수압의 깊이에 비례하여 증가할 때에 정확하게 측정되며 지층이 불규칙할 때에는 오차가 심하기 때문에 주의하여야 한다. 지하수위계의 설치 방법은 아래와 같다.

먼저 계획 심도까지 천공한후, Casagrande Tip과 Hi-3P Pipe를 연결한 후 계획 심도까지 삽입한다. Hi-3P Pipe를 Coupling을 이용하여 연결 설치하고, Boring Hole에 모래를 채워 넣는다. 설치 완료 후 Hi-3P Pipe 상단의 EL 값을 확인한다.



[그림 3-45] 감압정 계측기 설치사진

간극수압계는 감압정 설치에 따른 간극수압을 측정을 위해 설치하였으며 지반의 안정성 검토, 시공조정, 지하수위 측정의 참고자료로 이용할 수 있으며 진동현식 Type을 채택하였다. 간극수압계의 설치 방법은 아래와 같다.

먼저 회전 수세식으로 천공기로 보링 내경 76mm(NX) 이상으로 계획 심도까지 천공한다. 천공 후 맑은 물로 깨끗하게 세척하여 Slime을 완전하게 제거하고 모래를 20cm 이상 채운 후 심도를 확인한다. 이후 간극수압계는 24시간 동안 물로 포화시켜 팁의 기포를 제거하고 초기값을 측정한다. 포화된 간극수압계를 계획 심도에 서서히 자유 낙하시켜 설치한다. 설치된 간극수압계 상부 20cm 이상 모래를 채우고 다져 투수층을 형성시킨다.

케이싱을 1m 정도 제거한 후 모래를 채우고 상부에 벤토나이트 그라우팅액으로 상부에서의 침투수가 침투하지 못하도록 한다. 상부에 두께 100cm의 벤토나이트 펠렛을 투하하고 차수층 형성시킨다. 이후 케이싱을 제거하면서 그라우팅 호스를 이용해서, 시멘트 벤토나이트 그라우팅을 하여 지표면(수평 배수층)까지 불투수층을 형성 시킨다.

그라우팅을 실시하면서 과도한 수평 변위를 대비하여 지중과 지표면에 Cable에 Snaking을 주어 지반변형에 따른 Cable 단선을 방지하고, 또한 보호관을 공내에 1m 이상 삽입하여 Cable 단선을 방지한다. 그라우팅액의 양생이 완료 후 최소 72시간 이상 경과한 후 계측값을 측정하며, Cable 보호를 위하여 지표면에서 Cable Snaking을 한 후 보호관에 넣어 Cable의 손상을 방지하여야 한다.



[그림 3-46] 감압정 간극수압계 설치 사진

3.5.5 자동화 계측시스템




감압정 설치에 따른 계측관리는 제체의 안정성 파악을 위해 자동적, 연속적, 객관적으로 모니터링하고 이상 징후가 발생할 때는 이에 대한 원인을 파악하며 대책 수립 및 안정성을 효율적으로 파악하기 위한 수단이다. 자동 계측시스템을 실시하여 장기적으로 모니터링하며 경협식(Hyperbolic, Hoshino, Asaoka), 관련 이론 및 역해석과 수치해석을 이용한 관리기능을 구축하여 평가 및 모니터링이 가능하다.



감압정 설치에 따른 제체의 안정성을 파악하기 위한 계측관리시스템을 설계하여 실시간 모니터링 및 거동 감시를 위한 계측시스템을 현장에 설치하고 측정된 데이터를 수집하여 분석한다. 감압정 설치에 따른 제체의 안정성을 파악하는 것이 목적이며 초기 설치 시 제체 내 침윤선 파악 및 감압정 설치에 따른 수위 변화 측정데이터, 간극수압 측정 데이터 등 센서를 이용하여 감압정 설치 후의 변화 모니터링에 적용하였다.

자동화 계측시스템의 주요 구성은 전기적 신호로 감지하는 센서, 전기적 신호를 수집/처리하는 계측기기(데이터로거), 수집된 데이터를 전달하는 통신장치(모뎀), 현장 전원설비, 전송된 데이터를 저장하는 PC, 데이터를 분석하는 모니터링 프로그램(계측관리 모니터링 프로그램)으로 구성되어 있다.

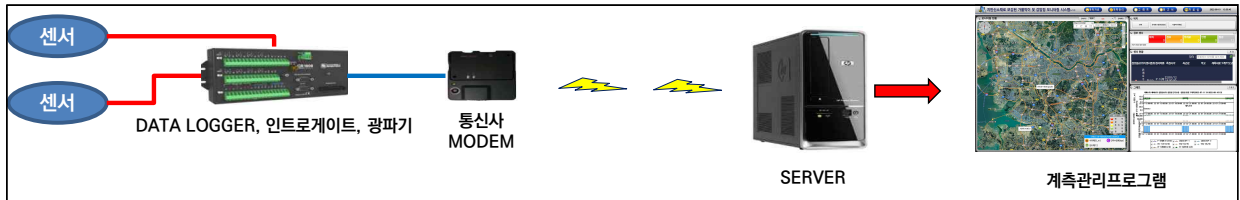
아래 표는 감압정 설치에 따른 자동화 계측시스템에 대한 규격 및 사진을 정리하였다.

[표 3-12] 자동화 계측시스템 사양

구분	규격	계측기기
측정 센서 (간극수압계 지하수위계 수위계)	<ul style="list-style-type: none"> · 0 ~ 50psi 측정 범위의 진동현식 Type · 최소 측정단위 : 0.025% F.S이하 · Maximum Over Load : 150% 이상 · 사용온도 : -20℃~+80℃ · 정확도 : ±0.1% F.S 이내 · Filter Pore Size : 60μm · 외경 : Stainless Steel 133×19.1mm · 측정케이블 : AWG20 코일형 석도석 4코어 차폐, 염해방지용 폴리우레탄 피복 	
데이터 수집장치 (데이터로거)	<ul style="list-style-type: none"> · 모델명 : CR6 · 사용온도 : -40℃~+70℃ · 최대 측정 속도 : 1,000 Hz · 유니버설 채널 12개 및 제어포트 4개 · 측정 센서 : 아날로그 전압, 진동현 센서, 스트레인게이지 · 통신포트 : Ethernet, USB Micro B, CS I/O, CPI, RS-485, RS-422, SDI-12 · 아날로그 정확도 : -40° ~ +70° C에서 ±(측정 + 오프셋의 0.06%) 	
데이터 전달 통신장치 (LTE모뎀)	<ul style="list-style-type: none"> · 모델명 : RCU-890S · 입력전원 : DC 5V ~ 13 1.2A 이상 · 무선통신방식 : SKT+LTE B5/B3 FDD Cat.1 · 인터페이스 : DB9 RS-232, RJ-45 Ethernet, GPIO 	

구분	규격	계측기기
현장 전원설비 (태양열 발전설비, 컨트롤러)	<ul style="list-style-type: none"> · 모델명 : SCM 80WN · 최대전압 : 18.5V · 개방전압 : 21.8V · 최대전력 : 80W · 사용온도 : -40℃ ~ +85℃ 	
감압정 펌프	<ul style="list-style-type: none"> · 모델명 : DPW80-12 · 입력전압 : DC 12V · 압상고 : 7m · 처리용량 : 4,800(L/h) · 입출경 : 25mm 	

각 센서에서 데이터 수집 장치인 데이터 로거로 데이터가 수집되면 LTE 모뎀까지 데이터 선 로로 전송된다. LTE 모뎀에서 상용 무선 통신망을 이용하여 서버에 전송되며 전송된 데이터를 계측관리 모니터링 프로그램에 표출한다. 아래 그림은 계측관리 시스템 통신망 구성을 표현하였다.

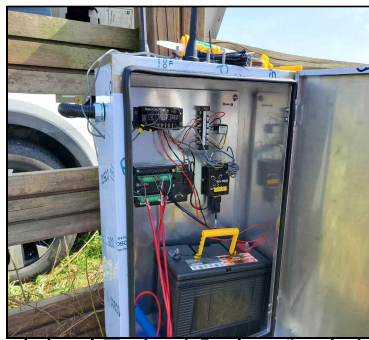


[그림 3-47] 자동화 계측시스템 통신 구성

아래 그림은 자동화 계측시스템 등의 현장 구축을 나타내었다.



(a) 자동화 계측시스템 전경



(b) 자동화 계측시스템 설치



(c) 태양열발전설비 설치

[그림 3-48] 감압정 계측기 설치사진

3.5.6 계측 모니터링 프로그램 개발 및 구축

실시간 모니터링 및 유지관리 시스템은 데이터 전송시스템, 자동화 계측데이터 분석시스템, 데이터베이스시스템, 예/경보시스템 등으로 구성되고 각종 시스템이 원활하게 기본 역할을 수행할 수 있는 통합 소프트웨어이다.

GUI 기반 데이터 전송, 저장, 분석 기능과 SMS를 이용한 예/경보 기능, 예비시험을 통한 원격지 실시간 모니터링 기능 검증이 가능하며 가물막이 및 감압정 모니터링시스템은 지하수위, 간극수압, 수위 등을 실시간 모니터링하고 측정 데이터를 기반으로 관리기준치에 따른 조기경보를 줌으로써 실무자 및 담당자가 신속하게 대응할 수 있도록 지원하는 시스템이다. 아래 그림은 감압정 모니터링 시스템 화면을 나타내었다.



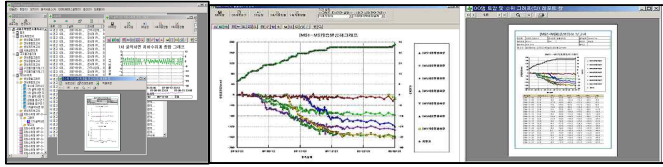
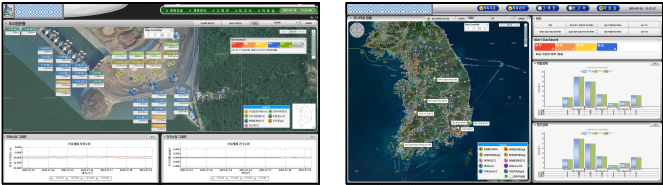

[그림 3-49] 감압정 모니터링시스템 화면

계측기를 연결하여 원격으로 측정하고 기기를 제어하여야 한다, 동시에 현재 상황도 실시간으로 측정자료를 체계적으로 취합, 저장, 분석하기 위해서는 관리자가 사무소에 설치된 설비로 자동계로 감시할 수 있도록 유지관리 계측 모니터링을 위한 전용 프로그램을 설치하여 구성하여 서버에 탑재하였다.

계측 모니터링 프로그램의 주요 기능은 센서 속성 및 데이터 관리 계측 현장 관리, 그래픽 사용자 인터페이스, 관리기준치 및 분석·경고 알림이 가능하며 아래 표는 모니터링 프로그램 특징 및 기능을 정리한 표이다.

[표 3-13] 모니터링 프로그램 특징 및 기능

구 성 품	특 징
자동 계측 프로그램 및 웹서비스	<ul style="list-style-type: none"> · 간극수압계, 지하수위계, 침하계 호환 가능(국내외의 로거 및 센서호환) · 기간별, 시간별 센서 측정 스케줄 설정 가능 · CDMA, TCP/IP, 모뎀(CDMA포함) 통신 방식 지원 · 방화벽 우회 통신 지원 · CR1000외 5가지 데이터 로거 통신 프로토콜 지원 (DT, CR1000X, ROTECH, AWSTRL-100 등)

구 성 품	특 징
<p>분석 및 경고 관리기준치</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 데이터 실시간 분류, 경보, 분석, 추출 기능 지원 · SMS, E-mail 경보 가능 · 사용자 분석 기법 정의 가능 · 사용자 그래프, 보고서 정의 및 출력 가능 
<p>웹 서비스 (사용자 운영 프로그램)</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 웹 인터페이스 기반 계측데이터 열람, 추출 · 시각적 / 도면 방식의 인터페이스 · 간극수압 Contour(침윤선) 표출 가능 · 사용자 편의 인터페이스(화면에 모든 필수데이터 표시) 
<p>스마트폰 계측서비스</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 스마트폰을 이용하여 계측데이터, 경보, 상황전파, 현장 영상 등을 실시간으로 확인 가능 · 현장 측정 데이터 현장 입력 기능 

계측시스템 및 모니터링 프로그램 유지관리 방안은 실시간 관리를 통한 장애 또는 이상 데이터에 대해 실시간 대응을 수행하며 관리항목 및 조치계획은 아래와 같다.

[표 3-14] 계측시스템 관리항목 및 조치계획

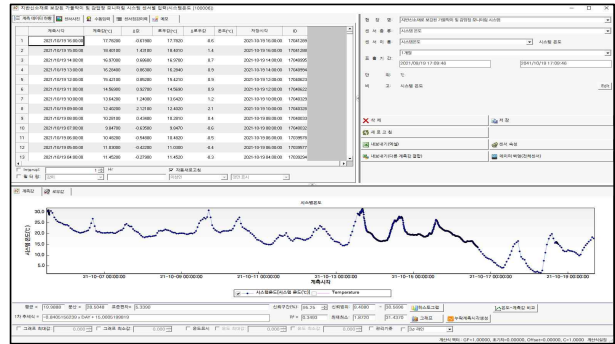
관리항목	관리항목	조치계획	비고
계측기	<ul style="list-style-type: none"> · 계측기의 외관 검사 · 측정장비의 정상가동 여부 	<ul style="list-style-type: none"> · 외관 이상시 관리자에 즉시 보고 후 장비 수리 및 교체 · 측정장비의 주기적 검교정 실시(년 1회) 	
통신	<ul style="list-style-type: none"> · 전산처리 프로그램 에러 유무 · 현장 통신 시스템 접속 유무 · 현장 전산입력 시스템 접속 유무 	<ul style="list-style-type: none"> · 측정 서버 다중 이용으로 인한 장애의 최소화 · 현장 시스템 이중화 구성(PC, 스마트폰) · 장애발생시 휴대폰 SMS 문자 통보 	
웹서비스	<ul style="list-style-type: none"> · 정상 가동 유무 	<ul style="list-style-type: none"> · 장애시 관리자에게 SMS 문자 메시지 전달 /즉각 대응 가능 	

가. 개발된 계측 모니터링 프로그램

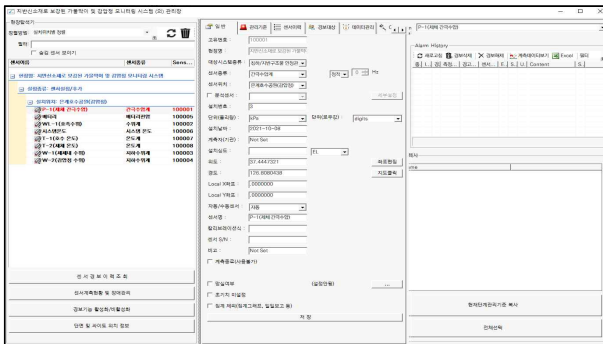
은계호수공원(具 소래저수지) 제당에 감압정 설치에 따른 간극수압, 지하수위를 평가를 위한 프로그램으로 계측자료 조회, 계측관리, 그래프, 보고서, 자료실의 기능을 포함하는 프로그램을 개발하였다. 아래 그림은 감압정 설치에 따른 모니터링 프로그램 기능을 나타내었다.



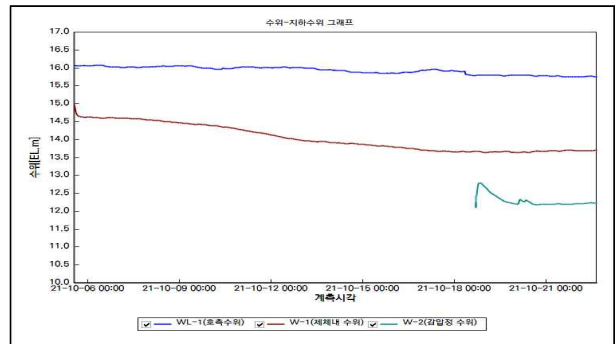
(a) 프로그램 메인화면



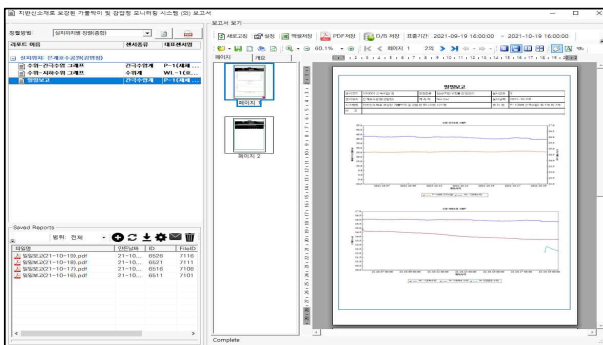
(b) 계측자료 조회



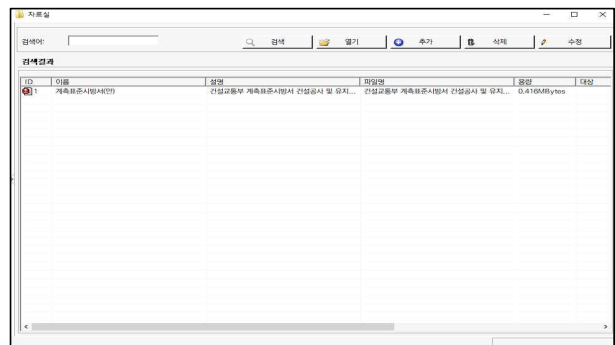
(c) 계측관리



(d) 그래프



(e) 보고서



(f) 자료실

[그림 3-50] 감압정 모니터링시스템

3.5.7 계측 데이터 기반 계측분석

계측데이터를 통한 감압정 모니터링 기술의 개발 및 사례에 대한 분석을 시행하였으며 이를 위하여 은계호수공원(具, 소래저수지)에 설치 및 적용하였다. 해당 저수지에 간극수압계, 지하수위계, 유량 펌프계 등을 설치하였으며 자동화 시스템을 적용하여 실시간 측정 및 모니터링이 가능하도록 하였다. 설계에서 적용된 설계치와 실측치를 대비 분석하여 분석에 필요한 자료를 제공 후 계측된 자료를 수집·정리·분석하였다.

수위는 호측, 체체, 감압정에 설치하였으며 간극수압은 체체 내에 설치하였다. 감압정 내 수위 저하를 위하여 펌프를 설치하였으며 펌프(1)는 1일에 한 번 10분을 가동, 펌프(2)는 3시간에 한 번 10분 가동하여 배수를 원활하게 하였다.

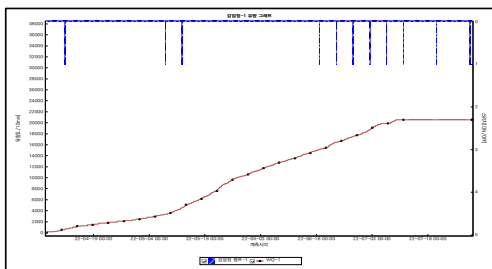
가. 분석결과

2021.10월 감압정을 설치하였으며 감압정 설치 후 약 6개월간 초기치 대비 체체 간극수압(▽15.28kPa), 체체 내 수위(▽1.03m)감소 하였으며 감압정 펌핑 초기 약 3주간은 안정화 기간 대비 체체 수위(△0.15m)m 간극수압(▽1.37kPa)은 변화가 거의 없는 것으로 확인되었다.

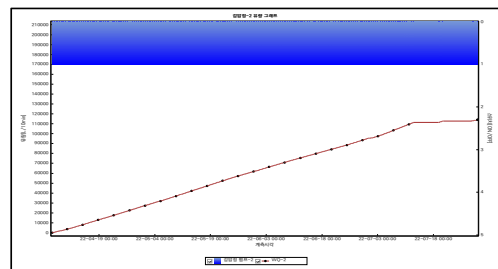
감압정 내 수위저하를 위해 설치한 펌프의 펌핑 후 약 8주간은 초기치 대비 (▽2.21m), 간극수압(▽26.46kPa)은 감소하였으며 22.06.06일 기준으로 호측 수위가 내려감에 따라 체체 지하수위 및 체체 간극수압은 감소하고 있으며, 감압정 수위에는 변동이 거의 없는 것으로 확인되었다.

[표 3-15] 감압정 계측 결과(요약)

위치	① 감압정 치(초기치) (21/10/18 설치)	②안정화 기간(②-①) (약 6개월)	③감압정 펌핑(③-①) (22/06/06 설치),(약 2개월 측정)
호수수위	15.74m	15.00m(▽0.74)	12.56m(▽3.18)
체체 내 지하수위	13.70m	12.67m(▽1.03)	11.34m(▽2.36)
감압정 지하수위	12.23m	9.81m(▽2.42)	9.6~11.4m(▽0.8~2.6)
체체 내 간극수압	25.85kPa	10.57kPa(▽15.28)	11.34kPa(▽25.85)

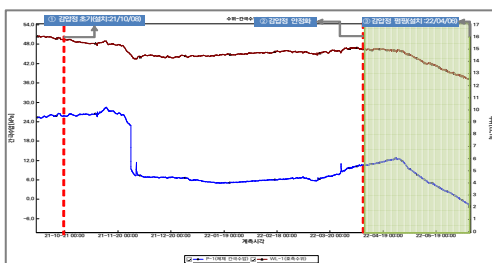


(a) 감압정-1 펌프 유량 그래프

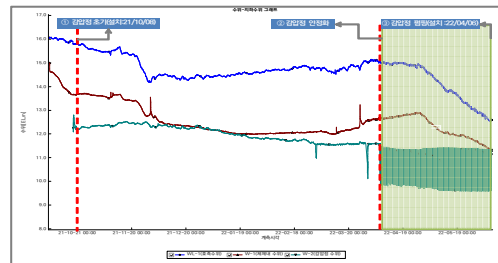


(b) 감압정-2 펌프 유량 그래프

[그림 3-51] 계측데이터 분석 결과(펌프 유량계)



(a) 호측 수위-체체 간극수압



(b) 호측 수위-체체 지하수위-감압정 지하수위

[그림 3-52] 계측데이터 분석 결과

3.5.8 수치해석

저수지 제방에서 감압정 설치 유무는 감압정 시스템의 설계 조건을 제공하는 침투분석 (USACE, 1992)에 기초해서 결정한다. 제방의 하단부 토우에 설치하는 감압정은 지중에서 수압에 의한 상향의 침투압력을 저하해 제방의 침투에 대한 안정성을 증가시킨다. 따라서, 저수지 제방에 침투 안정성 증가를 목적으로 감압정을 적용하는 경우 침투압력의 저하 정도를 파악하는 것이 중요하기 때문에, 침투류 해석 모델을 적용하여 감압정이 침투 거동에 미치는 영향을 분석해야 한다.

침투류 해석에서 유선망 방법은 단면의 기하학적 형상 및 복잡한 경계조건을 고려하는 데 한계가 있어, 유한요소법이나 유한차분법에 따른 수치해석을 많이 활용하고 있다. 유한요소법에 의한 침투해석에서 사용되는 지배 미분 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right] + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad \text{식 (10)}$$

여기서, H : 전수두(m)

k_x : x 방향의 투수계수(cm/sec)

k_y : y 방향의 투수계수(cm/sec)

k_z : z 방향의 투수계수(cm/sec)

Q : 흙의 단위 체적당 단위시간당 물의 유출입량($m^3/m^3/sec$)

θ : 체적함수비

t : 시간(sec)

침투 거동에 따른 제방 기초지반의 안정성을 분석하기 위하여 한계동수경사에 의한 침투 안정성을 검토하였다. 흙 속에서 상향 침투가 발생하면 유효응력이 감소하고, 유효응력이 0인 조건에 도달하면 흙의 안정상태가 파괴되는 파이핑(Piping) 현상이 발생한다. 유효응력이 0이 되는 동수경사(i_e)를 한계동수경사(i_{CR})라 한다. 한계동수경사에 의한 안전율은 다음과 같이 검토한다.

$$i_{CR} = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} = \frac{G_s - 1}{1 + e} = (1 - n)(G_s - 1) \quad \text{식 (11)}$$

$$F_s = \frac{i_{CR}}{i_e} \quad \text{식 (12)}$$

여기서, i_{CR} : 한계동수경사

i_e : 유출동수경사

γ_{sub} : 토립자의 수중단위중량(kN/m^3)

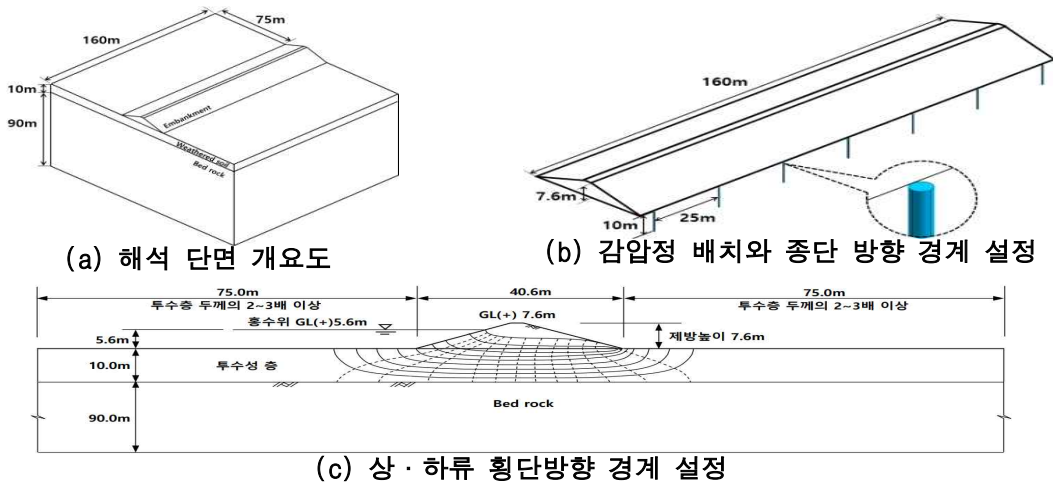
γ_w : 물의 단위중량(kN/m^3)

G_s : 토립자의 비중
 e : 흙의 간극비
 n : 흙의 간극률
 F_s : 안전율

본 해석에서는 감압정의 설치에 따른 간극수압 및 동수경사의 감소 효과를 확인하기 위하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 저수지 제방의 형식은 균일형으로 가정하였으며 하부지반은 침투류 흐름이 발생하는 풍화토 지층(10m)과 그 아래에는 침투류 흐름이 발생하지 않는 연암층(90m)이 층을 이루고 있는 것으로 가정하여 분석하였다.

저수지 제방의 높이는 농업생산기반정비사업 통계 연보를 분석하여 농업용 저수지 평균 높이 7.6m로 결정하였다(MAFRA, KRC, 2018).

상류 사면과 하류 사면의 경사도는 1:2.5, 댐 마루 폭은 2.6m이므로 제방폭은 40.6m를 설정하였고, 감압정 종단상 최대간격 50m의 3배 이상을 반영하여 제방의 길이는 160m로 설정하였다. 투수성 지층의 두께가 10m이므로 상·하류 해석 경계는 투수층 두께의 2~3배 이상이면 충분할 것으로 판단되나, 투수층 두께의 7.5배인 75m씩을 설정하였다.



[그림 3-53] 수치해석 단면

감압정의 직경, 설치 간격, 관통율, 수위 조건 등을 고려하여 총 22개의 Case에 대해 해석을 수행하였다. 설계 기준에 의하면 감압정의 직경은 15~45cm, 설치 간격은 8~30m를 권장하고 있어 설계 기준에서의 권장 직경과 간격을 고려하여 직경(0.1, 0.2, 0.4, 0.6m), 설치 간격(5, 10, 25, 50m), 감압정의 침투 유량의 배출 성능에 큰 영향을 미치는 관통율(25, 50, 75, 100%)을 각각 4가지 조건으로 침투해석을 수행하였다.

풍화토의 투수계수 및 침투류 해석을 위한 불포화 함수 특성의 체적 함수비와 부간극수압의 관계 등 해석에 사용된 지반의 물성치는 농업용 저수지 30개 지구의 비상 대처 계획(EAP) 자료를 참조하여 결정하였다.

저수지 제방의 수위조건은 상시만수위(4.6m) 조건으로 가정하여 정상류 수치해석을 수행하였고, 저수지 수위가 감압정의 성능에 미치는 영향을 비교검토 하였다. 감압정 효과분석을 위한 해석 단면, 감압정의 배치 등 해석의 경계 조건은 아래 그림과 표에 나타냈으며, 분석한 22개의 Case는 아래 표에 정리하였다.

[표 3-16] 수치해석 조건(요약)

구 분		제원	비고
저수지 제방	높이(m)	7.6	
	댐마루 폭(m)	2.6	
	사면기울기(V:H)	1:2.5	
	제방 하부폭(m)	40.6	
	제방 길이(m)	160	
	상·하류 해석경계(m)	75	
지반 지층	투수성 층(m)	10	
	기반암(m)	90	
투수 계수	제방(cm/sec)	5.75×10^{-5}	
	풍화토(cm/sec)	2.78×10^{-2}	
	기반암(cm/sec)	5.00×10^{-9}	
감압정 직경(m)		0.1, 0.2, 0.4, 0.6	
감압정 설치심도(m)		2.5, 5, 7.5, 10	
감압정 간격(m)		5, 10, 25, 50	
수위 GL(+m)		5.6(F.W.L), 4.6(N.H.W.L.), 2.6(L.W.L)	

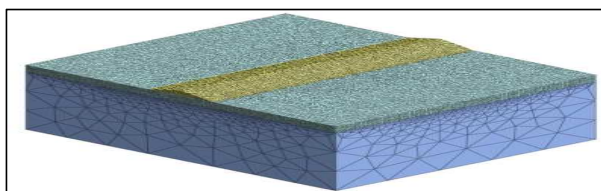
[표 3-17] 수치해석 Case 조건(요약)

구 분	감압정 직경(m)					감압정 간격(m)				관통율(%)				수위(m)		
	0	0.1	0.2	0.4	0.6	5	10	25	50	25	50	75	100	4.6 (NHWL)	5.6 (FWL)	2.6 (LWL)
CASE 1	○													○		
CASE 2		○				○							○	○		
CASE 3		○					○						○	○		
CASE 4		○						○					○	○		
...	...															
CASE 18			○				○			○				○		
CASE 19			○				○				○			○		
CASE 20			○				○					○		○		
CASE 21			○				○						○		○	
CASE 22			○				○						○			○

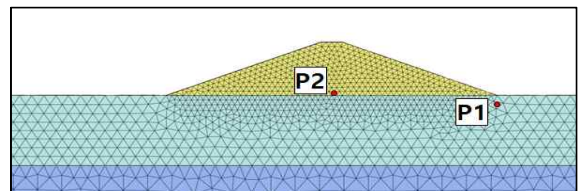
감압정의 해석은 주로 USACE의 이론적 방법, 전기적 분석, 이론적 방법에 근거한 컴퓨터 프로그램 등에 의존해 왔으며, 최근에는 수치해석 기법을 많이 활용하고 있다.

제방의 하단부에 발생하는 과도한 간극수압을 저감시킬 목적으로 종단 방향으로 임의위치에 감압정을 설치하는 경우 감압정의 직경, 간격, 관통율에 따라 감압정 위치와 감압정 사이에서의 침투 거동이 다르게 나타난다.

이러한 경우 종단 방향으로 간격을 두고 제방 하부에 설치하는 감압정의 침투 거동을 2차원 수치해석으로 분석하는 것은 한계가 있어, 감압정과 감압정 사이의 침투 거동을 실제로 근접하게 분석하기 위해서는 3차원 수치해석을 수행하였다.



(a) 저수지 제방



(b) 수치해석 분석 지점

[그림 3-54] 수치해석 모델링

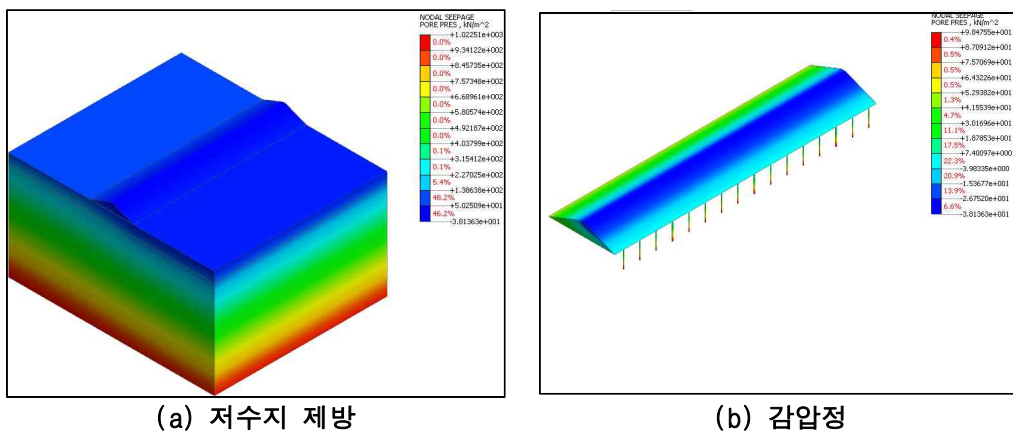
가. 해석결과

수치해석은 감압정의 직경, 간격, 관통률 등 조건을 고려한 감압정 설치에 따른 제방의 침투 안정성 향상 효과를 분석하기 위해 3차원 유한요소 침투해석 프로그램 midas GTS NX를 사용하였다.

해석 요소망의 크기는 일본 하천 설계 기준에서 제안하는 제방 높이의 1/10이하로 설정하였으며 변수는 감압정의 설치에 따라 댐체에 작용하는 침투 압력의 변화를 평가할 수 있는 간극수압과 한계 동수경사법에 의한 침투안정해석을 위한 유출 동수경사를 사용하였다. 또한, 감압정 성능의 비교분석을 위해 제방 횡단면에서는 제방 하류 사면 토우 하단부(P1) 및 제방 중앙부(P2)를 분석지점으로 정하여 간극수압과 동수경사를 검토하였다.

감압정이 설치되지 않은 경우의 P1, P2 지점에서의 간극수압과 동수경사를 분석(Case 1에 해당하며, 감압정 직경을 0m로 해석)하여 기준값으로 설정하였으며 감압정의 설치조건에 따른 제방의 종단 방향으로 성능을 분석하기 위하여 감압정 설치지점(RW^{주1)}) 및 감압정과 감압정 사이의 중간점(BRW^{주2)})에서 간극수압과 동수경사를 분석하였다. 기준값 대비 감압정의 설치에 따른 직경, 간격, 관통율, 수위 등의 조건별로 간극수압과 동수경사, 파이핑 안전율의 상호 비교를 통해 그 효과를 검토하였다.

감압정 설치 유무에 따른 침투 거동을 분석하기 위하여 감압정의 직경 및 설치 간격을 변화시켜 제방 하류 사면, 제방 중앙부 및 풍화토층의 간극수압을 변화를 분석하였다. 감압정 설치조건에 따른 간극수압의 결과 중 Case 8의 결과를 아래 그림에 나타내고 있다.



[그림 3-55] 간극수압 수치해석 결과 (CASE 8)

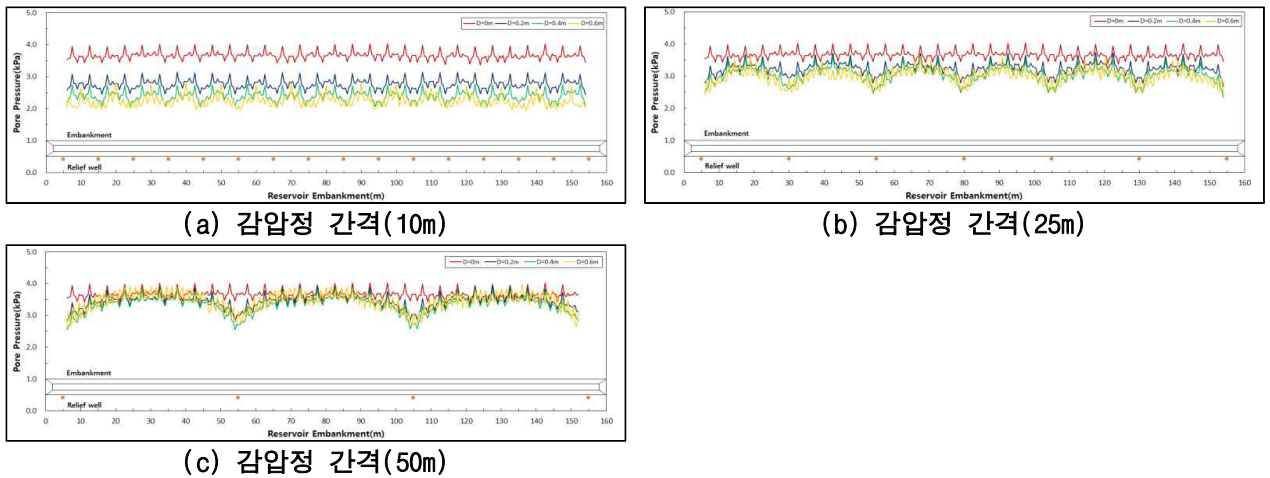
아래 그림은 홍수위 조건 하류사면(P1) 분석 지점에서 제방 종단 방향으로 감압정의 설치 간격과 직경에 따른 간극수압의 분포를 나타내고 있다. 감압정이 설치된 위치(RW)에서 제방에 작용하는 간극수압은 급격히 감소되었으며, 감압정과 감압정 사이에서 간극수압 감소는 상대적으로 적은 것으로 분석되었다.

주1) Relief Well의 약자로 본 해석에서는 감압정의 위치로 정의
 주2) Between Relief Wells의 약자로 감압정과 감압정의 사이 중간점으로 정의

감압정이 설치된 제방의 최대 간극수압은 감압정과 감압정 사이의 중간 지점(BRW)에서 나타났고, 최소 간극수압은 감압정이 설치된 위치에서 나타났다. 한편, 분석된 간극수압이 펄스 형태로 나타나는 것은 유한요소해석의 요소 크기 영향에 따른 것으로 판단된다.

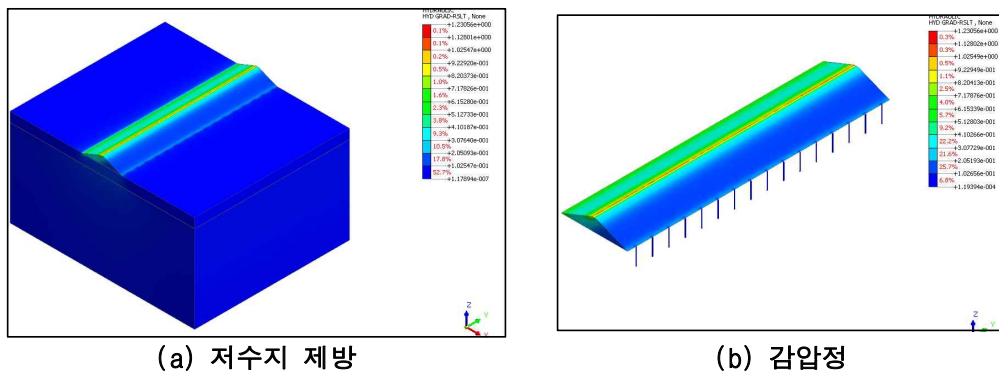
이에 대한 규명을 위해서는 추가적인 분석이 필요하여 감압정의 직경과 설치 간격에 따른 간극수압의 감소 효과를 분석한 결과, 직경과 설치 간격에 따라 간극수압 감소의 크기는 다르게 나타나고 있다.

또한, 감압정은 제방 하류 사면뿐만 아니라 제방 중앙부, 하부지반에서도 간극수압의 감소 효과가 나타나고 있다. 아래 그림의 감압정이 설치된 제방의 3차원 침투해석 결과에 나타난 바와 같이 침투압력이 제체의 종단 방향으로 감압정의 설치 위치와 감압정과 감압정의 사이에서 서로 다르게 나타나고 있으므로, 침투분석은 3차원 해석으로 수행하는 것이 타당하다고 판단된다. 자세한 해석 결과는 감압정 설계·시공 매뉴얼에 정리하였다.



[그림 3-56] 하류사면 종방향 간극수압(P1)

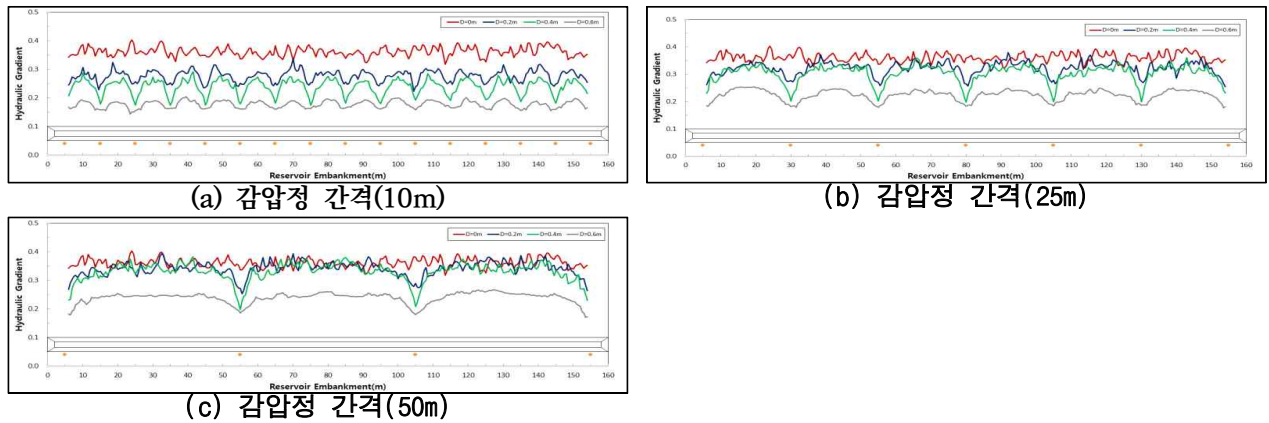
감압정 설치 유무에 따른 침투 거동을 분석하기 위하여 감압정의 직경 및 설치 간격을 변화시켜 제방 하류 사면의 유출 동수경사의 변화를 분석하였다. 동수경사와 파이핑 안전율은 홍수위 조건에서 제방의 침투거동을 분석하였다. 감압정 설치에 따른 동수경사의 결과 중 Case 8의 결과를 아래 그림에 나타내고 있다.



[그림 3-57] 동수경사 수치해석 결과(CASE 8)

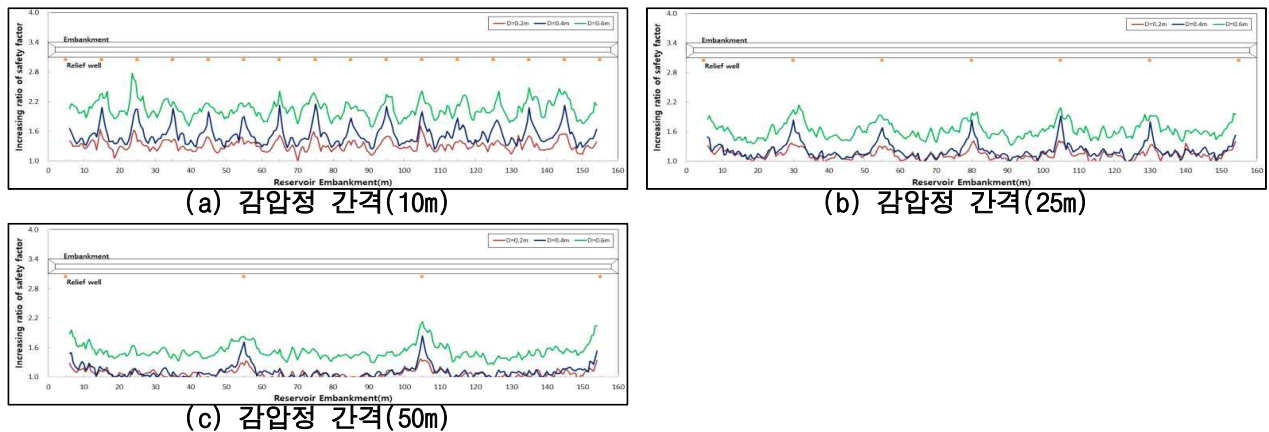
아래 그림은 홍수위 조건의 하류 사면 분석 지점(P1)에서 제방 종단 방향으로 감압정의 설치 간격과 직경에 따른 동수경사의 전체 분포를 나타냈다. 동수경사의 변화는 감압정이 설치된 위치(RW)에서 제방에 작용하는 동수경사가 급격히 감소되는 것으로 나타났으며, 감압정과 감압정 사이에서는 상대적으로 더 적은 것으로 평가되었다. 감압정이 설치된 제방의 최대동수경사는 감압정과 감압정 사이의 중간지점(BRW)에서 나타났고, 감압정이 설치된 위치(RW)에서 동수경사가 가장 적은 것으로 나타났다. 감압정의 설치에 따른 상대적인 효과를 분석하기 위하여 감압정이 설치되지 않은 조건(감압정 직경을 0으로 해석)과 비교하였다.

아래 그림 (a),(b),(c)에서 맨 위에 위치한 적색선은 감압정이 설치되지 않은 경우의 동수경사를 나타낸다.



[그림 3-58] 하류사면 종방향 동수경사(P1, F.W.L.)

동수경사와 파이핑 안전율을 분석한 결과, 감압정의 직경과 설치간격에 따라 유출동수경사는 감소하고 파이핑 안전율은 증가하는 것으로 평가되었다. 아래 그림 (b)에 나타난 바와 같이 동수경사의 감소와 파이핑 안전율의 증가는 감압정 직경 0.2m 이하와 설치간격 25m 이상에서는 효과가 감소하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 감압정의 설치시 직경과 간격은 제체와 지반의 토질조건, 침투조건 및 이에 따른 안전율 등 보다 다양한 요소를 고려하여 결정하여야 하며, 이에 대한 추가 분석이 필요하다.



[그림 3-59] 하류사면 종방향에 따른 동수경사 안전비 증가(F.W.L.)

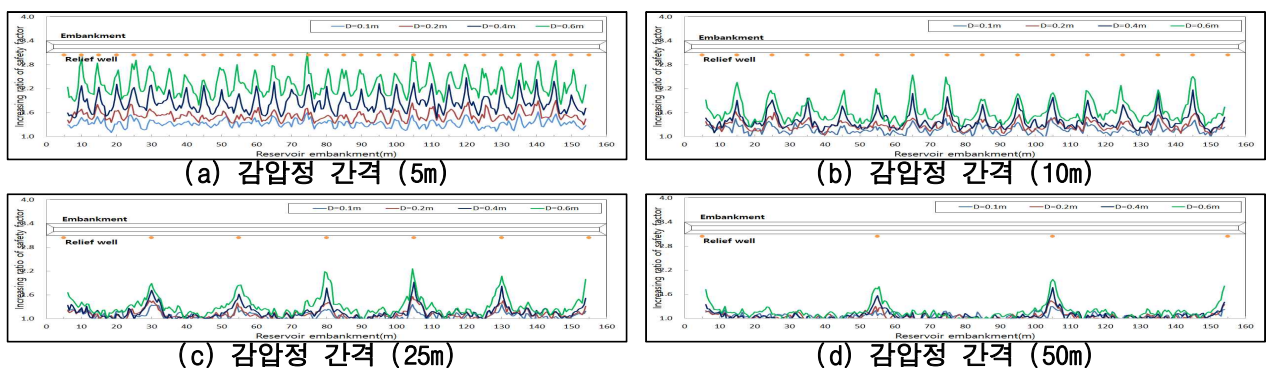
침투에 의한 파이핑의 발생으로 인해 제방의 안정성이 저해될 수 있다. 파이핑이 발생하면 정상적인 침투에 의한 침투량보다 훨씬 많은 침투가 발생하며, 침투수에 의한 내부침식으로 파이핑이 가속화되면서 제방에 치명적인 손상을 일으킬 수 있다. 제방의 침투 안정성을 평가

하기 위해 하류 사면에서 발생하는 유출 동수경사와 한계동수경사(i_{CR})의 비교를 통해 하류 사면의 파이핑에 대한 안정성을 평가하였다. 한계동수경사는 30개 저수지의 비상대처계획 (EAP) 자료를 참고하여 평균값 1.106을 활용하였다.

아래 그림은 상시만수위 조건의 하류 사면 분석 지점(P1)에서 제방 종단 방향으로 감압정이 설치되지 않은 조건(감압정 직경을 0으로 분석)에서 파이핑 안전율을 기준안전율로 하고 감압정의 직경, 간격을 조건으로 설치하였을 경우 파이핑 안전율의 증가비를 연속적인 그래프로 표시하였다. 그림에서 나타나듯이 파이핑 안전율은 감압정 설치 위치(RW)에서 최대로 증가하는 것으로 나타났고, 감압정과 감압정 사이의 제방에서도 감압정이 설치되지 않은 경우에 비해 상대적으로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 저수지 제방에서 적정 직경과 간격으로 감압정을 설치하면 제방의 파이핑에 대한 안정성 증가가 가능하다.

감압정이 설치되지 않은 조건의 기준안전율 대비 각 간격별 안전율 증가율을 분석한 결과 평균적으로 간격 5m에서 133%~229%, 간격 10m에서는 117%~161%, 간격 25m에서는 110%~131%, 간격 50m에서는 103%~116%까지 증가하였음을 알 수 있었다.

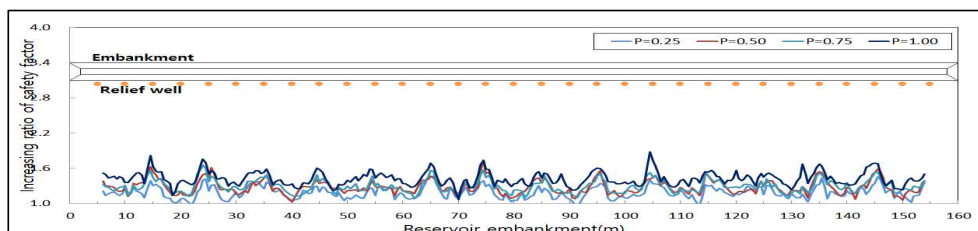
이는 감압정의 간격이 좁을수록 평균적인 안전율이 제방 하류사면 토우 하단에서 더 증가함을 나타낸다.



[그림 3-60] 직경, 간격별 하류사면 종단방향 파이핑안전율 변화 (P1, N.H.W.L.)

아래 그림은 직경 0.2m, 간격 10m, 상시만수위 조건에서 관통율별 종단 방향의 파이핑 안전율 증가비를 나타내고 있다. 그림에서 관통율이 증가함에 따라 파이핑 안전율은 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 분석 결과, 감압정이 없는 조건의 기준안전율 대비 평균적인 안전율 증가는 관통율 25%에서 118%, 50%에서 129%, 75%에서 130%, 100%에서 143%로 증가하였다.

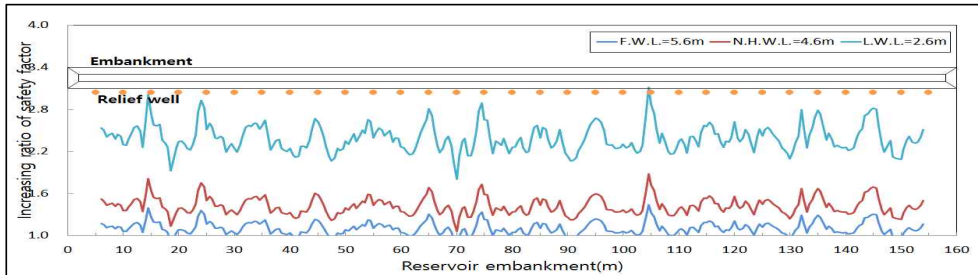
관통율이 50% 이상으로 증가하는 경우 파이핑 안전율 증가율은 둔화되는 경향이 있어, 감압정 설치시 깊이를 깊게 하는 것 보다는 간격을 좁게 하는 것이 더 유리할 수 있다는 것을 나타낸다.



[그림 3-61] 관통율-종단방향 파이핑 안전율 증가비 (P1, N.H.W.L, 관통율 25, 50, 75, 100%, D=0.2m, a=10m)

아래 그림은 직경 0.1m, 간격 10m에서 홍수위(4.6m), 상시만수위(5.6m), 저수위(2.6m) 등 수위별 종단 방향의 파이핑 안전율 증가비를 나타내고 있다. 그림에서 감압정을 설치하는 경우 수위가 증가함에 따라 파이핑 안전율의 증가율이 낮음을 알 수 있다.

분석 결과, 감압정이 없는 조건의 기준안전율 대비 평균적인 안전율 증가는 저수위(2.6m)에서 240%까지 증가하고 있으나, 상시만수위(4.6m)에서는 143%, 홍수위(5.6m)에서는 111% 증가하였다. 따라서 감압정의 설계시 목표로 하는 안전율은 홍수위나 상시만수위를 기준으로 정하여야 할 것으로 판단되며, 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.



[그림 3-62] 수위-종단방향 파이핑안전율 증가비
(P1, 홍수위, 상시만수위, 저수위, D=0.1m, a=10m)

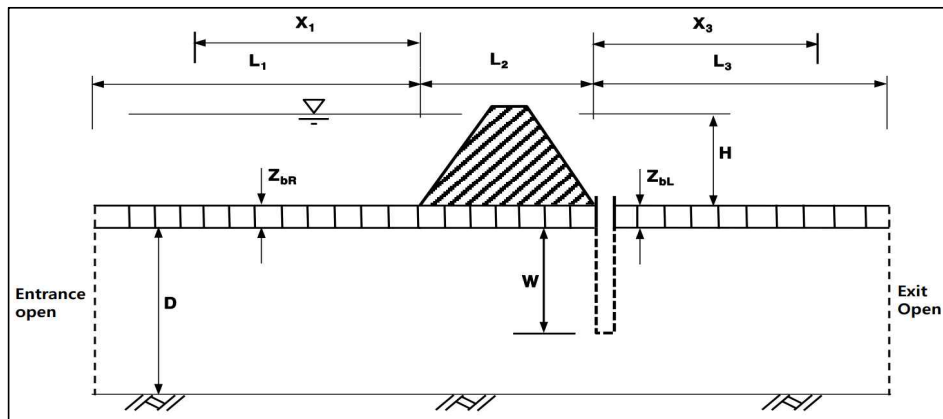
본 연구에서는 저수지 제방의 높이와 수위, 기초의 투수계수, 감압정의 설치 간격과 직경, 관통율 등 요소를 고려하여 3차원 침투 해석을 실시하고 간극수압의 변화, 동수경사의 변화, 한계 동수경사법에 의한 안전율 변화 등을 분석하고 제방의 침투 안정성 평가를 수행하였으며, 그 결과는 감압정 설계·시공 매뉴얼에 자세히 수록하였다.

3.5.9 감압정 효과 분석

감압정의 해석방법은 다양하며 이론식에 의한 수계산이 있고, 한 단계 진보한 수치해석을 통한 계산 방법이 있다. 본 과업에서는 이론적 해석을 기초로 현장 시공 여건을 최대한 재현할 수 있는 3차원 해석기법을 활용해서 감압정의 설계 및 시공기준을 구하였다. 이와 같은 감압정의 효과를 분석하기 위해서는 3차원 해석결과와 비교할 수 있는 기준값의 설정이 필요하며 감압정의 기준값 설정을 위한 감압정 시스템을 이론에 근거하여 분석하였다. 해석에 적용한 단면은 3차원 해석과 동일한 조건으로 가정하였다.

이론적 침투 분석을 위해서는 다음과 같은 단순화된 가정이 필요하다. 첫 번째 침투에 있어 그 소스(Source)는 임의 지점 상부 지층을 통해 투수성 지층으로 들어갈 수 있다. 두 번째 최상층을 통하는 흐름은 수직이다. 세 번째 투수성 지층을 통한 흐름은 수평이다. 수직 방향의 흐름은 완전히 무시된다. 네 번째 제방(불투수성 또는 두꺼운 소단을 포함)과 그 아래의 최상층 부분은 불투수성이다. 마지막으로 모든 침투는 층류이다.

분석을 위하여 저수지 제방의 형식은 균일형으로 가정하였으며 하부지반은 블랭킷 공식의 적용을 위해 제방의 상류 및 하류사면 외측에 반투수성의 유한 상부층(두께 1.0m, 길이 상하류 20m)과 침투 흐름이 발생하는 풍화토층(9.0m), 침투 흐름이 발생하지 않는 불투수층이 분포하는 것으로 가정하여 분석하였다. 저수지 제방의 높이는 농업생산기반정비사업 통계연보를 분석하여 농업용 저수지 평균 높이 7.6m로 결정하였다(MAFRA, KRC, 2018). 상류사면과 하류사면의 경사도는 1:2.5, 댐마루의 폭은 2.6m이므로 제방의 폭은 40.6m이며, 제방은 무한선 소스인 경우로 가정하였다. USACE의 이론의 적용을 위하여 가정한 상·하류 블랭킷의 길이가 각각 20m이므로 침투입구거리와 침투출구거리는 20m로 검토하였다. 감압정의 분석 단면은 아래 그림에 도시하였다.



[그림 3-63] 분석 단면

USACE 이론에 의한 감압정의 해석은 감압정의 직경, 관통율, 수위조건, 투수계수, 기초지반 두께를 매개변수로 반영하여 총 15개의 Case에 대해 분석하였다. 감압정의 직경, 관통율, 투수계수를 각각 다른 조건으로 15개의 CASE를 분석하였다. 분석에 사용된 기준 투수계수 $2.78 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 는 농업용저수지 30개 지구의 비상대처계획(EAP) 자료를 참조하여 제방과 하부지반 풍화토의 투수계수로 결정하였다. 저수지 제방의 수위조건은 정상류 상태인 상시만수위(4.6m) 조건으로 가정하였다. 감압정 효과분석을 위한 조건은 아래 표에 나타내고 있다.

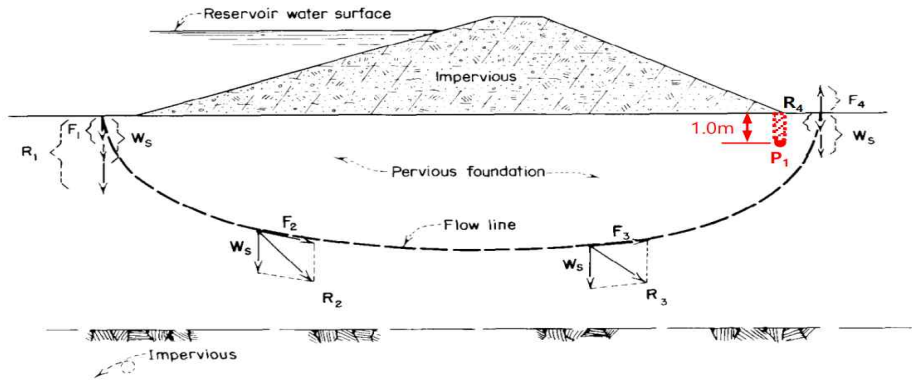
[표 3-18] 감압정 효과 분석조건

구 분		제원	비 고
저수지 제방	높이(m)	7.6	
	댐마루 폭(m)	2.6	
	사면기울기(V:H)	1:2.5	
	침투입구거리 L1(m)	20	
	제방 폭 L2(m)	40.6	
	침투출구거리 L3(m)	20	
투수 계수	제방(cm/sec)	5.75×10^{-5}	
	풍화토(cm/sec)	2.78×10^{-3} , 2.78×10^{-2} , 2.78×10^{-1}	
	기반암(cm/sec)	5.00×10^{-9}	
감압정 직경(m)		0.1, 0.2, 0.4, 0.6	
감압정 길이(m)		5, 10	
수위(m)		4.6(NHWL, 상시만수위)	
기초 지반	투수층 두께	10, 20, 30, 40	
블랭킷	두께(m)	1.0	
	길이(m)	상·하류 20	

[표 3-19] 감압정 효과 분석 CASE

구 분	감압정 직경(m)				투수계수(cm/sec)			지층두께				관통율(%)		수위(m) 4.6 (NHWL.)
	0.1	0.2	0.4	0.6	2.78×10^{-3}	2.78×10^{-2}	2.78×10^{-1}	10	20	30	40	50	100	
CASE1	○					○		○				○		○
CASE2	○					○		○					○	○
CASE3		○				○		○				○		○
CASE4		○				○		○					○	○
...	...													
CASE12		○					○	○					○	○
CASE13		○				○			○				○	○
CASE14		○				○				○			○	○
CASE15		○				○					○		○	○

기준값 설정을 위한 분석은 USACE EM 1110-2-1914(1992)의 블랭킷 이론에 의한 접근법을 활용하였다. 분석을 위하여 감압정이 없는 조건에서 하류 토우를 따라 발생할 수 있는 수두를 결정하고, 주어진 안전율을 고려하여 요구하는 수준의 수두까지 줄이기 위한 감압정 시스템을 설계하는 것으로 수행하였다.



[그림 3-64] 침투수압에 대한 감압정 분석 모식도

본 해석에서의 분석 방법은 위의 그림의 침투수압에 대한 감압정 분석 모식도에 나타난 바와 같이 제방 하류의 토우 원지반 하단 1m 지점 P_1 에서의 파이핑 안전율을 고려한 허용 동수경사값을 한계동수경사 이하로 제한하는 조건으로 분석하였다.

따라서 감압정 위치에서의 허용 동수경사와 감압정과 감압정 사이 중간점에서의 허용 동수경사값은 한계 동수 이하로 제한하였다.

본 검토에서 한계동수경사는 30개 저수지의 비상 대처계획(EAP) 자료를 참고하여 평균값 1.106을 활용하였다. 파이핑에 대한 안전율(FS)을 1.5로 적용하였으므로 허용 동수경사는 0.74이다. 따라서 제방 하류 토우 위치 하부 1m 검토지점의 허용 수두는 0.74m로 계산하였다. 본 분석에서는 무한 침투 소스에서 상하류 불투수성 유한한 블랭킷이 분포하는 투수성 지반으로 가정하였다.

가. 분석결과

감압정 설치에 따른 침투 거동을 분석하기 위하여 감압정의 직경, 관통율, 투수계수, 지층의 두께를 변화시키는 조건에서 감압정의 유량과 간격, 감압정 위치의 수두(감압정 수두), 그리고 감압정과 감압정 사이 중간점에서의 수두(중간점 수두)를 계산하였다. 요약된 계산 결과는 아래 표에 나타나 있다.

[표 3-20] 직경, 관통율 변화에 따른 분석결과

구 분		관통율(50%)				관통율(100%)			
		직경(2rw)				직경(2rw)			
		0.1	0.2	0.4	0.6	0.1	0.2	0.4	0.6
간격(a)	m	18	21	25	28	30	35	41	44
유량(Q)	m ³ /day	104	121	148	169	183	209	240	267
감압정수두(Hav)	m	0.727	0.724	0.731	0.731	0.731	0.722	0.735	0.730
중간점수두(Hm)	m	0.736	0.736	0.738	0.739	0.739	0.740	0.740	0.740
관통길이(W)	m	5.0	5.0	5.0	5.0	10.0	10.0	10.0	10.0

[표 3-21] 투수계수, 관통율 변화에 따른 분석결과

구 분		관통율(50%)			관통율(100%)			비고
		투수계수(cm/sec)			투수계수(cm/sec)			
		2.78×10^{-3}	2.78×10^{-2}	2.78×10^{-1}	2.78×10^{-3}	2.78×10^{-2}	2.78×10^{-1}	
간격(a)	m	20.1	20.7	18.9	34.4	35.1	28.3	직경 0.2m 상시만수위 50m
유량(Q)	m ³ /day	12	121	1,142	21	212	1,732	
감압정수두(Hav)	m	0.717	0.724	0.724	0.720	0.731	0.721	
중간점수두(Hm)	m	0.734	0.736	0.740	0.739	0.740	0.737	
관통길이(W)	m	5.0	5.0	5.0	10.0	10.0	10.0	

[표 3-22] 지층두께 변화에 따른 분석결과

구 분		지층두께(m)				비고
		10	20	30	40	
간격(a)	m	35.1	33.7	33.2	31.7	직경 0.2m 상시만수위 4.6m 투수계수 2.78×10^{-2} cm/sec 관통율 100%
유량(Q)	m ³ /day	212	439	646	819	
감압정수두(Hav)	m	0.731	0.731	0.731	0.713	
중간점수두(Hm)	m	0.740	0.740	0.740	0.739	
관통길이(W)	m	10.0	20.0	30.0	40.0	

위 표에 정리한 바와 같이 감압정의 유량은 직경과 관통율이 증가함에 따라 비례하여 커지는 경향을 보이고 있다. 또한 모든 직경과 관통율에 대해 감압정 수두가 중간점 수두보다 낮으며, 중간점 수두는 허용수두 0.740m 이하에서 0.736~0.740m로 일정한 값을 보이고 있다. 투수계수가 커지면 유량은 증가하고 간격은 좁아지는 경향을 보인다.

감압정에서의 수두는 0.717~0.731m, 중간점 수두는 0.734~0.740m로 나타났다. 또한, 지층 두께가 커지면 유량은 증가하고 간격은 좁아지는 경향을 보인다. 감압정에서의 수두는 0.713~0.731m, 중간점 수두는 0.739~0.740m으로 중간점 수두가 감압정 수두보다 높게 나타났다.

3.6 Well Point 적용에 따른 제방비탈면의 안정성 평가

저수지 제방 비탈면은 상류 수위가 높을수록 제방 비탈면 안전율은 저하되고, 그 안전율이 1.0이하가 될 경우에는 제방 비탈면의 붕괴로 이어질 것이다. 비탈면 안전율은 전단강도/활동력으로 표현되며, 저수지 수위가 높아질 경우 제체 내 간극수압증가로 인해 전단강도는 감소하고, 활동력은 증가하여 안전율이 급감하게 되는 것이다. 따라서, 저수지 제방 비탈면의 장기 안전성은 제체 내 간극수압 상승을 억제하는 것에 있다.

저수지 제방 상류 수위증가로 인한 제방 비탈면내 간극수압 증가를 억제할 수 있는 대책공법 중의 하나가 “Well Point 공법”이다. “Well Point” 공법은 저수지 제방 하류부에 Well을 형성하고, Well 내로 유입된 지하수를 외부로 펌핑함으로써 제방 비탈면내 간극수압을 상승을 억제하여 제방 비탈면의 안전율 저하를 방지하여 장기 안정성을 확보할 수 있다.

Well Point 효과를 고려한 비탈면 안정성 해석방법은 3차원적 지하수 흐름을 고려할 수 있어야 하며, 간극수압-응력-사면안정해석이 연동되어야만 가능한 것이다. 본 연구에서 이용된 “Plaxis3D”는 Bentley사에서 만들어진 3차원 유한요소해석 프로그램이다. 이 프로그램을 이용할 경우 침투해석에 의한 간극수압평가, 이를 반영한 응력변위해석 및 강도감소법을 이용한 사면안정해석이 가능한 프로그램으로 본 연구에 적합한 프로그램으로 판단된다.

Well Point 간격에 따른 제방 비탈면의 안정성 변화를 평가하기 위해 Well Point 간격을 1m, 2m, 4m, 6m, 8m, 10m, 12m, 14m, 16m, 18m, 20m, 22m, 24m 및 25m으로 3차원 수치모델링을 하였으며, 또한 Well Point 적용하지 않은 경우에 대해서도 수치해석을 수행하여 그 안정성에 대해 규명하고자 하였다.

3.6.1 수치해석 프로그램 및 해석모델의 선정

PLAXIS는 Bentley사에서 개발한 2차원 및 3차원 지반공학 전용 유한요소해석 프로그램이다. PLAXIS는 연약지반의 압밀거동 뿐만 아니라 과압밀 점토 그리고 사질토 및 암반지반에도 적용이 가능한 다양한 재료모형을 갖고 있다. 연약지반에 강하다는 점은 매우 작은 전단강도의 지반에 굴착 또는 성토하는 경우에 지반의 붕괴를 포함한 변형해석이 가능할 뿐만 아니라 압밀침하 및 점성침하 등의 복잡한 지반변형을 계산할 수 있음을 의미한다.

복잡한 비선형 거동을 구하기 위하여 PLAXIS에는 다양한 구성(재료) 모형과 탄소성 상태에서 평형상태에 도달하기 위한 즉, 수렴(convergence)을 돕는 강력한 알고리즘을 보유하고 있으며, 요소망 자동생성 등이 매우 쉬워 보이는 사용자 인터페이스와 복잡한 연약지반 거동분석 문제를 간단하게 해결하는 해석기능, 그리고 강도감소법 등 실무에 꼭 필요한 기능을 포함하고 있는 것이 PLAXIS의 특징이다.

2003년 하반기부터 출시된 Version 8.x 부터는 절리성 암반을 포함한 사용자 정의 재료모형(user defined material model)의 적용이 가능하며, 시공단계에 따른 침투해석과 그에 따른 유효응력해석 기능도 추가되었다. 터널 단면을 쉽게 생성할 수 있는 Tunnel Designer기능과 하중분배율 기능으로 쉘드터널은 물론 NATM터널의 해석이 가능하다. 또한, PLAXIS 프로그램은 ① PLAXIS Input, ② PLAXIS Calculations, ③ PLAXIS Output, ④ PLAXIS Curve 독립적인 4개의 프로그램으로 구성되어 있다.

새로운 Project를 수행하기 위해서 가장 먼저 선행되어야 할 작업은 기하형상을 생성하는 것이다. 이 작업에서는 3차원 문제를 2차원으로 표현해야 하는 것 그리고 점, 선, 영역(clusters)의 구성 등을 다룬다. 또한, 지층 구분 및 각 지층 세부 분할, structural objects, 시공 단계, 재하 조건 등의 작업을 다룬다. 해석 결과에 영향을 미치지 않을 정도로 충분한 크기로 경계면을 설정해주어야 한다. 기하형상에 가장 기본적인 3가지 요소인 점, 선, 영역에 대해서는 아래와 같이 세부적으로 설명하였다.

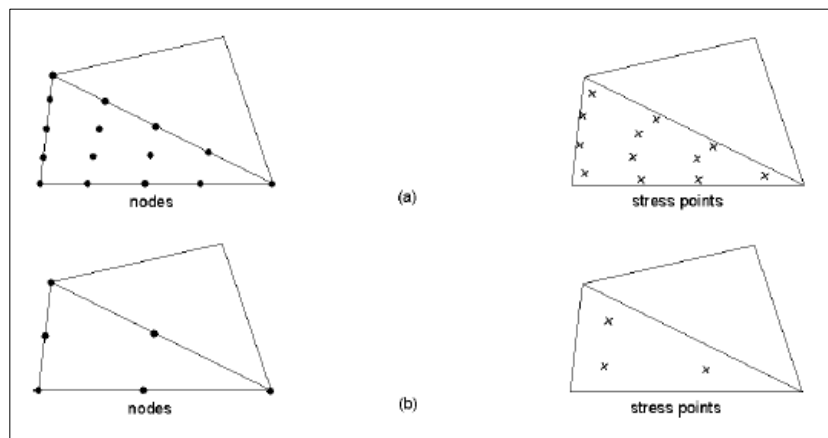
점(Points)은 선의 시작과 끝을 구성하기 위해 필요하다. 또한, 앵커, 외부하중 등의 사용 시 그 위치를 나타내기 위해서도 필요하다. 선(Lines)은 지층의 구분 등 기하형상의 물리적 경계면을 정의하기 위해서 필요하다. 선은 몇 개의 function 및 properties를 가질 수 있다. 영역(Clusters)은 선에 의해 폐합된 면적을 의미한다. PLAXIS에서는 선의 입력에 의해서 자동적으로 영역을 인식된다. 정해진 영역 내에 지층의 물성치는 homogeneous하다.

기하형상 생성 후에 유한요소는 선과 영역의 구성을 바탕으로 자동 생성될 수 있다. 유한요소 메쉬는 3가지의 구성 요소로 이루어져 있고, 그에 대한 기술은 아래와 같다.

요소 (Elements)는 Mesh가 생성되는 동안 clusters는 삼각형 유한요소로 나누어진다. 15절점 요소 및 6절점 요소로 선택할 수 있다. 15절점 요소로 선택하면 더 정확한 해석 결과를 얻을 수 있고, 6절점 요소로 선택을 하면 빠른 해석 결과를 얻을 수 있다. 동일 조건에서 15절점 요소로 해석하는 것이 6절점 요소로 해석하는 것보다는 좀 더 정확한 해석을 할 수 있지만, 시간이 상당히 소요되는 단점이 있다.

절점 (Nodes)은 15절점 요소는 15개의 절점을 가지고 있고, 6절점 요소는 6개의 절점을 가지고 있다. 그 위치는 아래 그림에서 보는 바와 같다. 유한요소 해석 동안 이 절점에서 변위(u_x, u_y)가 계산된다.

Stress Points는 변위가 절점에서 계산되는 반면에, 응력과 변형율은 아래의 그림에서 보는 것처럼 stress points에서 계산된다. 아래 그림 (a)에서 보는 것처럼 15절점 각 요소의 stress points는 11개이고, 아래 그림 (b)에서 보는 것처럼 6절점 각 요소의 stress points는 3개로 구성된다. 그 위치는 그림에서 확인할 수 있다. 이 stress points는 해석 후 stress path 또는 stress-strain diagram 등을 작성할 수 있도록 해석 전에 미리 선택해놓을 수 있다.



[그림 3-65] Nodes and stress points

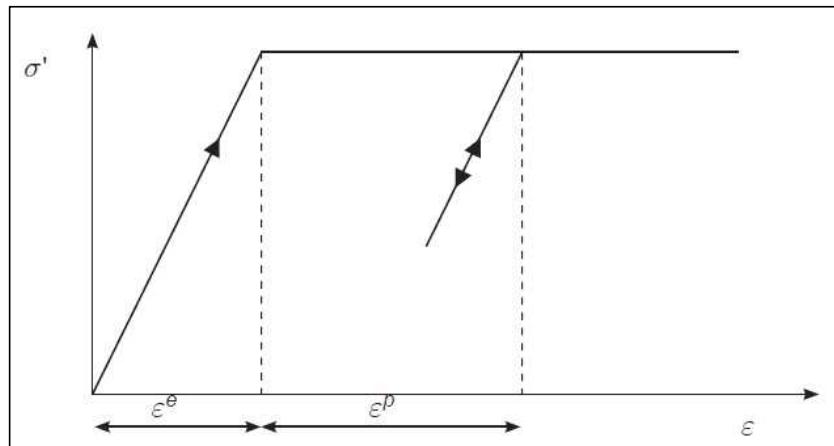
가. 수치해석 모델 선정

응력 및 변형조건이 변하게 되면, 지반거동은 비선형 거동을 하게 된다. 그리고 지반 강성은 지반의 응력수준, 응력경로 및 변형수준에 의존한다. 이러한 특징은 PLAXIS내 Advanced Soil Model에 포함되어 있다. 그러나 Mohr-Coulomb 모델은 비교적 간단한 모델이며, 선형탄성 완전소성모델(Linear Elastic Perfectly Plastic Model)으로 잘 알려져 있으며, 지반거동을 근사적으로 예측하는데 사용할 수 있다. Mohr-Coulomb 모델의 선형탄성부분은 등방탄성 Hooke's 법칙에, 완전소성부분(Perfectly Plastic Part)은 Mohr-Coulomb 파괴규준에 근간을 두고 있다.

소성은 소성변형증분을 포함하고 있다. 소성발생 여부를 평가하기 위해, 항복함수(f)가 응력 및 변형의 함수로 도입되고, 소성항복은 $f=0$ 상태와 관련이 있다. 이 상태는 종종 주응력 공간의 표면으로 표현될 수 있다. 완전소성모델은 항복면이 고정된 구성모델이며 즉, 모델 매개변수에 의해 정의되고 소성변형에 영향을 받지 않는 항복면으로 표현된다. 항복면 이내 응력 및 변형 거동상태는 완전탄성으로 표현된다.

탄소성 기본원리는 변형률과 변형률속도가 탄성과 소성부분으로 구분된다.

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p \tag{13}$$



[그림 3-66] 탄소성모델의 기본개념

Hooke의 법칙은 응력속도를 탄성변형률 속도와 관련시키는데 이용된다. 식 (13)을 Hooke의 법칙에 대입하면 식 (14)으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma = D^e \epsilon^e = D^e (\epsilon - \epsilon^p) \tag{14}$$

여기서, D^e : 탄성재료 강성 매트릭스

ϵ^e : 탄성변형률

ϵ : 전체변형률

ϵ^p : 소성변형률

소성이론(Hill, 1950)에 따르면, 소성변형률 속도는 응력에 대한 미분항복함수에 비례한다. 이것은 소성변형률 속도는 항복면에 수직인 벡터로 나타낼 수 있다는 것을 의미하는 것이다. 소성이론(Hill, 1950)은 소성과 관련이 있다. 그러나, Mohr-Coulomb 모델의 항복면은 소성에 의한 다이러턴시를 과대평가한다. 그러므로, 항복함수 외에 소성 포텐셜함수(g)를 도입된다. $g \neq f$ 인 경우, 비소성으로 정의된다. 일반적으로 소성변형률 속도는 식 (15)으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\varepsilon}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma} \quad \text{식 (15)}$$

여기서, λ : 소성계수 (탄성인 경우 : $\lambda = 0$, 소성인 경우 $\lambda > 0$)

g : 소성 포텐셜 함수

탄성완전소성 거동(Smith & Griffiths(1982), Vermeer & Borst(1984))인 경우, 유효응력 속도와 변형률 속도 사이의 관계 방정식은 식 (16)으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\sigma}' = \left(D^e - \frac{\alpha}{d} D^e \frac{\partial g}{\partial \sigma'} \frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} \right) \dot{\varepsilon} \quad \text{식 (16)}$$

여기서, α : 탄성인 경우 $\alpha = 0$, 소성인 경우 $\alpha = 1$

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \sigma'} D^e \frac{\partial g}{\partial \sigma'}$$

위의 소성이론은 항복면이 부드러운 경우로 제한되며, 전체 Mohr-Coulomb 모델에 있는 다중 표면항복윤곽(multi surface yield contour)은 포함하지 않고 있다. 이러한 항복면에 대해, 소성이론은 2개 이상의 소성 포텐셜 함수를 포함하고 있는 유동법칙을 설명하기 위해 Koiter(1960)와 기타 연구자에 의해 확장되었다.

$$\dot{\varepsilon}^p = \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial \sigma'} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial \sigma'} + \dots \quad \text{식 (17)}$$

그리고, $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ 의 크기를 결정하기 위하여, f_1, f_2, \dots 와 같은 항복함수를 사용한다.

Mohr-Coulomb 항복조건은 일반적인 응력상태에 대한 Coulomb의 마찰법칙을 확장한 것이다. 즉, 이 조건은 재료요소 내 임의의 평면에서 Coulomb의 마찰법칙이 유지되도록 정의한 것이다. 주응력상태에서 Mohr-Coulomb 항복조건은 6개의 항복면으로 구성되어 있다.

$$f_{1a} = \frac{1}{2} (\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} (\sigma'_2 - \sigma'_3) \sin\phi - c - \cos\phi \leq 0 \quad \text{식 (18a)}$$

$$f_{1b} = \frac{1}{2} (\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} (\sigma'_3 - \sigma'_2) \sin\phi - c - \cos\phi \leq 0 \quad \text{식 (18b)}$$

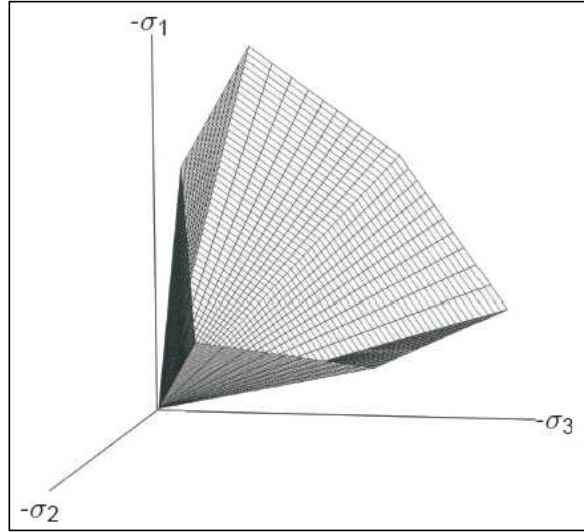
$$f_{2a} = \frac{1}{2} (\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} (\sigma'_3 - \sigma'_1) \sin\phi - c - \cos\phi \leq 0 \quad \text{식 (18c)}$$

$$f_{2b} = \frac{1}{2} (\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} (\sigma'_1 - \sigma'_3) \sin\phi - c - \cos\phi \leq 0 \quad \text{식 (18d)}$$

$$f_{3a} = \frac{1}{2} (\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} (\sigma'_1 - \sigma'_2) \sin\phi - c - \cos\phi \leq 0 \quad \text{식 (18e)}$$

$$f_{3b} = \frac{1}{2} (\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} (\sigma'_2 - \sigma'_1) \sin\phi - c - \cos\phi \leq 0 \quad \dots \quad \text{식 (18f)}$$

항복함수에 나타나는 두 개의 소성모델 매개변수는 내부마찰각(ϕ)과 점착력(c)이다. 아래 그림에서 보여주는 것처럼, 모든 항복함수에 대해 $f=0$ 인 상태는 주응력공간에서 고정 육각형 원뿔로 나타난다.



[그림 3-67] 주응력공간상에서의 Mohr-Coulomb 항복면

항복함수 이외에도, Mohr-Coulomb 모델에 대해 6개 소성 포텐셜 함수도 정의된다.

$$g_{1a} = \frac{1}{2} (\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} (\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin\psi \quad \text{식 (19a)}$$

$$g_{1b} = \frac{1}{2} (\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} (\sigma'_3 + \sigma'_2) \sin\psi \quad \text{식 (19b)}$$

$$g_{2a} = \frac{1}{2} (\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} (\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin\psi \quad \text{식 (19c)}$$

$$g_{2b} = \frac{1}{2} (\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2} (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin\psi \quad \text{식 (19d)}$$

$$g_{3a} = \frac{1}{2} (\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2} (\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin\psi \quad \text{식 (19e)}$$

$$g_{3b} = \frac{1}{2} (\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2} (\sigma'_2 + \sigma'_1) \sin\psi \quad \text{식 (19e)}$$

여기서, ψ 는 다이러턴시 각이다. 다이러턴시 각은 조밀한 지반의 (+)소성체적증분을 모델링하기 위해 필요하다.

$c > 0$ 인 경우, Mohr-Coulomb 파괴규준은 인장을 허용하고, 허용인장응력은 점착력에 비례한다. PLAXIS 해석시 이러한 거동(허용인장응력)을 고려하기 위해서는 tension cut-off을 설정하면 된다. 이러한 경우, (+)주응력을 갖는 Mohr 원은 허용되지 않는다. Tension cut-off을 설정함으로써, 다음과 같이 정의된 3가지 항복함수를 추가적으로 도입된다.

$$f_4 = \sigma'_1 - \sigma_t \leq 0 \quad \text{식 (20a)}$$

$$f_5 = \sigma'_2 - \sigma_t \leq 0 \quad \text{식 (20b)}$$

$$f_5 = \sigma'_3 - \sigma_t \leq 0 \quad \text{식 (20c)}$$

Tension cut-off 기능을 사용할 때, 허용인장응력은 기본적으로 “0” 으로 적용되지만, 이 값은 변경할 수 있다. 이러한 3개의 항복함수에 대해 연관된 흐름법칙이 적용된다.

선형탄성완전소성 Mohr-Coulomb 모델의 입력 매개변수는 7개로 구성되어있다. 이 7개 매개변수는 대부분의 지반공학 엔지니어에게 익숙한 변수이며, 실내 및 현장시험을 통해 결정할 수 있다. Mohr-Coulomb 모델의 입력 매개변수와 단위는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \gamma &: \text{단위중량}(kN/m^3), & E &: \text{탄성계수}(kN/m^2), & \nu &: \text{포아송비} \\ c &: \text{점착력}(kN/m^2), & \phi &: \text{내부마찰각}(^\circ), & \psi &: \text{다이러턴시 각}(^\circ) \\ \sigma_t &: \text{Tension cut-off와 인장강도} \end{aligned}$$

완전 또는 부분 포화된 지반거동을 수치해석 방법으로 분석하기 위해, 변형과 지하수 흐름을 모두 고려해야 한다. 시간 의존적 거동에 대해, 변형과 간극수압의 혼합방정식으로 이어진다. 포화 및 불포화 지반에서 정수두 및 변수두 지하수 흐름 해석, 즉 두 가지 유형의 계산이 PLAXIS 커널에서 완전히 구현할 수 있다. 변형 해석에 사용된 요소 형태에 따라, 커널은 지하수 흐름 해석에 사용된 요소와 동일한 형태의 요소를 사용한다. PLAXIS 커널에는 5가지 수리모델 (Van Genuchten, Mualem, 선형 Van Genuchten, spline 및 완전포화) 이 있다.

PLAXIS는 압축 응력과 변형은 (-)으로 표현하는 기호 규칙을 따른다. 동일한 방식으로 압축시 간극수압(Pw)와 간극 공기압(Pa)은 음(-)으로 간주한다. 지하수 배출은 양(+)으로 간주한다.

간극비(n)은 전체 체적(V)에 대한 간극 체적의 비이며, 포화도(S)는 간극의 체적에 대한 물의 체적의 비를 나타낸다.

$$n = \frac{dV_v}{dV}, \quad S = \frac{dV_w}{dV_v} \quad \text{식 (21)}$$

체적함수비는 아래와 같다.

$$\theta = \frac{dV_w}{dV} = Sn \quad \text{식 (22)}$$

중량함수비는 흡입자 중량에 대한 간극수 중량의 비이다.

$$w = \frac{dW_w}{dW_s} = S \frac{n}{1-n} \frac{\rho_w}{\rho_s} \quad \text{식 (23)}$$

다상매질의 밀도는 아래와 같다.

$$\rho = (1-n)\rho + nS\rho_w \quad \text{식 (24)}$$

여기서, ρ_s 는 흙입자의 밀도, ρ_w 는 물의 밀도이다. 지하수의 응력상태는 수두로 표현된다. 수두(전수두, ϕ)는 위치수두(z)와 압력수두(ϕ_p)로 구분된다.

$$\phi = z - \frac{p_w}{\gamma_w} = z + \phi_p \quad \text{식 (25)}$$

방정식은 x, y, z 축 있는 3차원 공간에 표현된다. 2차원 해석일 경우에는 y 축이 연직방향이며, 벡터와 행렬의 범위는 3차원보다 감소한다. 동수경사 연산자(∇)의 벡터 형식은 아래와 같다.

$$\nabla T = \left[\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right] \quad \text{식 (26)}$$

변형률 행렬 방정식은 아래와 같다.

$$L^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad \text{식 (27)}$$

포화지반에서의 물의 흐름은 일반적으로 Darcy's law(1856)을 사용한다. Darcy는 지반내 물의 흐름 속도는 동수경사에 비례한다고 가정하였다. 지하수 흐름의 평형 방정식은 아래 식과 같다.

$$\nabla p_w + \rho_w g + \phi = 0 \quad \text{식 (28)}$$

여기서 $g=(0, -g, 0)T$ 는 중력가속도 벡터이고, ϕ 는 흐르는 유체와 토립자 사이의 단위 부피당 마찰력 벡터입니다. 이 힘은 유체속도에 선형비례하며, 그 작용방향은 반대 방향으로 작용한다. 이러한 관계는 다음과 같다.

$$\phi = -m^{int} q \quad \text{식 (29)}$$

여기서 q 는 유출량 (유체 속도)이고 m^{int} 는 다음과 같다.

$$m^{int} = \begin{bmatrix} \mu/k_x & 0 & 0 \\ 0 & \mu/k_y & 0 \\ 0 & 0 & \mu/k_z \end{bmatrix} \quad \text{식 (30)}$$

μ 는 유체의 점성, k_i 는 다공성 매질의 고유 투수계수이다. 식 (27) 및 식 (28) 결과로부터 식 (31)과 식 (32)으로 표현할 수 있다.

$$-\nabla p_w - \rho_w g + m^{int} q = 0 \quad \text{식 (31)}$$

$$q = k^{int} (\nabla p_w + \rho_w g) \quad \text{식 (32)}$$

여기서, k^{int} 는 (식-33)와 같다.

$$k^{int} = \begin{vmatrix} k_x/\mu & 0 & 0 \\ 0 & k_y/\mu & 0 \\ 0 & 0 & k_z/\mu \end{vmatrix} \quad \text{식 (33)}$$

토질 역학에서 고유 투수성과 점성 대신에 투수계수 k_i^{sat} (또는 수리 전도도)가 사용된다.

$$k_i^{sat} = \rho_w g \frac{k_i}{\mu} \quad i = x, y, z \quad \text{식 (34)}$$

불포화 지반에서의 투수계수는 지반의 포화도에 따라 변화된다. 상대 투수계수($k_{rel}(S)$)는 임의의 포화도에서의 투수계수와 포화상태에서의 투수계수의 비로 정의된다. 식 (34)에서 정의된 투수계수는 완전포화상태일 때의 투수계수를 나타내며, 불포화 상태일 때 투수계수는 식 (35)과 같다.

$$k_i = k_{rel} k_i^{sat} \quad i = x, y, z \quad \text{식 (35)}$$

Darcy의 법칙의 기본 방정식은 식 (29)와 같다:

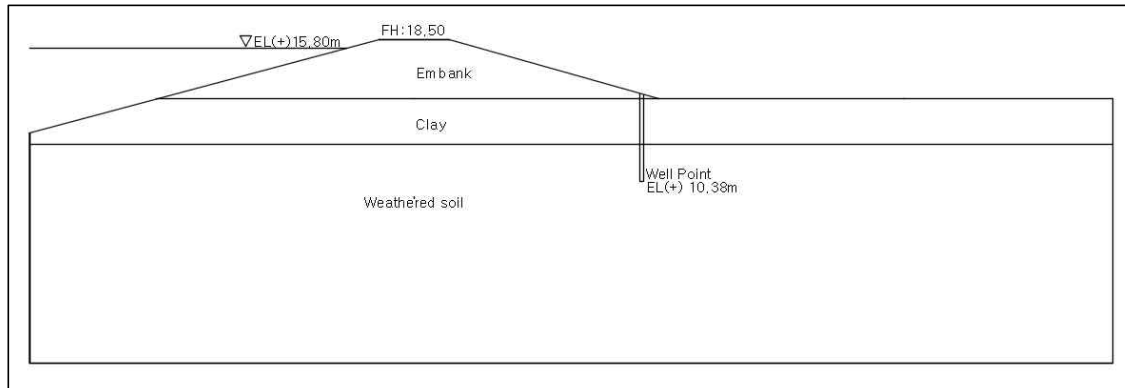
$$q = \frac{k_{rel}}{\rho_w g} k^{sat} (\nabla p_w + \rho_w g) \quad \text{식 (36)}$$

여기서 k_{sat} 는 포화투수계수 매트릭스이다.

$$k^{sat} = \begin{vmatrix} k_x^{sat} & 0 & 0 \\ 0 & k_y^{sat} & 0 \\ 0 & 0 & k_z^{sat} \end{vmatrix} \quad \text{식 (37)}$$

3.6.2 제방비탈면 단면 및 해석 Parameter

수치해석에 이용된 제방비탈면 해석단면은 아래 그림과 같다. 제방고는 EL(+18.5m)이며, 상류부 수위는 EL(+18.0m)으로 설정하였다. 상류부 수위를 높게 설정한 이유는 간극수압에 의한 제방안정성 거동을 명확하게 분석하기 위함이다.



[그림 3-68] 연구대상 제방비탈면 해석단면

아래 표는 수치해석에 이용된 해석 Parameter이다. 점성토는 본 연구에서 수행된 실내시험 결과를 이용하였고, 제방(Embank) 및 풍화토(Weathered Soil)의 해석 Parameter는 기존 문헌을 이용하여 결정하였다.

[표 3-23] 해석 Parameter

구분	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)	변형계수 (kPa)	포아송비 (ν)	투수계수 (m/day)	비고
제방	18.0	5	25	25,000	0.30	0.864	시험결과
점성토	18.0	4.1	30.6	15,000	0.40	0.5996×10^{-3}	시험결과
풍화토	19.0	10	30	20,000	0.3	4.320	문헌자료

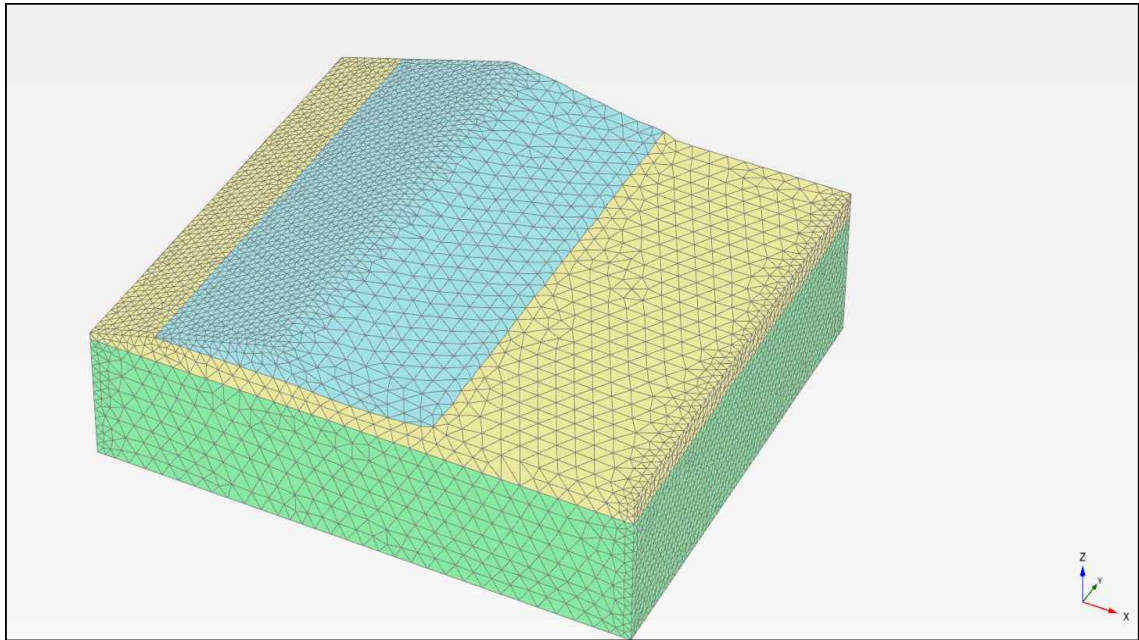
3.6.3 3차원 수치해석에 의한 제방안정성 검토

본 연구에 이용된 해석종류는 아래 표와 같다. 아래 그림에서 보여준 제방조건(EL(+) 18.5m)과 수위조건(EL(+) 18.0m) 및 Well Point 설치간격에 따른 제방비탈면의 안정성 검토를 실시하고자 한다. 이에 총 15개의 수치해석을 수행하였다.

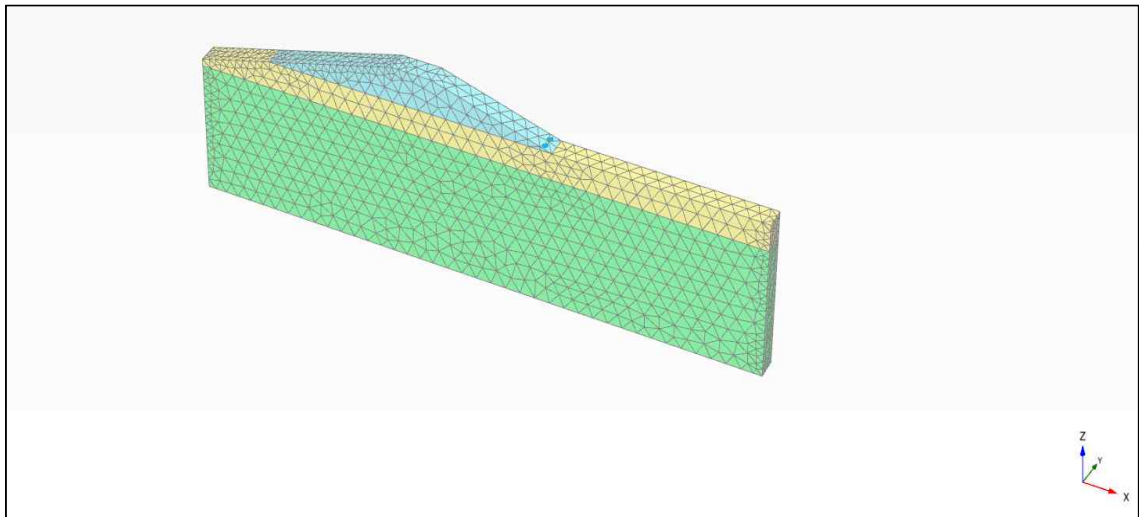
[표 3-24] 해석종류

구분	Well Point 간격	해석파일명	비고
1	No Well Point	01_No WellPoint	
2	1.0m	02_Space 1m	
3	2.0m	03_Space 2m	
4	4.0m	04_Space 4m	
5	6.0m	05_Space 6m	
6	8.0m	06_Space 8m	
7	10.0m	07_Space 10m	
8	12.0m	08_Space 12m	
9	14.0m	09_Space 14m	
10	16.0m	10_Space 16m	
11	18.0m	11_Space 18m	
12	20.0m	12_Space 20m	
13	22.0m	13_Space 22m	
14	24.0m	14_Space 24m	
15	25.0m	15_Space 25m	

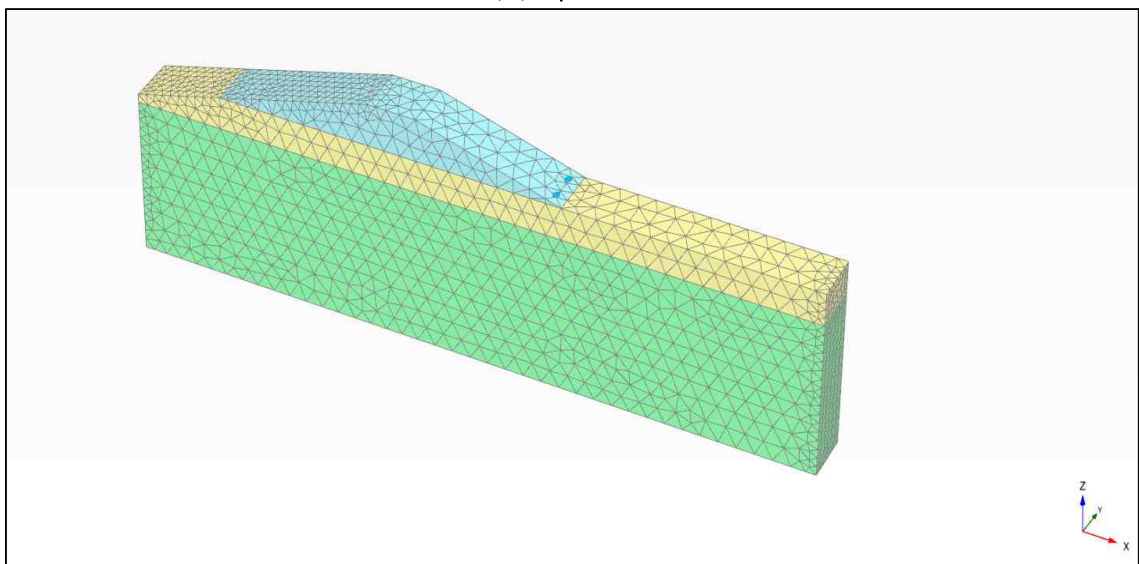
본 연구에 이용된 유한요소망은 아래 그림과 같다. 유한요소망은 토피고(도로에서부터 용암동굴 천정부까지의 거리) 높이별로 차등 생성하였고, 이를 아래 그림에 나타내었다.



(a) No WellPoint

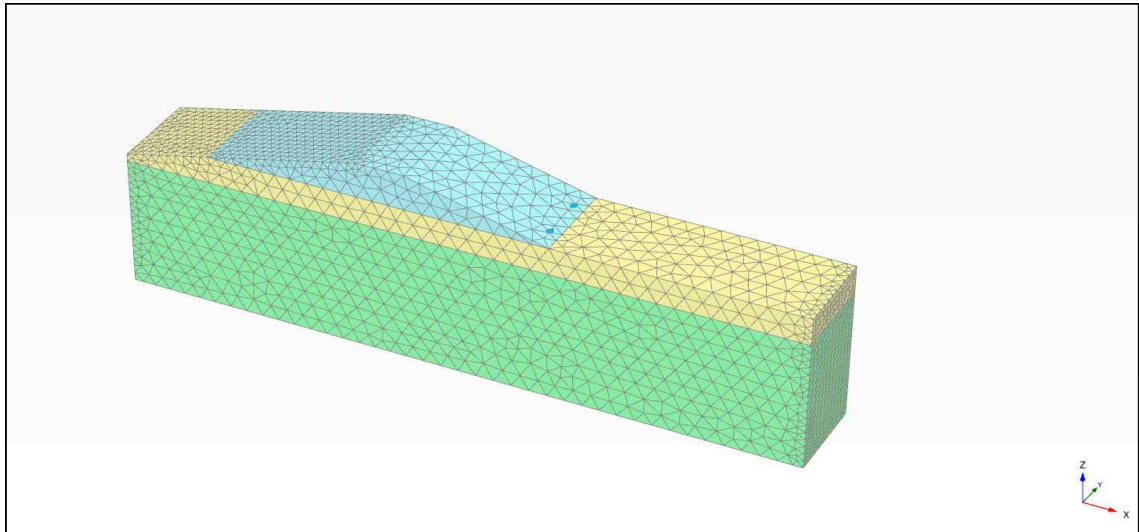


(b) Space 1m

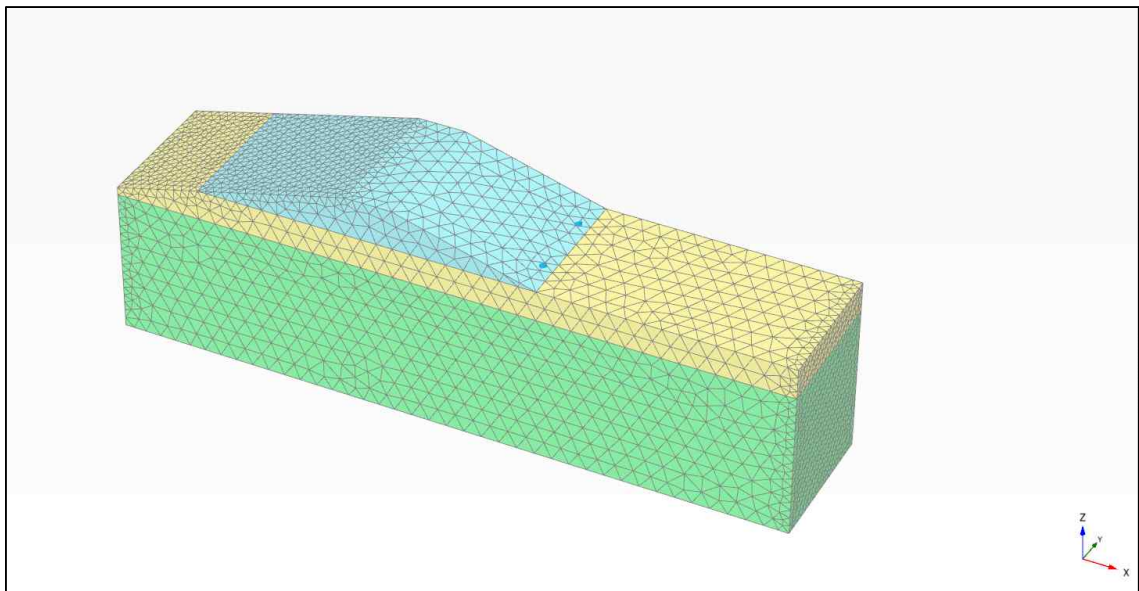


(c) Space 2m

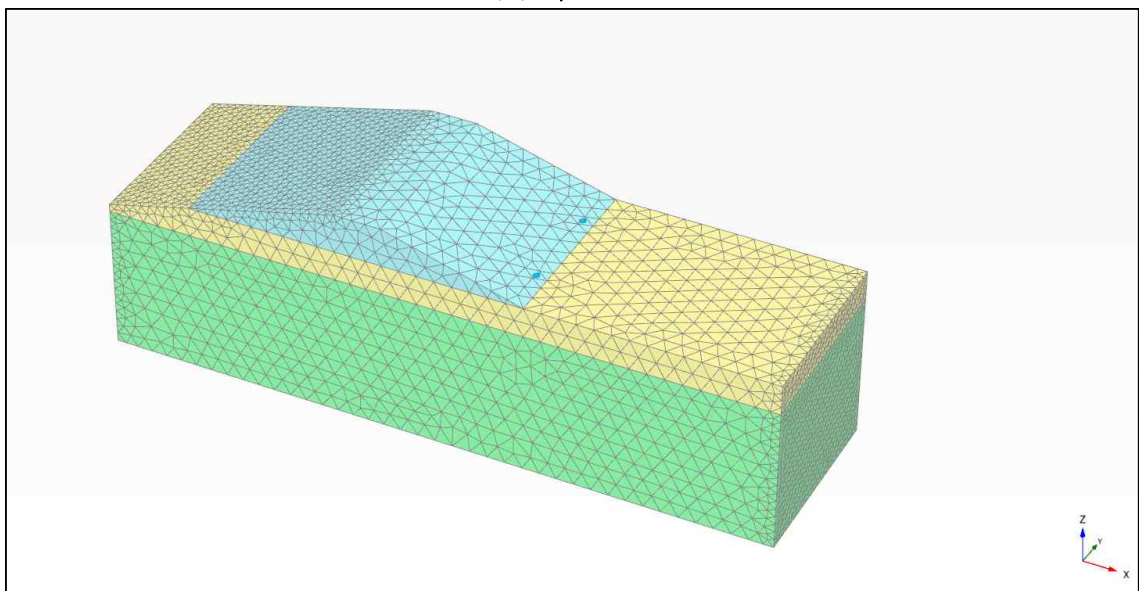
[그림 3-69] 해석 종류별 유한요소망<계속>



(d) Space 4m

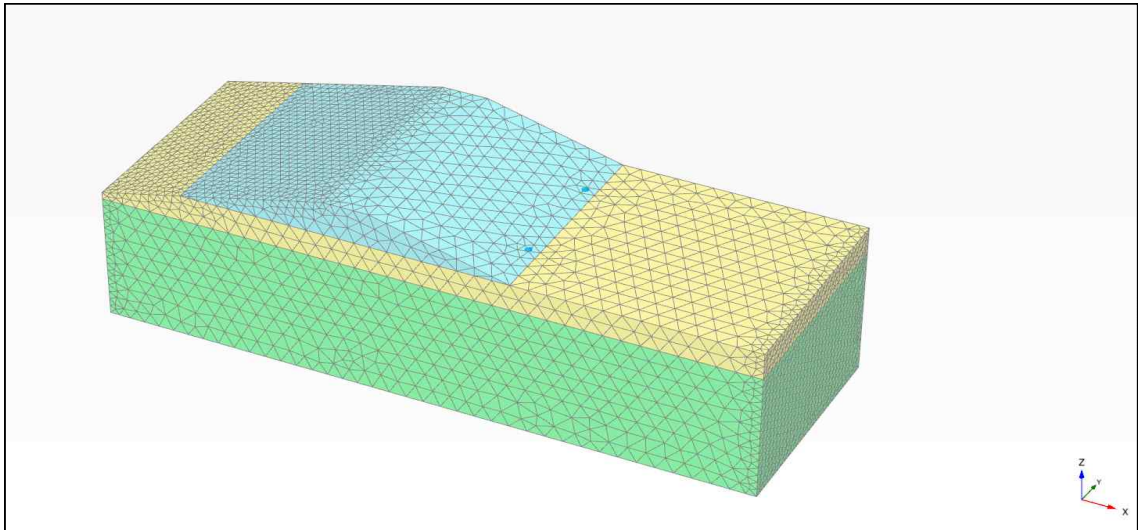


(e) Space 6m

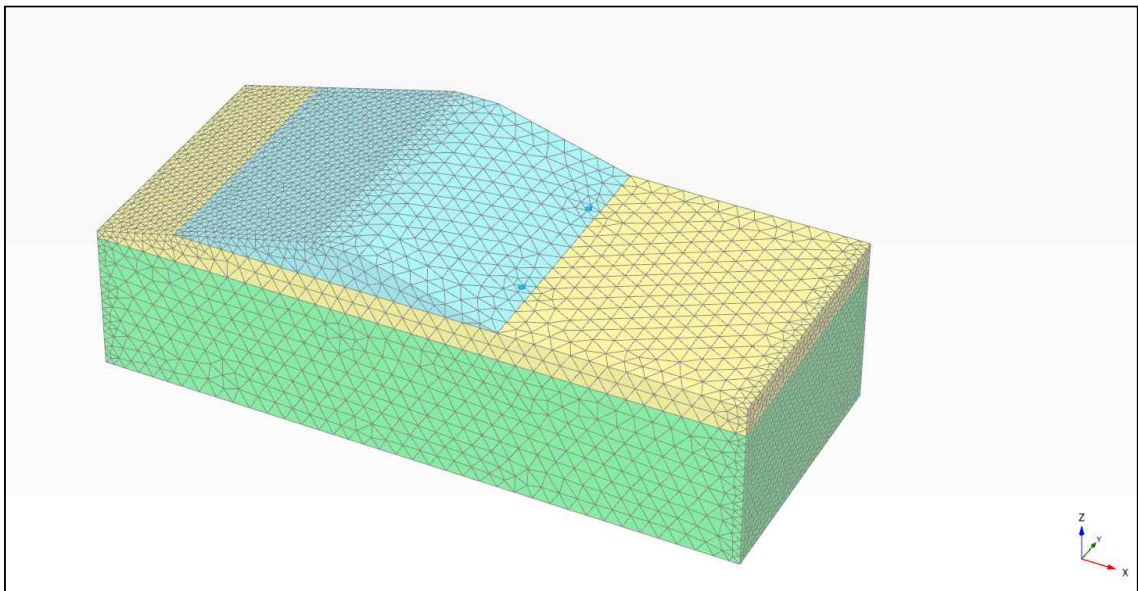


(f) Space 8m

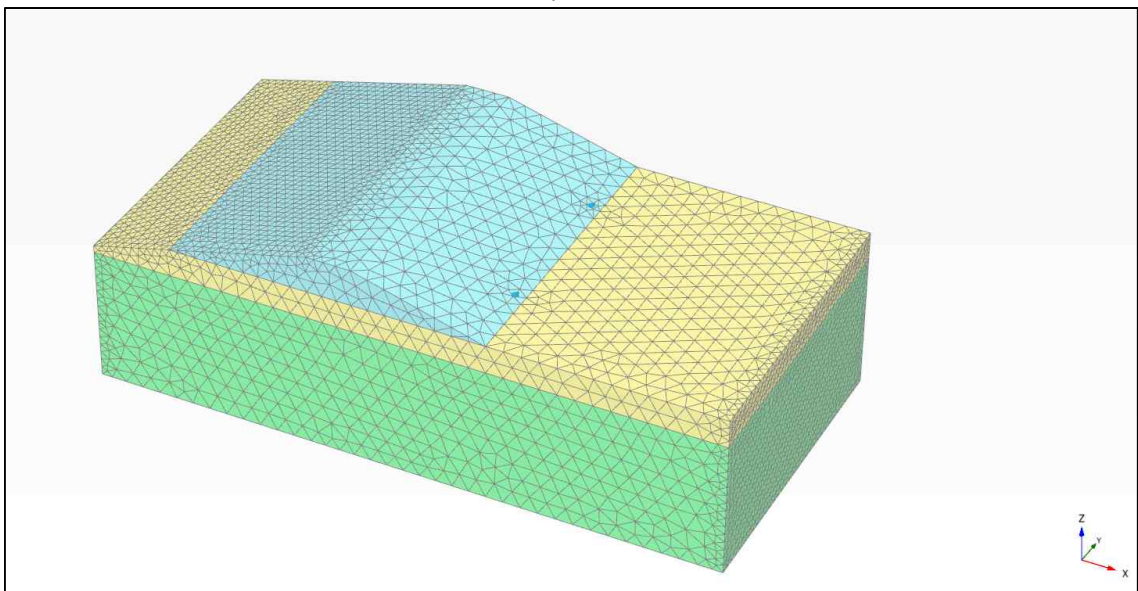
[그림 3-69] 해석 종류별 유한요소망<계속>



(g) Space 10m

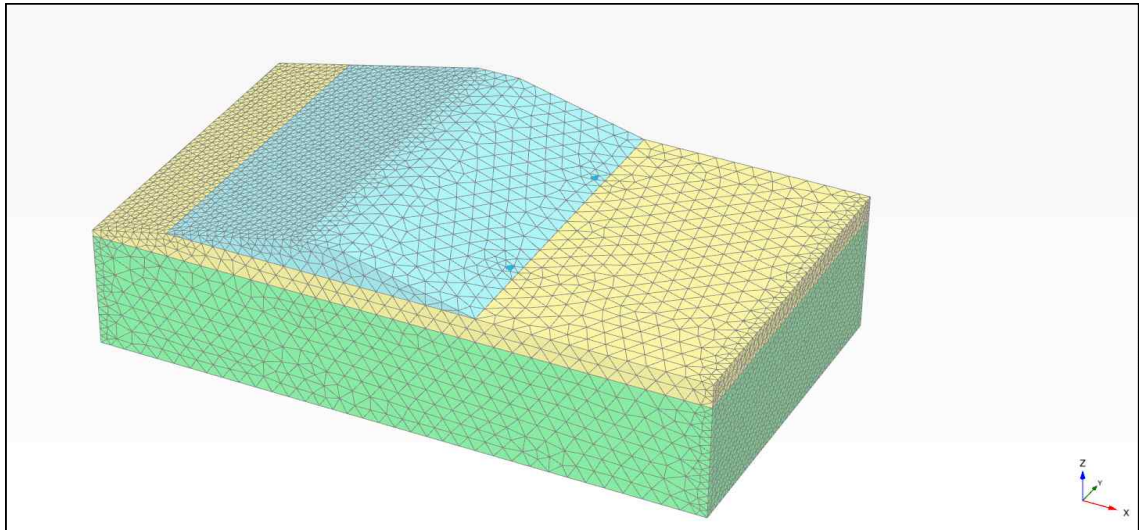


(h) Space 12m

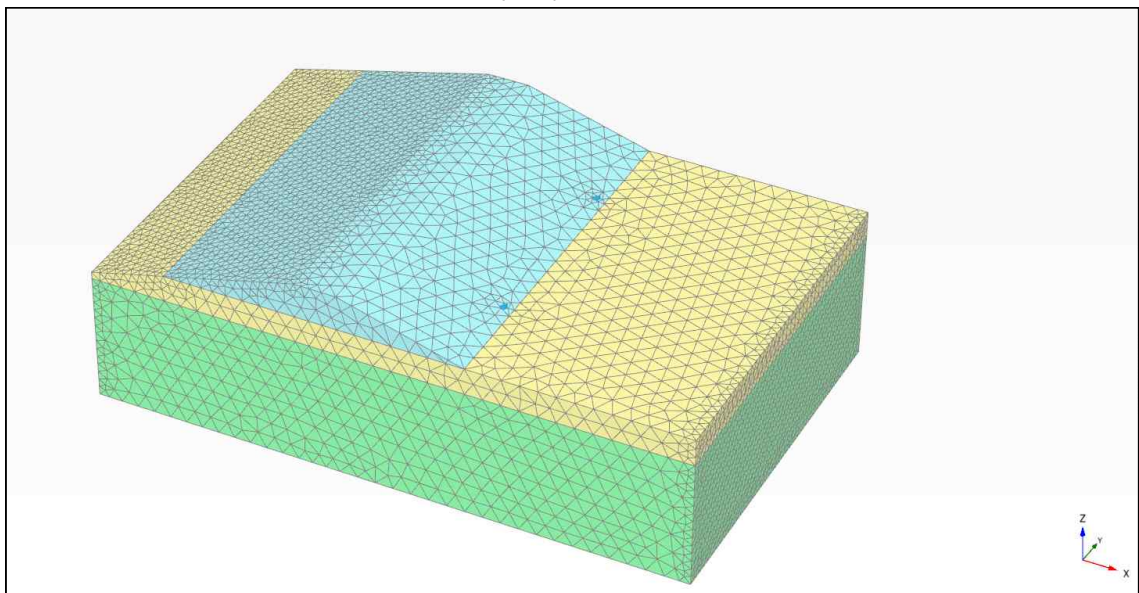


(i) Space 14m

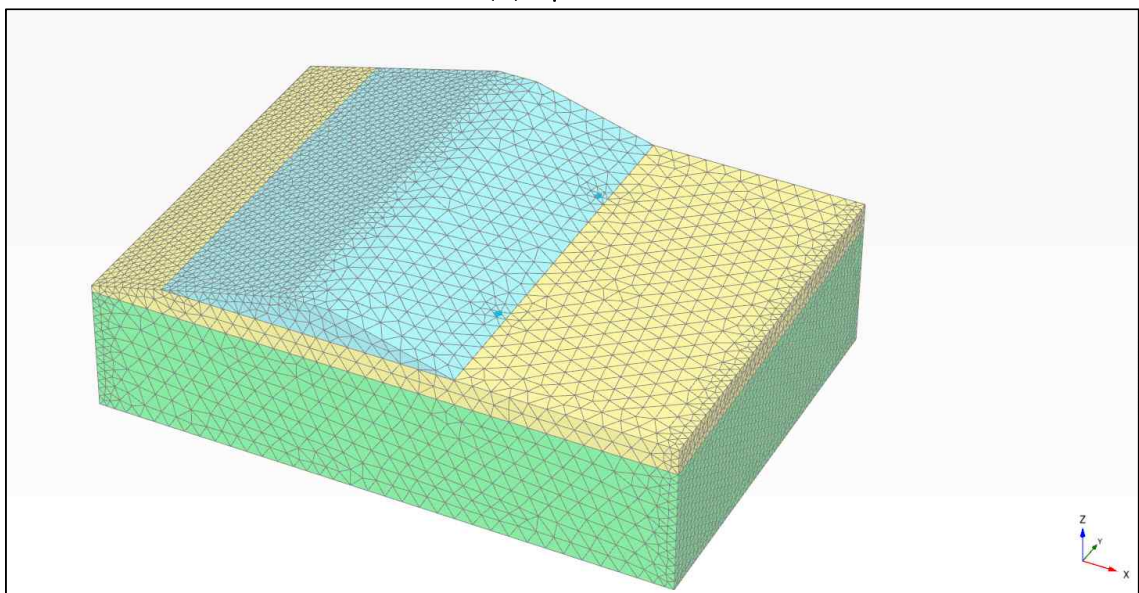
[그림 3-69] 해석 종류별 유한요소망<계속>



(j) Space 16m

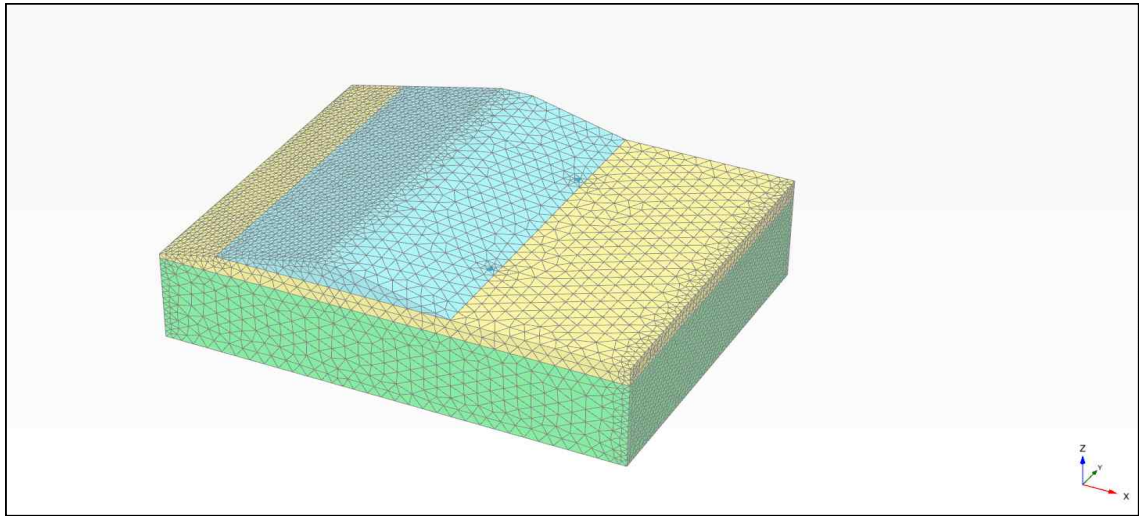


(k) Space 18m

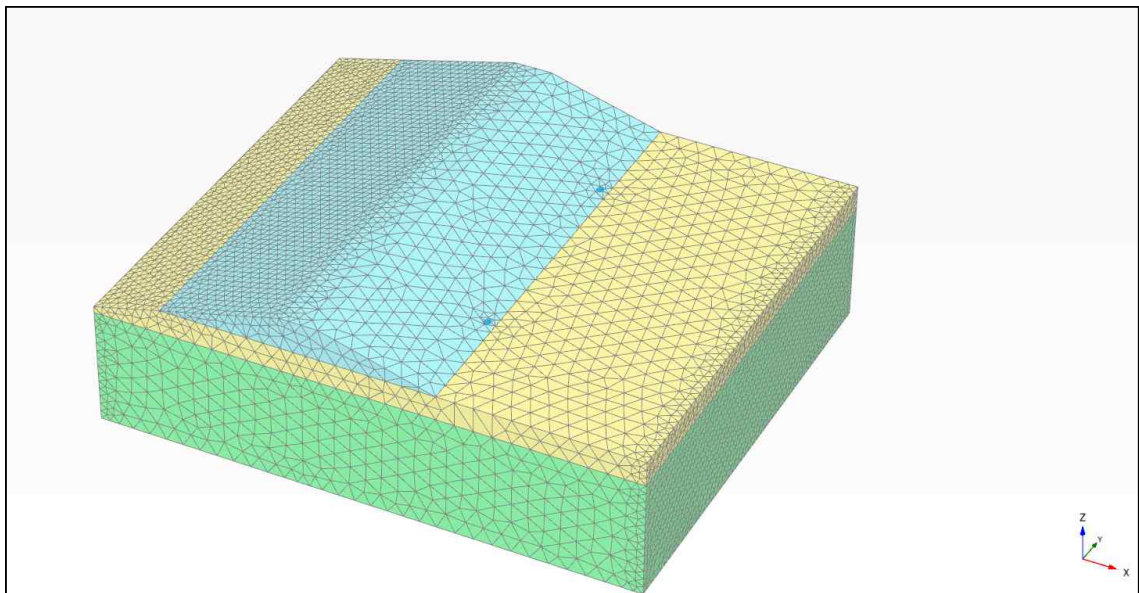


(l) Space 20m

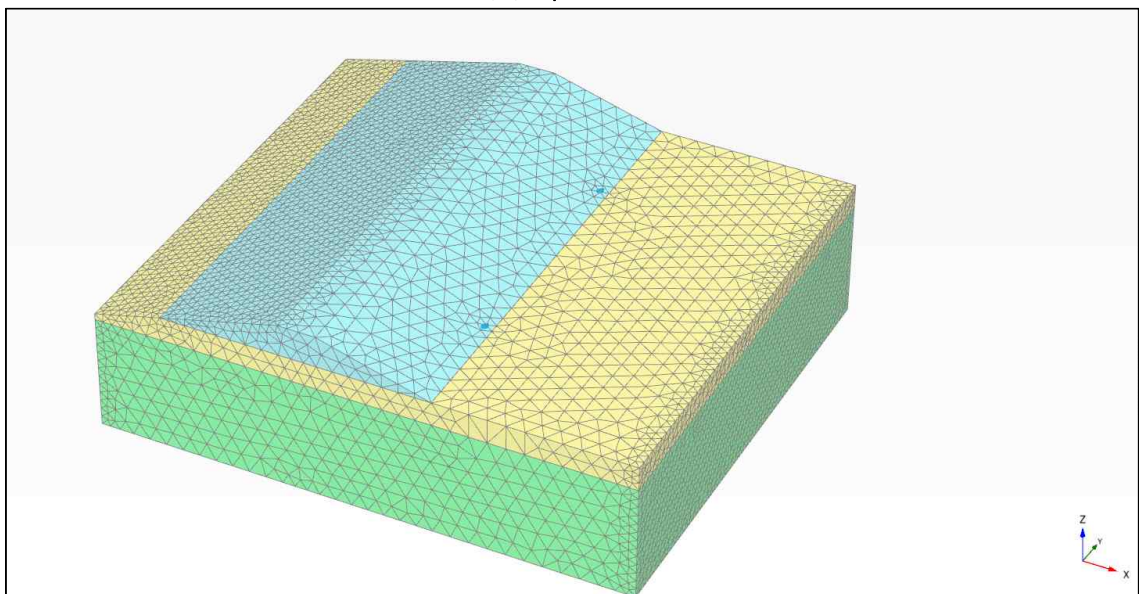
[그림 3-69] 해석 종류별 유한요소망<계속>



(m) Space 22m



(n) Space 24m



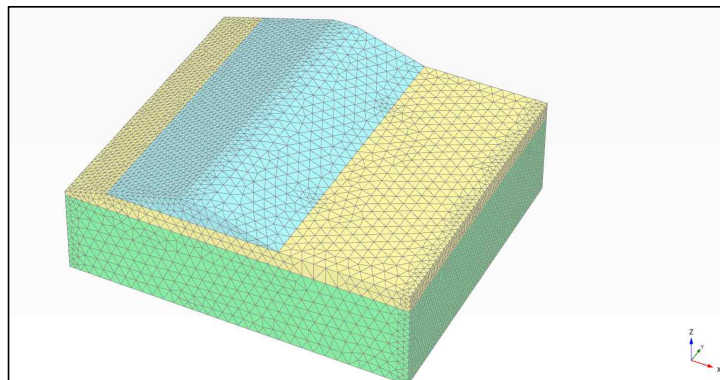
(o) Space 25m

[그림 3-69] 해석 종류별 유한요소망<계속>

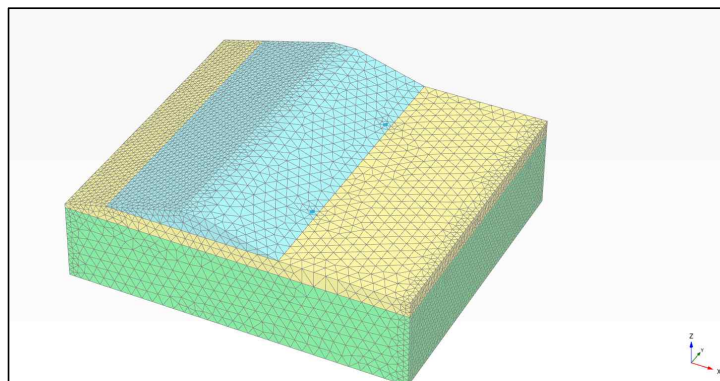
본 연구에 이용된 3차원 수치해석 해석단계는 표와 그림과 같다. 해석단계는 초기응력 생성 → Well Point 생성 및 침투해석 → 사면안정해석 순으로 적용하였다. 그리고, 3차원 유한요소망에서의 변위경계조건은 X방향 및 Y방향 좌우연직면은 수평변위를 구속하였고, Z 방향 최저면은 연직변위를 구속하였다.

[표 3-25] 해석단계

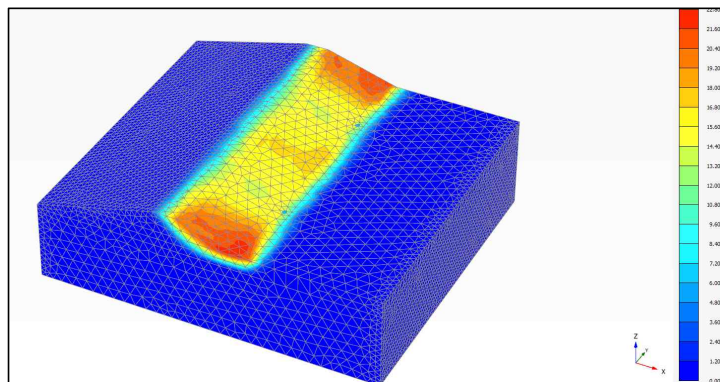
해석단계	특징	비고
Initial Phase	초기응력 생성	-
Phase_1	Well Point 생성	침투해석
Phase_2	사면안정해석	강도감소법에 의한 안정해석



(a) 초기응력 생성



(b) Well Point 생성



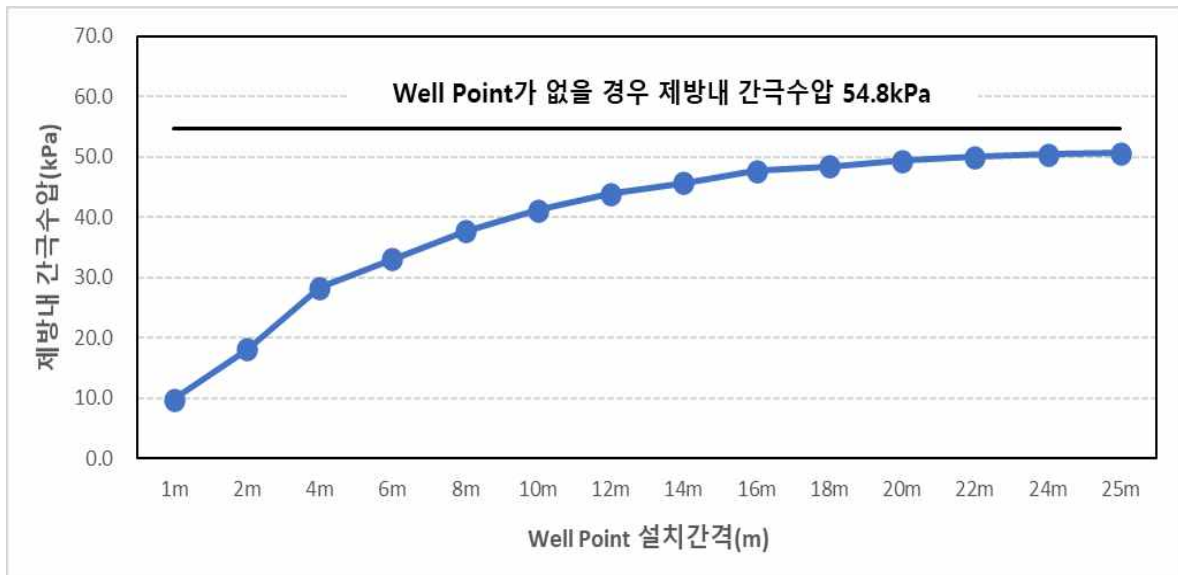
(c) 사면안정해석(강도감소법)

[그림 3-70] 해석단계

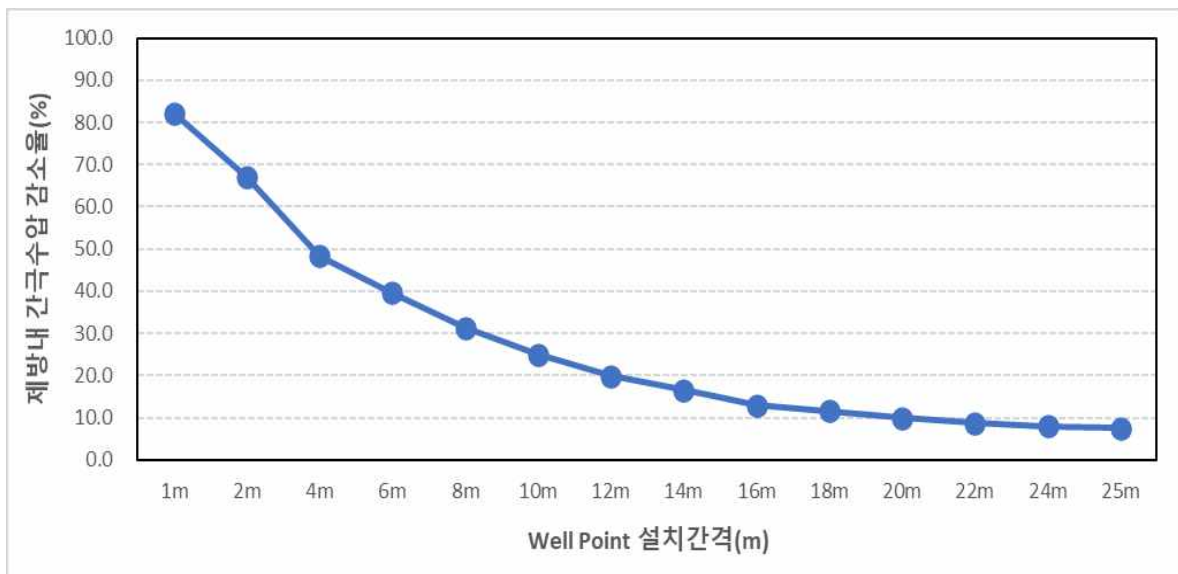
3.6.4 수치해석 결과 분석

Well Point 설치간격에 따른 간극수압의 변화는 아래 그림과 같으며 Well Point 설치간격에 따른 제방내 간극수압 분포도를 보여주고 있다. 제방내 간극수압은 Well Point 중간점(X=13m, Y=0m, Z=10.38m)에서 추출하였다. 그림에서 보듯이 Well Point 설치로 인해 제방내 간극수압은 감소됨을 확인할 수 있다.

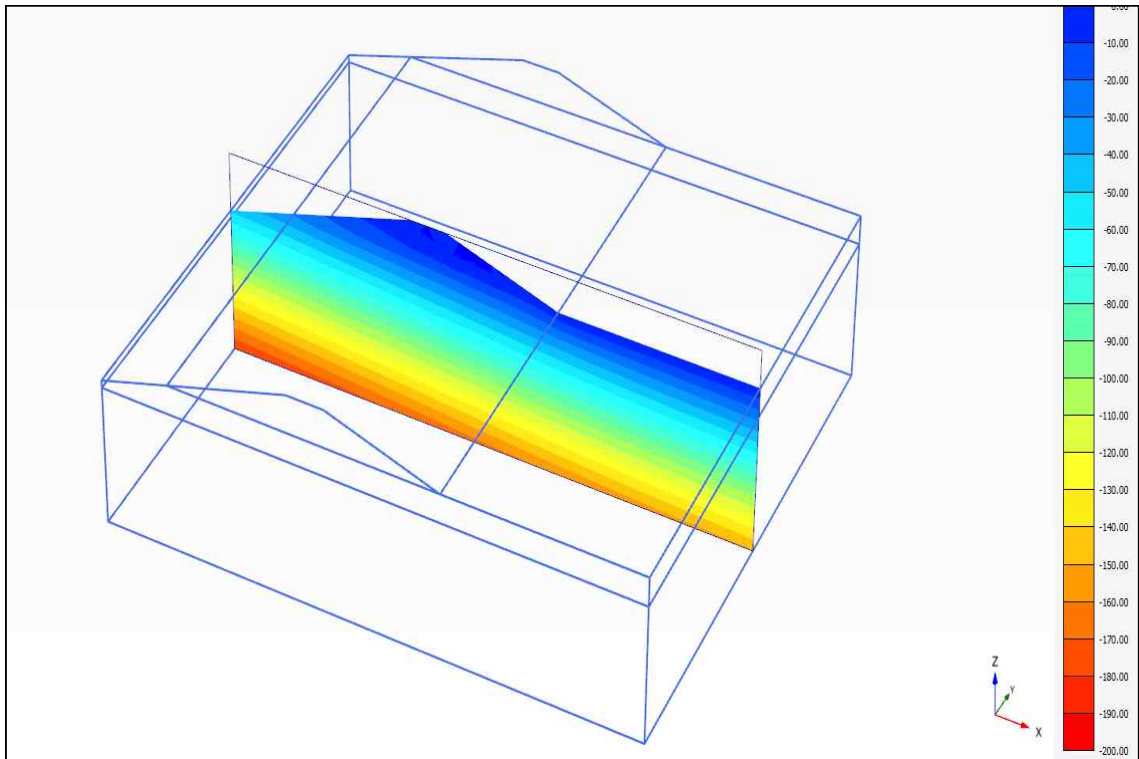
Well Point 설치간격이 20m이상일 경우 제방내 간극수압 감소율은 약 10%미만, 설치간격이 6~16m일 경우 제방내 간극수압 감소율은 13%~40%, 설치간격이 4m이하일 경우 50%~80%의 제방내 간극수압 감소율을 확인할 수 있다. 즉, Well Point 설치간격이 4m이하일 경우 Well Point의 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 아래 그림은 Well Point 설치간격에 따른 종방향 및 횡방향 간극수압 분포도를 보여주고 있으며, Well Point 설치위치에는 간극수압이 매우 작게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.



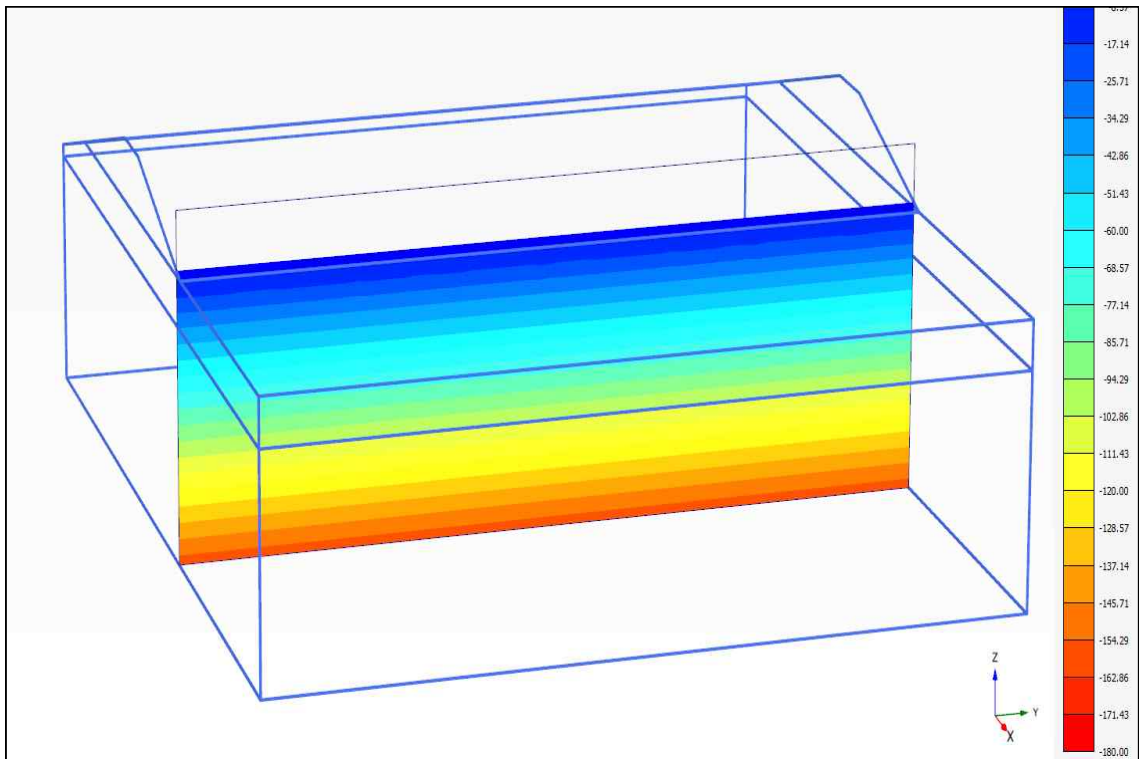
[그림 3-71] Well Point설치간격에 따른 제방내 간극수압



[그림 3-72] Well Point설치간격에 따른 제방내 간극수압 감소율

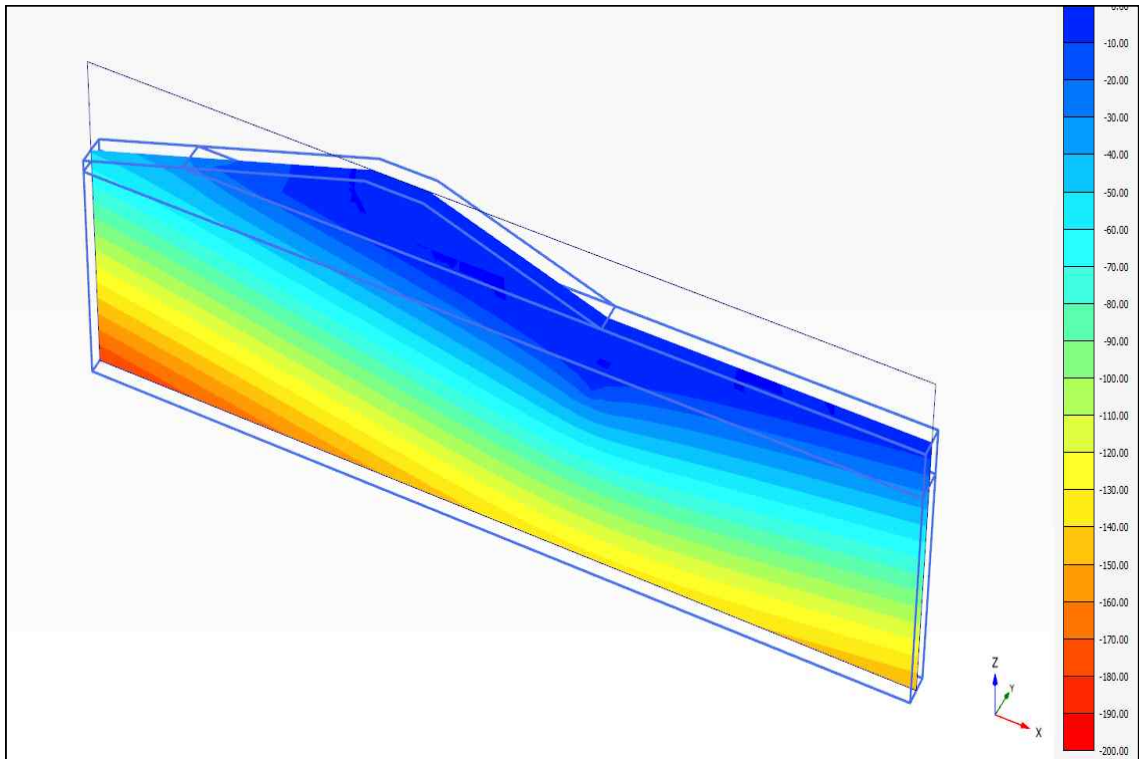


(a) No WellPoint 횡방향 간극수압 분포도

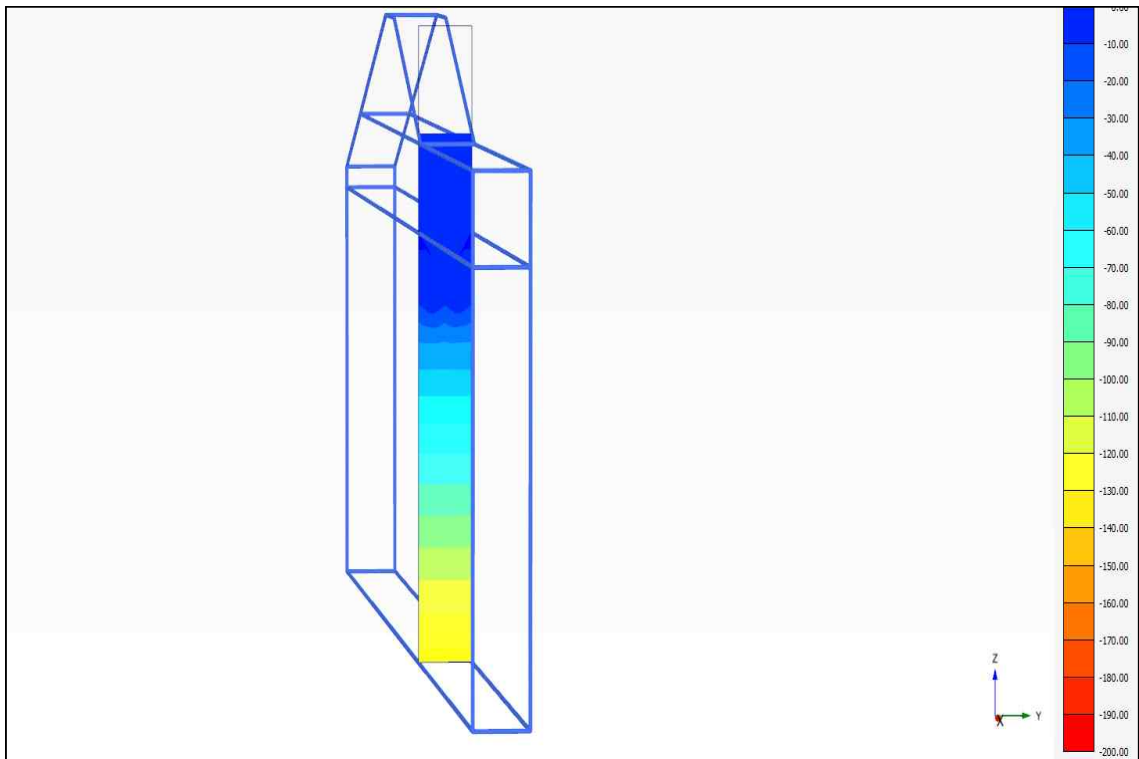


(a) No WellPoint 종방향 간극수압 분포도

[그림 3-73] 침투해석에 의한 제방내 간극수압 분포도<계속>

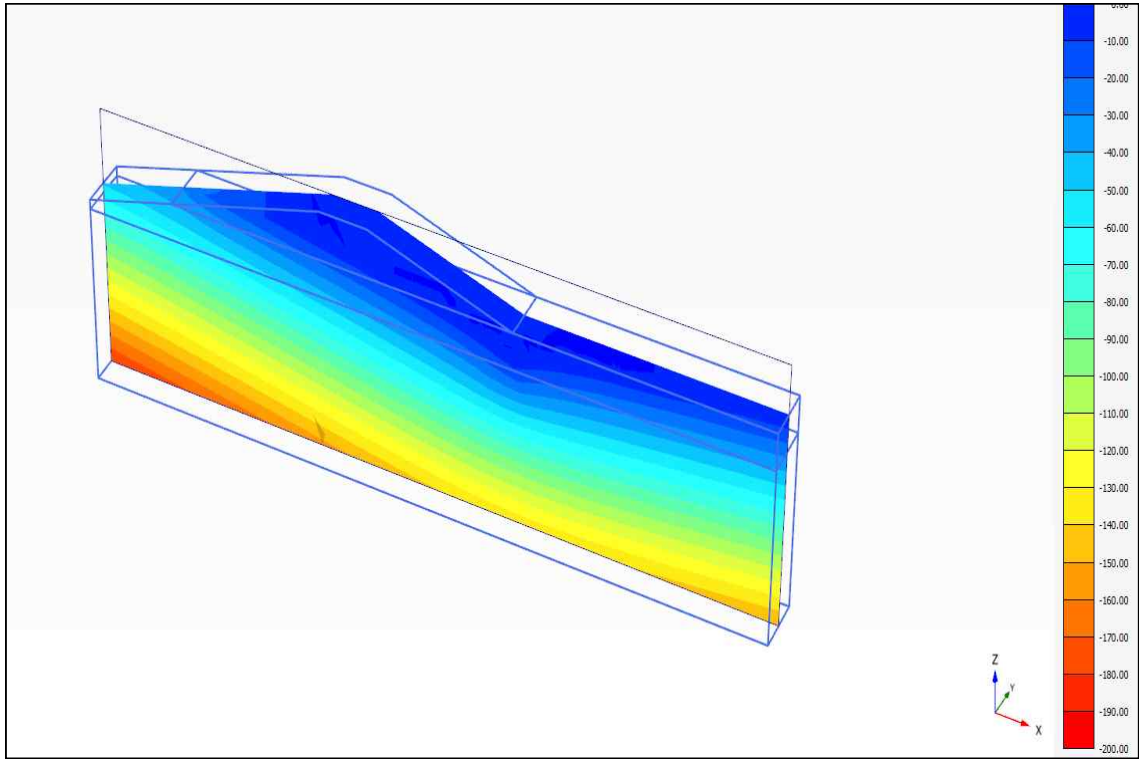


(b) Well Point 설치간격 : 1m 횡방향 간극수압 분포도

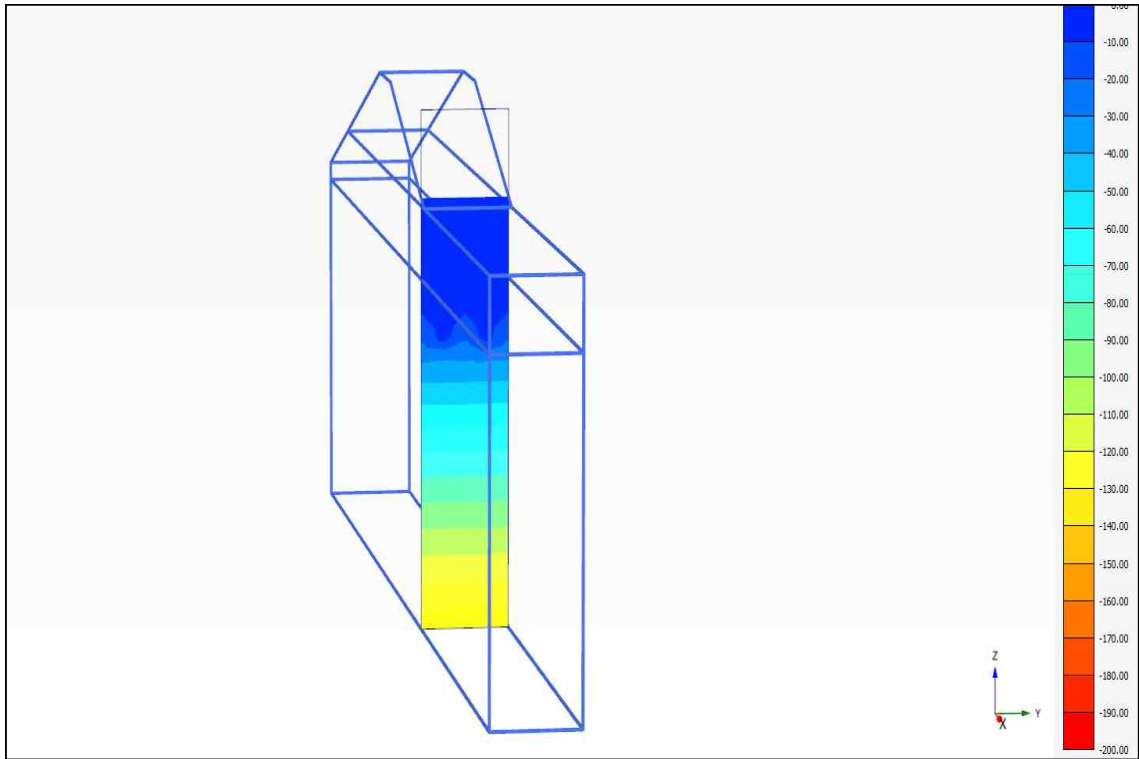


(b) Well Point 설치간격 : 1m 간극수압 분포도

[그림 3-73] 침투해석에 의한 제방내 간극수압 분포도<계속>

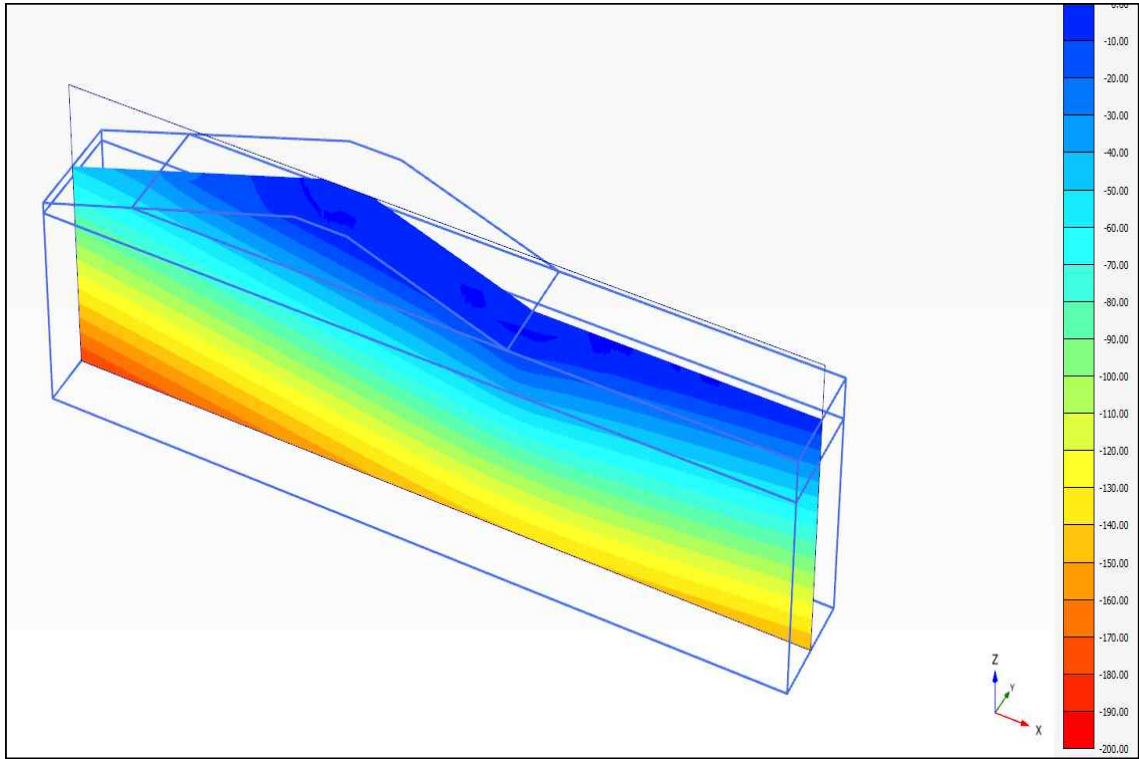


(c) Well Point 설치간격 : 2m 횡방향 간극수압 분포도

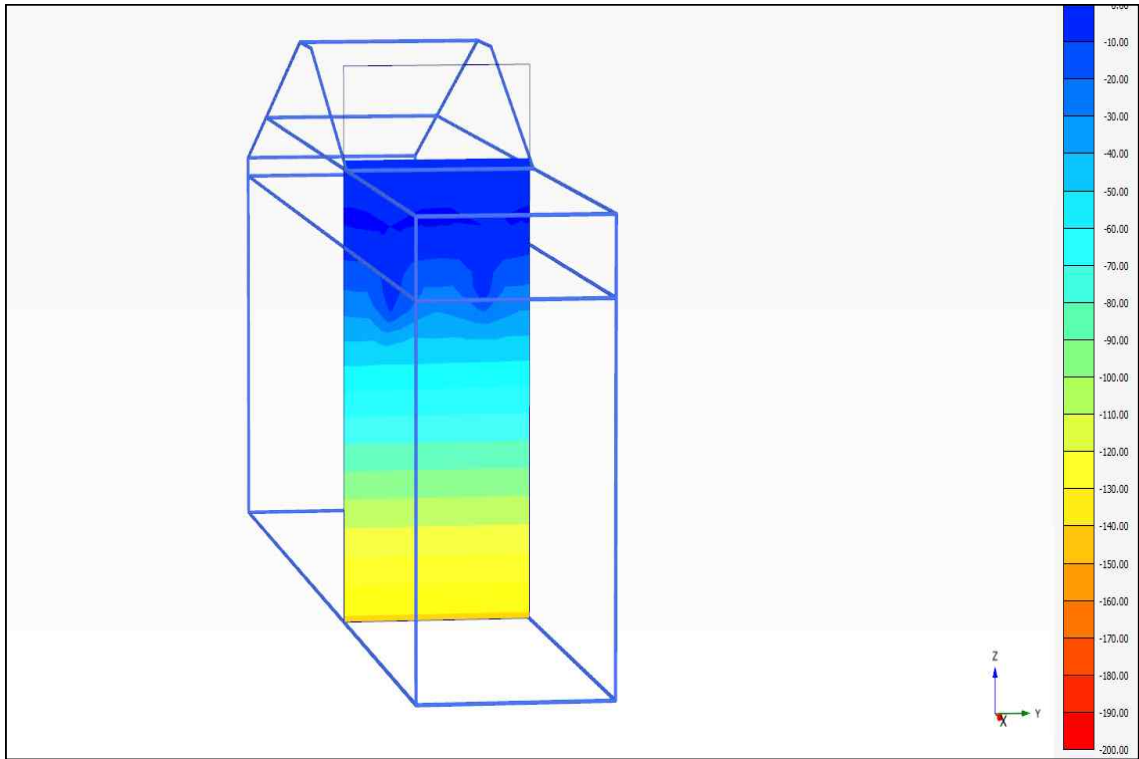


(c) Well Point 설치간격 : 2m 간극수압 분포도

[그림 3-73] 침투해석에 의한 제방내 간극수압 분포도<계속>

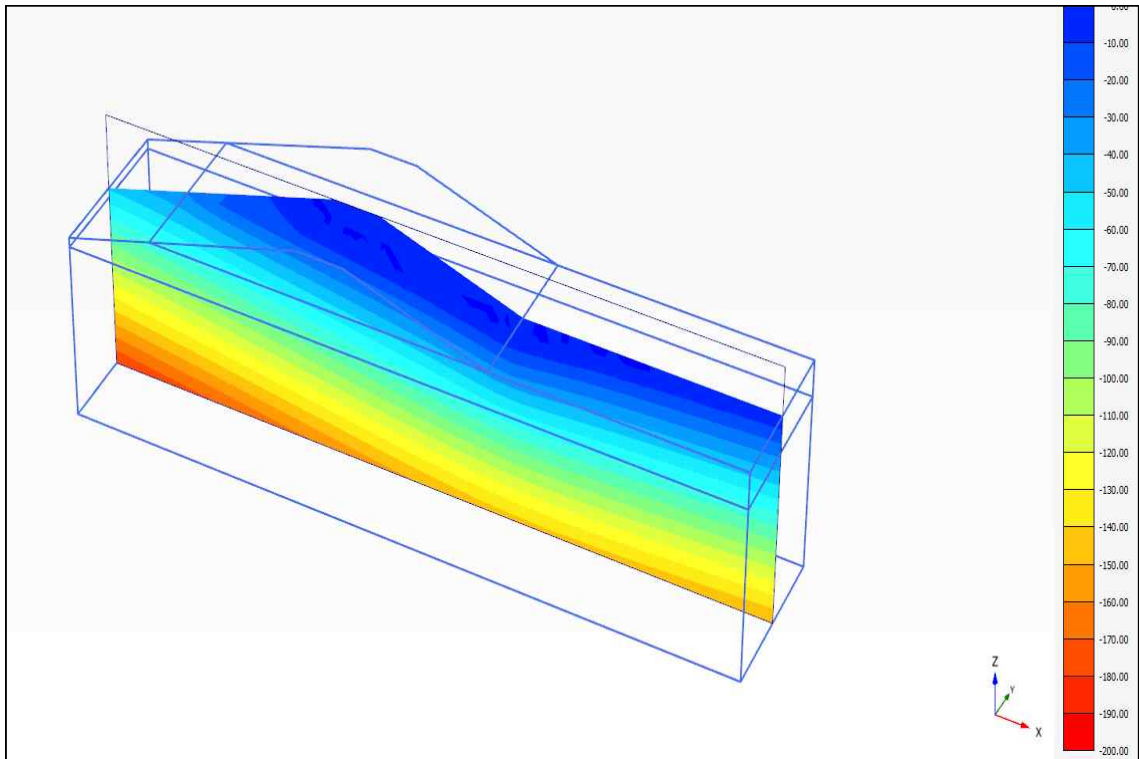


(d) Well Point 설치간격 : 4m 횡방향 간극수압 분포도

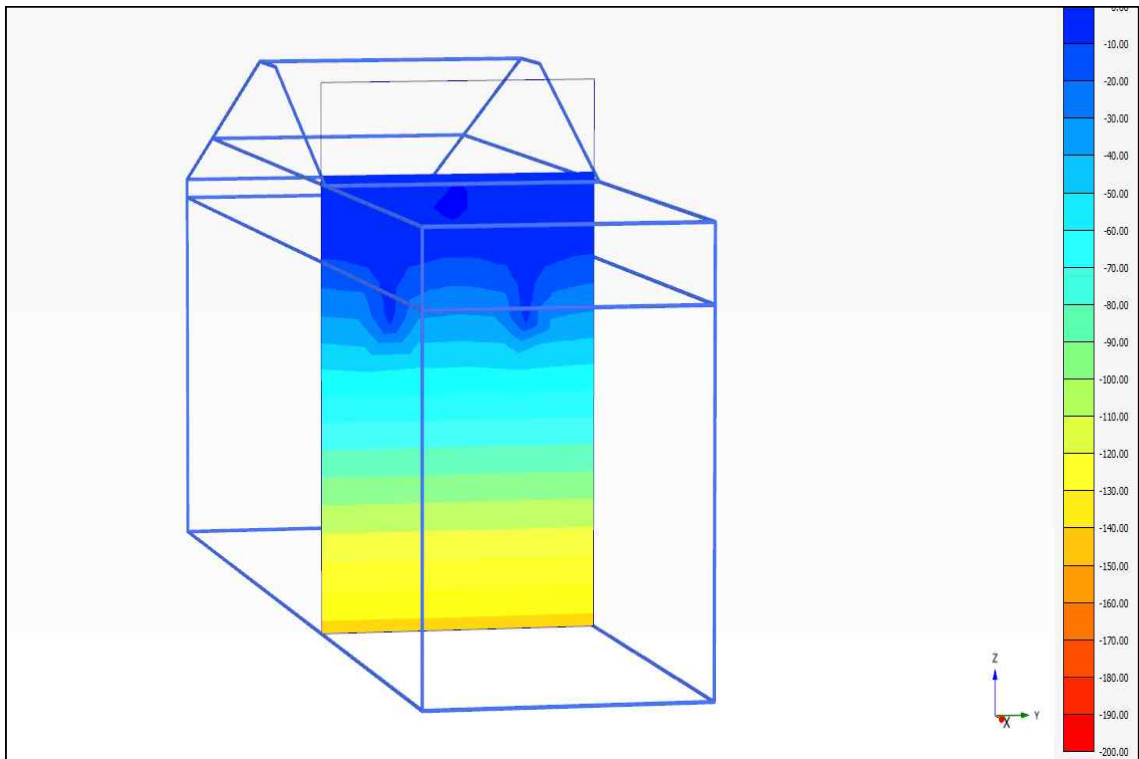


(d) Well Point 설치간격 : 4m 간극수압 분포도

[그림 3-73] 침투해석에 의한 제방내 간극수압 분포도<계속>

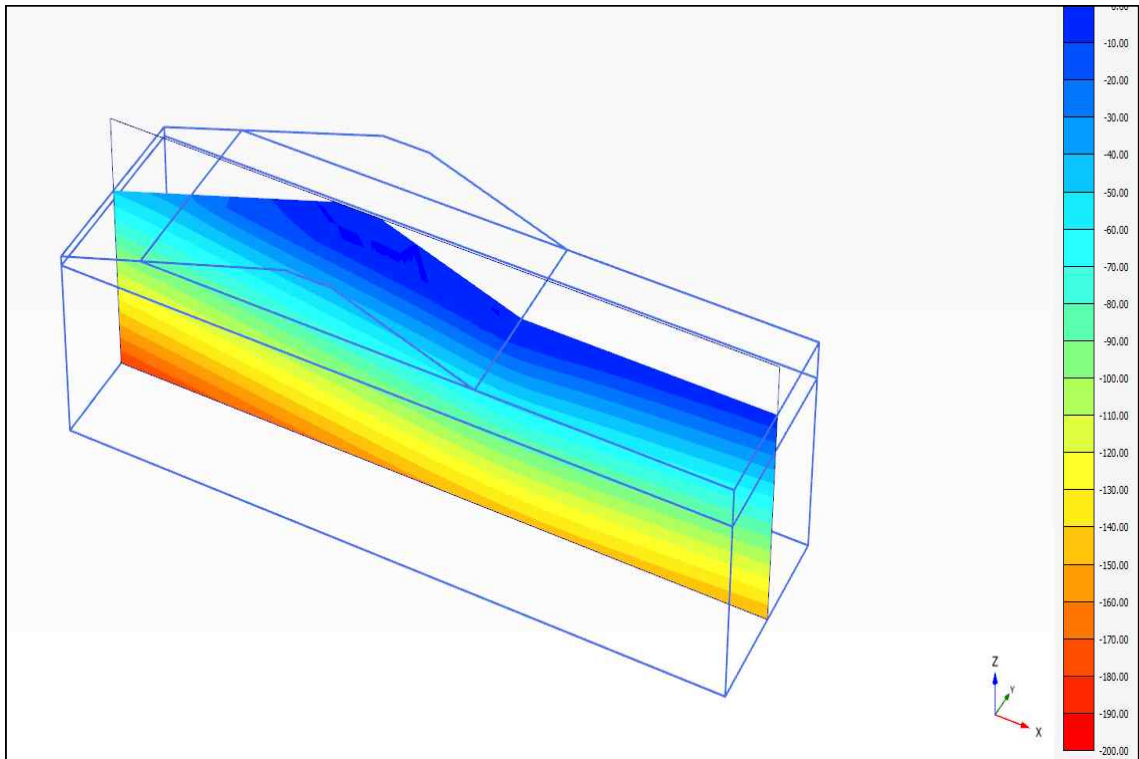


(e) Well Point 설치간격 : 6m 횡방향 간극수압 분포도

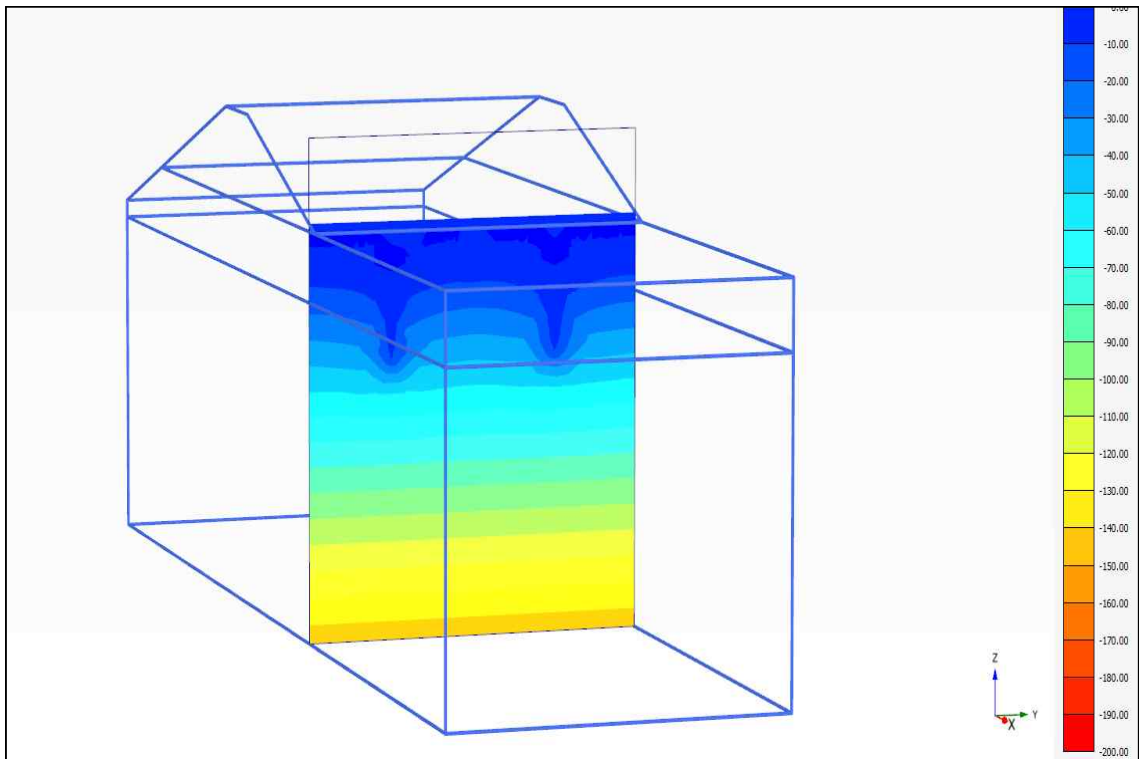


(e) Well Point 설치간격 : 6m 간극수압 분포도

[그림 3-73] 침투해석에 의한 제방내 간극수압 분포도<계속>

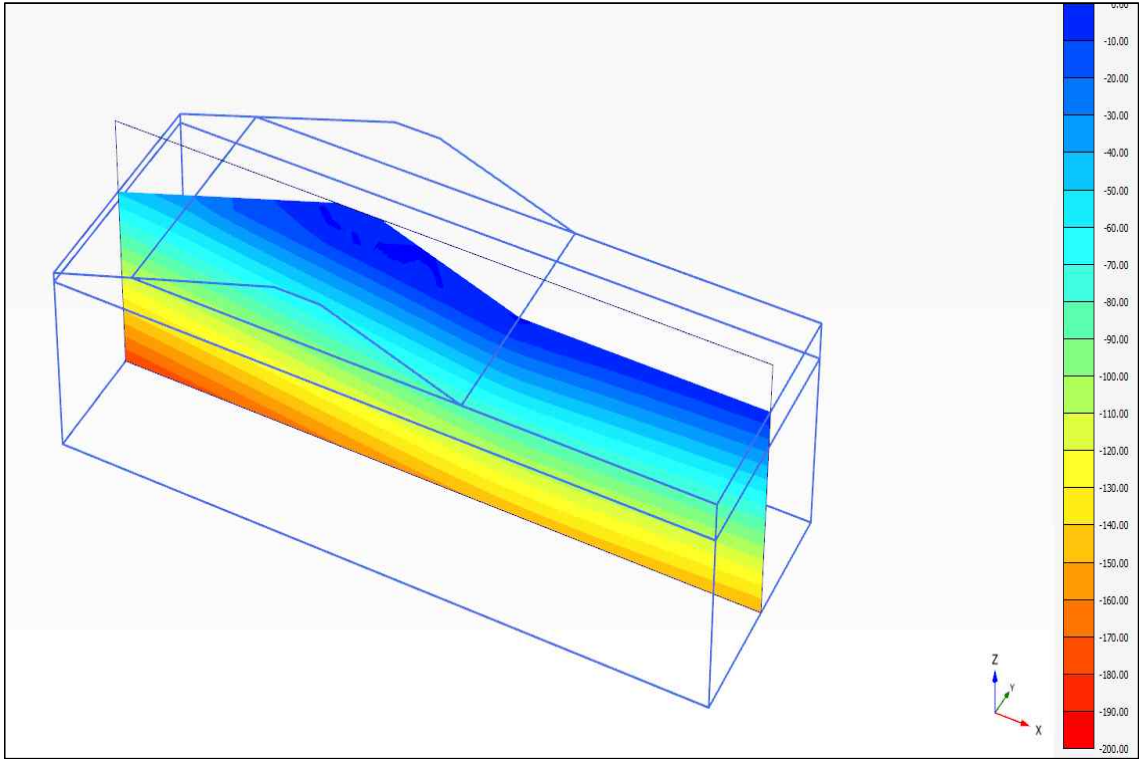


(f) Well Point 설치간격 : 8m 횡방향 간극수압 분포도

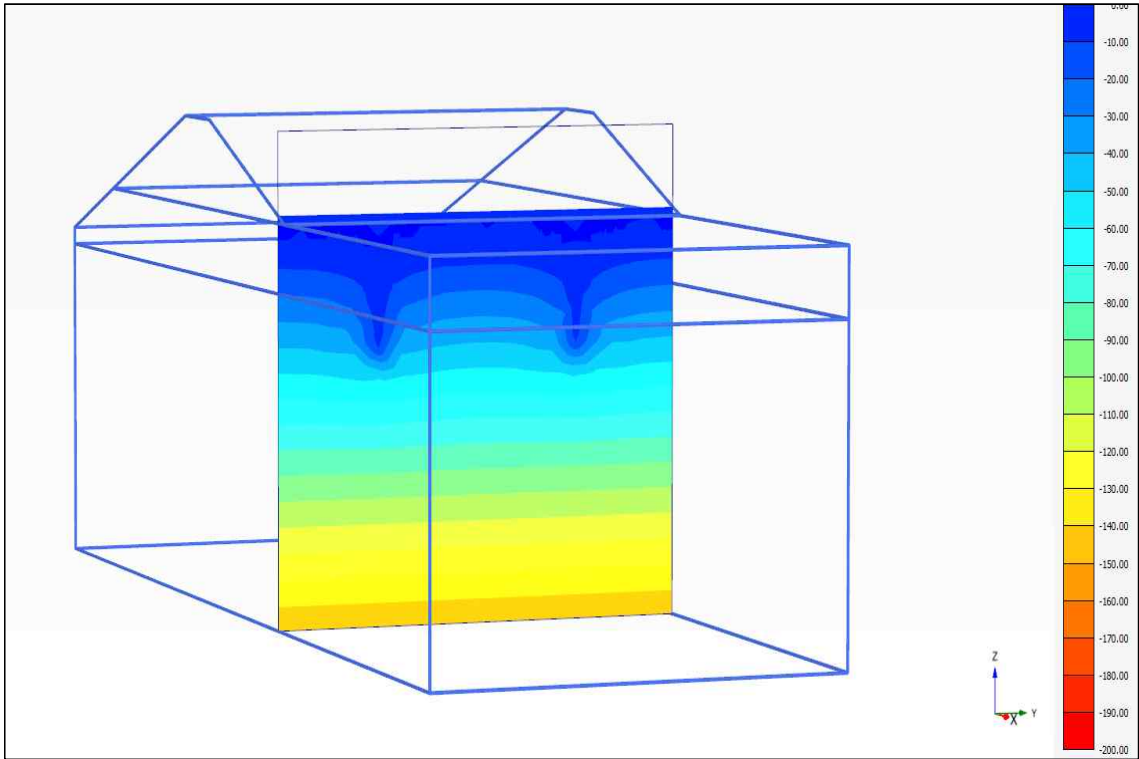


(f) Well Point 설치간격 : 8m 간극수압 분포도

[그림 3-73] 침투해석에 의한 제방내 간극수압 분포도<계속>

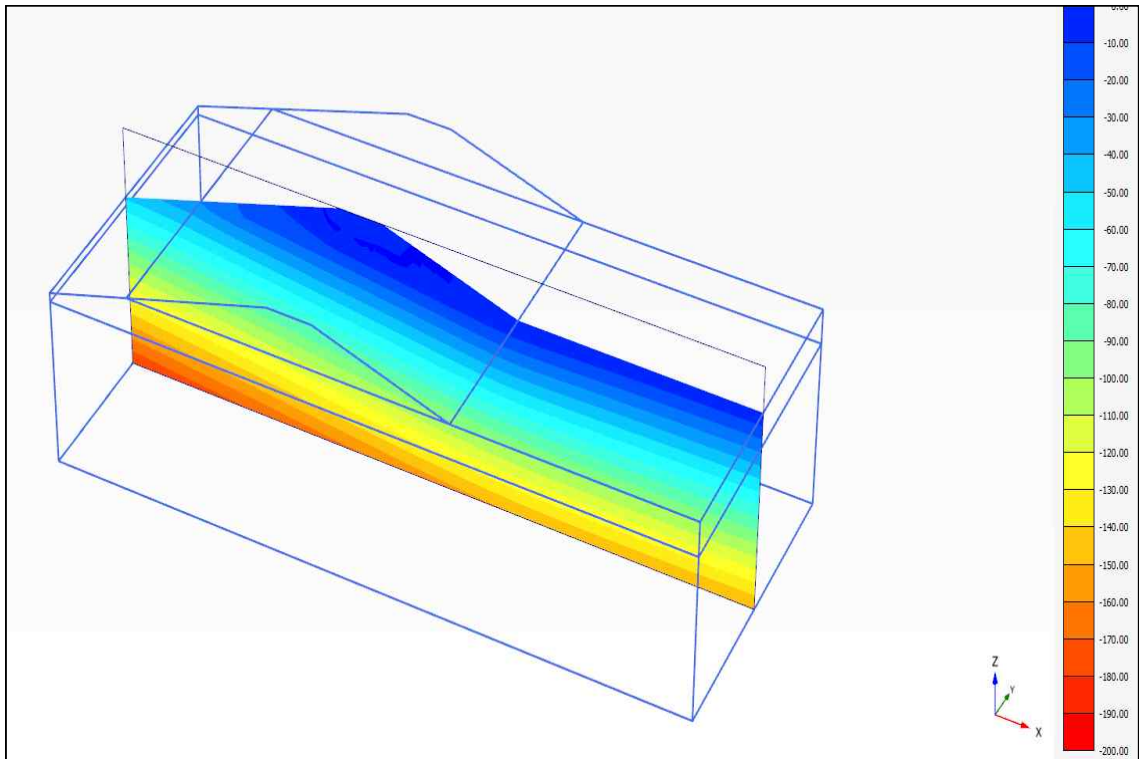


(g) Well Point 설치간격 : 10m 횡방향 간극수압 분포도

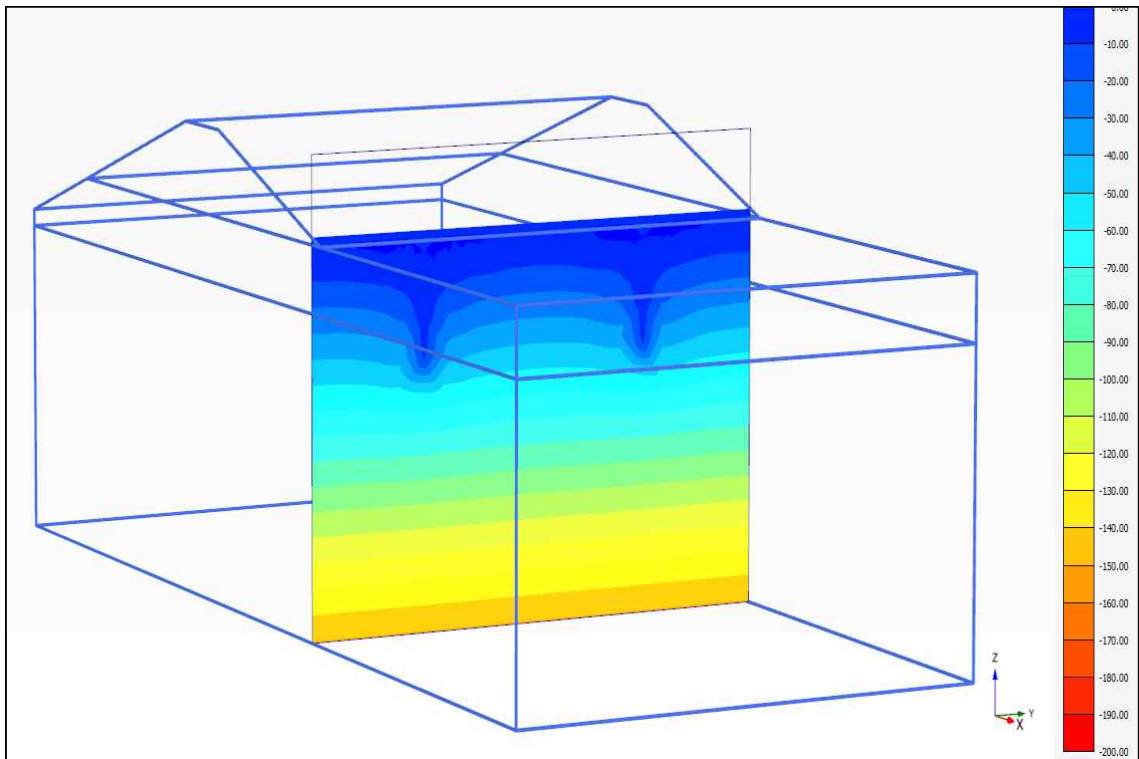


(g) Well Point 설치간격 : 10m 간극수압 분포도

[그림 3-73] 침투해석에 의한 제방내 간극수압 분포도<계속>

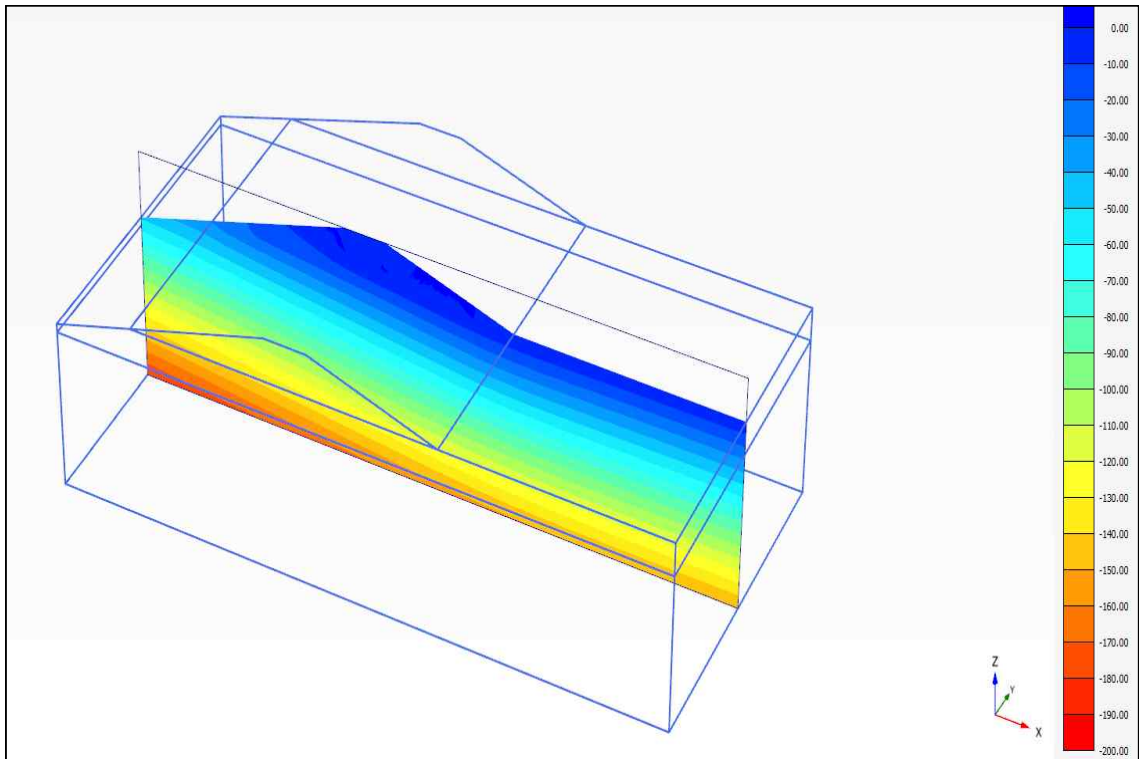


(h) Well Point 설치간격 : 12m 횡방향 간극수압 분포도

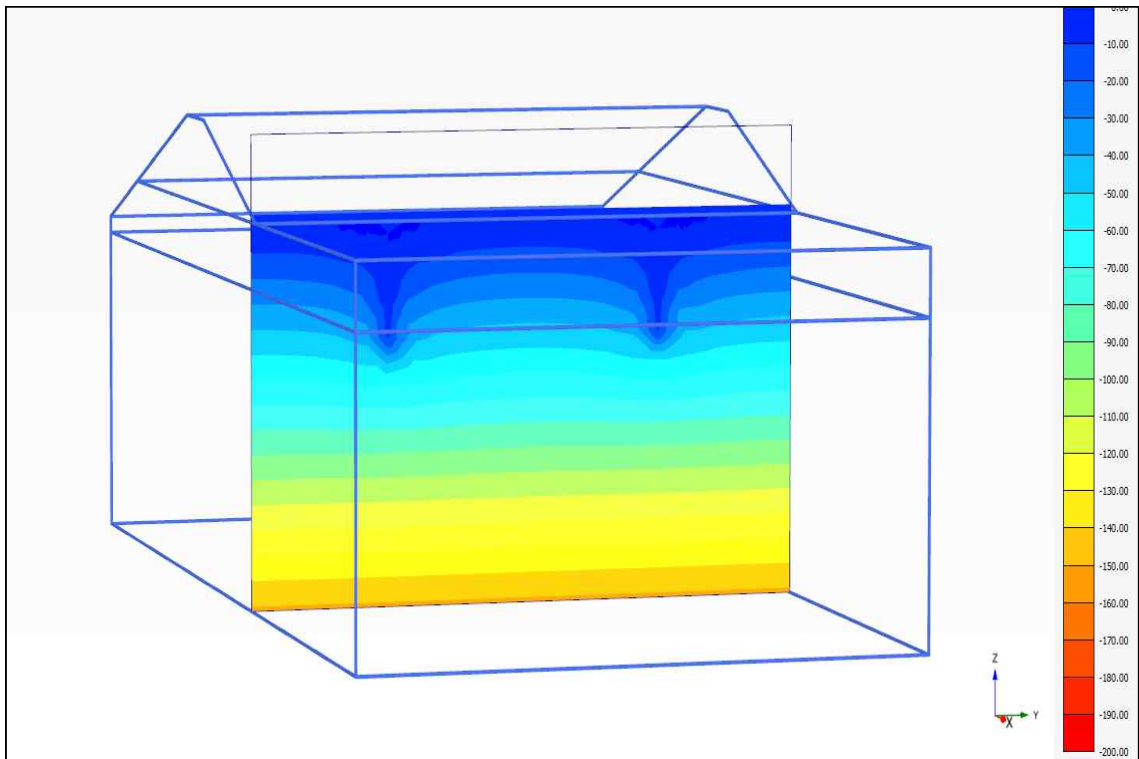


(h) Well Point 설치간격 : 12m 간극수압 분포도

[그림 3-73] 침투해석에 의한 제방내 간극수압 분포도<계속>

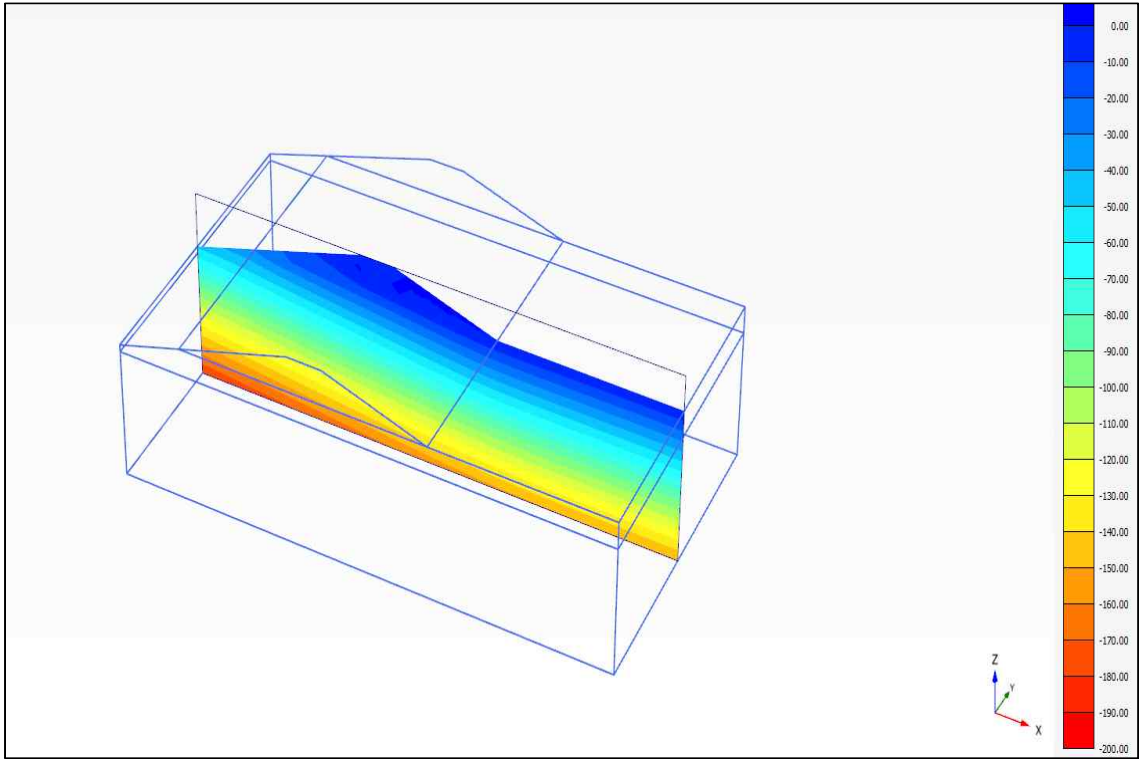


(i) Well Point 설치간격 : 14m 횡방향 간극수압 분포도

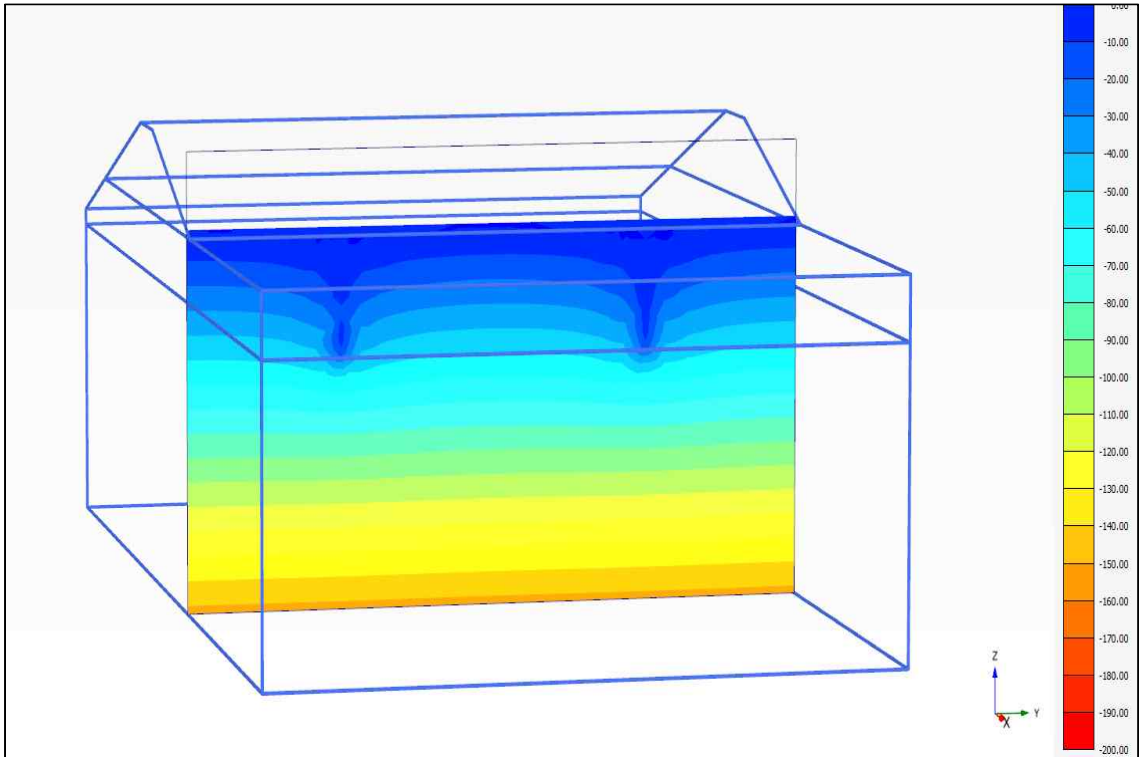


(i) Well Point 설치간격 : 14m 간극수압 분포도

[그림 3-73] 침투해석에 의한 제방내 간극수압 분포도<계속>

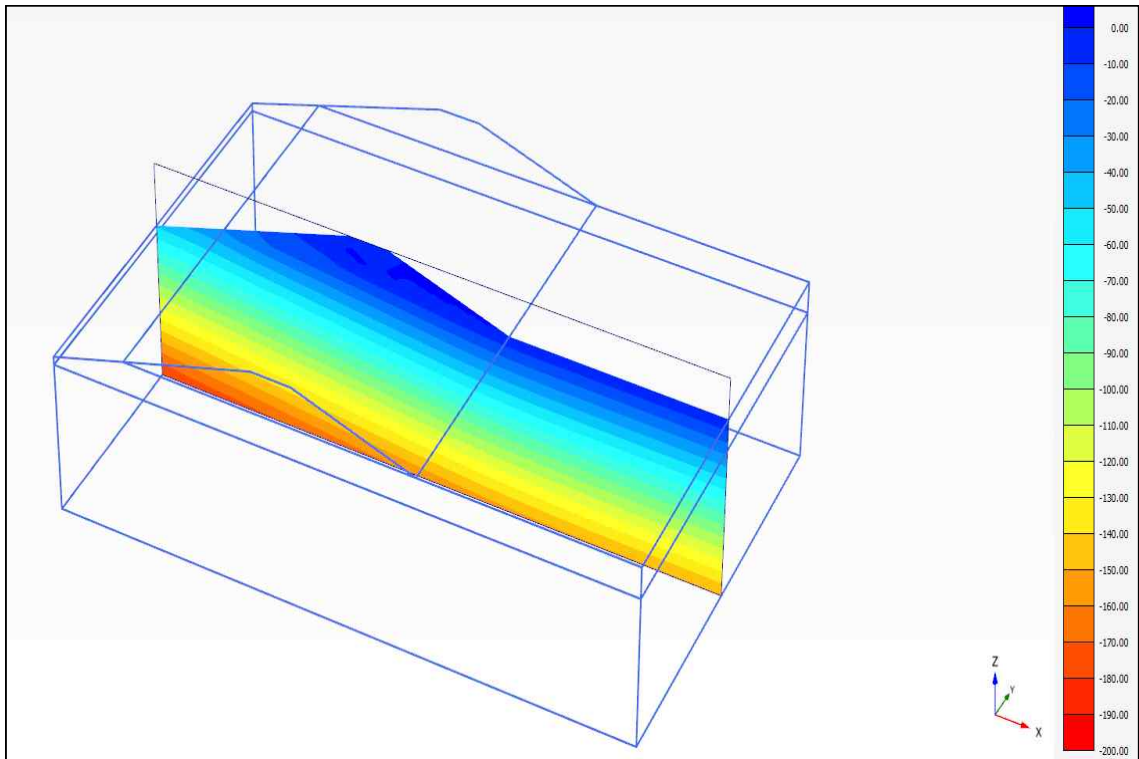


(j) Well Point 설치간격 : 16m 횡방향 간극수압 분포도

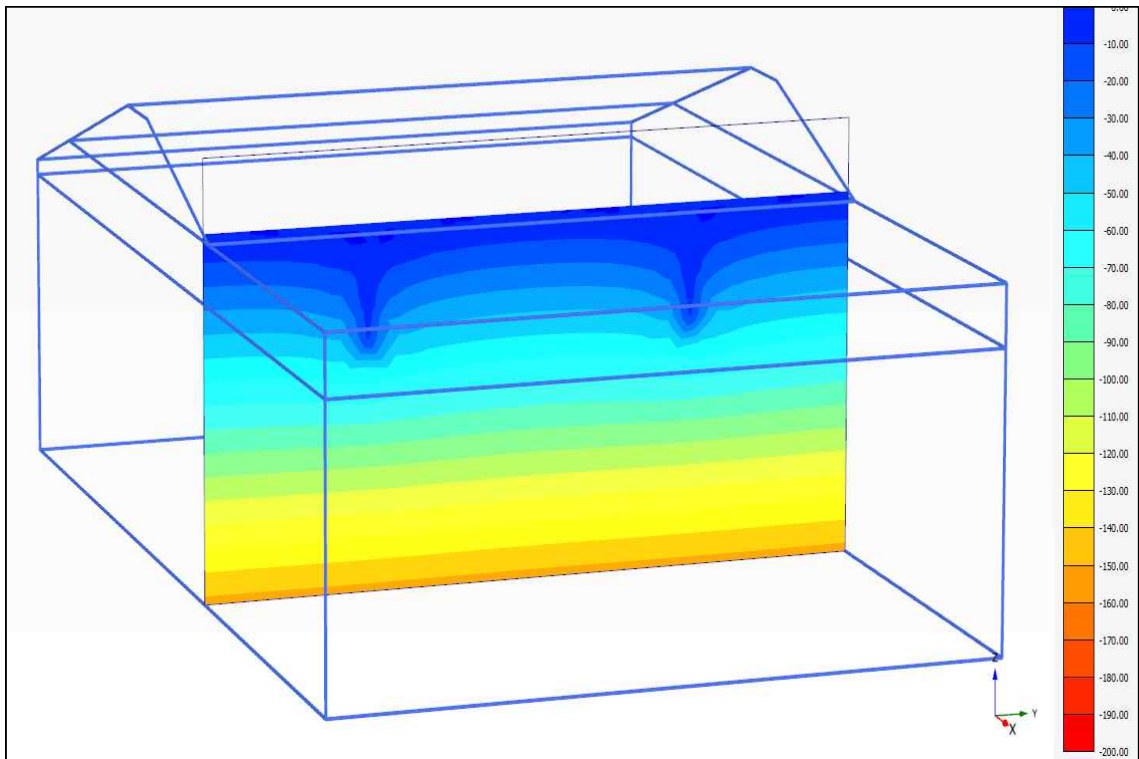


(j) Well Point 설치간격 : 16m 간극수압 분포도

[그림 3-73] 침투해석에 의한 제방내 간극수압 분포도<계속>

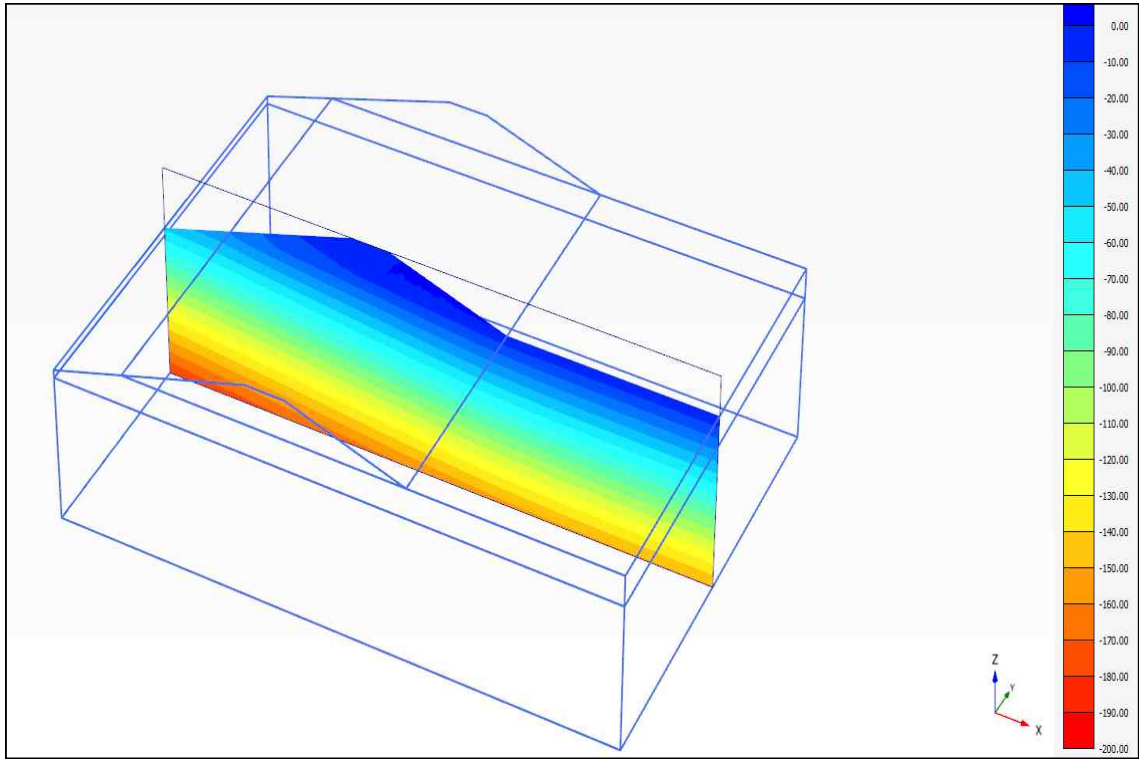


(k) Well Point 설치간격 : 18m 횡방향 간극수압 분포도

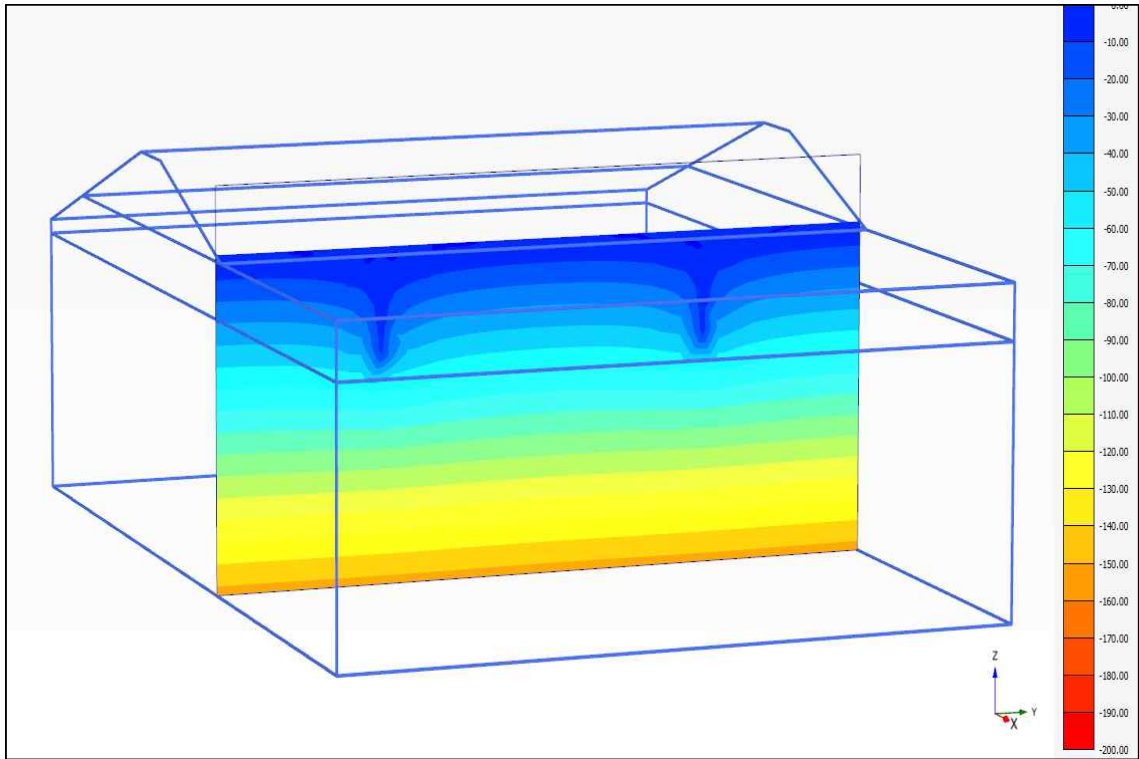


(k) Well Point 설치간격 : 18m 간극수압 분포도

[그림 3-73] 침투해석에 의한 제방내 간극수압 분포도<계속>

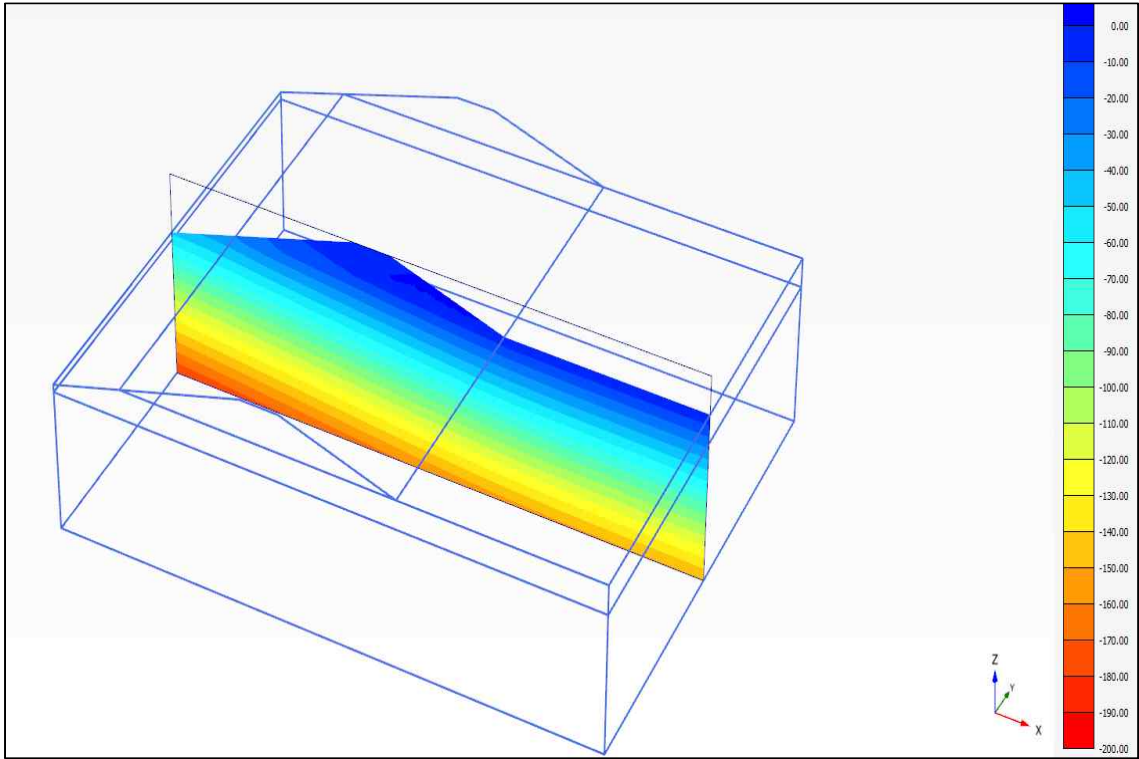


(1) Well Point 설치간격 : 20m 횡방향 간극수압 분포도

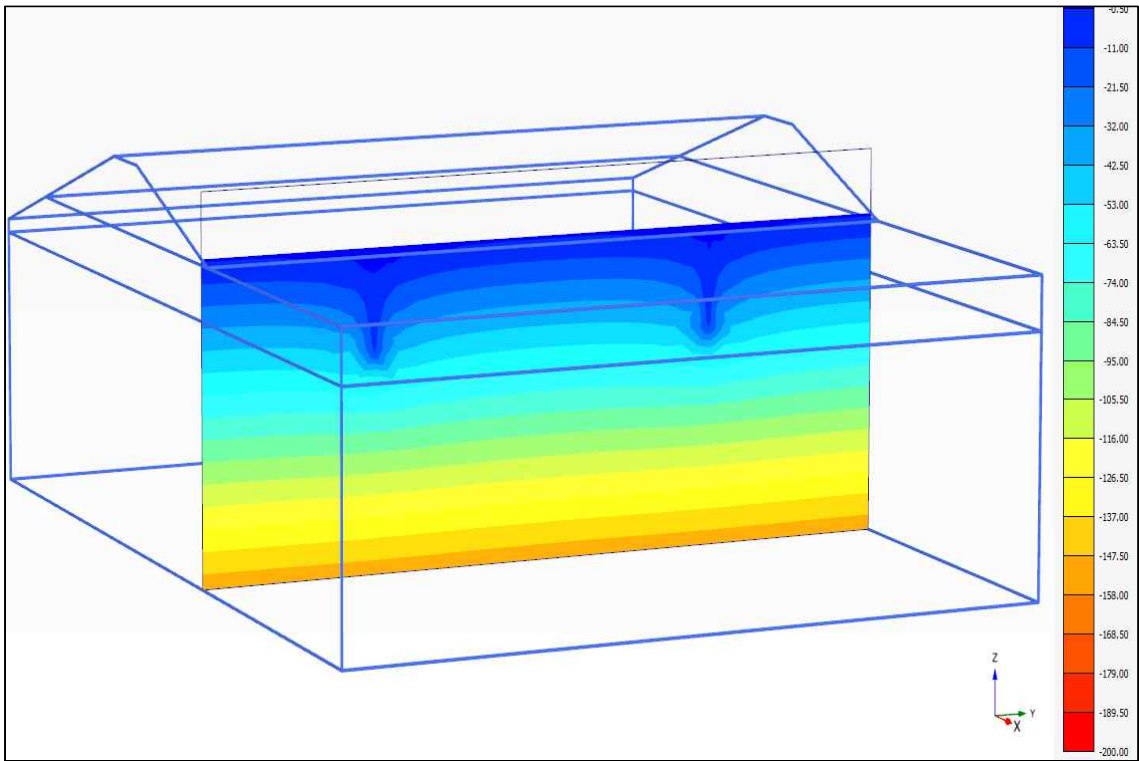


(1) Well Point 설치간격 : 20m 간극수압 분포도

[그림 3-73] 침투해석에 의한 제방내 간극수압 분포도<계속>

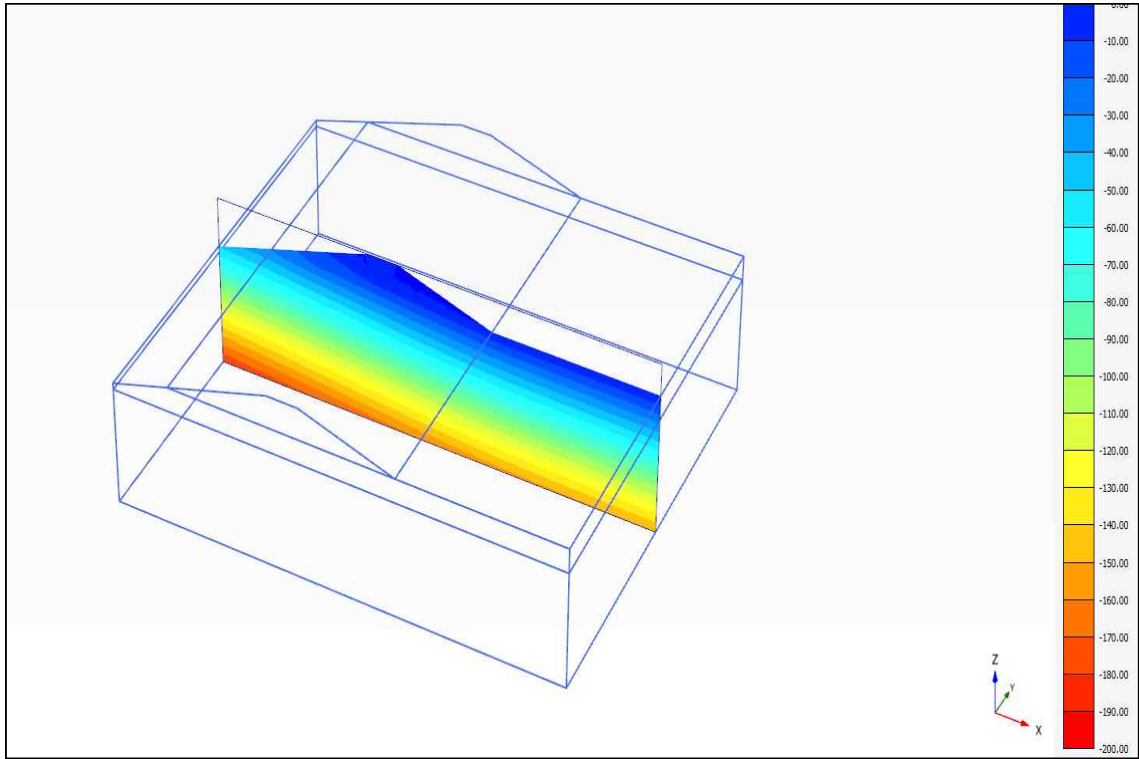


(m) Well Point 설치간격 : 22m 횡방향 간극수압 분포도

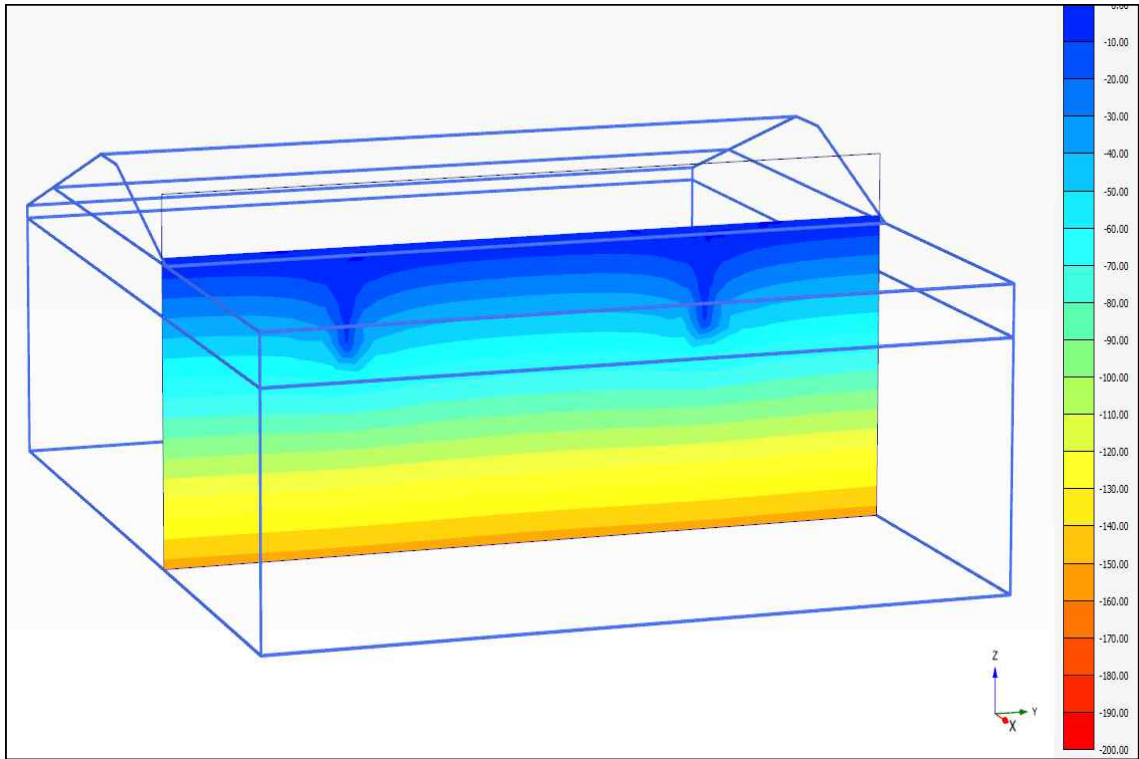


(m) Well Point 설치간격 : 22m 간극수압 분포도

[그림 3-73] 침투해석에 의한 제방내 간극수압 분포도<계속>

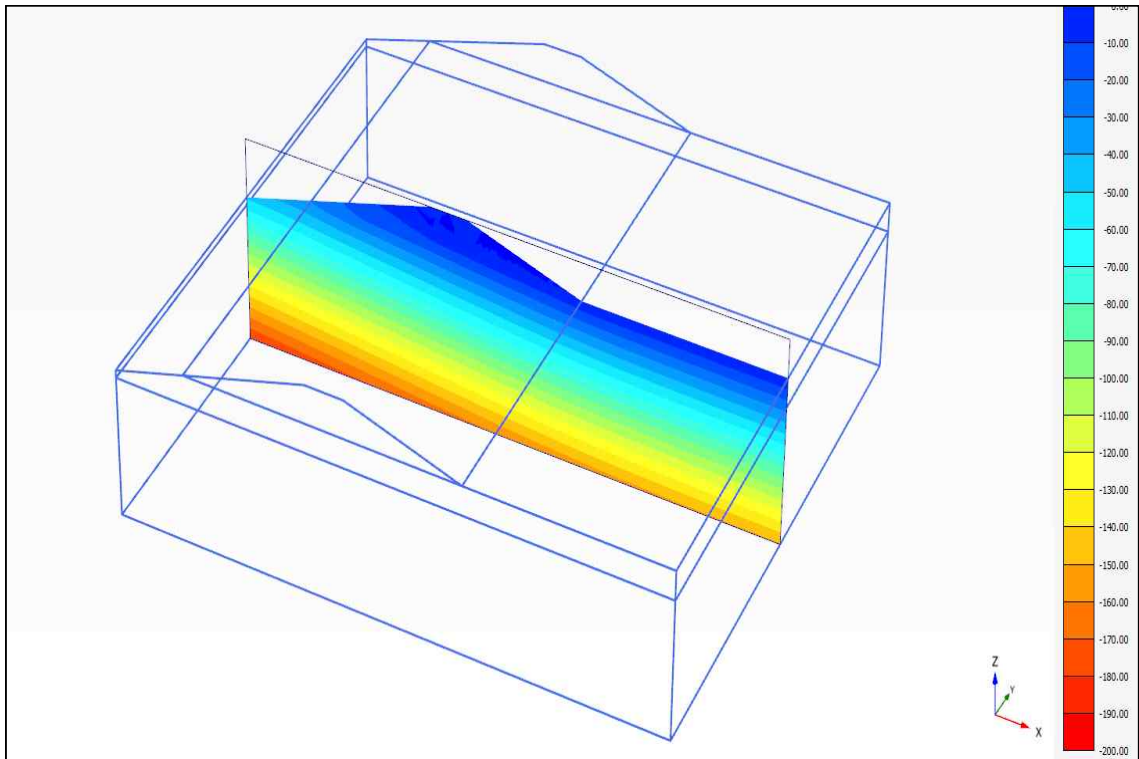


(n) Well Point 설치간격 : 24m 횡방향 간극수압 분포도

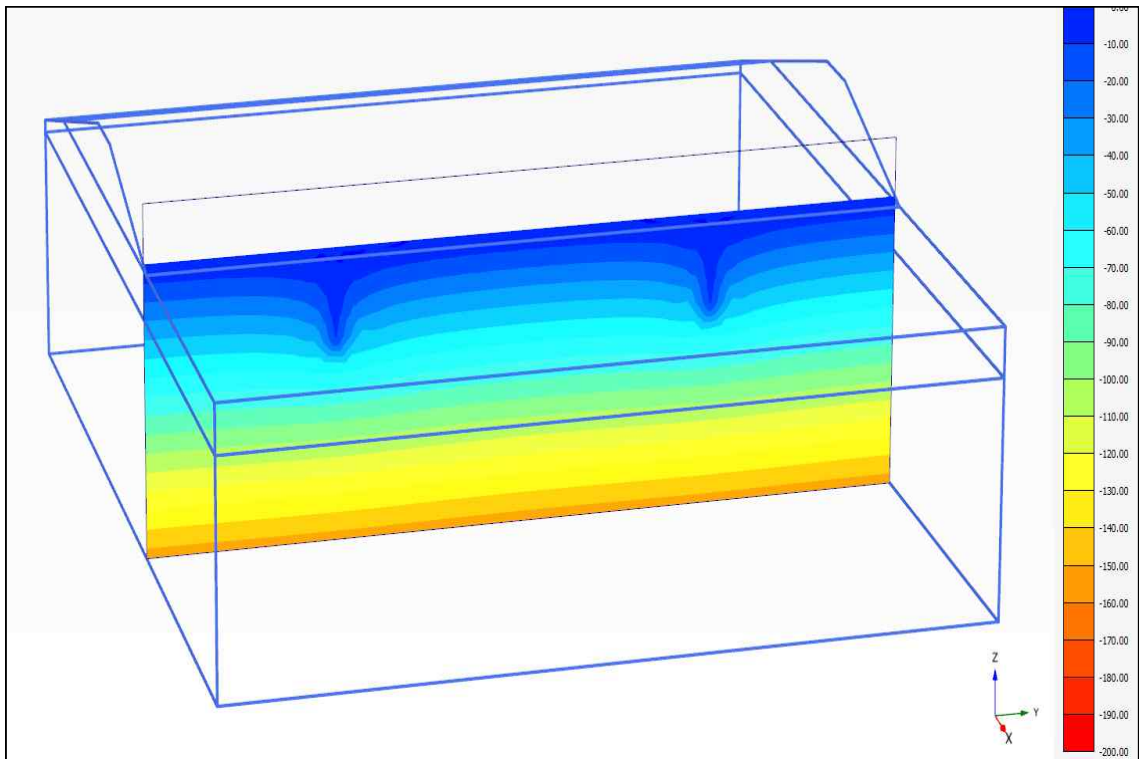


(n) Well Point 설치간격 : 24m 간극수압 분포도

[그림 3-73] 침투해석에 의한 제방내 간극수압 분포도<계속>



(o) Well Point 설치간격 : 25m 횡방향 간극수압 분포도

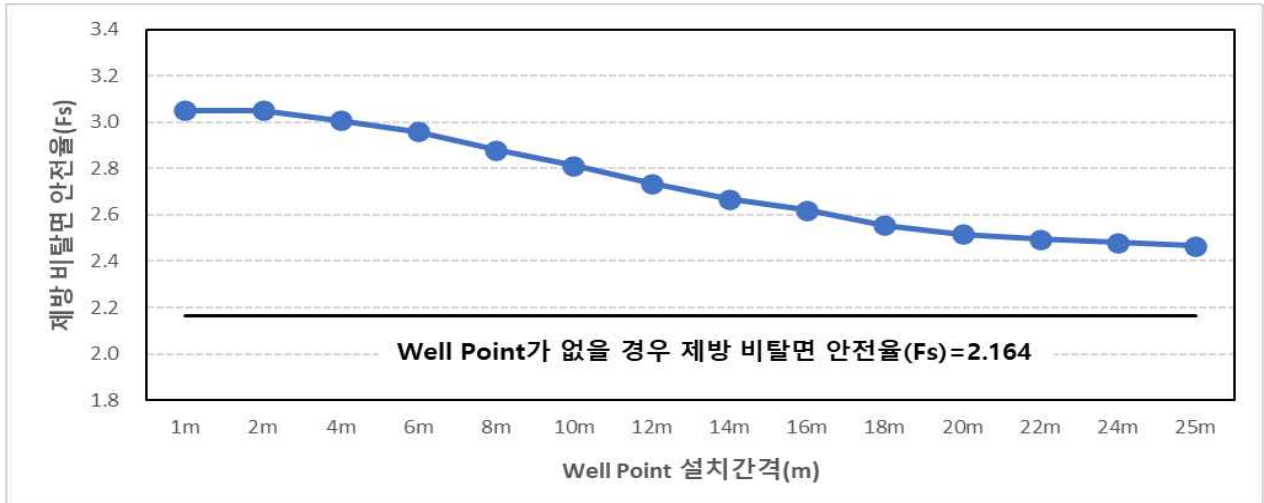


(o) Well Point 설치간격 : 25m 간극수압 분포도

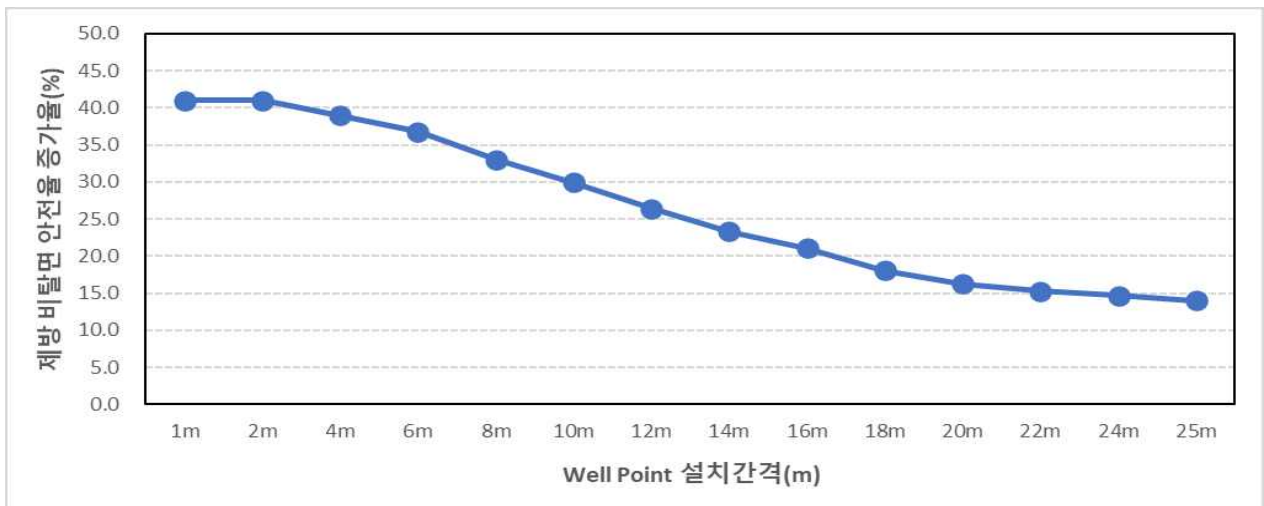
[그림 3-73] 침투해석에 의한 제방내 간극수압 분포도<계속>

Well Point 설치간격에 따른 제방비탈면 안전율의 변화는 아래 그림과 같이 보여주고 있다. 제방비탈면 안전율은 강도감소법을 이용하여 산정하였다. 그림에서 보듯이 Well Point 설치로 인해 제방내 비탈면 안전율은 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이는 Well Point설치로 인해 제방 비탈면내 간극수압이 감소하기 때문이다.

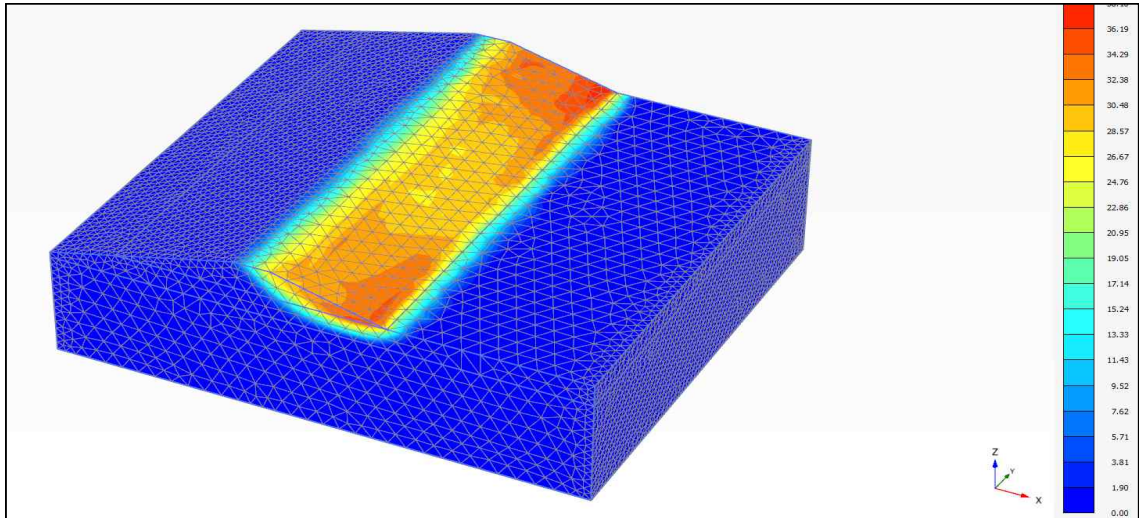
아래 그림에서 Well Point 설치간격이 20m이상일 경우 제방비탈면 안전율 증가율은 약 15%미만, 설치간격이 6~16m일 경우 21%~36%, 설치간격이 4m이하일 경우 40%으로 나타났다. 즉, Well Point 설치간격이 4m이하일 경우 Well Point에 의한 제방비탈면 안전율 증가효과를 판단된다. 아래 그림은 강도감소법에 의한 제방비탈면의 예상 활동과괴원을 보여주고 있다.



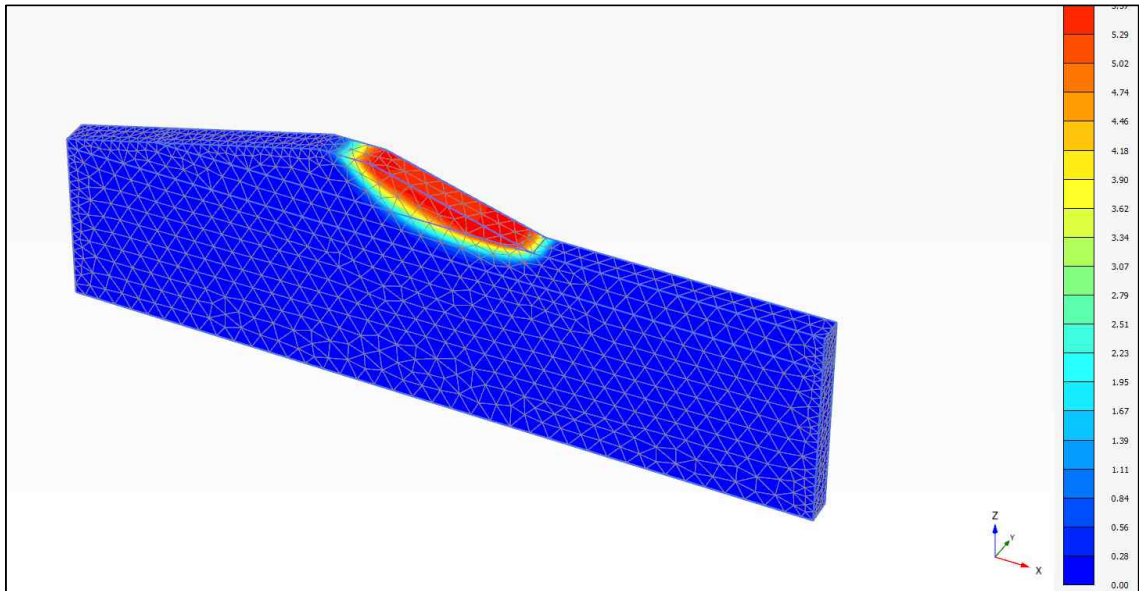
[그림 3-74] Well Point설치간격에 따른 제방비탈면 안전율



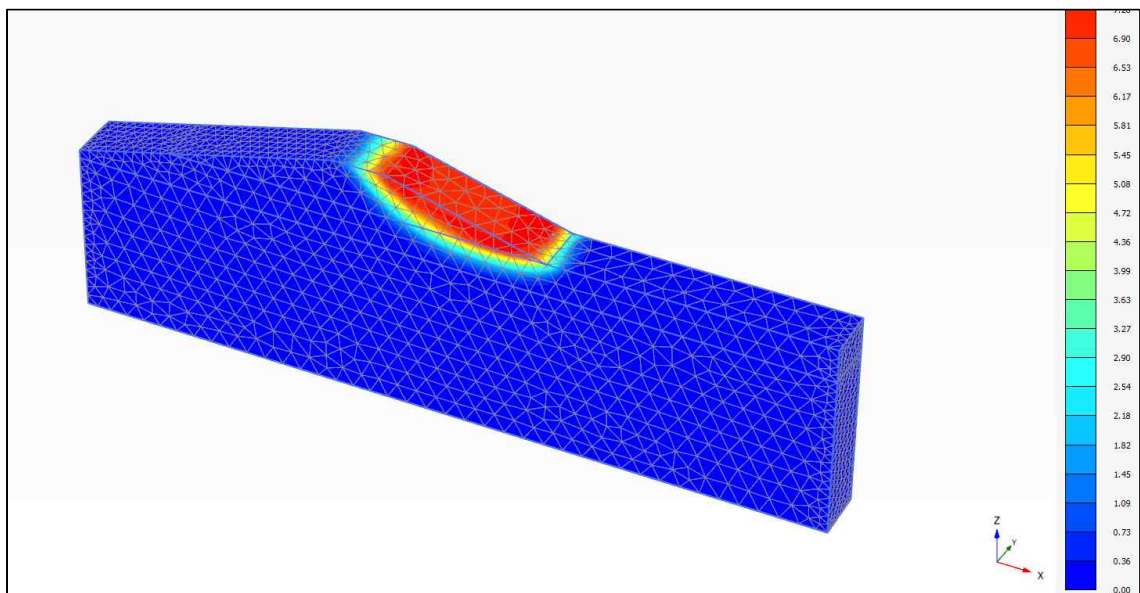
[그림 3-75] Well Point설치간격에 따른 제방비탈면 안전율 증가율



(a) No Well Point

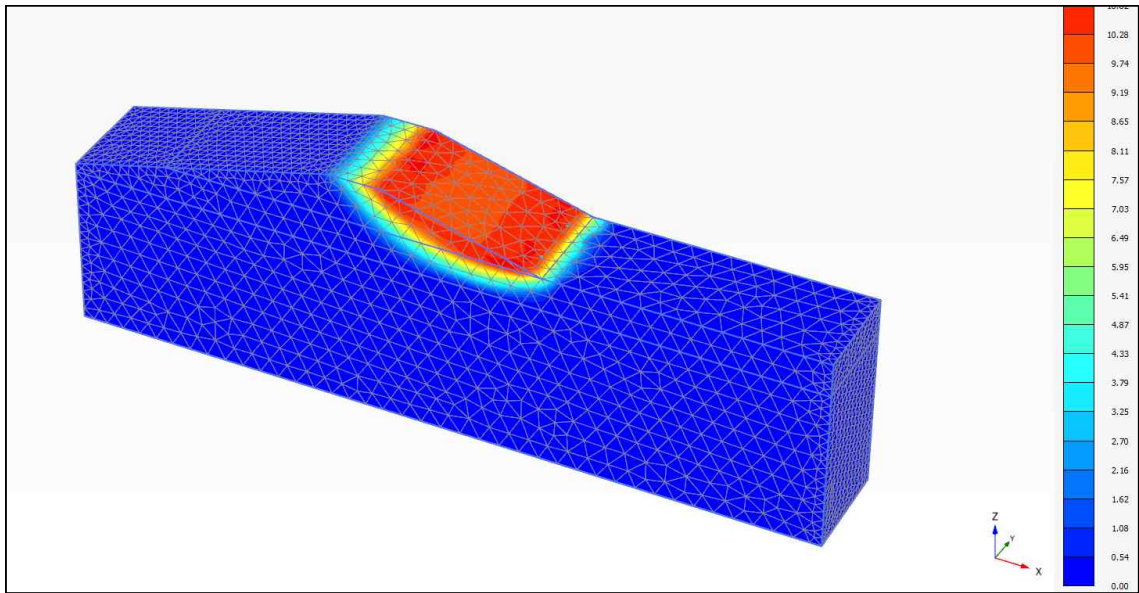


(b) Space 1m

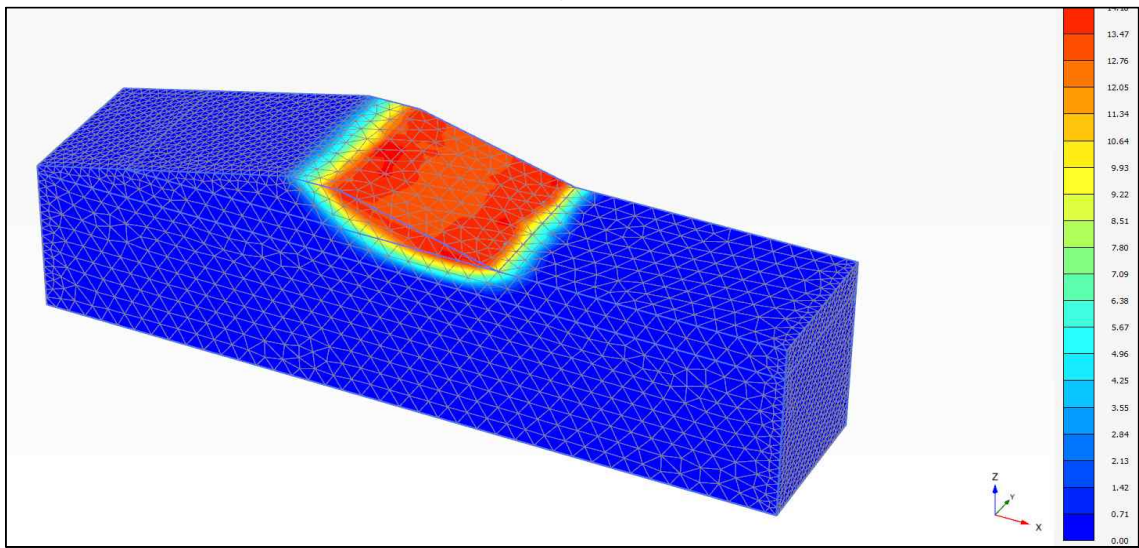


(c) Space 2m

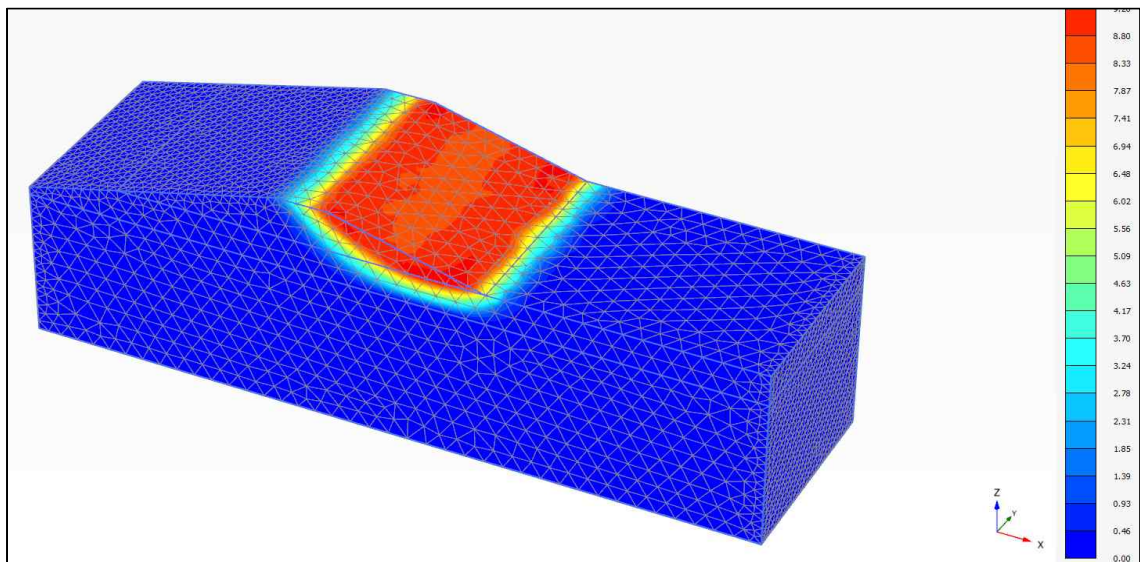
[그림 3-76] 강도감소법에 의한 제방비탈면의 예상 활동파괴원<계속>



(d) Space 4m

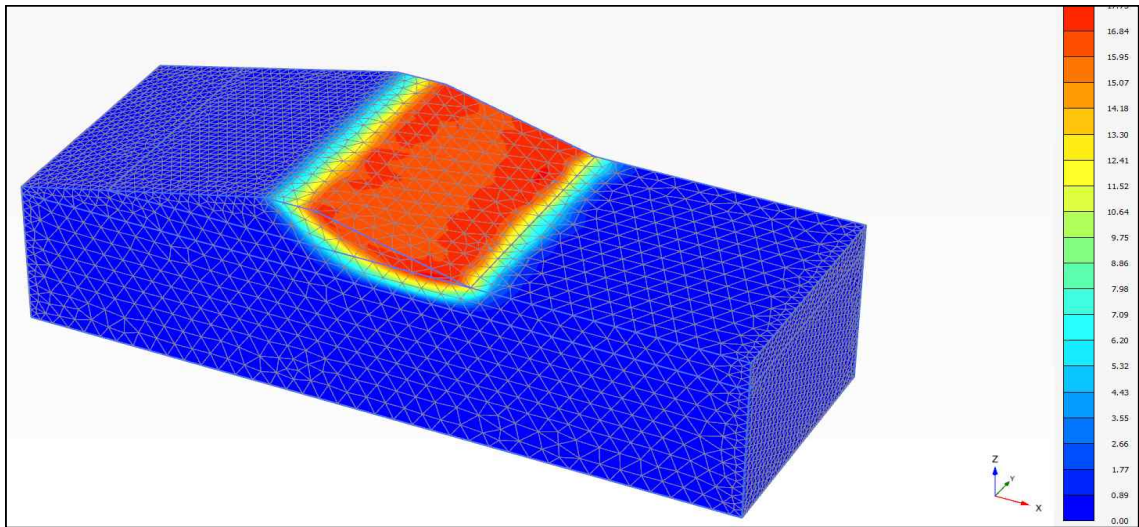


(e) Space 6m

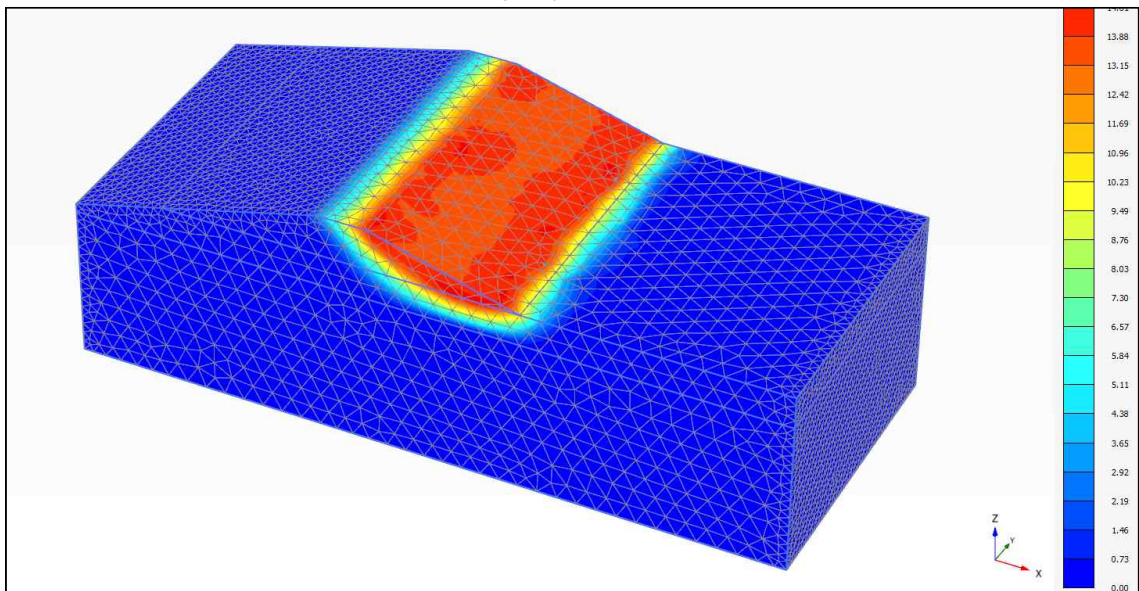


(f) Space 8m

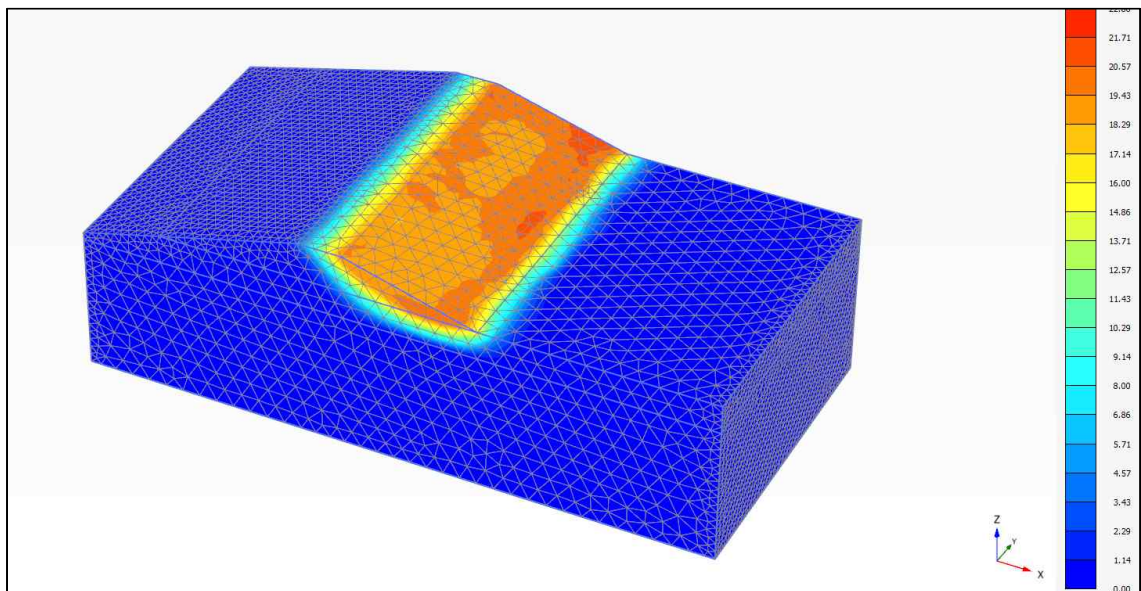
[그림 3-76] 강도감소법에 의한 제방비탈면의 예상 활동파괴원<계속>



(g) Space 10m

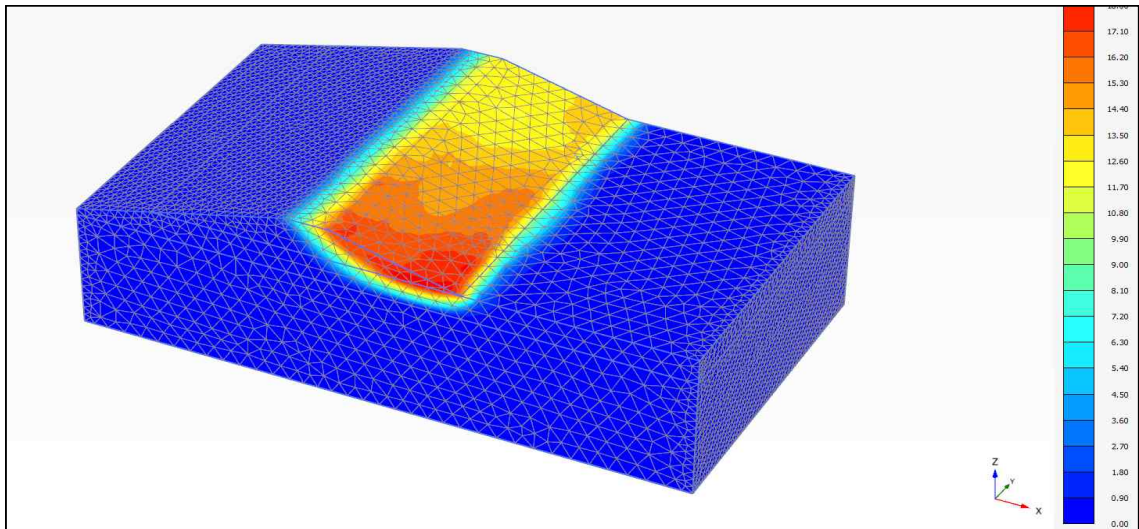


(h) Space 12m

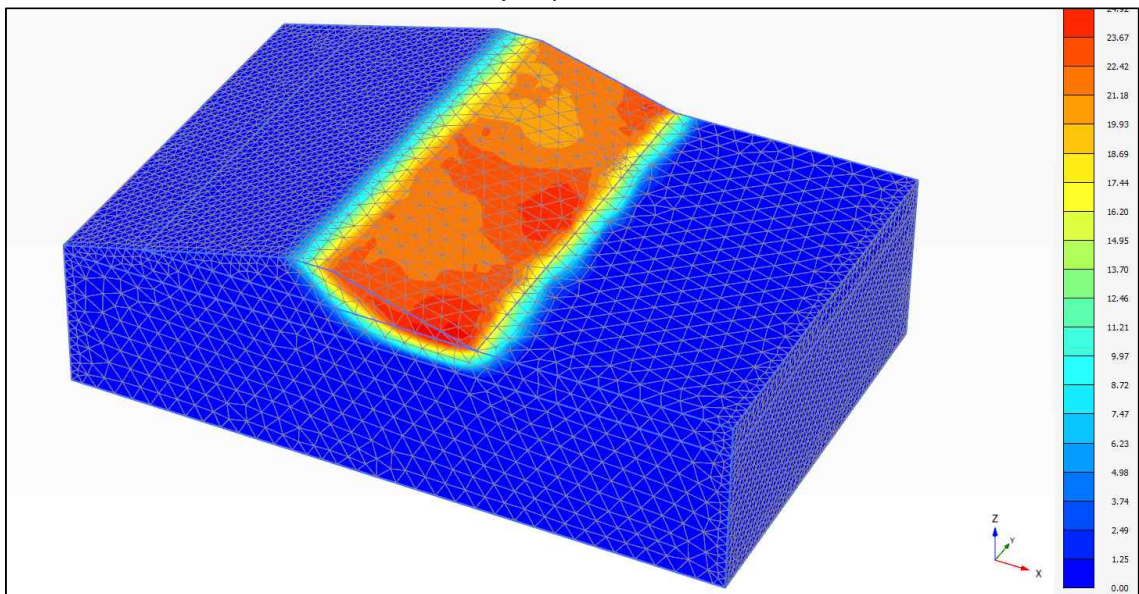


(i) Space 14m

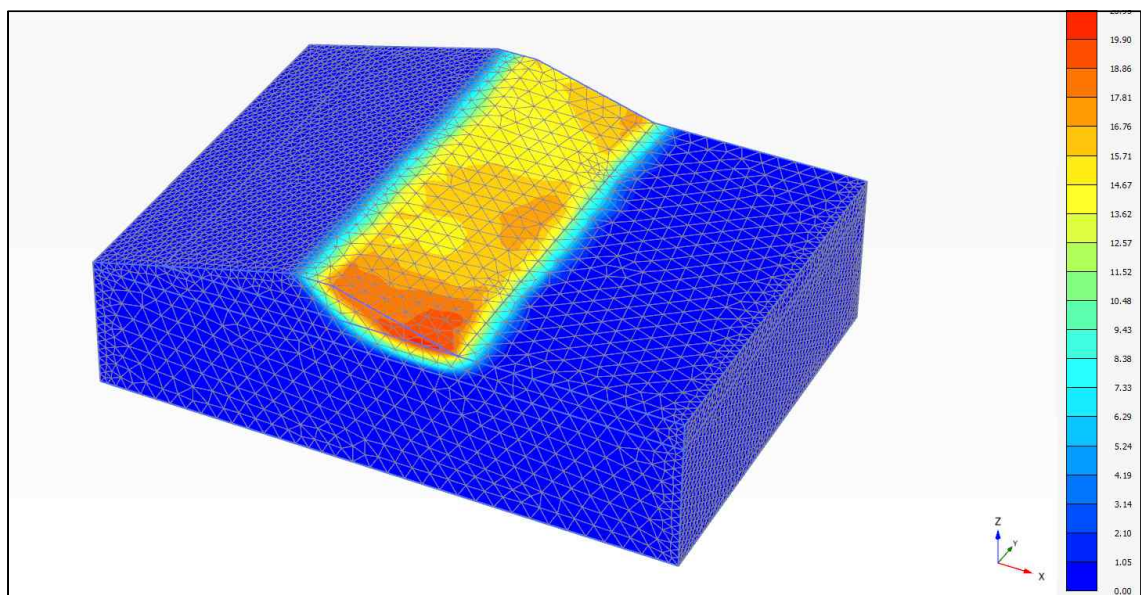
[그림 3-76] 강도감소법에 의한 제방비탈면의 예상 활동파괴원<계속>



(j) Space 16m

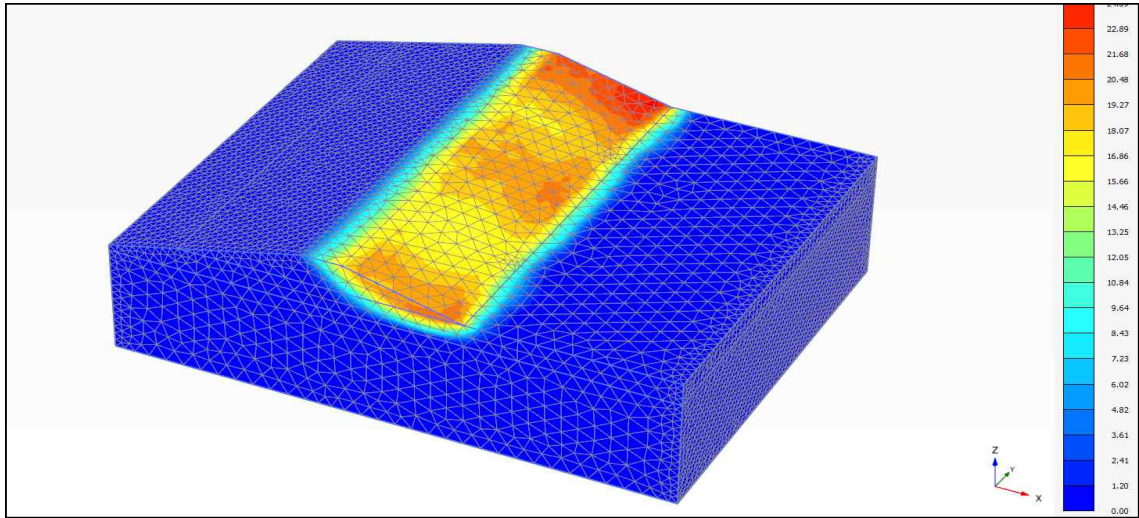


(k) Space 18m

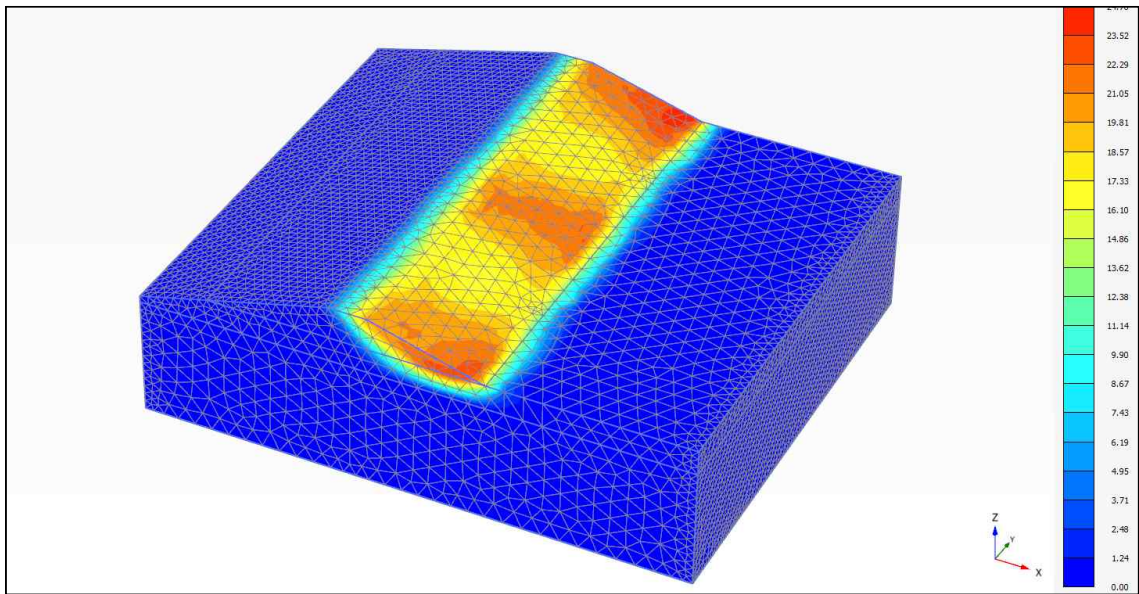


(l) Space 20m

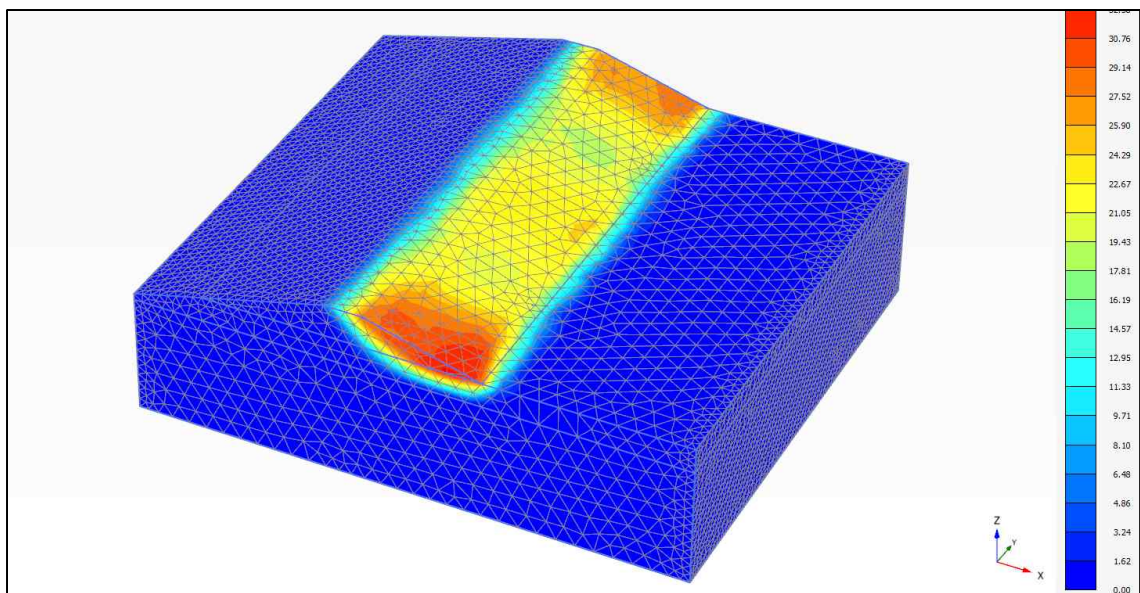
[그림 3-76] 강도감소법에 의한 제방비탈면의 예상 활동파괴원<계속>



(m) Space 22m



(n) Space 24m



(o) Space 25m

[그림 3-76] 강도감소법에 의한 제방비탈면의 예상 활동파괴원<계속>

□ 결과분석

Well Point 간격에 따른 제방 비탈면의 안정성 변화를 평가하기 위해 Well Point 간격을 1m, 2m, 4m, 6m, 8m, 10m, 12m, 14m, 16m, 18m, 20m, 22m, 24m 및 25m으로 3차원 수치모델링하였으며, 또한 Well Point 적용하지 않은 경우에 대해 3차원 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

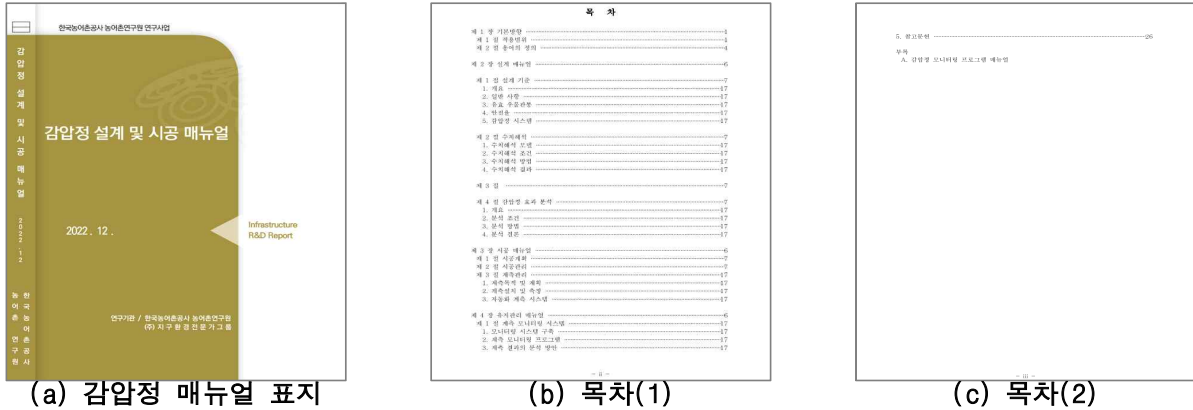
Well Point 설치간격이 20m이상일 경우 제방내 간극수압 감소율은 약 10%미만, 설치간격이 6~16m일 경우 제방내 간극수압 감소율은 13%~40%, 설치간격이 4m이하일 경우 50%~80%의 제방내 간극수압 감소율을 확인할 수 있다. 즉, Well Point 설치간격이 4m이하일 경우 Well Point의 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Well Point 설치간격이 20m이상일 경우 제방비탈면 안전율 증가율은 약 15%미만, 설치간격이 6~16m일 경우 21%~36%, 설치간격이 4m이하일 경우 40%으로 나타났다. 즉, Well Point 설치간격이 4m이하일 경우 Well Point에 의한 제방비탈면 안전율 증가효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

저수지 수위상승으로 인한 제방비탈면내 간극수압 상승을 억제하기 위해 Well Point 공법의 적용성은 3차원 수치해석에 의해 확인되었고, 이를 이용할 경우 Well Point 설계(간격, 설치심도)가 가능할 것으로 판단된다.

3.7 감압정 설계 및 시공 매뉴얼

본 연구의 해석 및 분석 결과를 토대로 농업용 저수지 개보수 사업을 보다 안전하고 효율적으로 수행하기 위해서 한국의 시설과 지질 특성에 적합한 감압정 공법에 대한 설계, 시공, 유지관리에 대한 매뉴얼을 작성하였다. 아래 그림은 감압정 설계 및 시공 매뉴얼의 일부를 나타내었다.



[그림 3-77] 감압정 매뉴얼

개발된 내용 중 설계 매뉴얼 개발 내용은 일부 발취 하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

투수성(permeable) 지반 위에 설치된 농업용 저수지(fill dam)는 제체 하부의 피압 발생으로 제체 토립자가 빠져나오는 파이핑(piping) 현상 등이 우려될 수 있다. 감압정 시스템은 흩으로 이루어진 제체의 파이핑(pipinh)등 내부침식(internal erosion)을 통한 토립자 유출을 방지하는데 필수적이다.

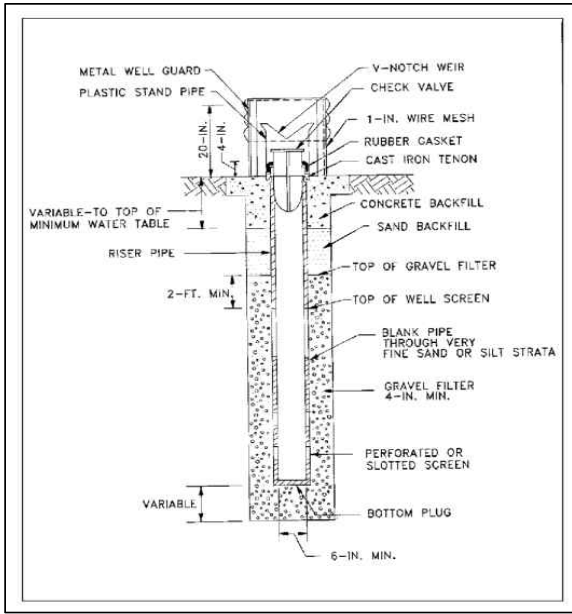
감압정 공법은 다른 공법에 비하여 토지 점용 면적이 작은 장점이 있다. 하지만 주기적인 유지관리가 필요하고 감압정을 통하여 수집된 지표에서 다루어야 할 지하를 통한 침투량이 증가할 수 있으므로 설계에 주의를 요한다.

투수성 지반위에 설치된 농업용저수지의 안정성과 경제성을 확보하기 위한 감압정 설치 매뉴얼은 미국 공병단(USACE)에서 작성한 매뉴얼과 네델란드 델프트(Delft) 연구소의 매뉴얼을 참고하여 작성하였다.

1) 감압정 시스템 설계 시 고려사항

가) 감압정 시스템의 구성

감압정 설계를 위하여는 감압정 시스템의 세부 구성에 대하여 충분히 인지한 상태에서 설계를 해야 하며 감압정 시스템은 주로 다음으로 구성된다.

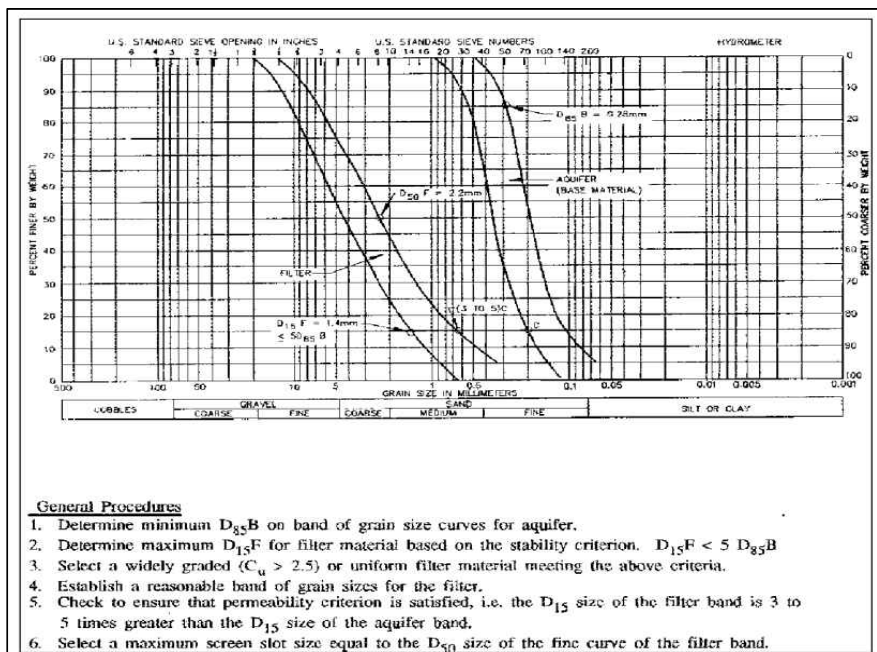


- 시추공(Drilled hole)
- 스크린(Screen)
- 바닥판, 멩관(Bottom plate)
- 필터(Filter)
- 속관(Riser)
- 체크밸브(Check valve)
- 뒤채움(Back fill)
- 두껍(Cover)

[그림 3-78] 감압정 단면도(미국 공병단(USACE))

미공병단에서 추천하는 각 구성의 규격은 다음과 같다.

- 속관의 최소 직경은 16cm
- 필터재 채움 최소 두께는 10cm
- 속관 스크린부 상단과 필터재 뒤채움 최고 높이와의 차이는 최소 60cm 이상되어야 하고, 스크린의 길이는 대수층의 두께에 맞아야 함
- 자갈 필터부 상부는 모래로 채움
- 감압정 시스템 상부 마무리는 콘크리트로 채움



[그림 3-79] 감압정 내부 채움재 권장 입도분포(미국 공병단(USACE))

저수지 기초의 모래가 필터 간극으로 유입되어 필터의 기능을 막게 하지 않으려면 필터의 입도는 다음의 기준을 만족하여야 한다.

① $D_{15F} < 5D_{85B}$

② $6.0 > C_u > 2.5$

③ 필터 알갱이는 파쇄되지 않는 것으로 충분히 단단해야 한다.

스크린 개구부의 크기는 필터재료가 유입되지 않는 범위 내에서 가능한 넓게 하여야 하며 최대 스크린 개구부 사이즈는 필터 밴드의 세립자 곡선의 D_{50} 사이즈와 동일하게 정한다.

나) 기본 고려사항

설계 시 기본적으로 고려하여야 할 사항들은 다음과 같다.

- 충분한 기초지반조사 : 저수지 상하류 투수층의 깊이, 두께, 물리적 특성
- 기초지반의 투수성 조사 : 실내투수시험 또는 입자 사이즈와의 상관성을 통한 투수성을 조사
- 비등방성 고려: 침투해석시 투수층의 비등방성(anisotropic)을 고려
- 지하수의 화학적 상태: 감압정의 효율에 영향 미치는 지하수의 화학적 성분 분석
- 침투류 해석 : 감압정 시스템 필요여부 결정
- 기준 안전율 : 상향의 압력(uplift) 또는 히빙(heave)에 대한 안전율은 다음 사항을 고려하여 결정함

① 최소안전율(FS)은 1.5보다 커야 함

② 피압 지하수위(piezometric head)가 저수지 하류부의 지표면 아래로 유지되도록 감압정을 설계하여야 함

다) 감압정 시스템 재료의 재질

감압정 시스템의 스크린(screen)과 속관(riser)에 사용되는 재질의 종류는 다음과 같다.

- 스테인레스 스틸(Stainless steel)
- 나무(Wood)
- 동, 구리(Brass and Bronze)
- PVC
- 유리섬유(Fiberglass)

재료의 선택은 다음 사항들을 고려하여 결정한다.

① 수질(Water quality)

수질분석은 지하수의 화학적 특성을 결정하고 부식성(corrosive)인지 아닌지를 평가하며 아래 표와 같이 구분되며 부식에 의한 스크린의 개구부의 확장은 감압정으로의 점진적인 세립자의 이동을 유발할 수 있다. 그러므로, 부식성 지하수라고 예측되는 경우에 감압정 스크린을 부식에 저항할 수 있는 재질로 설계하는 것은 필수적이다.

Indicators of Corrosive and Incrusting Waters ^a	
Indicators of Corrosive Water	Indicators of Incrusting Water
1. A pH less than 7	1. A pH greater than 7
2. Dissolved oxygen in excess of 2 ppm ^b	2. Total iron (Fe) in excess of 2 ppm
3. Hydrogen sulfide (H ₂ S) in excess of 1 ppm detected by a rotten egg odor	3. Total manganese (MN) in excess of a 1 ppm in conjunction with a high pH and the presence of oxygen
4. Total dissolved solids in excess of 1,000 ppm indicates an ability to conduct electric current great enough to cause serious electrolytic corrosion	4. Total carbonate hardness in excess of 300 ppm
5. Carbon dioxide (CO ₂) in excess of 50 ppm	
6. Chlorides (CL) in excess of 500 ppm	
Notes:	
a. From TM 5-818-5.	
b. ppm = parts per million.	

[그림 3-80] 감압정 설계시 수질기준(미국 공병단(USACE))

② 철분 박테리아의 존재(potential presence of iron bacteria)

철분 박테리아가 존재하는 것이 예상되는 경우, 감압정 스크린은 반복적인 화학적 처리에 견딜 수 있는 재료로 선정해야 한다.

③ 요구 강도(strength requirements)

일반적인 재료의 스크린은 수평 토압에 대부분 저항할 수 있는 수준이므로 스크린의 요구강도는 스크린 재질 결정의 중요한 요소는 아니다.

2) 감압정 시스템의 간격 결정

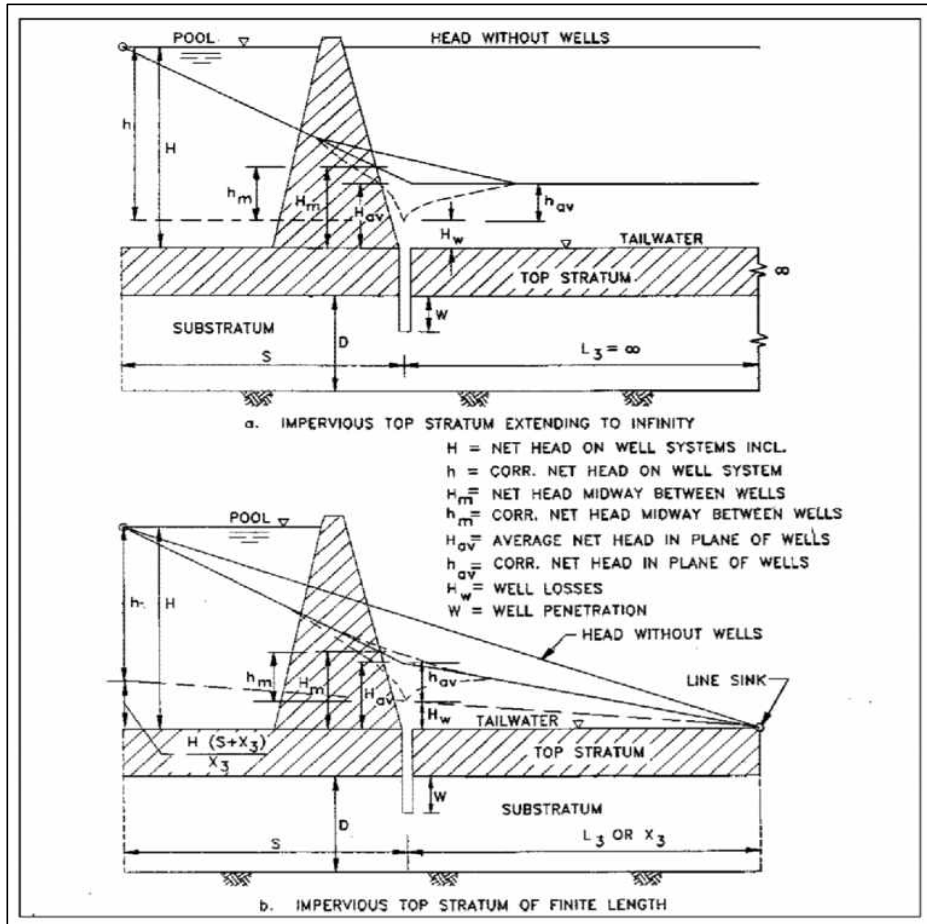
가) 설계 절차

감압정의 수두 손실은 계산된 감압정 유량을 기준으로 결정되어야 하며 감압정부 최대 수두에 추가되어야 한다. 그러면 상향압력(uplift)에 대한 안전율은 낮아진다.

감압정 속관(riser)의 상단이 하류부 수면(tail water) 위로 확장되면 감압정부 최대 수두를 결정할 때 감압정 수두손실에 고도 차이를 추가해야 한다.

최대 수두는 항상 감압정과 감압정 중간에서 발생하고, 필요한 안전율을 유지하려면 감압정부 최대 수두를 낮추기 위해 감압정의 간격을 줄여야 한다.

따라서, 감압정의 손실을 고려할 때 감압정과 감압정 중간의 수두 또는 평균 수두 중 더 큰 것이 설계 값과 같다는 조건을 충족하는 감압정 간격을 찾기 위해 반복적인 절차를 거쳐야 한다.



[그림 3-81] 감압정 시스템의 간격 결정을 위한 제원

나) 세부절차

감압정 시스템을 설계하는 일반적인 절차는 다음과 같으며 이 절차는 투수층 전체를 관통하는 시스템과 부분만 관통하는 감압정 시스템 모두에 유효하다.

- ① 허용수두 h_a 계산. 하류부 수위는 지표면과 일치한다고 가정
- ② 감압정 사이의 중간지점의 수두 H_m 은 h_a 와 같고 감압정 손실 H_w 가 0이라고 가정
- ③ 주어진 감압정 침투에 대해 W , 식에 따라 감압정 간격 a 의 다양한 시도 값에 대해 H_m 을 계산. 보간 하여 $H_m = h_a$ 이 되는 감압정 간격을 결정
- ④ 위의 감압정 간격 및 침투에 대한 감압정 유량 Q_w 를 계산
- ⑤ 감압정 치수를 가정하고 Q_w 에 해당하는 감압정 손실 H_w 를 계산

- ⑥ H_m 대신 $h_m = H_m - H_w$ 를 사용하여 다) 단계를 반복하고 a 의 새 값을 결정
- ⑦ 두 번의 연속적 시도에서 비교적 일관된 a 값을 얻을 때까지 ④단계에서 ⑤를 반복. 이러한 방식으로 도출된 a 의 값은 완전히 관통되는 감압정에 대한 설계 요구 사항을 충족함
- ⑧ 감압정이 완전히 관통되지 않는 경우 평균 수두차인 H_{av} 가 h_a 와 같다고 가정하고 ②단계를 반복
- ⑨ 주어진 감압정 침투 W 에 대해 감압정 간격 a 의 다양한 시도 값에 대한 H_{av} 를 계산하고 $H_{av} = h_a$ 에 필요한 감압정 간격을 결정하기 위해 보간
- ⑩ 위의 감압정 간격 및 침투에 대한 감압정 유량 Q_w 를 계산
- ⑪ 감압정 치수를 가정하고 Q_w 에 해당하는 감압정 손실 H_w 를 계산
- ⑫ H_{av} 대신 $h_{av} = H_{av} - H_w$ 를 사용하여 자) 단계를 반복하고 a 의 새 값을 결정
- ⑬ 두 번의 연속 시도에서 상대적으로 일관된 a 값을 얻을 때까지 자) 단계에서 반복. 설계의 경우 주어진 감압정 침투에 대해 단계 ⑦ 및 ⑬에서 결정된 감압정 간격의 더 작은 값을 선택
- ⑭ 다양한 감압정 관통에 대해 반복하여 설계 요구 사항을 충족하는 감압정의 관통 깊이와 간격 간의 관계를 도출함

이외의 항목의 내용에 대해서는 본 보고서의 내용과 중복되어 생략한다. (자세한 내용은 매뉴얼을 참고하기 바란다.)

4. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

4.1 연구개발 성과

성과 목표	사업화지표											연구기반지표									
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화					기술인증	학술성과				교육지도	인력양성	정책 활용·홍 보		기타 (타연구 활용등)
	특허출원	특허등록	품종등록	S M A R T	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용창출	투자유치		논문		논문 평균 I F	학술 발표			정책 활용	홍보 전시	
													SCI	비 S C I							
단위	건	건	건	평균 등급	건	백 만원	건	백 만원	백 만원	명	백 만원	건	건	건	명	건	건				
가중치	15	15			15		25							10				20			
최종 목표	1	1			1		1					1	1	4				2			
1단계	목 표	1											1	4							
	실 적	1											1	5							
2단계	목 표		1		1		1					1						2			
	실 적	1	1		1		1					1		1	1			2			
달성률 (%)	200	100			100		100					100	100	150	100			100			

4.1.1 국내·외 논문 게재

번호	논문명	학술지 명	주 저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	시멘트 결합재가 적용된 지오텍스타 일의 접촉면 전단강도 평가	한국농공 학회 논문집	변용훈	제64권 제1호	대한민국	한국농공 학회	비SCIE	2022.1	1738- 3692	100%
2	Internal str ength char acterization o f geotextile tube using miniature co ne	Ocean Eng ineering	변용훈	Volume 26 6	영국	Ocean Eng ineering	SCI	2022.12. 15	0029- 8018	100%

4.1.2 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2020 한국구조물진단 유지관리공학회 여름학술발표회 (발표제목: 위험도 평가를 위한 공학적 판단의 정량화 방안)	허건	2020.07.07	라마다프라자 제주호텔	대한민국
2	2020 한국농공학회 학술발표회 (발표제목: 지반신소재를 활용한 저수지 가물막이 공법 개발 연구)	변용훈	2020.10.16	서울대학교	대한민국
3	2020 한국구조물진단 유지관리공학회 가을학술발표회 (발표제목: 집중호우에 따른 저수지 사고 피해조사 및 향후과제)	허건	2020.11.19	한국과학 기술인회관	대한민국
4	2021 한국지반공학회 가을학술발표회 (발표제목: 시멘트계 결합재가 적용된 지오텍스타일의 마찰력 특성 평가)	변용훈	2021.10.01	aT센터	대한민국
5	2021 한국농공학회 학술발표회 (발표제목: 채움재의 종류에 따른 지오텍스타일 튜브의 형태 변화 평가)	변용훈	2021.11.05	솔비치 진도	대한민국
6	2022 한국농공학회 학술발표회 (발표제목: 월류 시 다층 지오텍스타일 튜브의 거동에 대한 실험적 연구)	변용훈	2022.10.14	대구 인터볼고 호텔	대한민국

4.1.3 지식재산권

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			기여율
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호	등록인	등록일	등록 번호	
1	누수 모니터링 시스템	대한민국	경북대학교 산학협력단	2021. 03.29	10-2021- 0040493		경북대학교 산학협력단	2023. 01.04.	10-24862 62	100%
2	튜브 구조체 및 이를 이용한 제방 방법	대한민국	경북대학교 산학협력단	2022. 03.10	10-2022- 0029926					100%

4.1.4 제품화

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율
1	저수지 감압정 유지관리 모니터링 프로그램	2022.06.01	한국농어촌공사 농어촌 연구원	2022.6.29	C-2022-02 6080	한국저작권 위원회	100%

4.1.5 기술이전

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황
1	기술이전	저수지 감압정 유지관리 모니터링 프로그램 기술이전	(주)지구환경 전문가그룹	2022.8.10	-	-

4.2 연구수행 결과

4.2.1 정성적 연구개발 성과

- 전국에 분포된 농업용저수지의 평균 제원에 해당하는 가물막이 체체 시공에 활용 가능
 - 갈수기에 육상조건으로 급속 시공이 필요한 현장에 효과적으로 활용
 - 홍수기에 높은 안정성 유지가 필수적인 현장에 적용 가능
 - 현장토사가 유용가능하거나, 토취장의 거리가 먼 현장에 효과적으로 활용
 - 저수지 체체 및 기초부 누수에 대한 항구적인 대책공법으로 활용
 - 농업용 저수지 제방 하부 투수성 지반에 감압정 적용 가능
-

4.2.2 정량적 연구개발 성과

- 특허출원 : 2건
 - 특허등록 : 1건
 - 제품화 : 1건 (소프트웨어 프로그램)
 - 논문게재 : 2건, 논문발표 : 6건
 - 기술이전 : 1건 (소프트웨어 프로그램 기술이전)
 - 인력양성 : 1건 (박사 1명)
 - 타 연구활용(매뉴얼 발간) : 2건
-

4.2.3 세부적인 연구개발실적

- 보강 및 차수기능에 적합한 지반신소재 결정 및 채움재 특성 결정 기술
 - 가물막이 요소의 조합/배치 결정 및 구축가능 단면 분석 기술
 - 가물막이 요소간 마찰력 향상을 위한 결합재의 개발 및 마찰특성 평가 기술
 - 지반신소재로 보강된 성토체의 응력해석 및 내/외적 안정성 평가 기술
 - 시공/운영 중 긴급대응 기술 및 시공성과 안정성을 확보한 차수/보강 기술
 - 체체에 최적화된 매립식 탄성과 센서 개발 및 지반재료의 동적특성 평가 기술
 - 저수지 제방의 하중저하를 위한 감압정 설계 기술
 - 용수확보를 위한 감압정 시공 프로세스 정립
-

4.2.4 세부 정량적 연구개발 성과

[과학적 성과]

가. 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	시멘트 결합재가 적용된 지오텍스타일의 접촉면 전단강도 평가	한국농공학회 논문집	변용훈	제64권 제1호	대한민국	한국농공학회	비SCIE	2022.1	1738-3692	100%
2	Internal strength characterization of geotextile tube using miniature cone	Ocean Engineering	변용훈	Volume 266	영국	Ocean Engineering	SCI	2022.12.15	0029-8018	100%

나. 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2020 한국구조물진단 유지관리공학회 여름학술발표회 (발표제목: 위험도 평가를 위한 공학적 판단의 정량화 방안)	허건	2020.07.07	라마다프라자 제주호텔	대한민국
2	2020 한국농공학회 학술발표회 (발표제목: 지반신소재를 활용한 저수지 가물막이 공법 개발 연구)	변용훈	2020.10.16	서울대학교	대한민국
3	2020 한국구조물진단 유지관리공학회 가을학술발표회 (발표제목: 집중호우에 따른 저수지 사고 피해조사 및 향후과제)	허건	2020.11.19	한국과학기술인회관	대한민국
4	2021 한국지반공학회 가을학술발표회 (발표제목: 시멘트계 결합재가 적용된 지오텍스타일의 마찰력 특성 평가)	변용훈	2021.10.01	aT센터	대한민국
5	2021 한국농공학회 학술발표회 (발표제목: 채움재의 종류에 따른 지오텍스타일 튜브의 형태 변화 평가)	변용훈	2021.11.05	썰비치 진도	대한민국
6	2022 한국농공학회 학술발표회 (발표제목: 월류 시 다층 지오텍스타일 튜브의 거동에 대한 실험적 연구)	변용훈	2022.10.14	대구 인터볼고 호텔	대한민국

다. 기술 요약 정보

- 해당사항 없음 -

라. 보고서 원문

- 해당사항 없음 -

마. 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

- 해당사항 없음 -

[기술적 성과]

가. 지식재산권

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			기여율	활용 여부
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호	등록인	등록일	등록 번호		
1	누수 모니터링 시스템	대한민국	경북대학교 산학협력단	2021.03.29	10-2021-0040493		경북대학교 산학협력단	2023.01.04.	10-2486262	100%	활용
2	튜브 구조체 및 이를 이용한 제방 방법	대한민국	경북대학교 산학협력단	2022.03.10	10-2022-0029926					100%	활용

○ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	기타
	√									

나. 저작권

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율
1	저수지 감압정 유지관리 모니터링 프로그램	2022.06.01	한국농어촌공사 농어촌연구원	2022.6.29	C-2022-026080	한국저작권위원회	100%

다. 신기술 지정

- 해당사항 없음 -

라. 기술 및 제품 인증

- 해당사항 없음 -

마. 표준화

- 해당사항 없음 -

[경제적 성과]

가. 시제품 제작

- 해당사항 없음 -

나. 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황
1	기술이전	저수지 감압정 유지관리 모니터링 프로그램 기술이전	(주)지구환경 전문가그룹	2022.8.10	-	-

다. 사업화 투자실적

- 해당사항 없음 -

라. 사업화 현황

- 해당사항 없음 -

마. 매출 실적(누적)

- 해당사항 없음 -

바. 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과		모니터링 시스템 사업화			
사업화 계획	사업화 소요기간(년)	5년			
	소요예산(천원)	37,500			
	예상 매출규모(천원)	현재까지	3년 후	5년 후	
		0	517,500	862,500	
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
			0	50%	50%
0			0	0	
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획	건설단계부터 운영주체까지 호환될 경우 노후 저수지 뿐만 다른 조기경보 시스템등으로 확장 가능				

성과		개발된 지오텍스타일 튜브 제품화			
사업화 계획	사업화 소요기간(년)	5년			
	소요예산(천원)	-			
	예상 매출규모(천원)	현재까지	3년 후	5년 후	
		0	300,000	500,000	
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
			0	200%	30%
0			0	0	
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획	1~3년은 기존 가물막이 등 가시설 시공에 제품 납품, 4~5년은 제방 등 영구구조물에 사용되는 지오투브에 장기물성 적용				

사. 고용 창출

- 해당사항 없음 -

아. 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	0
		생산인력	0
	개발 후	연구인력	2명
		생산인력	3명

자. 비용 절감(누적)

순번	사업화명	발생연도	산정 방법	비용 절감액(천원)
합계				

차. 경제적 파급 효과

(단위: 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수)	기타
해당 연도							
기대 목표							

카. 산업 지원(기술지도)

순번	내용	기간	참석 대상	장소	인원

타. 기술 무역

(단위: 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	기 징수액	총 계약액	해당 연도 징수액	향후 예정액	수출/수입

[사회적 성과]

가. 법령 반영

- 해당사항 없음 -

나. 정책활용 내용

- 해당사항 없음 -

다. 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구분 (설계기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용
1	지침/안내서	신규	감압정 설계 및 시공매뉴얼	2022.12.31	감압정 설계 및 시공
2	지침/안내서	신규	신소재 가물막이 설계 및 시공매뉴얼	2022.12.31	신소재 가물막이 설계 및 시공

라. 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황											
			학위별				성별		지역별					
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타	
1	전문 인력	2022.1	1				1						1	

마. 산업 기술 인력 양성

- 해당사항 없음 -

바. 다른 국가연구개발사업에의 활용

- 해당사항 없음 -

사. 국제화 협력성과

- 해당사항 없음 -

아. 홍보 실적

- 해당사항 없음 -

자. 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
1	포상	우수논문 발표	학술발표 우수논문	김동주 변용훈 손동건 이종섭 강병윤	2022.10.14	한국농공학회

[인프라 성과]

가. 연구시설·장비

- 해당사항 없음 -

4.2.5 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항

인력 양성(박사 1인) (사회적 성과에 반영)

4.3 목표 달성 수준

4.3.1 정성적 연구목표 달성

연구개발목표	달성내용	달성도(%)
지반신소재를 이용한 가물막이 용수기술 확보	- 안정하고 경제적인 가물막이 공법개발을 통해 안정적인 농업용수 확보기술 구현	100
감압정 설치를 통한 제방 안정성 확보	- 감압정 설치를 통한 제방 하부 간극수압 소산 및 침투선 저하로 저수지 제방의 안정성 확보기술 구현	100

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가 내용
감압정 설치 및 감압정 시공 프로세스 정립	5	100	- 감압정 효과확인을 위해 현장실증시험 실시 - 감압정 조사, 설계, 시공 단계별 계획수립
농업용 저수지 감압정 시공 매뉴얼 개발	10	100	- 감압정 현장실증을 통해 시공방법 제시 - 감압정 시공 매뉴얼 작성 보급
농업용 저수지 감압정 유지관리 매뉴얼 개발	15	100	- 감압정을 통한 제체 장기거동을 파악하기 위해 실시간 모니터링 시스템 구축 - 이러한 관리기법을 토대로 유지관리 매뉴얼 작성
가물막이 시설의 모니터링을 위한 계측기 설치 및 데이터 취득	10	100	- 감압정을 통한 제체 장기거동을 파악하기 위해 실시간 모니터링 시스템 구축 - 장기 데이터를 근거로 제체 장기 안정성 평가 실시 ※ 모니터링 전용 프로그램 저작권 확보
수위에 따라 적절한 지반 신소재의 복합적 적용 방법 제시	10	100	- 신소재를 이용한 가물막이 신공법의 효과를 확인하기 위해 현장 실험시험 조건을 내측수위 변화 조건으로 설정하고 그 단계별 수위조건의 전체 거동을 분석함
시공/운용 중 긴급상황에 대비한 가물막이 대책 시나리오 작성	10	100	- 기존 가물막이 공법의 문제점을 파악하고 시공여건을 고려한 긴급상황에 대응가능한 신소재 가물막이 공법을 개발 제시하였음
가물막이 설계 인자 및 프로세스 제시	5	100	- 최적의 신소재 가물막이 공법을 계획단계에서부터 설계 방법 및 시공순서를 최적화하여 매뉴얼을 작성 보급함
지반 신소재를 적용한 가물막이의 설계시 검토 및 고려사항 제공	5	100	- 최적의 신소재 가물막이 공법을 계획단계에서부터 설계 방법 및 시공순서를 최적화하여 매뉴얼을 작성 보급함
구조체 설계에 필요한 지반 신소재 제작 및 제공	10	100	- 현장 토사를 이용 가능한 최적의 지반 신소재를 발굴하기 위해 실내시험을 통해 최적의 소재를 공장 생산하여 실증시험에 반영하였음
가물막이 모형과 시공법을 바탕으로 테스트 베드에 Mock-up construction 제공	20	100	- 가물막이 공법의 현장 적용성을 검증하고자 실험 시험을 실시하고 최적의 공법 조합을 제시함
합계	100		

4.3.2 정량적 연구목표 달성

연구개발목표	달성내용	달성도(%)
- 특허출원 : 1건 - 특허등록 : 1건 - 제품화 : 1건 - 논문개제 : 2건, 논문발표 : 4건 - 기술이전 : 1건 - 타 연구활용(매뉴얼 발간) : 2건	- 특허출원 : 2건 - 특허등록 : 1건 - 제품화 : 1건 (소프트웨어 프로그램) - 논문개제 : 2건, 논문발표 : 6건 - 기술이전 : 1건 (소프트웨어 프로그램 기술이전) - 타 연구활용(매뉴얼 발간) : 2건 - 인력양성 : 1건 (기대하지 않은 효과)	100

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

5.1 기술적 측면

- 보강 및 차수기능에 적합한 지반 신소재 결정 및 채움재 특성 결정 기술
- 가물막이 요소의 조합/배치 결정 및 구축 가능 단면 분석 기술
- 가물막이 요소간 마찰력 향상을 위한 결합재의 개발 및 마찰특성 평가 기술
- 지반 신소재로 보강된 성토체의 응력해석 및 내/외적 안정성 평가 기술
- 시공/운영 중 긴급대응 기술 및 시공성과 안정성을 확보한 차수/보강 기술
- 체체에 최적화된 매립식 탄성과 센서 개발 및 지반재료의 동적특성 평가 기술
- 저수지 제방의 하중저하를 위한 감압정 설계 기술
- 용수확보를 위한 감압정 시공 프로세스 정립

5.2 경제적 · 산업적 측면

- 제품화 : 채움재의 특성에 따른 적합한 인장강도, 투수성능 및 유효구멍 크기를 갖는 지오투브 개발로 현장여건에 맞는 최적의 물성을 규격화. 과제 수행기간 중 인장강도 300/300kN/m (MD/CD), 투수성능 20L/min. 이상의 제품개발 목표. (기존 제품의 물성은 200/200kN/m (MD/CD), 투수각집성능 13L/min. 이상 물성 보유)
- 신사업 창출 : 고투수성 원단을 활용한 지오투브 활용 및 가압식 주입공법 개발을 통해 발전소, 정유화학 플랜트, 제철소 등에서 발생하는 슬러지, 슬래그 등의 폐기물 처리에 활용 가능하며, 하천 및 저수지의 정화작업 및 녹조 처리에도 적용 가능
- 생산계획 : 대운지오텍의 원단 개발, 생산 및 봉제기술을 활용하여 가물막이, 슬러지 처리 등 용도에 맞는 물성과 크기의 지오투브 생산
- 수요처 : 가물막이용 지오투브는 매립지, 산업단지 등 해안의 부지확장공사의 시공사 및 발주처. 슬러지, 슬래그 처리용 지오투브는 플랜트 및 공장의 사업주, 발전소 운영 기관. 정화작업 및 녹조처리용 지오투브는 지자체 및 농어촌공사, 수자원공사로 예상
- 적용계획 : 우선적으로 한국농어촌공사에서 추진하는 수리시설개보수사업 중 가물막이 공종이 필요하고 적용성이 우수한 지구에 대하여 본 기술개발을 통하여 도출된 공법을 시범 적용 추진하여 2023년 3건 시범 추진, 시범 추진 적용 결과에 따라 24년 이후 확대 추진
- 매출계획 : 과제 종료 후 2023년 한국농어촌공사 시범 추진 3건을 포함해 제품납품과 시공으로 국내 150,000,000원, 해외 100,000,000원의 매출발생 기대. 이후 매년 사업 확장 가능 예상

5.3 사회적 측면

- 지반 신소재 가물막이 공법 개발 : 현재까지 저수지 현장에서 적용한 사례가 없어 기술개

발이 완료되면 빠르게 공법 전파가 가능할 것으로 판단됨

- 감압정 시공을 통한 저수지 제방 안정성 확보 : 현재까지 국내 저수지 현장에서 시공된 사례가 없어 효과가 검증될 경우 안전한 농업기반 시설물 관리가 가능함.

5.4 연구개발성과 기술 기여도

(단위 : 백만원, %)

총괄과제명	세부과제명	기관명	유형	총 연구개발비 (A)	정부지원 연구개발비 (B)	정부지원 연구개발비 비율 (C=B/A)	성과 유형	기술기여도	
								산정 근거	비율
저수지 개보수공사 가물막이 공법 및 용수확보 기술 개발	농업용수 용수확보 기술 개발	한국농어촌공사농어촌연구원	출연 연구소 (비영리)	225	225	100.00	해당 없음		
	농업용저수지 가물막이 공법의 설계기술 개발	경북대학교 산학협력단	대학 (비영리)	220	220	100.00	해당 없음		
	저수지 가물막이 공법의 설치 및 해체기술 개발	대운지오택	중소기업 (영리)	366	200	54.64	기존 제품 개선	Ⅰ-①	54.64
	지반신소재로 보강된 가물막이 모니터링 방안 개발	(주)지구환경전문가그룹	중소기업 (영리)	40	40	100.00	기존 제품 개선	Ⅰ-①	100.00
계				851	685	-	-	-	-

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

6.1 최종성과물에 대한 활용방안

최종성과물	최종성과물 활용방안
최종보고서	<ul style="list-style-type: none"> - 전국에 분포된 농업용 저수지의 평균 제원에 해당하는 가물막이 체체 시공에 활용 - 갈수기에 육상조건으로 급속 시공이 필요한 현장에 효과적으로 활용 - 홍수기에 높은 안정성 유지가 필수적인 현장에 적용 가능 - 현장토사가 유용가능하거나, 토취장의 거리가 먼 현장에 효과적으로 활용 - 저수지 체체 및 기초부 누수에 대한 항구적인 대책공법으로 활용 - 농업용 저수지 제방 하부 투수성 지반에 감압정 활용 가능
매뉴얼 (감압정 설계 및 시공매뉴얼)	<ul style="list-style-type: none"> - 간극수압이 크게 작용하거나 연약지반상에 체체의 안정성을 도모하기 위해 감압정 시설 설치가 필요함 - 본 매뉴얼은 최적의 기능을 발휘할 수 있도록 설계 및 시공 실무자에게 감압정에 관한 자료를 제공
매뉴얼 (신소재 가물막이 설계 및 시공매뉴얼)	<ul style="list-style-type: none"> - 신소재 타입의 가물막이 공법을 개발하여 현장 적용에 관한 보급을 도모하고자 매뉴얼을 제작하여 실무자에게 편의를 제공

6.2 최신기술 동향을 반영한 사업화 전략 도출

6.2.1 공사현장 적용 방안

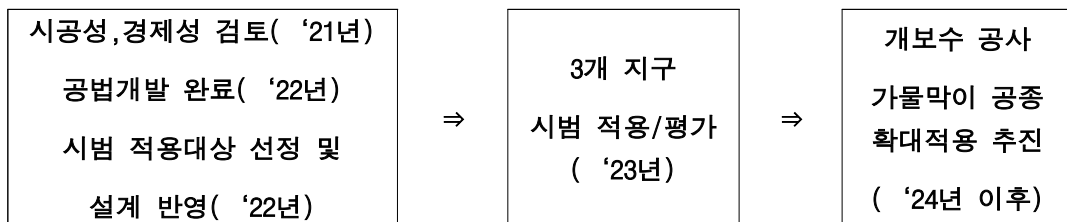
가물막이 및 감압정 설계 매뉴얼 제공을 통한 한국 농어촌공사 및 지자체 관리 농업용 저수지 개보수사업 또는 재해 위험 저수지 가물막이 설계지구(130여 지구/년)에 반영하여 공사 현장에 적용 가능하다.

6.2.2 공사현장 사업화 전략

- 제품화 : 채움재의 특성에 따른 적합한 인장강도, 투수성능 및 유효구멍 크기를 갖는 지오투브 개발로 현장여건에 맞는 최적의 물성을 규격화하였으며, 과제 수행기간 중 인장강도 300/300kN/m (MD/CD), 투수성능 20L/min. 이상의 제품개발 하여 기존제품과의 차별화 (기존 제품의 물성은 200/200kN/m (MD/CD), 투수성능 13L/min. 이상 물성 보유)
- 신사업 창출 : 고투수성 원단을 활용한 지오투브 활용 및 가압식 주입공법 개발을 통해

발전소, 정유화학 플랜트, 제철소 등에서 발생하는 슬러지, 슬래그 등의 폐기물 처리에 활용 가능하며, 하천 및 저수지의 정화작업 및 녹조 처리에도 적용 가능

- 생산계획 : 대운지오텍의 원단 개발, 생산 및 봉제기술을 활용하여 가물막이, 슬러지 처리 등 용도에 맞는 물성과 크기의 지오투브 생산
- 수요처 : 가물막이용 지오투브는 매립지, 산업단지 등 해안의 부지확장공사의 시공사 및 발주처. 슬러지, 슬래그 처리용 지오투브는 플랜트 및 공장의 사업주, 발전소 운영 기관. 정화작업 및 녹조처리용 지오투브는 지자체 및 농어촌공사, 수자원공사로 예상
- 적용계획 : 우선적으로 한국농어촌공사에서 추진하는 수리시설개보수사업 중 가물막이 공종이 필요하고 적용성이 우수한 지구에 대하여 본 기술개발을 통하여 도출된 공법을 시범 적용 추진하여 2023년 3건 시범 추진, 시범 추진 적용 결과에 따라 24년 이후 확대 추진
- 매출계획 : 과제 종료 후 2023년 한국농어촌공사 시범 추진 3건을 포함해 제품납품과 시공으로 국내 150,000,000원, 해외 100,000,000원의 매출발생 기대. 이후 매년 사업 확장 가능 예상



[그림 6-1] 개발된 공법의 사업화 추진 과정

6.2.3 모니터링 시스템 활용 방안 및 기대효과

감압정 설치에 수치해석이 필요하면 본 연구에서 개발한 모니터링 시스템을 활용할 수 있다. 또한 현재 실시간 계측, 조사 및 탐사 결과의 관리 등을 D/B를 확보하고 모니터링 하기 위한 독립 시스템으로 활용 가능하다. 또한 D/B프로그램은 계측 센서의 RAW자료를 저장하고 관리할 수 있어 향후 빅데이터 분석 등에 활용 가능성이 크다. 감압정 관리 시스템은 D/B와 모니터링 프로그램과 연계되어 수향하며 지자체 및 관리주체에서 활용 가능하다.



[그림 6-2] 모니터링 시스템 활용 계획 및 방안

지속적인 프로그램 개발을 통해서 프로그램 조작의 편리성, 유지보수성, 신뢰성, 가격 경쟁력 확보하여, 건설단계 및 운영주체 연계 호환이 가능한 모니터링시스템 구축할 수 있다. 이는 단순 계측데이터 확보가 목적이 아닌 분석(간극수압, 지하수위), 조기 경보전파시스템에 연계하여 실시간 대응이 가능하다.



[그림 6-3] 감압정 및 가물막이 모니터링 시스템 활용 계획 및 방안

6.3 연구개발성과 활용계획표

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내				
		2023	2024	2025	2026	2027
국외논문	SCIE					
	비SCIE					
국내논문	SCIE					
	비SCIE		1			
특허출원	국내					
	국외					
특허등록	국내					
	국외					
인력양성	학사					
	석사					
	박사					
사업화	시제품개발					
	상품출시					
	기술이전					
	공정개발					
	매출액(단위 : 천원)	112,500	187,500	187,500	187,500	187,500
	기술료(단위 : 천원)	3,071	5,118	5,118	5,118	5,118
비임상시험 실시						
임상시험 실시 (IND 승인)	의약품	1상				
		2상				
		3상				
	의료기기					
진료지침개발						
신의료기술개발						
성과홍보						
포상 및 수상실적						
정성적 성과 주요 내용						

7. 참고문헌

1. Alvarez, I.E., Rubio, R., Ricalde, H., 2007. Beach restoration with geotextile tubes as submerged breakwaters in Yucatan, Mexico. *Geotext. Geomembr.* 25, 233-241.
2. Bolton, M.D., Gui, M.W., Garnier, J., Corte, J.F., Bagge, G., Laue, J., Renzi, R., 1999. Centrifuge cone penetration tests in sand. *Géotechnique.* 49, 543-552.
3. Bustmante, M., Gianceselli, L., 1982. Pile bearing capacity prediction by means of static penetrometer CPT, in: *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, Vol. 2.* Balkema, Amsterdam, the Netherlands, pp. 493-500.
4. Byun, Y.H., Kim, J.H., Lee, J.S., 2013. Cone penetrometer with a helical-type outer screw rod for evaluation of the subgrade condition. *J. Transp. Eng.* 139, 115-122.
5. Cantré, S., 2002. Geotextile tubes—Analytical design aspects. *Geotext. Geomembr.* 20, 305-319.
6. Cho, S.M., Jeon, B.S., Park, S.I., Yoon, H.C., 2008. Geotextile tube application as the cofferdam at the foreshore with large tidal range for Incheon bridge project, in: *Geosynthetics Civ. Environ. Eng. Heidelb.* 591-596.
7. Das Neves, L., Moreira, A., Taveira-Pinto, F., Lopes, M.L., Veloso-Gomes, F., 2015. Performance of submerged nearshore sand-filled geosystems for coastal protection. *Coast. Eng.* 95, 147-159.
8. Fowler, J., Bagby, R.M., Trainer, E., 1996. Dewatering sewage sludge with geotextile tubes, in: *Proceedings of the 49th Canadian Geotechnical Conference.* St John's, NLE, Canada, pp. 129-137.
9. Hirst, T. J., Richards, A. F., Inderbitzen, A. L., 1972. *A static cone penetrometer for ocean sediments.* ASTM International.
10. ISO 12956, 1999. *Geotextiles and Geotextile-Related Products—Determination of the Characteristic Opening Size.*
11. Karadoğan, Ü., Çevikbilen, G., Korkut, S., Pasaoglu, M. E., & Teymur, B., 2022. Dewatering of Golden Horn sludge with geotextile tube and determination of optimum operating conditions: A novel approach. *Mar. Georesources Geotechnol.* 40, 782-794.
12. Kim, D.J., Son, D. G., Lee, J. S., Kang, T. H. K., Yun, T. S., Byun, Y. H., 2022. Characterization of stacked geotextile tube structure using digital image correlation. *The 2022 Structures Congress, Seoul, Korea, 2022.*
13. Kim, H.J., Dinoy, P.R., 2021. Two-dimensional consolidation analysis of

- geotextile tubes filled with fine-grained material. *Geotext. Geomembr.* 49, 1149-1164.
14. Kim, H. J., Dinoy, P. R., Kim, H. S., 2020. Tension force analysis of geotextile tubes by half cross-section test. *Geotext. Geomembr.* 48, 243-256.
 15. Kim, H.J., Won, M.S., Lee, K.H., Jamin, J.C., 2016a. Model tests on dredged soil-filled geocontainers used as containment dikes for the Saemangeum reclamation project in South Korea. *Int. J. Geomech.* 16, 04015055.
 16. Kim, H.J., Won, M.S., Jamin, J.C., Joo, J.H., 2016b. Numerical and field test verifications for the deformation behavior of geotextile tubes considering 1D and areal strain. *Geotext. Geomembr.* 44, 209-218.
 17. Kim, R., Lee, W., Lee, J.S., 2010. Temperature-compensated cone penetration test mini-cone using fiber optic sensors. *Geotech. Test. J.* 33, 243-252.
 18. Kim, S.Y., Hong, W.T., Lee, J.S., 2019. Role of the coefficient of uniformity on the California bearing ratio, penetration resistance, and small strain stiffness of coarse arctic soils. *Cold Reg. Sci. Technol.* 160, 230-241.
 19. Koerner, G.R., Koerner, R.M., 2006. Geotextile tube assessment using a hanging bag test. *Geotext. Geomembr.* 24, 129-137.
 20. Koh, J.W., Chew, S.H., Chua, K.E., Yim, H.M.A., Gng, Z.X., 2020. Effect of construction sequence on the performance of geotextile tubes in a containment bund. *Int. J. Geomate.* 19, 1-7.
 21. Khachan, M. M., Bhatia, S. K., 2016. Influence of fibers on the shear strength and dewatering performance of geotextile tubes. *Geosynth. Int.* 23, 317-330.
 - Lawson, C.R., 2008. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering. *Geosynth. Int.* 15, 384-427.
 22. Leshchinsky, D., Leshchinsky, O., Ling, H.I., Gilbert, P.A., 1996. Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: Some design aspects. *J. Geotech. Eng.* 122, 682-690.
 23. Lee, W., Shin, D.H., Yoon, H.K., Lee, J.S., 2009. Micro-cone penetrometer for more concise subsurface layer detection. *Geotech. Test. J.* 32, 358-364.
 24. Man, X.L., Shu, Y.M., Yu, C.L., Hao, X.H., Li, S.P., 2018. Effect of cyclic wave loading on scouring stability of geotube dams. *Ocean Eng.* 152, 1-5.
 25. McCafferty, C., Hsuan, G., 2020. Analyzing filtration flow rate change of woven geotextiles for fine grained slurries. *Geosynth. Int.* 27, 655-661.

26. Moo-Young, H.K., Tucker, W.R., 2002. Evaluation of vacuum filtration testing for geotextile tubes. *Geotext. Geomembr.* 20, 191-212.
27. Oh, Y.I., Shin, E.C., 2006. Using submerged geotextile tubes in the protection of the E. Korean shore. *Coast. Eng.* 53, 879-895.
28. Palmeira, E.M., Melo, D.L.A., Moraes-Filho, I.P., 2019. Geotextile filtration opening size under tension and confinement. *Geotext. Geomembr.* 47, 566-576.
29. Puech, A., Foray, P., 2002. Refined model for interpreting shallow penetration CPTs in sands. In *Offshore Technology Conference*. OnePetro.
30. Shin, E.C., Kang, J.K., Kim, S.H., Park, J.J., 2016. Construction technology of environmental sustainable shore and harbor structures using stacked geotextile tube. *KSCE J. Civ. Eng.* 20, 2095-2102.
31. Shin, E.C., Oh, Y.I., 2002. Installation technology and behavior of silty clay filled geotextile tube. *J. Korean Geosynth Soc.* 1, 13-21.
32. Shin, E.C., Oh, Y.I., 2003. Analysis of geotextile tube behaviour by large-scale field model tests. *Geosynth. Int.* 10, 134-141.
33. Shin, E.C., Oh, Y.I., 2007. Coastal erosion prevention by geotextile tube technology. *Geotext. Geomembr.* 25, 264-277.
34. Tumay, M.T., Kurup, P.U., 2001. Development of a continuous intrusion miniature cone penetration test system for subsurface explorations. *Soils Found.* 41, 129-138.
35. Van Steeg, P., Vastenburg, E.W., 2010. Large Scale Physical Model Tests on the Stability of Geotextile Tubes. *Deltares Report 1200162-000*.
36. Wang, J.J., Zhang, H.P., Tang, S.C., Liang, Y., 2013. Effects of particle size distribution on shear strength of accumulation soil. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 139, 1994-1997.
37. Yang, H., Russell, A. R., 2015. Cone penetration tests in unsaturated silty sands. *Can. Geotech. J.* 53, 431-444.
38. Yee, T.W., Lawson, C.R., 2012. Modelling the geotextile tube dewatering process. *Geosynth. Int.* 19, 339-353.
39. Yoon, H.K., Truong, Q.H., Byun, Y.H., Lee, J.S., 2015. Capillary effect in salt-cemented media of particle sizes. *J. Appl. Geophys.* 112, 20-28.
40. Yoon, H.K., Lee, J.S., 2012. Microcones configured with full-bridge circuits. *Soil Dyn. Earthquake Eng. Elsevier.* 41, 119-127.

41. 한국농어촌공사, 2018. 농업생산기반정비통계연보
42. 손재권, 구자용, 최진규, 1997. 저수지 준설대상 토양의 이화학적 특성. 한국농공학회지. 39(3), 96-107.
43. 김형주, 2016. 준설토를 활용한 토목섬유 튜브 구조체의 최적 설계기법 연구.
44. 농림축산식품부, 2019. 농업생산기반시설 설계기준
45. Li, H., Chen, H., Liu, L., Zhang, F., Han, F., Lv, T., ... & Yang, Y., 2016. Application design of concrete canvas (CC) in soil reinforced structure. Geotextiles and Geomembranes, 44(4), 557-567.
46. 김낙석, 홍은철, 조신행., 2009. 직접 전단 실험을 통한 배수성포장용 텍코트 특성 평가. 한국방재학회논문집, 9(1), 27-32.
47. Ouria, A., Mahmoudi, A., 2018. Laboratory and numerical modeling of strip footing on geotextile-reinforced sand with cement-treated interface. Geotextiles and Geomembranes, 46(1), 29-39.
48. Lee, K. M., Manjunath, V. R., 2000. Soil-geotextile interface friction by direct shear tests. Canadian geotechnical journal, 37(1), 238-252.
49. 서민우, 김동진, 박준범, 박인준., 2002. 토목섬유 점토 차수재 (GCL) 와 지오멤브레인 (GM) 의 접촉 전단강도 평가. 한국지반공학학회논문집, 18(4), 137-146.
50. 김세진, 윤희정., 2016. HDPE 표면처리 지오멤브레인의 경계면 전단강도에 관한 연구. 한국지반환경공학회 논문집, 17(2), 41-49.
51. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2020. Standard Test Method for Determining the Internal and Interface Shear Strength of Geosynthetic Clay Liner by the Direct Shear Method, D6243
52. 김정환, 2017. 토목섬유를 이용한 제방축조 및 슬러지 탈수
53. American Association of State Highway and Transportation Officials, 1990. Task Force 25 report: Guide specifications for geotextiles in separation applications.
54. Khalilzad, M., Gabr, M. A. 2011. External stability of geotubes subjected to wave loading. In Geo-Risk 2011: Risk Assessment and Management (pp. 1044-1054).
55. Kim, M., Freeman, M., FitzPatrick, B. T., Nevius, D. B., Plaut, R. H., Filz, G. M., 2004. Use of an apron to stabilize geomembrane tubes for fighting floods. Geotextiles and Geomembranes, 22(4), 239-254.
56. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2002. Standard test methods for Preparation and Testing of controlled low strength material(CLSM) Test

Cylinders, D4832.

57. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2004. Standard Test Method for Flow Consistency of Controlled Low Strength Material (CLSM), D6103
58. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2013. Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, C191
59. Gibeaut, J. C., Hepner, T., Gutierrez, R., Waldinger, R., Smyth, R., & Andrews, J. L, 2001. Geotubes for Temporary Erosion Control and Storm Surge Protection Along Gulf of Mexico Shoreline of Texas.
60. Kim, H. G, 2004. The construction method using a Geo-textile Tube. Daelim technical information, 114-123 (in Korean).
61. Koffler, A., Choura, M., Bendriss, A., & Zengerink, E, 2008. Geosynthetics in protection against erosion for river and coastal banks and marine and hydraulic construction. *Journal of coastal conservation* 12(1): 11-17. doi: 10.1007/s11852-008-0023-x
62. Lee, K. H., Lee, J. S, 2010. A Case Study on Temporary Road Using Geotextile Mat. *Journal of the Korean Geosynthetics Society Conference*, 89-96 (in Korean).
63. Lee, K., Choi, S. W., Kim, D., & Lee, C, 2018. Numerical Study on Direct Shear Test of Composite Shotcrete with Sprayable Waterproofing Membrane. *Journal of the Korean Geosynthetics Society* 17(4): 189-197 (in Korean). doi:10.12814/jkgss.2018.17.4.189
64. Ouria, A., & Mahmoudi, A, 2018. Laboratory and numerical modeling of strip footing on geotextile-reinforced sand with cement-treated interface. *Geotextiles and Geomembranes* 46(1): 29-39. doi: 10.1016/j.geotexmem.2017.09.003
65. Park, J. G., Ko, J. H., & Park, T. S, 2013. Behavior Analysis of the Saemangum Waterproof Embankment Applying Geotextile Tube Method and Example of Field Test-In Concentration of Reviewing the Construction and Design Process. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 55(4): 155-165 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2013.55.6.155
66. Park, J. J., Kim, S. H., & Shin, E. C, 2008. Case history of sea dyke construction using geotextile mat. *Journal of the Korean Geosynthetics Society* 7(2): 7-13 (in Korean).
67. Seo, M. W., Kim, D. J., Park, J. B., & Park, I. J, 2002. An Evaluation of Interface Shear Strength between Geosynthetic Clay Liner and Geomembrane. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 18(4): 137-146 (in Korean).

68. Shin, E. C., Kim, S. H., & Oh, J. Y, 2010. Case History of Construction Geotextile Tube Method in Koreaa-The Problem and Solution. In The fall Korean Geosynthetics Society Conference, 135-147 (in Korean).
69. Zornberg, J. G., McCartney, J. S. & Swan, R. H. Jr, 2005. Analysis of a large database of GCL internal shear strength results. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 131(3): 367-380. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:3(367)
70. 국토교통부, 2021. 바이오폴리머 신소재 제방 내부침식 평가 및 기술 가이드

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 농업기반 및 재해대응기술개발사업 연구보고서입니다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 농림축산식품부(농림식품기술기획평가원)에서 시행한 농업기반 및 재해대응기술개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.

자체평가 의견서

1. 과제현황

		과제번호	320045-3		
사업구분	농업기반 및 재해대응기술개발사업				
연구분야				과제구분	단위
사업명	-				주관
총괄과제	-			총괄책임자	-
과제명	저수지 개보수공사 가물막이 공법 및 용수확보 기술 개발			과제유형	응용, 개발
연구개발기관	한국농어촌공사 농어촌연구원			연구책임자	강병윤
연구기간 연구개발비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차년도	2020.4~2020.12	187,000	-	187,000
	2차년도	2021.1~2021.12	249,000	-	249,000
	3차년도	2022.1~2022.12	249,000	-	249,000
		이	하	여	백
	계		685,000		685,000
참여기업	경북대학교 산학협력단, 대운지오텍(주), ㈜지구환경전문가그룹				
상대국			상대국 연구개발기관		


2. 평가일 :

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
한국농어촌공사 농어촌연구원	수석연구원	강병윤

4. 평가자(연구책임자) 확인 :

본인은 평가대상 과제에 대한 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확약하며, 본 자료가 전문가 및 전문기관 평가 시에 기초자료로 활용되기를 바랍니다.

확약	
----	---

1. 연구개발 실적

1. 연구개발 결과의 우수성/창의성

■ 등급 : 우수

- 기존의 가물막이 공법의 문제점을 개선하기 위해 현장토사를 우선적으로 활용한 경제성이 확보된 지반 신소재 활용 개선된 공법을 개발하였으며 안정성을 확보하기 위해 구조체 공극간에 결합재를 사용하여 수밀성이 확보되어 더욱 안정성이 확보된 공법으로 판단된다.
- 또한, 감압정을 이용한 제체 하부지반 간극수압 배제, 제체 침윤선 저하등의 효과로 제체의 안정성을 도모하는 공법은 국내 최초 현장실증 연구를 추진한 점으로 높이 평가된다.

2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : 우수

- 기존의 가물막이 공법의 안정성 부족, 과대 공사비 문제점으로 인해 공사현장에 많은 애로사항이 있었으며 본 연구 결과가 현장에 적용할 경우 상당의 시공 및 경제성 효과가 있을 것으로 판단된다.
- 또한, 국내 최초의 감압정(Relief Well)의 경우 저렴한 공사비로 노후 저수지의 안정성 확보가 가능하여 노후된 농업기반시설물에 확대 적용이 가능하다고 판단된다.

3. 연구개발 결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : 우수

- 본 연구결과는 통상적인 가물막이 공법을 현장 시공성의 문제점을 해결하여 경제적이고 안전한 공법구현을 목표로 하였으며 농업기반시설물 개보수 현장에 폭넓은 활용이 가능할 것으로 판단된다.
- 감압정 공법의 경우 기존 노후된 농업기반시설물(저수지) 유지관리에 적극 활용하여 제체 안정성 확보가 가능하다고 판단된다.

4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : 우수

- 본 연구는 기존 가물막이 공법의 경제성 및 부실시공 대응 안전확보등의 사회적 욕구를 해결하기 위해 추진되었으며 조기 현장적용을 위해 제한된 연구비내에서 현장실증시험까지 포함하여 추진하였다.
- 특히, 감압정 공법의 경우 즉시 현장적용이 가능하여 연구성과 극대화가 가능하다.

5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : 우수

[논문 게재]									
번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)
1	시멘트 결합재가 적용된 지오텍스타일의 접촉면 전단강도 평가	한국농공학회 논문집	변용훈	제64권 제1호	대한민국	한국농공학회	비SCIE	2022.1	1738-3692
2	Internal strength characterization of geotextile tube using miniature cone	Ocean Engineering	변용훈	Volume 266	영국	Ocean Engineering	SCI	2022.12.15	0029-8018

[학술발표]						
번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명	
1	2020 한국구조물진단 유지관리공학회 여름학술발표회 (발표제목: 위험도 평가를 위한 공학적 판단의 정량화 방안)	허건	2020.07.07	라마다프 라자 제주호텔	대한민국	
2	2020 한국농공학회 학술발표회 (발표제목: 지반신소재를 활용한 저수지 가물막이 공법 개발 연구)	변용훈	2020.10.16	서울대학교	대한민국	
3	2020 한국구조물진단 유지관리공학회 가을학술발표회 (발표제목: 집중호우에 따른 저수지 사고 피해조사 및 향후과제)	허건	2020.11.19	한국과학기술인회관	대한민국	
4	2021 한국지반공학회 가을학술발표회 (발표제목: 시멘트계 결합재가 적용된 지오텍스타일의 마찰력 특성 평가)	변용훈	2021.10.01	aT센터	대한민국	
5	2021 한국농공학회 학술발표회 (발표제목: 채움재의 종류에 따른 지오텍스타일 튜브의 형태 변화 평가)	변용훈	2021.11.05	쓸비치진도	대한민국	
6	2022 한국농공학회 학술발표회 (발표제목: 월류 시 다층 지오텍스타일 튜브의 거동에 대한 실험적 연구)	변용훈	2022.10.14	대구 인터볼고 호텔	대한민국	

[지적재산권]										
번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록번호	등록인	등록일	등록번호	
1	누수 모니터링 시스템	대한민국	경북대학교 산학협력단	2021.03.29	10-2021-0040493		경북대학교 산학협력단	2023.01.04.	10-2486262	100%
2	튜브 구조체 및 이를 이용한 제방 방법	대한민국	경북대학교 산학협력단	2022.03.10	10-2022-0029926					100%

[기술실시(이전)]						
번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황
1	기술이전	저수지 감압정 유지관리 모니터링 프로그램 기술이전	(주)지구환경전문가그룹	2022.8.10	-	-

[전문인력 양성]														
번호	분류	기준 연도	현황											
			학위별				성별		지역별					
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타	
1	전문인력	2022.1	1				1						1	

[우수논문발표상]						
번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
1	포상	우수논문발표	학술발표 우수논문	김동주, 변용훈, 손동건 이종섭, 강병운	2022.10.14	한국농공학회

II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
감압정 설치 및 감압정 시공 프로세스 정립	5	100	- 감압정 효과확인을 위해 현장실증시험 실시 - 감압정 조사, 설계, 시공 단계별 계획수립
농업용 저수지 감압정 시공 매뉴얼 개발	10	100	- 감압정 현장실증을 통해 시공방법 제시 - 감압정 시공 매뉴얼 작성 보급
농업용 저수지 감압정 유지관리 매뉴얼 개발	15	100	- 감압정을 통한 제체 장기거동을 파악하기 위해 실시간 모니터링 시스템 구축 - 이러한 관리기법을 토대로 유지관리 매뉴얼 작성
가물막이 시설의 모니터링을 위한 계측기 설치 및 데이터 취득	10	100	- 감압정을 통한 제체 장기거동을 파악하기 위해 실시간 모니터링 시스템 구축 - 장기 데이터를 근거로 제체 장기 안정성 평가 실시 ※ 모니터링 전용 프로그램 저작권 확보
수위에 따라 적절한 지반 신소재의 복합적 적용 방법 제시	10	100	- 신소재를 이용한 가물막이 공법의 효과를 확인하기 위해 현장 실험시험 조건을 내측수위 변화 조건으로 설정하고 그 단계별 수위조건의 전체 거동을 분석함
시공/운용 중 긴급상황에 대비한 가물막이 대책 시나리오 작성	10	100	- 기존 가물막이 공법의 문제점을 파악하고 시공여건을 고려한 긴급상황에 대응가능한 신소재 가물막이 공법을 개발 제시하였음
가물막이 설계 인자 및 프로세스 제시	5	100	- 최적의 신소재 가물막이 공법을 계획단계에서부터 설계 방법 및 시공순서를 최적화하여 매뉴얼을 작성 보급함
지반 신소재를 적용한 가물막이의 설계시 검토 및 고려사항 제공	5	100	- 최적의 신소재 가물막이 공법을 계획단계에서부터 설계 방법 및 시공순서를 최적화하여 매뉴얼을 작성 보급함
구조체 설계에 필요한 지반 신소재 제작 및 제공	10	100	- 현장 토사를 이용 가능한 최적의 지반 신소재를 발굴하기 위해 실내시험을 통해 최적의 소재를 공장생산하여 실증시험에 반영하였음
가물막이 모형과 시공법을 바탕으로 테스트 베드에 Mock-up construction 제공	20	100	- 가물막이 공법의 현장 적용성을 검증하고자 실험 시험을 실시하고 최적의 공법 조합을 제시함
합계	100점		

III. 종합의견

1. 연구개발결과에 대한 종합의견

- 연구결과에 따른 저비용 및 높은 안정성의 가물막이 기술의 체계 정립으로 노후화가 진행된 대부분의 농업용 저수지의 개보수사업의 실효성 증대 예상
 - 농업생산기반정비사업 통계연보(2017)에 따르면, 전국 총 17,313개의 농업용저수지 중 내구연한 50년을 넘긴 저수지의 수는 14,106개로 약 81.5%에 이룸
- 본 과제에서 개발되는 지반신소재로 구성된 가물막이 기술 공법은 가물막이 요소간 결합력 증대 및 채움재의 동적특성 모니터링 기술을 통하여 농업기반 재해대응 관련시장에 경쟁력 확보 전망
 - 특히, 매립식 탄성과 센서시스템을 통한 현장 지반재료의 동적특성 모니터링 기법은 국내/외 수준을 고려할 경우 세계적 원천기술 확보가능
- 농업용수 용수확보 기술로 개발되는 감압정 공법은 저수지의 누수발생에 대한 항구적인 대책 공법으로 활용 전망
 - 누수 발생에 대한 기존 대책공법인 그라우팅 공법에 비하여 상대적으로 저비용이며 항구적인 대책공법으로 선진국에서는 적용 중
 - 또한, 누수 발생으로 인한 재해 우려로 저수지의 수위를 인위적으로 낮추어 관리하는 시설의 수위를 최대가능 수위(Full Water Level)까지 높일 수 있게 되어 추가적인 농업용수 확보 가능

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

- 해당사항 없음

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

- 본 연구를 통해 개발한 감압정 및 신소재 가물막이 공법에 대한 현장 보급을 위해 농업기반시설물 신규 개보수 사업을 대상으로 설계 실무자 공청회 또는 교육, 자료제공 등을 후속조치가 필요함

IV. 보안성 검토

- 해당사항 없음

※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성함.

1. 연구책임자의 의견

본 연구의 내용은 저수지 개보수공사 가물막이 공법 및 용수확보 기술 개발 과제로서, 보안성 필요에 해당하는 사항이 없음

2. 연구개발기관 자체의 검토결과

본 연구 개발내용은 보안성 과제에 해당하는 사항이 없음

연구성과 활용계획서

1. 연구과제 개요

사업추진형태	<input type="checkbox"/> 자유응모과제 <input checked="" type="checkbox"/> 지정공모과제	분 야		
연구과제명	저수지 개보수공사 가물막이 공법 및 용수확보 기술 개발			
주관연구개발기관	한국농어촌공사 농어촌연구원		주관연구책임자	강병운
연구개발비	정부지원 연구개발비	기관부담연구개발비	기타	총연구개발비
	685,000,000	166,000,000		851,000,000
연구개발기간	2020.04.29 - 2022.12.31(2년 9개월)			
주요활용유형	<input type="checkbox"/> 산업체 이전 <input type="checkbox"/> 교육 및 지도 <input type="checkbox"/> 정책자료 <input checked="" type="checkbox"/> 기타(설계, 시공) <input type="checkbox"/> 미활용 (사유:			

2. 연구목표 대비 결과

당초목표	당초연구목표 대비 연구결과
①지반신소재를 이용한 가물막이 용수기술 확보	안정하고 경제적인 가물막이 공법개발을 통해 안정적인 농업용수 확보기술 구현
②감압정 설치를 통한 제방 안정성 확보	감압정 설치를 통한 제방 하부 간극수압 소산 및 침윤선 저하로 저수지 제방의 안정성 확보기술 구현

* 결과에 대한 의견 첨부 가능

3. 연구목표 대비 성과

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표										연구기반지표									
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				기술 인증	학술성과				교육 지도	인력 양성	정책 활용· 홍보		기 타 (타연구활용등)
	특허 출원	특허 등록	품종 등록	S M A R T	건 수	기 술 료	제 품 화	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출		투 자 유 치	논 문	비 S C I	논 문 평 균 I F			학 술 발 표	정 책 활 용	
건	건	건	건	건	백 만 원	건	백 만 원	백 만 원	명	백 만 원	건	건	건	건	명	건	건	건		
가중치	15	15			15		25							10					20	
최종 목표	1	1			1		1					1	1	4					2	
연구기간내 달성실적	2	1			1		1					1	1	6	1				2	
달성률 (%)	200	100			100		100					100	100	150					100	

4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	보강 및 차수기능에 적합한 지반 신소재 결정 및 채움재 특성 결정 기술
②	가물막이 요소의 조합/배치 결정 및 구축가능 단면 분석 기술
③	가물막이 요소간 마찰력 향상을 위한 결합재의 개발 및 마찰특성 평가 기술
④	지반신소재로 보강된 성토체의 응력해석 및 내/외적 안정성 평가 기술
⑤	시공/운영 중 긴급대응 기술 및 시공성과 안정성을 확보한 차수/보강 기술
⑥	제체에 최적화된 매립식 탄성파 센서 개발 및 지반재료의 동적특성 평가 기술
⑦	저수지 제방의 하중저하를 위한 감압정 설계 기술
⑧	용수확보를 위한 감압정 시공 프로세스 정립

5. 연구결과별 기술적 수준

구분	핵심기술 수준					기술의 활용유형(복수표기 가능)				
	세계 최초	국내 최초	외국기술 복제	외국기술 소화·흡수	외국기술 개선·개량	특허 출원	산업체이전 (상품화)	현장애로 해결	정책 자료	기타
①의 기술								√		
②의 기술								√		
③의 기술								√		
④의 기술								√		
⑤의 기술		√					√	√		
⑥의 기술	√	√				√	√	√		
⑦의 기술		√					√	√	√	
⑧의 기술		√						√		√

* 각 해당란에 v 표시

6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과 활용계획 및 기대효과
①의 기술	개발된 지반신소재를 이용하여 경제적이고 시공이 용이한 신소재 구조체 조성기술 구현가능
②의 기술	최적화된 구조체 배치를 통해 안정적이고 경제적인 배치가 가능
③의 기술	수밀성이 확보된 가물막이 구조체 조성기술 확보, 향후 구속력이 강한 결합재 개발 필요
④의 기술	신소재 가물막이 최적 규모를 결정하기 위해 설계단계에서 지원 가능한 프로세스 정립
⑤의 기술	기존 가물막이 공법의 문제점에 대응가능한 안정적인 구조체 개발
⑥의 기술	지진시 가물막이 구조체 동적거동 파악이 가능하고 안정적인 구조체 평가 가능
⑦의 기술	제체 침윤선 저하 및 하부지반 간극수압 조기 저감을 통해 제체 안정성 확보
⑧의 기술	유지관리가 용이하고 노후 제체의 안정성을 도모가능한 감압정 시공기술 확보

7. 연구종료 후 성과창출 계획

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표										연구기반지표									
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				기술인증	학술성과			교육지도	인력양성	정책 활용· 홍보		기타 (타연구활용외)	
	특허출원	특허등록	품종보호권	S M A R T	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용창출		투자유치	논문				학술발표	정책 활용		홍보 전시
													S C I	비 S C I						
단위	건	건	건	건	건	건	백만원	백만원	백만원	명	건	건	건	명	건	건				
가중치	15	15			15		25							10			20			
최종 목표	1	1			1		1					1	1	4			2			
연구기간내 달성실적	2	1			1		1					1	1	6	1		2			
연구종료후 성과창출 계획							2	20						1			1			

8. 연구결과의 기술이전조건(산업체 이전 및 상품화 연구결과에 한함)

핵심기술명 ¹⁾	저수지 감압정 유지관리 모니터링 시스템 기술실시		
이전형태	<input type="checkbox"/> 무상 <input checked="" type="checkbox"/> 유상	기술료 예정액	매출액의 5%
이전방식 ²⁾	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input checked="" type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 통상실시권 <input type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타()		
이전소요기간	2년	실용화 예상시기 ³⁾	2024년
기술이전시 선행조건 ⁴⁾	기술지도 등		

연구성과 활용계획서

1. 연구과제 개요

사업추진형태	<input type="checkbox"/> 자유응모과제 <input checked="" type="checkbox"/> 지정공모과제		분 야		
연구과제명	저수지 개보수공사 가물막이 공법 및 용수확보 기술 개발				
주관연구개발기관	한국농어촌공사 농어촌연구원			주관연구책임자	강병운
연구개발비	정부지원 연구개발비	기관부담연구개발비	기타	총연구개발비	
	685,000,000	166,000,000		851,000,000	
연구개발기간	2020.04.29 - 2022.12.31(2년 9개월)				
주요활용유형	<input type="checkbox"/> 산업체 이전 <input type="checkbox"/> 미활용 (사유:		<input type="checkbox"/> 교육 및 지도	<input type="checkbox"/> 정책자료	<input checked="" type="checkbox"/> 기타(설계, 시공)

2. 연구목표 대비 결과

당초목표	당초연구목표 대비 연구결과
①지반신소재를 이용한 가물막이 용수기술 확보	안정하고 경제적인 가물막이 공법개발을 통해 안정적인 농업용수 확보기술 구현
②감압정 설치를 통한 제방 안정성 확보	감압정 설치를 통한 제방 하부 간극수압 소산 및 침윤선 저하로 저수지 제방의 안정성 확보기술 구현

* 결과에 대한 의견 첨부 가능

3. 연구목표 대비 성과

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표										연구기반지표									
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				기술 인증	학술성과				교육 지도	인력 양성	정책 활용· 홍보		기 타 (타연구 활용등)
	특허 출원	특허 등록	품종 등록	S M A R T	건 수	기 술 료	제 품 화	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출		투 자 유 치	논 문	비 S C I	논 문 평 균 I F			학 술 발 표	정 책 활 용	
건	건	건	건	건	백 만 원	건	백 만 원	백 만 원	명	백 만 원	건	건	건	건	명	건	건	건		
가중치	15	15			15		25							10					20	
최종 목표	1	1			1		1					1	1	4					2	
연구기간내 달성실적	2	1			1		1					1	1	6	1				2	
달성률 (%)	200	100			100		100					100	100	150					100	

4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	보강 및 차수기능에 적합한 지반 신소재 결정 및 채움재 특성 결정 기술
②	가물막이 요소의 조합/배치 결정 및 구축가능 단면 분석 기술
③	가물막이 요소간 마찰력 향상을 위한 결합재의 개발 및 마찰특성 평가 기술
④	지반신소재로 보강된 성토체의 응력해석 및 내/외적 안정성 평가 기술
⑤	시공/운영 중 긴급대응 기술 및 시공성과 안정성을 확보한 차수/보강 기술
⑥	제체에 최적화된 매립식 탄성파 센서 개발 및 지반재료의 동적특성 평가 기술
⑦	저수지 제방의 하중저하를 위한 감압정 설계 기술
⑧	용수확보를 위한 감압정 시공 프로세스 정립

5. 연구결과별 기술적 수준

구분	핵심기술 수준					기술의 활용유형(복수표기 가능)				
	세계 최초	국내 최초	외국기술 복제	외국기술 소화·흡수	외국기술 개선·개량	특허 출원	산업체이전 (상품화)	현장애로 해결	정책 자료	기타
①의 기술								√		
②의 기술								√		
③의 기술								√		
④의 기술								√		
⑤의 기술		√					√	√		
⑥의 기술	√	√				√	√	√		
⑦의 기술		√					√	√	√	
⑧의 기술		√						√		√

* 각 해당란에 v 표시

6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과 활용계획 및 기대효과
①의 기술	개발된 지반신소재를 이용하여 경제적이고 시공이 용이한 신소재 구조체 조성기술 구현가능
②의 기술	최적화된 구조체 배치를 통해 안정적이고 경제적인 배치가 가능
③의 기술	수밀성이 확보된 가물막이 구조체 조성기술 확보, 향후 구속력이 강한 결합재 개발 필요
④의 기술	신소재 가물막이 최적 규모를 결정하기 위해 설계단계에서 지원 가능한 프로세스 정립
⑤의 기술	기존 가물막이 공법의 문제점에 대응가능한 안정적인 구조체 개발
⑥의 기술	지진시 가물막이 구조체 동적거동 파악이 가능하고 안정적인 구조체 평가 가능
⑦의 기술	제체 침윤선 저하 및 하부지반 간극수압 조기 저감을 통해 제체 안정성 확보
⑧의 기술	유지관리가 용이하고 노후 제체의 안정성을 도모가능한 감압정 시공기술 확보

7. 연구종료 후 성과창출 계획

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표										연구기반지표									
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				기술인증	학술성과			교육지도	인력양성	정책 활용· 홍보		기타 (타연구활용외)	
	특허출원	특허등록	품종등록	S M A R T	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용창출		투자유치	논문				학술발표	정책 활용		홍보 전시
													S C I	비 S C I						
단위	건	건	건	건	건	건	백만원	백만원	백만원	명	건	건	건	명	건	건				
가중치	15	15			15		25							10			20			
최종 목표	1	1			1		1					1	1	4			2			
연구기간내 달성실적	2	1			1		1					1	1	6	1		2			
연구종료후 성과창출 계획							2	20						1			1			

8. 연구결과의 기술이전조건(산업체 이전 및 상품화 연구결과에 한함)

핵심기술명 ¹⁾	저수지 감압정 유지관리 모니터링 시스템 기술실시		
이전형태	<input type="checkbox"/> 무상 <input checked="" type="checkbox"/> 유상	기술료 예정액	매출액의 5%
이전방식 ²⁾	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input checked="" type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 통상실시권 <input type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타()		
이전소요기간	2년	실용화 예상시기 ³⁾	2024년
기술이전시 선행조건 ⁴⁾	기술지도 등		