20AWMP-C
140166-03

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( ), 발간등록번호(11-B552989-000397-01)

물관리연구사업 최종보고서

R&D / 20AWMP-C140166-03

ORS(Optical Remote Sensing)와 광섬유 센싱을 통한 제방 모니터링 및 내진설계 기술 개발 최종보고서

2020. 12. 31.

주관연구기관 / 한국건설기술연구원
공동연구기관 / 주식회사 자연과기술
공동연구기관 / Deltares

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

모니터링 및 내진설계 기술 개발 최종보고서 2020
ORS(Optical Remote Sensing)와 광섬유 센싱을 통한 제방
국토교통부 국토교통과학기술진흥원

제출문

제 출 문

국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘ORS(Optical Remote Sensing)와 광섬유 센싱을 통한 제방 모니터링 및 내진설계 기술개발’(연구개발 기간 : 2018. 2. 23~2020. 12. 31) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2020. 12. 31.

주관연구기관명 : 한국건설기술연구원 (인)



공동연구기관명 : 주식회사 자연과기술 (인)



공동연구기관명 : Deltares (인)



주관연구기관책임자 : 지 운

공동연구기관책임자 : 김종태

공동연구기관책임자 : Ellis Penning

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20AWMP-C140166-03	해당 단계 연구 기간	2018.2.23. ~2020.12.31.	단계구분	3차년도/3차년도
연구사업명	중사업명	물관리연구사업			
	세부사업명	물관리연구사업			
연구과제명	대과제명	ORS(Optical Remote Sensing)와 광섬유 센싱을 통한 제방 모니터링 및 내진설계 기술개발			
	세부과제명	ORS(Optical Remote Sensing)와 광섬유 센싱을 통한 제방 모니터링 및 내진설계 기술개발			
연구책임자	지 운	해당단계 참여연구원 수	총: 18 명 내부: 18 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 239,000천원 민간: 184,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 423,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 14 명 내부: 14 명 외부: 명	총 연구비	정부: 716,000천원 민간: 552,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:1,268,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국건설기술연구원 국토보전연구본부			참여기업명 주식회사 자연과기술	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음					
연구개발성과의 보안등급 및 사유					

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기탁번호	4	1	1			13					

요약 ○ **광섬유 센서를 활용한 제방 내부 모니터링 시스템 구축**
· 제방의 안정성 판단을 위한 광섬유 데이터 최적 활용 및 분석 기술개발
· 광섬유 온도 센싱 정보 분석 기반 제방 제체 모니터링 프로그램 개발
○ **ORS와 광섬유 센싱을 통한 제방 내진점검 및 모니터링 가이드라인 제시**
· 국내 지진발생 추이를 고려한 지진재난 및 위기 사전대응을 위한 한국형 제방 모니터링 가이드라인
· ORS를 활용한 광역형 제방 모니터링 기법 활용 및 광섬유 센싱을 통한 국부적 모니터링 기법 제시
· 지진으로 인한 제방 붕괴 유형 검토 수리실험 설계(안) 제시
○ **ORS 모니터링을 통한 제방 안전 진단 플랫폼 구축**
· 기상영향을 고려한 고품질의 UAV 영상 취득 방법 개발
· RGB 및 초분광센서로 취득한 분광정보 분석 기반의 제방 취약 구간 탐지 알고리즘 개발
· UAV 활용 ORS 제방 안전 진단 및 취약 구간 탐지 플랫폼 구축

보고서 면수

133

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 광학원격탐사(ORS, Optical Remote Sensing)를 이용한 광역 제방 모니터링 시스템 · UAV와 이미지 센싱을 접목한 인터페이스 장치 개발 · 분광 및 공간 정보 분석기반 제방 안전 진단 플랫폼 구축 ○ 광섬유를 이용한 제방(제체) 위험성 감지 모니터링 시스템 · 광섬유 센싱의 최적 활용을 위한 대용량 데이터 분석 기술 및 시스템 · 광섬유 센싱 정보 분석 기반 제방 위험성 감지 ○ 국내실정을 고려한 제방 내진점검 및 모니터링 기술 개발 · 광학원격탐사 및 광섬유 센싱을 통한 지진 대비 제방 모니터링 가이드라인
연구개발성과	○ 광섬유 센서를 활용한 제방 내부 모니터링 시스템 구축 · 제체의 안정성 판단을 위한 광섬유 데이터 최적 활용 및 분석 기술개발 · 광섬유 온도 센싱 정보 분석 기반 제방 제체 모니터링 프로그램 개발 ○ ORS와 광섬유 센싱을 통한 제방 내진점검 및 모니터링 가이드라인 제시 · 국내 지진 발생 추이를 고려한 지진재난 및 위기 사전대응을 위한 한국형 제방 모니터링 가이드라인 개발 · 광학원격탐사(ORS)를 활용한 광역형 제방 모니터링 기법 활용 및 광섬유 센싱을 통한 국부적 모니터링 기법 제시 · 지진으로 인한 제방 붕괴 유형 검토 수리실험 설계(안) 제시 ○ ORS 모니터링을 통한 제방 안전 진단 플랫폼 구축 · 기상 영향을 고려한 고품질의 UAV 영상 취득 방법 개발 · RGB 및 초분광센서로 취득한 분광정보 분석 기반의 제방 취약 구간 탐지 알고리즘 개발 · UAV 활용 ORS 제방 안전 진단 및 취약 구간 탐지 플랫폼 구축
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 광학원격탐사를 활용한 제방 모니터링 현장 적용성과 활용성 검증을 통한 실무 적용 지침(안) 마련 ○ 하천 유지관리 분야 드론 활용 제도(안) 사업 종료 이후 하천설계기준 등 설계 기준 개정(안) 제시 ○ 정부/지자체가 관리하고 있는 하천의 제방 유지관리 모니터링 작업의 효율성 제고를 위한 개발 기술의 실무 적용 지침 마련

국문핵심어 (5개 이내)	제방	모니터링	광섬유	광학원격탐사	내진설계
영문핵심어 (5개 이내)	River levee	Monitoring	Optical fiber	ORS	Seismic design

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

〈 목 차 〉

제1장 연구개발과제의 개요 ····· 1

1. 연구의 필요성 ····· 1
2. 연구내용 및 범위 ····· 2
   가. 연구개발 목표 ····· 2
   나. 연구개발 내용 ····· 3
   다. 연구 수행내용 및 범위 ····· 4

제2장 연구개발 수행내용 및 성과 ····· 6

1. 광섬유를 이용한 제방 제체 모니터링 장치 활용 기술 개발 ····· 6
   가. 하천 제방의 붕괴 유형 사례조사 ····· 6
   나. 광섬유 센서를 이용한 제방 모니터링 실규모 실험 및 검증 ····· 10
   다. 광섬유 센서를 활용한 제체 위험성 감지 소프트웨어 유저 인터페이스 구축 ····· 29
2. 국내 실정을 고려한 제방 내진점검 및 모니터링 가이드라인 ····· 34
   가. 국내외 지진으로 인한 하천 제방의 피해조사 ····· 34
   나. 제방 붕괴유형 실험 사례조사 ····· 37
   다. 지진의 영향을 고려한 제방파괴 실험 및 분석 ····· 46
3. UAV 부착용 이미지 센싱 인터페이스 장치 개발 ····· 72
   가. UAV 부착용 이미지 센싱 인터페이스 설계 ····· 72
   나. 인터페이스 시제품 개발 및 시험적용 ····· 75
   다. 실규모 및 현장적용을 통한 인터페이스 장치 검증 ····· 78
4. ORS 모니터링을 통한 제방 안전 진단 플랫폼 구축 ····· 82
   가. 제방 안정성 취약 구간 탐지 인덱스 조사 ····· 82
   나. UAV를 활용한 제방 ORS 영상 획득 시스템 구축 ····· 88
   다. 분광 및 공간정보 기반 취약 구간 탐지 알고리즘 개발 ····· 104
   라. ORS 기반의 제방 안전 진단 현장적용 결과 ····· 118

제3장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 121

1. 연구 목표 ····· 121
2. 목표 달성여부 ····· 124
   가. 질적성과 ····· 124

나. 양적성과 ····· 126
제4장 연구개발성과의 활용 계획 ····· 127
1. 연구성과 활용분야 및 방안 ····· 127
가. 제방 유지관리 모니터링 및 내진점검 분야 정책 반영 ····· 127
나. 하천시설물 모니터링 및 재난재해 대책 마련 실무 적용 ····· 128
2. 최종성과물 활용계획 ····· 128

참고문헌 ····· 129

〈 표 목 차 〉

표 2.1.1 기존 제방 모니터링 기법과 광섬유 온도 센싱을 통한 제방 모니터링 기법 비교 · 13
표 2.2.1 지진을 고려한 제방 실험 조건(Kurakami, 2018) ····· 40
표 2.2.2 성토재료의 입도분포 및 다짐도시험 결과표 양식 ····· 47
표 2.2.3 제방 실험의 성토재료 입도분포 및 다짐도시험 결과표 ····· 51
표 2.2.4 실험 케이스별 제방의 다짐도 및 유량 조건 ····· 53
표 2.2.5 다짐도에 따른 월류실험 결과 - Case A ····· 59
표 2.2.6 다짐도에 따른 월류실험 결과 - Case B ····· 61
표 2.2.7 다짐도에 따른 월류실험 결과 - Case C ····· 63
표 2.2.8 다짐도에 따른 월류실험 결과 - Case D ····· 65
표 2.3.1 3축 짐벌의 주요기능 ····· 78
표 2.3.2 3축 짐벌의 정량적 항목 ····· 80
표 2.4.1 제방 안정성 취약 항목 ····· 82
표 2.4.2 기존 모니터링 기법과 비교 ····· 89
표 2.4.3 드론과 센서의 제원 ····· 91
표 2.4.4 2017년도 포항지진발생에 따른 피해 시설물 복구 현황(행정안전부, 2018) ····· 94
표 2.4.5 2017년도 포항지진발생에 따른 저수지 점검결과(한국농어촌공사, 2017) ····· 95
표 2.4.6 농업용 저수지 내진설계기준 설정 대상 확대 ····· 96
표 2.4.7 2013년도~2019년도 저수지 붕괴 및 문제발생 현황 ····· 96
표 2.4.8 조사된 경주 소재 저수지 현황 ····· 97
표 2.4.9 조사된 포항 소재 저수지 현황 ····· 97
표 2.4.10 초분광 센서의 특성 및 기능 ····· 105
표 2.4.11 초분광 영상분석결과와 수심측정 결과 ····· 106
표 2.4.12 CASE 및 측정 포인트 ····· 110
표 2.4.13 Case 1의 각 지점별 최대강도(Peak Data Value, P.D.V), 최대강도 시 파장과 밴드 ····· 111
표 2.4.14 Case 2의 각 지점별 최대강도(Peak Data Value, P.D.V), 최대강도 시 파장과 밴드 ····· 112
표 2.4.15 Case 3의 각 지점별 최대강도(Peak Data Value, P.D.V), 최대강도 시

파장과 밴드 ····· 113
표 2.4.16 반사율 평균값 종합 ····· 116
표 3.1.1 연차별 개발 목표 및 결과 ····· 121
표 3.2.1 성과점검기준표(총괄) ····· 125
표 3.2.2 연구개발 양적성과 달성 ····· 126

〈 그 림 목 차 〉

그림 1.2.1 연구개발 목표 ····· 2
그림 1.2.2 연구개발 내용 모식도 ····· 3
그림 2.1.1 일반적인 제방 붕괴 원인 및 매커니즘(Schiereck, 1998) ····· 7
그림 2.1.2 월류에 의한 제방 붕괴 실험(Kim et al., 2017) ····· 8
그림 2.1.3 파이핑에 의한 제방 붕괴 실험(Kim and Moon, 2017) ····· 9
그림 2.1.4 액상화로 인한 제방 교란(Sasaki et al., 2012) ····· 10
그림 2.1.5 광섬유 온도 센싱의 원리(Lee, 2011) ····· 11
그림 2.1.6 제방 모니터링에 광섬유 센서 적용 사례(Schenato, 2017) ····· 12
그림 2.1.7 실규모 제방 모형 실험장(Sekula et al, 2018) ····· 13
그림 2.1.8 제방 모니터링 시스템(Sekula et al, 2018) ····· 13
그림 2.1.9 중규모 제방모형 실험 시 제방 축조 과정 ····· 14
그림 2.1.10 제체 내 광섬유 케이블 매립 및 배치도 ····· 15
그림 2.1.11 광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템(DTS) 연결 및 설치 ····· 15
그림 2.1.12 하천연구센터의 실험수로 및 중규모 제방 실험 유량공급 개략도 ····· 16
그림 2.1.13 중규모 제방의 월류 및 붕괴 실험 ····· 16
그림 2.1.14 중규모 제방 내부의 온도 변화 분석 결과 ····· 18
그림 2.1.15 제방 높이별 횡적 온도 분포도(Ahn et al., 2019) ····· 19
그림 2.1.16 실규모 제방 모형 및 광섬유 매립 ····· 20
그림 2.1.17 광섬유 케이블 매립계획(안) 및 매립도 ····· 21
그림 2.1.18 실규모 제방 실험 과정 ····· 22
그림 2.1.19 실규모 제방 실험 1차-수위 측정 결과 ····· 23
그림 2.1.20 실규모 제방 실험 2차-수위 측정 결과 ····· 23
그림 2.1.21 제방 앞비탈면의 광섬유 온도 센싱 데이터 및 스무딩 처리 결과 ····· 25
그림 2.1.22 실규모 제방 내부의 온도 변화 및 온도차 그래프(Ahn et al., 2020) ····· 27
그림 2.1.23 침투 경과 시간에 따른 제방 내부의 온도 분포 (Ahn et al., 2020) ····· 29
그림 2.1.24 광섬유 온도 센싱 데이터 ····· 30
그림 2.1.25 제방 내부에 설치된 광섬유 온도 센싱 데이터 후처리 프로그램 ····· 31
그림 2.1.26 온도 데이터의 선택 화면 및 입력 자료의 구축 ····· 31

그림 2.1.27 이상치 제거 및 스무딩 후처리 그래프 ····· 32
그림 2.1.28 시간에 따른 제방 내부의 온도변화 그래프 ····· 32
그림 2.1.29 제방 단면의 온도 분포(침투 전) ····· 33
그림 2.1.30 제방 단면의 온도 분포(침투 진행) ····· 33
그림 2.1.31 제방 내부의 온도차를 이용한 이상현상 모니터링 결과 ····· 33
그림 2.1.32 신뢰구간을 초과하는 구간의 이상현상 감지 ····· 33
그림 2.2.1 경주 지진 발생 후 태풍으로 인한 제방 붕괴(사진출처-좌: 연합 뉴스, 2016; 우: SBS뉴스, 2016) ····· 34
그림 2.2.2 포항 지진으로 인한 균열 ····· 35
그림 2.2.3 포항 지진으로 인한 액상화 현상(사진출처-한국일보, 2017) ····· 35
그림 2.2.4 구마모토 지진으로 인한 제방피해 조사결과(Kurakami, 2018) ····· 36
그림 2.2.5 아키즈강 우안의 지진 전후의 제방 마루 비교(Kurakami, 2018) ····· 36
그림 2.2.6 구마모토 지진 후 호우로 인한 2차 재난재해 피해현황(Kurakami, 2018) ····· 37
그림 2.2.7 지진의 영향을 고려한 제방 실험의 실험수로(Kurakami, 2018) ····· 38
그림 2.2.8 지진 영향을 고려한 제방 실험의 가진 발생 장치(Kurakami, 2018) ····· 38
그림 2.2.9 가진 발생 과정 및 실험 절차(Kurakami, 2018) ····· 39
그림 2.2.10 Case A와 Case C의 제방 및 수로 모식도(Kurakami, 2018) ····· 40
그림 2.2.11 Case B의 제방 실험 조건 제방 및 수로 모식도(Kurakami, 2018) ····· 40
그림 2.2.12 Case A의 실험 결과(Kurakami, 2018) ····· 42
그림 2.2.13 Case B의 실험 결과(Kurakami, 2018) ····· 42
그림 2.2.14 월류 후 경과시간에 따른 체적 변화(Kurakami, 2018) ····· 43
그림 2.2.15 실험 수로 및 제방 모형 제원(Feliciano et al., 2014) ····· 43
그림 2.2.16 흙의 구성에 따른 실험조건(Feliciano et al., 2014) ····· 44
그림 2.2.17 실험조건별 토질특성 분석 결과(Feliciano et al., 2014) ····· 44
그림 2.2.18 흙의 구성에 따른 제방 두부침식 위치(Feliciano et al., 2014) ····· 45
그림 2.2.19 제방 축조 및 다짐도 측정 절차 ····· 48
그림 2.2.20 수동식 다짐기(soil tamper) ····· 48
그림 2.2.21 하천연구센터 내의 순환수로 제원 및 제방 축조 위치 ····· 50
그림 2.2.22 제방 모형의 설계도 ····· 50
그림 2.2.23 제방 성토재료의 입도분포곡선 ····· 50
그림 2.2.24 다짐도에 따른 제방 붕괴유형 검토 실험의 층 다짐 과정 ····· 52
그림 2.2.25 다짐도 측정을 위한 부피 산정 과정 ····· 53
그림 2.2.26 제방 모형 축조 결과 ····· 54

그림 2.2.27 제방 사면의 격자 작도 ····· 54
그림 2.2.28 다짐도에 따른 침투실험의 제외지 수위 변화·비교 ····· 55
그림 2.2.29 다짐도에 따른 침투실험-1차 실험 결과(Case A) ····· 56
그림 2.2.30 다짐도에 따른 침투실험-2차 실험 결과(Case C) ····· 56
그림 2.2.31 다짐도에 따른 월류 실험(월류 발생 직전) ····· 57
그림 2.2.32 다짐도별 수위변화 및 월류 파괴 유량 산정 결과 ····· 68
그림 2.2.33 다짐도별 최대 파괴 유량 산정 결과 ····· 69
그림 2.2.34 제내지 비탈면의 측선별 붕괴 폭 산정 결과 ····· 71
그림 2.3.1 UAV(Aibotix X6 V2) 사양 및 기능 ····· 72
그림 2.3.2 2축 짐벌의 원리 ····· 73
그림 2.3.3 3축 짐벌의 원리 ····· 73
그림 2.3.4 부착용 인터페이스 3축 짐벌 설계(안) ····· 74
그림 2.3.5 UAV 부착용 3축 짐벌 설계도면 ····· 75
그림 2.3.6 초분광 영상촬영을 위한 UAV 부착용 짐벌시스템 ····· 76
그림 2.3.7 초분광센서 중심축 위치 밸런스 제어 ····· 78
그림 2.3.8 시험운영 대상지(용연저수지) ····· 79
그림 2.3.9 2축 짐벌 및 3축 짐벌을 이용한 초분광 영상자료 비교(하천연구센터) ····· 79
그림 2.3.10 저수지 제방 및 초분광 영상촬영 결과 ····· 81
그림 2.4.1 제방 활동 파괴의 예(국토해양부, 2012) ····· 83
그림 2.4.2 하상보호사석 세굴로 기초구조물 노출의 예(국토해양부, 2012) ····· 83
그림 2.4.3 수문 접합부 누수로 인한 제방 붕괴의 예(국토해양부, 2012) ····· 84
그림 2.4.4 제체 마루 침하의 예(국토해양부, 2012) ····· 84
그림 2.4.5 청미천 촬영 구간 ····· 85
그림 2.4.6 대청천 촬영 구간 ····· 85
그림 2.4.7 청미천 제방사면 취약 인자 분석 결과 ····· 87
그림 2.4.8 대청천 제방사면 취약 인자 분석 결과 ····· 87
그림 2.4.9 초분광 영상의 자료 구조 ····· 88
그림 2.4.10 UAV를 활용한 제방 ORS 영상 획득 시스템의 구성 및 취약구간 분석 과정 · 90
그림 2.4.11 연구대상지역(하천연구센터) ····· 91
그림 2.4.12 무감독분류 분석 결과 ····· 93
그림 2.4.13 분광지수 분석 결과 ····· 94
그림 2.4.14 저수지 제방 균열 ····· 95
그림 2.4.15 조사한 경주 및 포항 저수지 ····· 99

그림 2.4.16 시범운영구간(용연저수지) ····· 99
그림 2.4.17 시범운영구간 제방 침식 및 균열 ····· 100
그림 2.4.18 시범운영구간에 대한 촬영위치(용연저수지) ····· 101
그림 2.4.19 RGB 영상자료 및 초분광 영상자료 ····· 102
그림 2.4.20 균열 없는 지점과 균열 있는 지점에 대한 최대 강도값 비교 ····· 103
그림 2.4.21 실제수심과 최대강도값의 비교 그래프 ····· 107
그림 2.4.22 프로그램의 구성 ····· 108
그림 2.4.23 프로그램 실행 화면 ····· 108
그림 2.4.24 CASE 1의 비균열 영역과 균열영 역의 파장대비 강도값 ····· 110
그림 2.4.25 CASE 2의 비균열 영역과 균열영 역의 파장대비 강도값 ····· 111
그림 2.4.26 CASE 3의 비균열 영역과 균열영 역의 파장대비 강도값 ····· 112
그림 2.4.27 비균열과 균열 영역의 파장에 따른 강도값 비교 ····· 113
그림 2.4.28 각 CASE에 대한 최대강도와 조도 비교 ····· 114
그림 2.4.29 각 케이스별 반사율과 파장 관계 ····· 115
그림 2.4.30 비균열 및 균열 영역의 파장에 따른 반사율 ····· 115
그림 2.4.31 비균열 및 균열 영역의 반사율 분포 ····· 116
그림 2.4.32 제방 균열 평가 소프트웨어의 구성 ····· 117
그림 2.4.33 제방 균열 평가 소프트웨어의 실행 화면 ····· 117
그림 2.4.34 현장검증 위치(경북 안동시) ····· 118
그림 2.4.35 개선된 3축짐벌 및 초분광 카메라 ····· 118
그림 2.4.36 하천제방 균열사진 ····· 119
그림 2.4.37 낙동강 본류 제방 일대 현장사진 및 초분광 영상 ····· 119
그림 2.4.38 균열 분석 결과 ····· 120
그림 2.4.39 비균열 및 균열 영역의 안전진단 결과 ····· 120

제1장

연구개발과제의 개요

1. 연구의 필요성

기후변화로 발생하는 극한 수재해 및 지진 등 예기치 못한 자연재해의 증가로 인해 국내 하천 수리구조물의 안정성 확보가 절실한 실정이다. 특히, 2016년 9월 경주 및 2017년 11월 포항 지역에서 발생한 강진 이후로 제방과 같은 하천 수리구조물의 지진발생 전후 모니터링에 대한 중요성이 인지되고 있으며, 이와 같은 지진으로 인한 제체 변화는 집중호우 및 홍수 발생 시 제방이 붕괴되는 2차 재난재해로 이어질 수 있다. 제방붕괴로 인해 발생하는 피해 규모에 비해 노후화 및 지진 발생에 대비한 제방 안정성 평가 모니터링 기술 및 제방 내진설계에 대한 기술 개발은 상대적으로 미흡한 실정이다. 하천의 제방은 수십에서 수백 km까지 축조되어 있어 기존의 물리탐사기법에만 의존할 경우 많은 비용과 시간이 소요되므로 제방의 규모 및 작업의 효율성을 고려한 모니터링 기법을 개발하는 연구가 요구된다.

최근에 다양한 첨단 모니터링 장비 기술이 개발됨에 따라 접근이 어려운 지점이나 관측 지역이 상당히 넓은 곳에 원격탐사를 통해 실시간으로 동시 다발적인 탐사가 가능해졌으며, 모니터링 장비의 소형화 및 대중화를 통해 보다 용이하고 경제적인 비용으로 정보 수집이 가능하도록 기술이 점차 발전하고 있는 추세이다. 무인항공기 및 다양한 첨단 센서 기술을 하천조사에 적극 활용하기 위해 하천의 3차원 공간정보 구축, 하천환경 평가, 수리구조물 모니터링, 재난재해 대응, 하상조사 등의 목적으로 연구개발이 진행되고 있다. 특히, 제방의 유지관리 및 안정성 평가를 위한 모니터링 기술의 중요성이 증대됨으로써 항공영상정보를 통한 하천관리 정보 분석 기술을 개발하고자 하는 다양한 노력이 시도되고 있다. 하지만, 실제현장에서 제방의 안정성을 진단하고 평가하는데 직접 활용할 수 있는 수준의 첨단 모니터링 기법 제시는 아직까지 미흡한 실정이다. 이에 따라, 소형 무인항공기 기반의 광학원격탐사(ORS, Optical Remote Sensing)로 취득한 공간정보자료와 광섬유(fiber optic) 온도 분포 센싱 정보를 활용하여 제방의 표면 및 제체 내부 변화 모니터링 기술을 개발한다면 재난재해로 인한 제방의 균열, 붕괴, 침식 등의 피해를 사전에 예방하고 위험에 대응하는 속도를 향상시킬 수 있는 기술의 제시가 가능할 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 ORS 기반 **광역 제방 모니터링**과 **광섬유**를 활용한 **온도 분포 센싱** 기반 **국부 제방 모니터링** 시스템을 개발하여 노후 제방의 효율적인 안정성 진단 및 관리 기술을 제시하고자 한다. 또한, 하천 제방의 지진재난을 사전에 예방 혹은 즉각 대처할 수 있는 국내 상황에 적합한 한국형 제방 내진점검 및 모니터링 기술 가이드라인을 개발하고자 한다. 이러한 진보된 하천 제방의 모니터링 및 진단 기술은 실무에서 제방의 안정성을 평가하고 판단하는데 적극 활용할 수 있으며, 현장에서 즉각적인 의사결정을 위한 관련 정보 및 자료 도출에 도움이 될 것으로 기대된다.

2. 연구내용 및 범위

가. 연구개발 목표

본 연구는 하천 제방의 안정성 진단 및 평가를 위한 ORS와 광섬유 센싱 기반 광역·국부 제방 모니터링 시스템 개발을 통한 노후 제방 안전진단 및 관리 기술을 도출하고, 지진발생 전·후 상황에 대비하는 제방 내진 점검 및 모니터링 기술을 개발하는 것이 목적이다. 연구 수행을 통해 ORS를 이용한 광역 제방 모니터링 시스템, 광섬유를 이용한 노후 제방 위험성 감지 모니터링 시스템, 국내 실정을 고려한 한국형 내진점검 및 고효율의 첨단 제방 모니터링 가이드라인을 제시하는 것이 목표이다(그림 1.2.1).

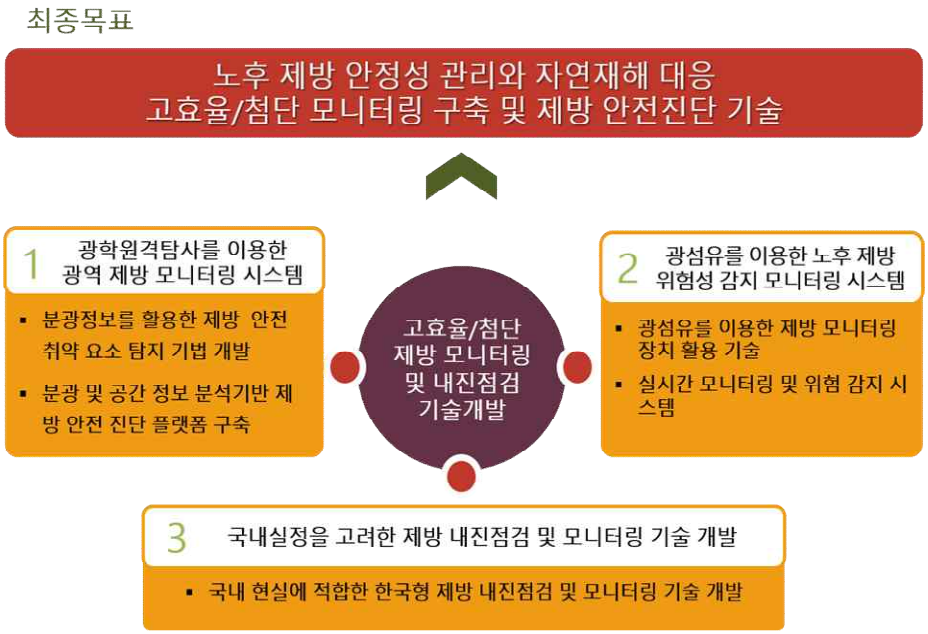


그림 1.2.1 연구개발 목표

나. 연구개발 내용

하천 제방의 안정성 진단 및 홍수, 지진 등의 자연재해에 대응할 수 있는 고효율·첨단 모니터링 기술 구축 및 한국형 제방 내진 점검 기술 개발을 위해 본 연구에서 수행하고자 하는 구체적인 연구개발 내용은 다음과 같다(그림 1.2.2).

첫째, 광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템(Distributed Temperature Sensor, DTS)을 이용하여 제체 내부의 온도 변화 정보 획득을 통한 제방의 안정성 진단 및 제체 위험성 감지 시스템을 개발하고자 한다. 개발하고자 하는 시스템은 제방의 위험성 및 불안정 요소를 주기적으로 모니터링하여 위험성에 대한 사전 대응과 대처를 위한 의사결정 자료를 제공함으로써 보다 효율적인 제방 관리에 활용할 수 있다.

둘째, 분광정보를 활용한 제방 안전 취약 요소 탐지 기법과 분광 및 공간 정보 분석기반의 제방 안전 진단 플랫폼 구축을 통해 광학원격탐사(ORS)를 이용한 광역형 제방 모니터링 시스템을 개발하고자 한다. 소형 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 기반의 광학원격탐사를 활용한 광범위한 제방의 안정성 모니터링 시스템은 제방의 안정성 평가와 유지관리 소요시간 및 비용 절감이 가능하며, 제방의 정밀 안전진단 대상지 선정을 위한 의사결정 자료로 활용할 수 있다.

셋째, 국내 지진 발생과 관련하여 지진재난 및 위기 사전대응을 위한 한국형 제방 내진 점검 기술을 개발하고자 한다. 국내 실정을 고려하여 한반도 지질 및 지진 발생 추이를 토대로 제방 내진점검 및 모니터링 가이드라인을 제시하여 제방의 피해 규모를 줄이고, 복구비 및 시설피해액을 절감할 수 있을 것으로 예상된다.

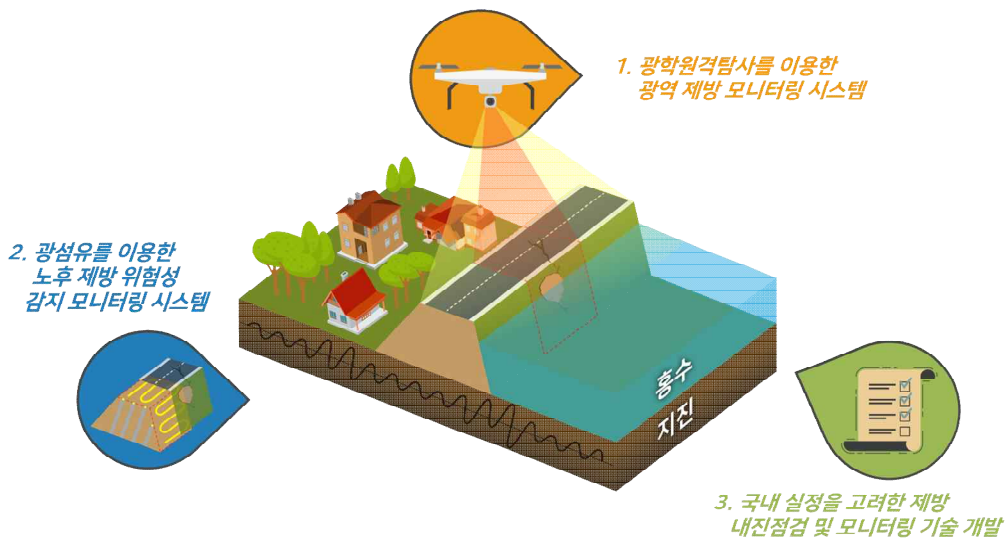


그림 1.2.2 연구개발 내용 모식도

본 연구에서 수행한 연구개발 내용 중 제방의 내진설계에 대한 내용은 본 과제에서 허용된 연구기간과 연구비를 고려하여 지진 발생으로 인한 제방의 다짐도 변화에 대한 평가로 한정하였다. 본 연구에서 다짐도 설정은 지진 발생 후 제체의 다짐도 변화를 고려하여 현재 하천설계기준에서 제시하고 있는 제체 재료 다짐 기준인 90%를 기준(구조물 주변의 경우 95%)로 하였으며, 이보다 다짐도가 약해진 상태의 실험 제방을 축조하여 이에 따른 제체 안정성을 실험적으로 평가하였다.

다. 연구수행 내용 및 범위

본 연구의 연구수행 내용 및 범위를 고려했을 때 5가지의 핵심성과를 기준으로 도출되는 단위성과가 다음과 같으며, 이에 대한 핵심 연구개발 수행내용을 요약하여 본 보고서 제2장에 수록하였다.

A. 광섬유를 이용한 제방 제체 모니터링 장치 활용 기술개발
  A-1. 하천 제방의 제체 구조 및 붕괴 유형 검토
  A-2. 제방 제체 모니터링 실규모 실험 및 검증
  A-3. 현장 모니터링 및 적용성 검증

B. 국내 실정을 고려한 제방 내진점검 및 모니터링 가이드라인 개발
  B-1. 제방의 지진실험 및 내진설계 선행연구조사
  B-2. 지진 영향을 고려한 제방파괴 실험 및 분석
  B-3. 하천 제방의 내진점검 가이드라인(부록)
  B-4. 하천 제방의 내진 성능평가를 위한 모니터링 방법 개발(부록)

C. UAV 부착용 이미지 센싱 인터페이스 장치 개발
  C-1. UAV 부착용 이미지 센싱 인터페이스 설계
  C-2. 인터페이스 시제품 개발 및 시험적용
  C-3. 실규모 및 현장 적용을 통한 인터페이스 장치 검증

D. ORS 모니터링을 통한 제방 안전 진단 플랫폼 구축
  D-1. 제방 제체 안정성 취약 구간 탐지 인덱스 조사
  D-2. UAV 활용 제방 ORS 영상 획득 시스템 구축
  D-3. 분광 및 공간 정보 기반 취약 구간 탐지 알고리즘 개발
  D-4. UAV 활용 ORS 영상 분석 기반 제방 안전 진단 플랫폼 구축

E. 광섬유 센싱 모니터링 시스템 구축

E-1. 제방 모니터링을 위한 광섬유 센싱 최적 시스템 구축

본 연구에서 개발한 광역원격탐사 기술을 활용한 광역 제방 모니터링 기술은 물리적인 모니터링 기법에서 육안으로 확인되는 제방의 균열 점검에 대해 보다 경제적이고 효과적인 광역 모니터링을 가능하게 하며, 광섬유를 활용한 온도 분포 센싱 기술의 경우 제체 내부의 침투, 파이핑 등의 물리적 변화를 선제적으로 감지하는데 활용할 수 있다. 광학원격탐사 기술과 광섬유 온도 분포 센싱 기술을 제체 변화와 균열의 근본적인 원인을 분석하고 판정하는 데는 여전히 기술적 한계가 남아 있으나, 본 과제의 당초 연구목적에 맞게 물리적인 탐사 및 모니터링 기술의 효율성 제고와 제체 내부와 외부의 물리적 변화를 사전에 선별적이고 선제적으로 감지하여 이상홍수와 지진 발생 후 나타날 있는 제방 붕괴 및 2차 재난에 대응할 수 있는 모니터링 기술을 제시하였다. 또한 본 과제의 연구성과를 바탕으로 현재 제시된 가이드라인으로 규정하기 어려운 노후제방과 지진 발생 후 제방의 제체 변화에 대해 보다 정량적이고 과학적인 판정 기준을 수립하는데 개발 기술들을 활용할 수 있다.

제2장

연구개발 수행내용 및 성과

1. 광섬유를 이용한 제방 제체 모니터링 장치 활용 기술 개발

가. 하천 제방의 붕괴 유형 사례조사

(1) 제방 실험을 통한 붕괴 유형 사례조사

기후변화로 인한 이상홍수가 빈번해지면서 노후화된 제방의 붕괴가 발생하고 이로 인해 막대한 재산과 인명 피해가 증가하고 있는 실정이다. 과거부터 태풍 및 홍수 등으로 인한 제방 붕괴가 발생하면서 제방의 유지관리 및 안전진단에 대한 중요성이 부각되고 있다. 한국건설기술연구원에서는 1987년에서 2003년까지의 국내 제방 붕괴 원인에 대한 자료를 조사하여 통계분석을 수행하였으며, 그 결과 노후화 및 이상홍수로 인한 붕괴 758건 중 침식 300건(39.6%), 월류 295건(38.9%), 제체 불안정 87건(11.5%), 구조물에 의한 파괴 76건(10.0%)로 제방 붕괴가 발생한 것으로 나타났다(한국건설기술연구원, 2004).

네덜란드의 경우 과거부터 2006년까지 발생한 제방 피해를 조사한 결과, 1,735건의 제방이 붕괴되었고, 붕괴 원인 중 침식으로 인한 제방 붕괴가 67%로 조사되었다(van Baars and van Kempen, 2009). 또한, Danka and Zhang(2015)은 미국과 헝가리를 포함하여 9개 국가의 제방 피해 자료를 수집하였으며, 대부분의 제방 붕괴는 침식으로 인해 발생한 것이라는 연구결과를 도출하였다. 이처럼 국외에서도 제방 붕괴에 대해 심각성과 중요성을 인지하고 다양한 연구가 수행되고 있다. Schiereck(1998)는 일반적인 제방 붕괴의 원인과 과정에 대해 그림 2.1.1과 같이 붕괴 유형을 12가지로 제시하였다. Nakajima(2003)는 월류에 의한 제방 파괴 과정에 대한 연구결과를 도출한 바 있으며, Mohamed et al.(2004)은 흙댐과 제방의 붕괴 매커니즘을 규명하기 위한 모형 제방의 붕괴 실험을 수행하였다. Hanson et al.(2005)은 실규모 제방 붕괴 실험을 수행하였으며, Mohamed et al.(2004)과 Hanson et al.(2005)은 실험을 통해 제방 붕괴는 월류수의 유로가 형성되어 제체 비탈면의 국부적인 붕괴가 발생하면서 붕괴면의 세굴 및 침식이 발달하고, 이러한 세굴과 침식이 지속되면서 붕괴 영역이 확장되어 제방이 전반적으로 붕괴된다고 제시하였다.

Kim et al.(2016)은 실제 제방이 붕괴되는 형상은 하도의 흐름방향으로 붕괴가 진행되므로 붕괴 단면이 비대칭이며, 이를 증명하기 위해 수리실험을 수행하였다. 그 결과, 붕괴 초기에 비대칭성이 크게 나타나다 시간이 지남에 따라 대칭성의 형태를 보인다는 연구결과를 제시하였다. Ko and Kang(2018)은 월류에 의한 제방 붕괴과정을 영상분석을 통해 제방의 초기 붕괴 위치 및 과정 등을 분석하였으며, Feliciano et al.(2014)은 토사밀도, 함수율, 일축압축강도 등 토질특성에 따른 제방붕괴 영향에 관한 실험을 수행하여 재료에 따른 붕괴 매커니즘 및 시간에 따른 붕괴 양상을 단계별로 분석하였다. 제방의 붕괴는 수리학 및 지반학의 복합적인 해석이 필요하며(Schmocker and Hager, 2012), 제방 붕괴 현상의 복잡성을 물리적으로 규명하는 것은 여전히 어려운 문제로 남아 있다(Evangelista, 2015).

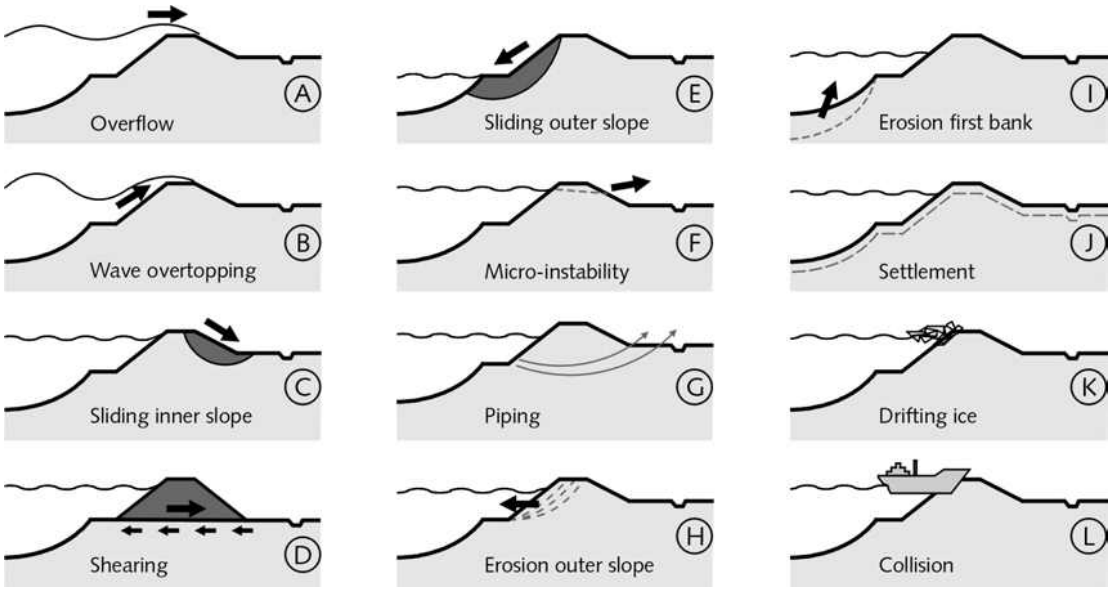


그림 2.1.1 일반적인 제방 붕괴 원인 및 매커니즘(Schiereck, 1998)

(가) 월류에 의한 제방 붕괴

제방 붕괴 사례 중에 월류로 인한 붕괴가 높은 비중을 나타내고 있으며(ASCE/EWRI Task Committee on Dam/Levee Breaching, 2011), 월류로 인한 제방 붕괴의 매커니즘을 규명하기 위해 많은 현장 조사 및 실험 연구가 진행되어왔다. Schmocker and Hager (2012)는 월류로 인한 제방 붕괴 실험을 통해 월류 제방 붕괴에 영향을 미치는 파라미터들을 규명한 바 있다. Kim et al.(2017)은 제방고 0.4 m, 0.8 m인 축소 모형과 제방고 1.0 m인 제방 모형으로 월류에 의한 붕괴 실험을 수행하였다. 그 결과, 월류에 의한 비탈면 국부 세굴 발생하고 직벽 형태의 계단형 깊은 세굴이 진행되었다. 그리고 직벽 세굴면 자중에 의한 국부활동과 소류력에 의한 세굴면 확대 순 등으로 붕괴 과정이 반복되면서 제방의 붕괴 규모가 증가하여 전체적인 붕괴를 야기한다고 제시하였다(그림 2.1.2). 또한, 제방 높이에 따라 제방 붕괴 폭과 붕괴 지속시간이 상이한 것으로 나타났다.

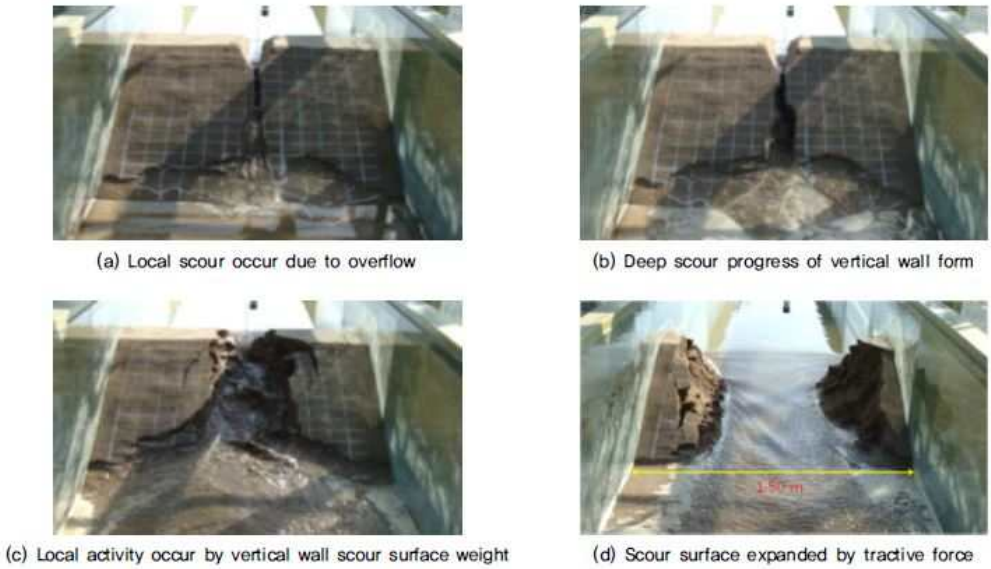


Fig. 7. Overflow failure mechanism on levee (H = 0.7 m)

그림 2.1.2 월류에 의한 제방 붕괴 실험(Kim et al., 2017)

(나) 파이핑에 의한 제방 붕괴

하천 수위의 급격한 변동은 제방 내 침윤선과 침투유속, 동수경사 등을 변화시켜 하천 제방의 내구성에 큰 영향을 준다. 이러한 현상은 제체와 지반 누수의 원인되고, 파이핑에 의한 제방 붕괴를 야기한다. 이에 Kim and Moon(2017)는 제방고 0.7 m, 마루 폭 0.4 m, 비탈경사 1:2인 제방 모형을 축조하여 파이핑에 의한 제방 붕괴 매커니즘을 파악하기 위해 실험을 수행하였다(그림 2.1.3). 실험을 통해 파괴 경과시간과 파이핑 안전율에 따라 세굴된 높이와 폭이 차이가 나타난 것을 확인하였다. 파이핑에 의해 제체 세굴이 진전되면서 깊은 골의 형성되고, 골이 깊어지면서 측벽부 측면 기울기가 급해지면서 활동이 발생하여 활동에 의한 흙이 파이프 전면을 덮은 후 성토된 흙을 침투압이 다시 세굴 되는 과정이 반복되면서 제방 붕괴가 확대되는 것으로 연구 결과를 제시하였다.



그림 2.1.3 파이핑에 의한 제방 붕괴 실험(Kim and Moon, 2017)

(다) 지진발생 후 액상화로 인한 제방 붕괴

Sasaki et al.(2012)은 1993년 쿠시로-오키 지진이 발생했을 때 도카치 강과 쿠시로 강의 제방 붕괴를 예를 들어 지진 발생 후 제방 내부의 액상화가 발생하는 매커니즘을 제시하였다. 지진이 발생한 후 제방의 액상화 진행 과정을 그림 2.1.4와 같이 4단계로 제시하였다. 그림 2.1.4의 (1)은 지진이 발생하기 전을 나타내며, 제방 축조 당시의 지질 상태가 지속될 경우에는 지하수위가 유지되면서 액상화의 위험은 높지 않다. 그러나, 그림 2.1.4의 (2)와 같이 지진이 발생하면 제체에 미세한 균열이 발생하고 이러한 균열은 지하수 밑의 하층토까지 영향을 미치게 된다. 또한, 지진으로 인한 균열로 지표수가 침투하여 지하수위가 상승하게 된다. 그 후, 그림 2.1.4의 (3)과 같이 제방 마루부분은 침강하고 제체 횡방향의 강도가 약해지면서 느슨한 상태로 진전이 되고, 결국 그림 2.1.4의 (4)와 같이 지진동 발생으로 토양의 교란 및 제방 기초지반이 연약해져 액상화가 발생한다고 설명하였다.

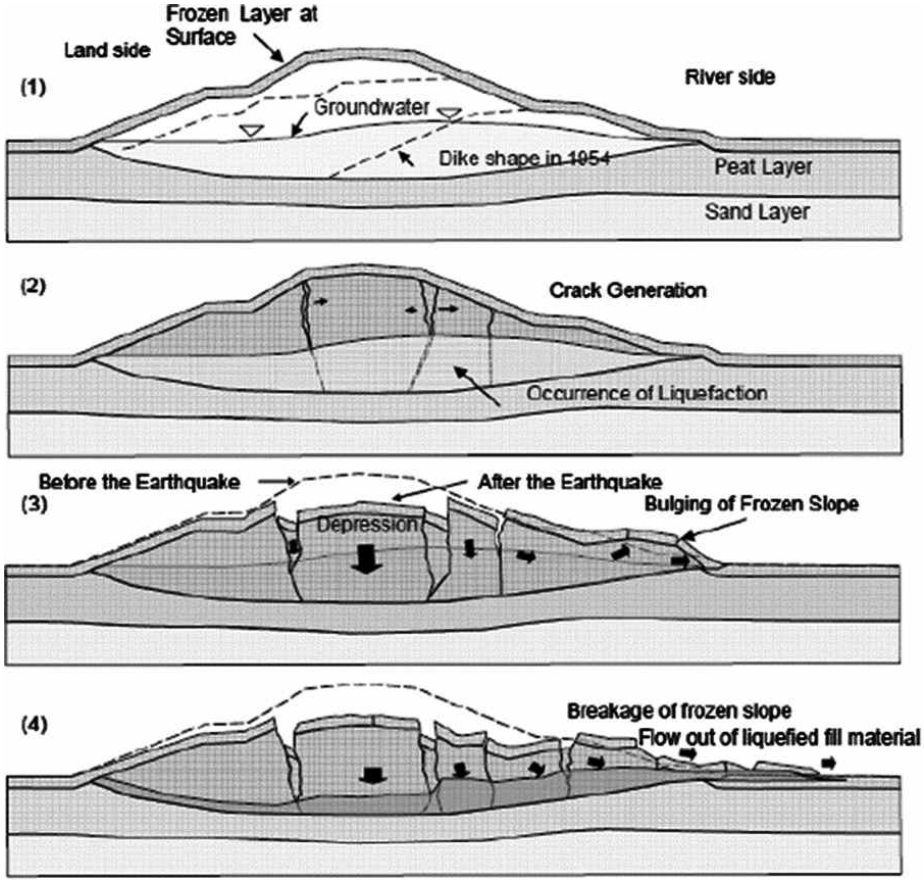


그림 2.1.4 액상화로 인한 제방 교란(Sasaki et al., 2012)

나. 광섬유 센서를 이용한 제방 모니터링 실규모 실험 및 검증

(1) 광섬유 센서의 원리 및 측정 방법

광섬유는 얇은 유리를 통해 빛을 전달하기 위해 만든 섬유이며, 광섬유를 통해 지나가는 빛의 세기로 광섬유의 굴절률, 길이, 모드, 편광상태 등의 변화를 파측정량으로 추정하는 것이 광섬유 센서의 원리이다(Lee et al., 2010). 특히, 광섬유에 짧은 빛 혹은 레이저 펄스를 입사하면 산란현상이 발생하며, 광섬유의 주변 환경에 온도, 변형, 압력과 같은 인자들의 변화가 있을 경우 세 가지 종류의 산란현상이 나타난다(Kim et al., 2009). 산란현상은 파장에 따라 Rayleigh 산란, Raman 산란, Brillouin 산란으로 구분된다(그림 2.1.5). Rayleigh 산란은 대체로 광섬유 주위의 밀도 변화와 연관되며, 큰 진폭을 띄고 파장 변위는 거의 없다. 특히, Raman 산란은 광섬유 주변의 온도변화에 영향을 크게 받는다. Stokes 범위에 속한 후방-Raman 산란은 온도변화에 무관하지만 anti-stokes 범위의 전방-Raman 산란은 온도변화에 따라 진폭이 예민한 반응을 보여준다. 특히, Raman 산란은 온도 변화에 따라 파장 변위 폭이 크기 때문에 온도 변화를 감지하는 측면에서 매우 용이하며, 온도 측정 분해능(angular resolution)을 높이는데 유리하다(Lee et al., 2010).

Brillouin 산란의 경우는 광섬유에 빛을 입사하면 광파만 전달되는 것이 아니라 자연적으로 음파가 발생하는데, 이때 전파되는 광파와 음파 사이의 상호 작용에 의해 발생된다. 이러한 Brillouin 산란은 광섬유에 생긴 변형과 온도와 같은 외부 영향에 다라 민감하게 반응한다. 다만, Brillouin 산란은 Rayleigh 산란 지점과 인접하여 Raman 산란보다 파장 분석이 상대적으로 어렵다(Kim et al., 2009). 이러한 산란은 광섬유의 위치 및 광섬유 주변 환경의 영향 등의 정보를 갖고 있기 때문에 여러 가지 물리 정보를 획득할 수 있다.

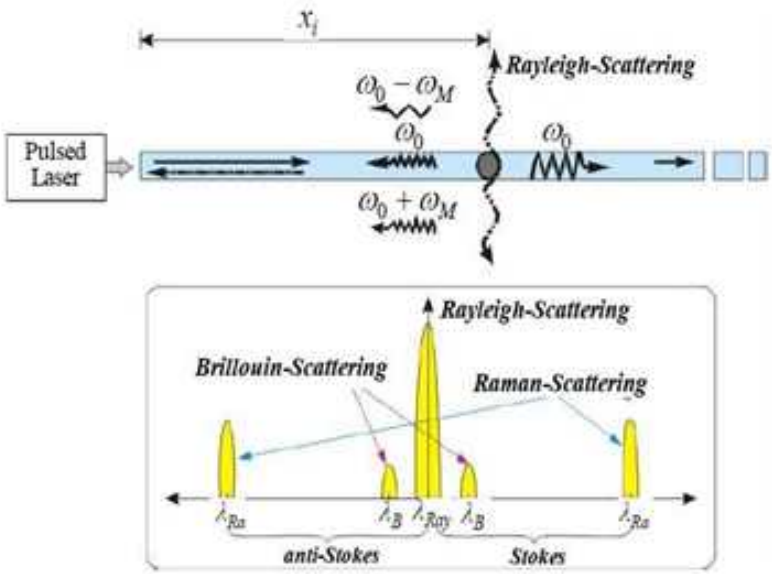


그림 2.1.5 광섬유 온도 센싱의 원리(Lee, 2011)

광섬유는 매우 작은 진동 또는 소음, 미세한 온도변화 등을 인식하여 다양한 파장의 형태로 표현할 수 있다. 광섬유를 통해 수집할 수 있는 온도, 음향, 압력 등의 데이터는 사용자의 목적에 맞게 후처리 과정이 필요하며, 후처리는 광섬유 센싱 데이터 활용의 핵심적인 부분이라고 할 수 있다. 광섬유를 이용한 센싱 기술은 이미 다양한 분야에서 적용되고 있으며, 구조물 및 시설 등의 안정성을 평가하고 진단하는데 적합한 기술로 활용되고 있다.

본 연구에서는 광섬유를 이용하여 획득할 수 있는 정보 중에 온도 감지를 통해 제체 내부의 변화를 모니터링 하였다. 제체 내부에 광섬유 케이블을 설치하고 광섬유로부터 센싱되는 데이터를 온도로 변환하고 저장하는 장치인 광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템(Distributed Temperature Sensor, DTS)을 활용하여 제체 내부의 온도 정보를 획득하였다. 광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템(DTS)은 Raman 산란광의 파장 산란조도(intensity)의 비를 분석함으로써 분포형 온도를 측정할 수 있으며, Raman 산란의 반사파 세기와 시간을 분석하여 위치별 온도 측정이 이루어진다. 이러한 경우에 온도 분해능은 측정거리, 측정시간, 위치 분해능(spatial resolution)에 따라 결정된다(Kim et al., 2007).

(2) 광섬유 온도 센싱을 활용한 제방 모니터링 사례

광섬유 온도 센싱을 통한 제방 모니터링 실험 수행을 위해 광섬유 센서를 적용한 제방 모니터링의 기존 사례를 조사하였다. 광섬유 센서(Fiber-optic Sensor)는 1990년 지반수공학 분야에 적용되기 시작하였으며, 광섬유 센서의 기술이 발달하면서 수리구조물 모니터링에 적용되었다.

Schenato(2017) 연구에 따르면, 과거부터 광섬유를 제방 모니터링에 적용하면서 다양한 데이터 분석 모델이 제시되었고, 소중규모 제방 모형실험에 적용하여 데이터 처리 기법에 대해 상당히 많은 연구가 진행되어 왔다고 한다(그림 2.1.6). 특히, 과거부터 광섬유 온도 센싱으로 획득되는 자료에서 제방 이상 현상을 식별하는 것에 어려움이 있어, 다양한 분석 기법 및 모델이 개발되고 있는 실정이다. Su et al.(2018)은 광섬유에 열을 가열하여 주변 온도와 차이를 구별하고, 침투실험을 수행하여 시간에 따라 온도가 상승하고 감소하는 것을 확인한 바 있다. Pyayt et al.(2014)은 인공신경망 분석 기법을 광섬유 센싱을 활용한 제방 모니터링 방법에 적용한 모델을 제시하기도 하였다. 또한, Habel and Krebber(2011)는 지오텍스타일과 광섬유를 함께 제방에 설치하고 분산형 광섬유 센서(DOFS)를 이용하여 제방의 변형을 감지하는 연구를 수행한 바 있다.

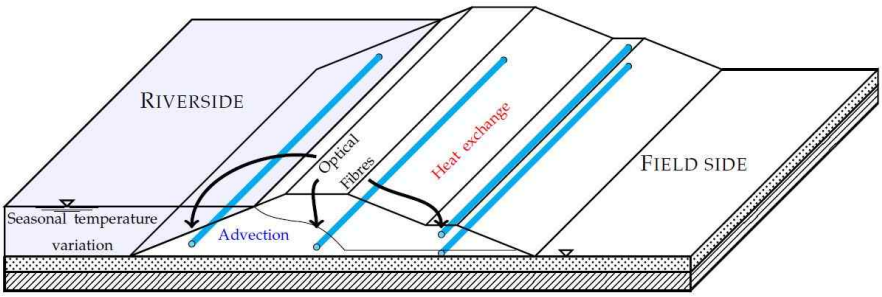


그림 2.1.6 제방 모니터링에 광섬유 센서 적용 사례(Schenato, 2017)

Sekula et al.(2018)은 실규모 제방 모형에 광섬유, 간극수압계, 온도 센서, 피에조메타 등 다양한 계측 센서를 적용하여 제방 모니터링 시스템을 구축하였다(그림 2.1.7). 홍수로 인한 제방의 안정성 및 피해 예측, 대응을 위한 모니터링 시스템을 그림 2.1.8와 같이 설계했으며, 다양한 센서로 수집된 데이터는 제방의 누수 및 사면의 안정성 등에 위험 정도를 분석하기 위한 기초자료로 활용할 수 있다. 특히, 센서로 획득되는 데이터에서 비정상적인 수치가 발생하거나 한계 값을 초과하면 제방에 이상 현상이 발생했다는 의사결정을 할 수 있는 판단자료로 활용된다. 이러한 광섬유 센싱 및 다양한 계측 장비를 통한 제방 모니터링 시스템은 홍수 발생 전, 후에 대해 신속하게 대응할 수 있는 자료를 제공한다고 제시하였다.



그림 2.1.7 실규모 제방 제방 모형 실험장(Sekula et al., 2018)

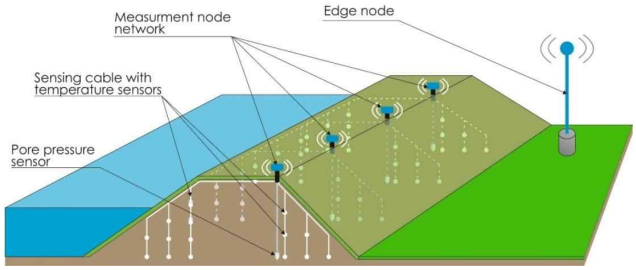


그림 2.1.8 제방 모니터링 시스템(Sekula et al., 2018)

표 2.1.1 기존 제방 모니터링 기법과 광섬유 온도 센싱을 통한 제방 모니터링 기법 비교

구분	기존 모니터링 기법	광섬유 온도 센싱 모니터링 기법
기술성	· 측정 시점의 데이터 획득 · 물리적 점검 필요 · 제방 내부 모니터링 한계	· 장기간 시계열 데이터 실시간 모니터링 · 제방 내부 3차원 고해상도 데이터 획득 · 원격 데이터 획득 가능
효율성	· 모니터링 수행 시간 및 인력 비효율성	· 모니터링 지속 시간 및 인력 투입 효율성 증대(기존 모니터링 기법 대비 50%이상)
경제성	· 일시적 측정 비용 저렴 · 유지관리 비용 점진적 증가	· 모니터링 초기 설치 고비용 · 유지관리 비용 점진적 절감

광섬유 온도 센싱을 활용한 구조물 모니터링은 타분야에서도 다양한 방식으로 적극적으로 활용되고 있다. 특히, 터널 및 도로, 교량 등 토목분야에서 적합한 센싱 기술로 활용되고 있으며, 수리구조물 모니터링에도 적용 가능한 센싱 기법으로 고려된다. 표 2.1.1에 정리한 바와 같이 광섬유 온도 센싱을 통한 제방 모니터링 기법을 적용할 경우, 기술성 및 효율성, 경제성 측면에서 기존 모니터링 기법에 비해 개선된 방법이라는 것을 확인할 수 있다. 특히, 제방 내부의 상태에 대한 신뢰성 있는 데이터를 장기간 시계열로 획득할 수 있으며, 원격으로 고해상도의 데이터를 취득할 수 있다는 것이 장점이다. 본 연구에서는 이러한 광섬유 온도 센싱 기법을 제방 모니터링에 적용하여 제방의 이상감지 모니터링의 실행을 가능하게 하고자 한다. 이를 위해 실규모 제방 모형에 광섬유 센서를 매립하여 제체 온도 정보를 센싱한 후 제방 내부에서 발생하는 이상 현상 감지 및 온도 변화를 분석하였다.

(3) 광섬유 온도 센서를 적용한 중규모 제방 실험 수행

(가) 실험의 개요

1차년도에 광섬유 온도 센싱을 활용한 제체 모니터링 기법의 체계를 구축하고 설치 방법 및 측정항목, 데이터 획득 등을 검토하기 위해 중규모 제방에 광섬유 온도 센서를 설치하여 실험을 진행하

였다. 한국건설기술연구원 안동하천연구센터의 A3수로 하류부 직선구간에서 광섬유 온도 분포 센서를 활용한 중규모 제방 모니터링 실험을 수행하였다. 입도가 균일한 사질토를 사용하여 제방 높이 1 m, 마루 1 m, 비탈경사 1:2, 전체 길이 5 m인 중규모 제방을 축조하였다. 제방을 축조하면서 광섬유 케이블을 함께 설치하였으며, 그림 2.1.9와 같이 3 m 높이에서 모래를 낙사시켜 기본적인 제체의 지반을 조성한 다음 0.2 m 높이 간격으로 물다짐을 반복적으로 수행하였다. 또한, 다짐을 마무리한 뒤 높이 20 cm 간격으로 광섬유 케이블을 제방 전면에 매립하였다.



그림 2.1.9 중규모 제방모형 실험 시 제방 축조 과정

(2) 광섬유 센서 매립 및 실험 조건

제방 내부의 온도 변화 감지를 위해 총 110 m의 광섬유 케이블을 그림 2.1.10과 같이 높이 1 m인 제방의 수직방향으로 0.2 m, 0.4 m, 0.6 m, 0.8 m 위치에 매립하였으며, 각 층에 설치한 광섬유로 제방 내부의 온도 변화를 모니터링하였다. 실험에 사용된 광섬유 케이블은 Optical Multimode3(OM3)로 외피가 얇아서 주위의 온도 전도도가 높으며 난연 및 자외선차단 기능을 포함하여 외부 충격에도 광섬유를 안전하게 보호할 수 있는 특성을 가지고 있다. 광섬유 케이블 매립 순서는 제방의 수직방향으로 높이 0.2 m 위치에 1 m 간격으로 광섬유 케이블 20 m를 연속적으로 설치한 후 높이 0.2 m 만큼 모래를 낙사시키고 물다짐 및 다짐을 수행하였다. 그리고 제체 높이 0.4 m 위치에 광섬유 케이블 23 m를 0.5 m 간격으로 설치 후 앞서 설명한 바와 같이 동일하게 낙사 및 다짐을 수행하였다. 제체 높이 0.6 m 위치에서는 광섬유 케이블 26 m를 0.3 간격으로, 제체 높이 0.8 m 위치에는 37 m의 광섬유 케이블을 0.1 m 간격으로 매립하였다. 4개의 층에 광섬유 케이블을 설치하고 각 층별에 설치된 광섬유 케이블 길이 및 위치를 기록하여 제방 위치별 온도 변화를 분석하였다. 광섬유 케이블 설치 후 광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템을 연결하여 12초

간격으로 모든 위치에 실시간 온도 데이터를 수집하였다(그림 2.1.11). 수집한 온도 데이터를 이용하여 온도가 점진적으로 혹은 급격하게 변하는 위치에서 제방 내부의 균열 및 침투 현상이 발생했다는 것을 추적할 수 있었다.

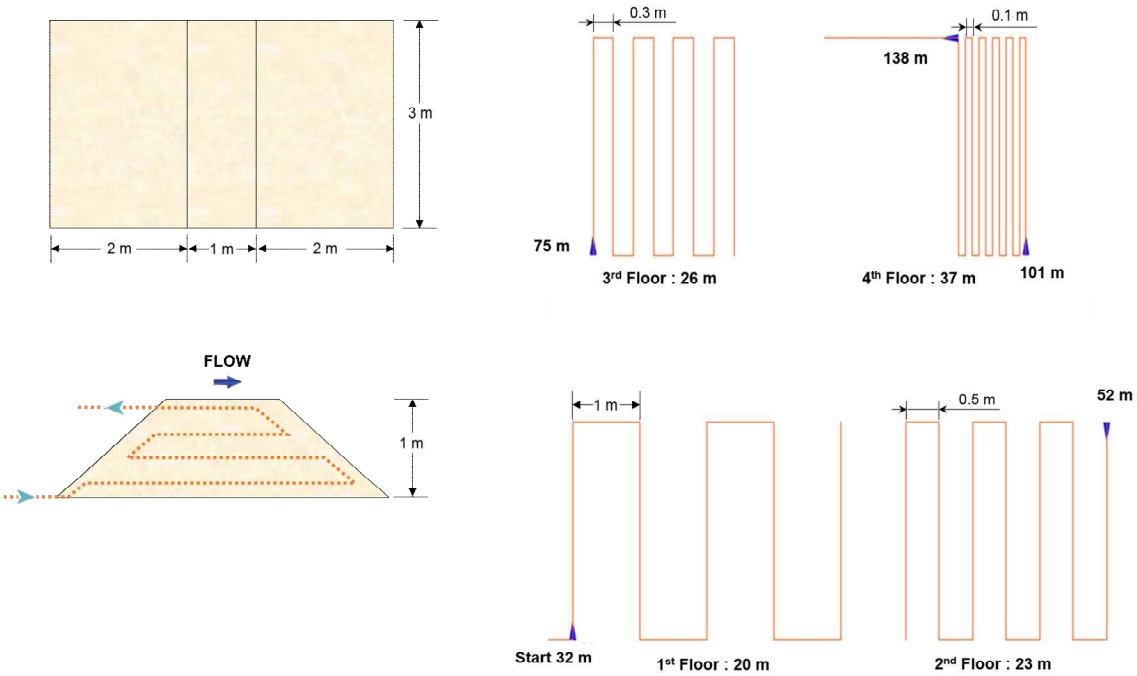


그림 2.1.10 제체 내 광섬유 케이블 매립 및 배치도



그림 2.1.11 광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템(DTS) 연결 및 설치

중규모 제방 실험이 수행된 A3수로는 유입부에서 유량을 공급할 경우 수로 길이 약 600 m를 흘러 제방 모형까지 도달하게 되어 있다. 하류에 유량이 도달하기까지 상당한 시간이 소요되며, 최대로 공급 가능한 유량의 한계가 있어 유량 공급 조절에 어려움이 있었다. 이에 대한 해결방안으로 그림 2.1.12와 같이 직선수로(A1수로)에서 유량을 공급하여 하류단 유출수조의 수위를 서서히 올려 제방이 축조된 수로에 역방향으로 유량을 공급하였다. 또한, 실제 현장 조건을 재현하고자 제방 붕괴가 발생할 때 제외지 측에서의 급격한 수위저하가 발생하지 않도록 상대적으로 방대한 유량을 공급하였

다. 제방의 붕괴는 단시간에 발생하므로 제방 주변에서 다양한 각도로 동영상 촬영을 수행하였다. 공급된 유량은 3 m^3/s이며 제방 월류의 영상자료를 획득하여 PIV(Particle Image Velocimetry) 분석으로 제방의 월류 발생 시 표면유속을 산정하였다. PIV 분석으로 산정된 유속은 약 1.1 m/s이며, 비탈면에서 유속이 급격하게 증가하는 것을 확인하였다. 실험 과정은 그림 2.1.13과 같이 서서히 수위를 올려 월류가 발생하는 조건을 유지하였다.



그림 2.1.12 하천연구센터의 실험수로 및 중규모 제방 실험 유량공급 개략도



그림 2.1.13 중규모 제방의 월류 및 붕괴 실험

(3) 실험 결과

중규모 제방 실험에서 광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템(DTS)을 활용하여 제방 내부의 온도 변화를 감지하고, 이를 통해 월류로 인한 제방의 침투 및 침식, 붕괴 과정을 분석하였다. 실험을 통해 획득한 온도 데이터를 기반으로 제방이 붕괴되는 순간의 온도 변화를 확인할 수 있었다. 또한, 월류 후 제방의 마루와 기초지반 부분이 붕괴되는 시점에 온도가 급격하게 변하는 것을 감지할 수 있었다. 그림 2.1.14는 제내지 측의 제방 내부의 온도 데이터를 층별로 나타낸 그래프이며, 그림 2.1.14(a)는 비탈면의 좌안, (b)는 비탈면의 우안, (c)는 비탈면의 중앙에서 샘플링한 온도 데이터를 도시한 것이다. 광섬유 케이블을 매립한 4개의 층에서 온도가 감소하기 시작하는 시점을 그래프에 표기하였으며, 파란색으로 표기한 부분은 제방의 바닥인 첫 번째 층과 그 다음인 두 번째 층의 온도 변화 시점을 나타낸 것이다. 또한, 제방 마루부분과 가장 근접한 네 번째층과 그 아래인 세 번

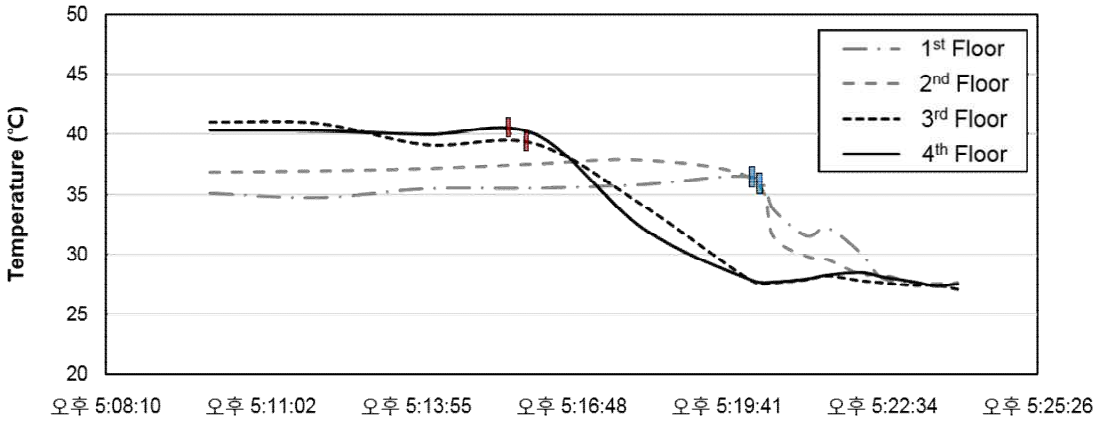
째 층은 빨간색으로 표기하였다.

제방의 제내지 비탈면 측의 좌안의 경우(그림 2.1.14(a)), 제방의 월류가 발생한 후 제방 마루부분과 기초지반 부분의 온도변화가 명확하게 나타났다. 그래프에서 빨간색으로 표기한 바와 같이 네 번째 층에서 가장 먼저 온도가 감소하기 시작하였으며, 그 뒤로 세 번째 층에서 온도가 감소하였다. 이는 월류 후 마루부분부터 침투 및 침식이 발생하므로 가장 먼저 온도변화가 나타난 것으로 해석할 수 있다. 마루 근접한 부분에 설치한 광섬유 케이블의 온도 변화가 시작되고 약 5분 후에 파란색으로 표기한 바와 같이 첫 번째와 두 번째 층에서 온도가 급격하게 감소하였다. 첫 번째 층과 두 번째 층의 최저와 최대의 온도 차는 각각 2.68°C, 4.81°C로 나타났으며, 세 번째 층과 네 번째 층은 6.29°C와 7.83°C로 나타났다. 이러한 결과는 실험 과정에서 확인된 바와 같이 마루부분은 침식 발생 후 완전히 붕괴되어 온도 차가 크고, 기초 지반부분에는 서서히 침투가 발생하면서 붕괴되었으므로 온도 차가 상대적으로 작은 것으로 해석할 수 있다. 또한, 월류 후 제방이 붕괴되는데 걸린 시간은 약 8분이며, 모든 층에 온도가 급격하게 감소한 후 수렴하는 시점을 고려했을 때 실제 붕괴되는 시간과 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

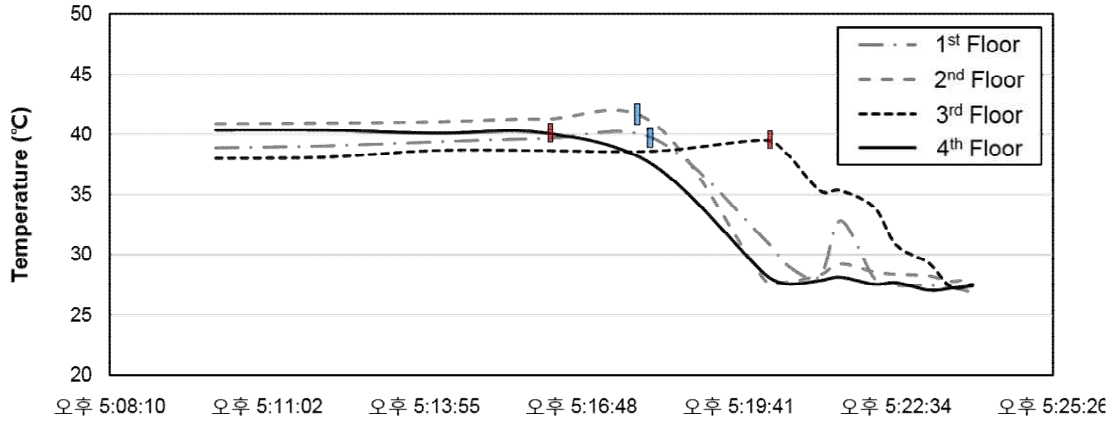
그림 2.1.14(b)의 경우, 제내지 비탈면 측의 우안의 제체 온도 변화를 분석한 결과로써 좌안과 동일하게 마루부분과 근접한 네 번째 층에서 가장 먼저 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 네 번째 층에서 급격한 온도변화가 시작된 후 약 2분 후에 두 번째 층, 첫 번째 층에서 온도변화가 나타났다. 이는 마루부분의 침식이 발생하고 서서히 기초지반까지 침식되면서 전체적으로 붕괴가 된 것으로 해석할 수 있다. 또한, 전반적으로 온도가 수렴되는 부분을 고려했을 때 제체 전면이 붕괴되는 시점은 좌안보다 빨리 발생함을 확인할 수 있었다. 첫 번째 층과 두 번째 층의 최저와 최대 온도 차는 각각 8.31°C, 13.03°C로 나타났으며, 세 번째 층과 네 번째 층은 3.13°C와 8.95°C로 나타났다. 세 번째 층의 급격한 온도 저하는 가장 마지막에 발생하였으며, 좌안의 결과와 조금 상이하게 나타났다. 이에 대한 추가적인 분석과 해석이 필요한 것으로 판단된다.

제내지 측의 비탈면 중앙 부분(그림 2.1.14(c))에서는 세 번째 층을 제외하고 비슷한 시점에 온도가 감소하는 것을 확인하였으며, 네 번째, 두 번째, 첫 번째 층의 순으로 온도 변화가 시작되었다. 좌안과 우안 결과에 비해 두드러지는 경향이 나타나진 않았으나, 제방이 완전히 붕괴되는 시점에서 온도가 수렴하는 것은 확인하였다. 그리고 첫 번째와 두 번째 층의 온도는 점차적으로 감소하는 것을 보아 서서히 침투가 발생하고 침식이 일어난 것으로 해석된다.

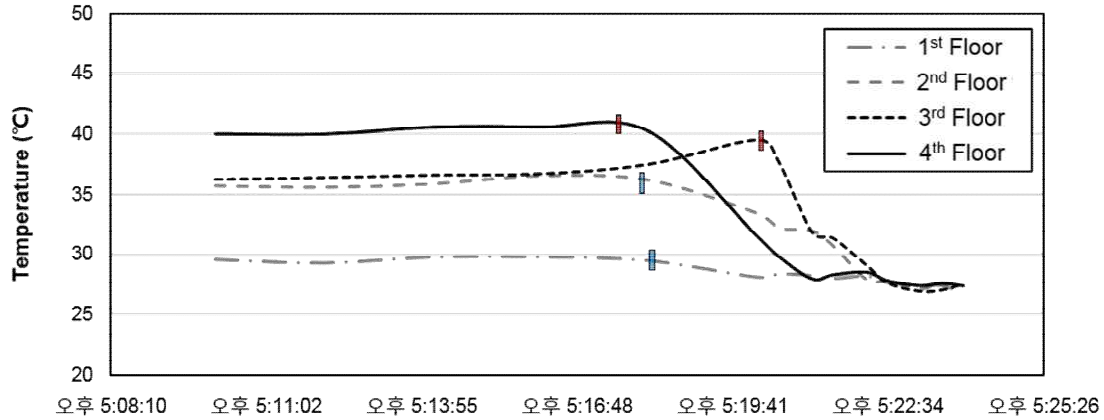
그림 2.1.14에서 네 번째 층에서 온도가 급감하는 시간을 고려했을 때 좌안에서 가장 먼저 온도의 급격한 감소가 시작되었고, 그 뒤로 우안과 중앙 순으로 온도가 급격하게 감소하였다



(a) 제방 좌안 측의 제체 내 온도 변화



(b) 제방 우안 측 제체 내 온도 변화



(c) 제방 중앙의 제체 내 온도 변화

그림 2.1.14 중규모 제방 내부의 온도 변화 분석 결과

제방 내부의 온도 변화를 공간적으로 관찰하기 위해 월류가 시작되는 시점의 각 층별 온도 분포를 분석하였다. 그림 2.1.15는 공간적 온도 분포를 나타낸 것이며, x축은 제외지를 기준으로 제방의 폭, y축은 제방의 길이를 나타낸다. 급격하게 제방 붕괴가 진행되면서 제방의 우안에서 전반적으로 온도가 낮은 것을 확인할 수 있었고, 이러한 온도 자료를 기반으로 제체 마루의 우안이 먼저 침식되

고 그 이후 좌안과 중앙에서 침식이 발생한 것을 판단할 수 있었다. 광섬유 온도 센싱을 통해 획득한 제방 내부의 온도 데이터를 활용하면 제방 붕괴되는 시점을 보다 정확하게 분석이 가능함을 확인하였다.

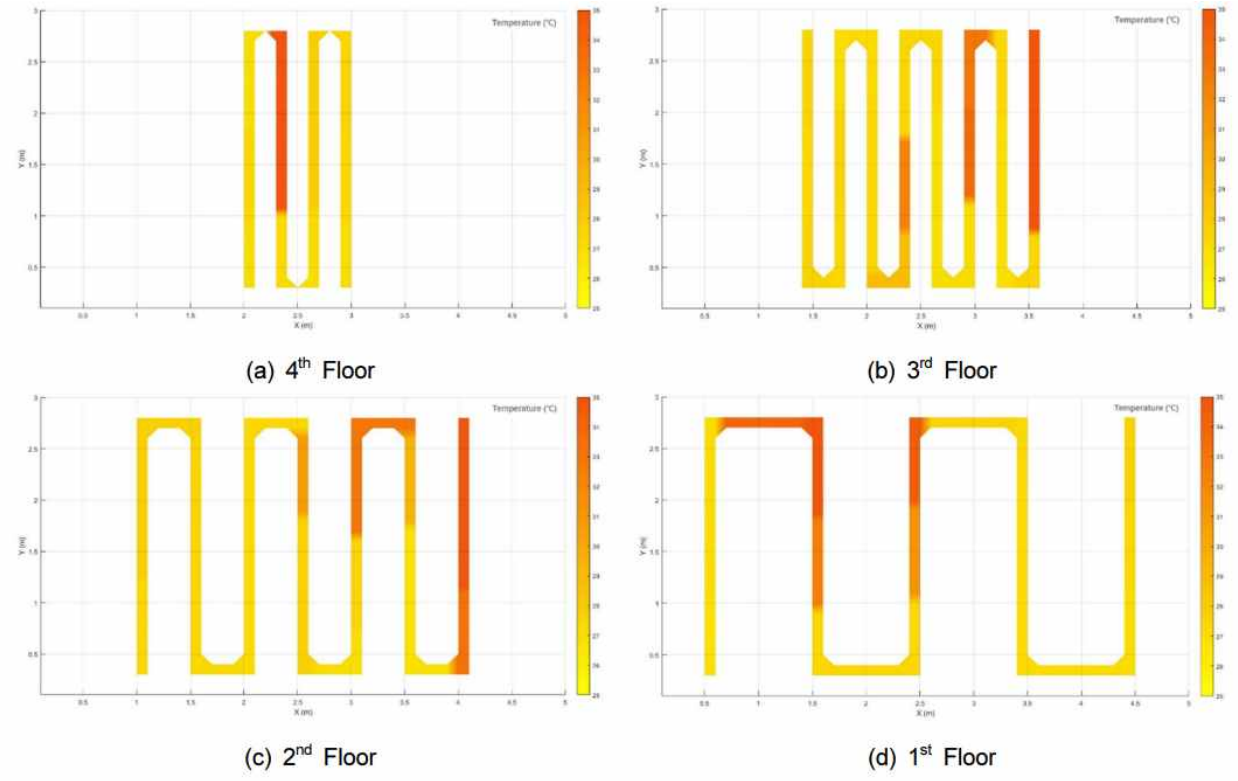


그림 2.1.15 제방 높이별 횡적 온도 분포도 (Ahn et al., 2019)

1차년도에 수행한 중규모 제방 실험을 통해 제체에 설치한 광섬유 케이블로부터 측정된 온도자료를 통해 제체의 침투 및 침식, 붕괴 등의 현상을 분석할 수 있는 가능성을 확인하였으며, 제방 내부에 침투가 서서히 진행됨에 따라 각 층별, 구간별 온도변화가 시간에 따라 확연하게 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 실험을 통해 본 연구에서는 광섬유 분포형 온도 시스템(DTS)을 이용하여 제체 내부의 온도 정보 획득을 통해 제방의 침투, 균열, 붕괴, 활동 등의 위험성을 감지할 수 있다는 것을 확인하였다.

(4) 광섬유 온도 센서를 적용한 실규모 제방 실험 수행

(가) 실험의 개요

2차년도에는 광섬유 온도 센싱을 활용한 제체 모니터링 시스템의 실증을 목적으로 실규모 제방 실험을 수행하였다. 광섬유 온도 센싱을 통한 실규모 제방 내부의 이상감지 모니터링 기법 적용성을 검토하기 위해 한국건설기술연구원 하천연구센터 내의 실규모 제방 실험장에서 총 2회에 걸쳐 실규

모 제방 실험을 수행하였다. 하천연구센터 내의 실규모 제방 실험장의 저류량은 약 4,389 m^3이며, 최대 4대의 펌프를 가동하여 방대한 유량을 공급할 수 있다.

실규모 제방 실험을 수행하기 위해 제방 총 길이 10 m, 높이 3 m, 마루폭 2 m, 비탈경사 1:2인 실규모 제방을 축조하였다(그림 2.1.16). 제방 내부의 온도 변화를 모니터링하기 위해 제방 모형 좌측 일부 구간에 광섬유 케이블을 매립하였다. 본 연구에서는 광섬유 온도 센싱을 적용한 중규모 제방 실험을 통해 일반적인 광섬유 케이블을 적용한 결과 온도변화 감지능을 추가적으로 개선할 필요가 있음을 인식하였다. 따라서, 실규모 실험에서는 일반적인 광섬유 케이블에 히팅 케이블을 피복한 광섬유 케이블을 적용하여 실험을 진행하였다. 실규모 제방 실험에서는 코어 직경 50 μm, 클래딩 125 μm인 OM2(Optical Multimode) 광섬유 케이블을 사용하였다. OM2 케이블은 전송속도가 빠르고 높은 대역폭을 지원하며 외부 환경 변화에 민감한 특징이 있다.

광섬유 케이블에 일정한 온도 값으로 조절 가능한 히팅 케이블을 피복하여 실험을 진행하였다. 광섬유 케이블을 히팅 케이블로 피복하여 일정한 온도를 가열하면 물 이외의 온도에 대한 영향을 받지 않는 조건에서 제방 내부의 온도 변화를 모니터링할 수 있다. 실규모 제방 실험에서는 히팅 케이블이 피복된 광섬유 케이블 총 150 m를 활용하여 실험을 수행하였다.

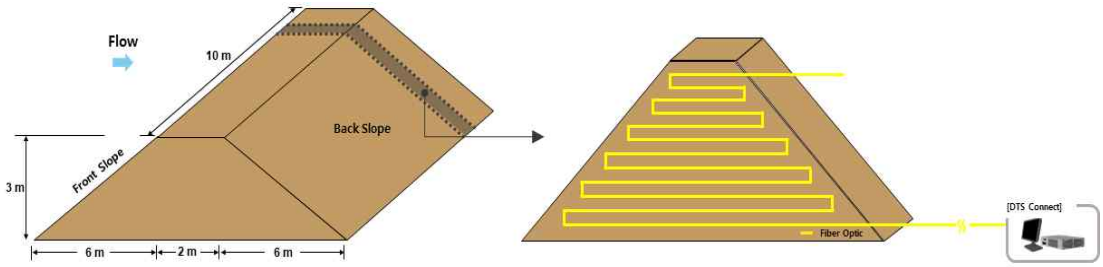
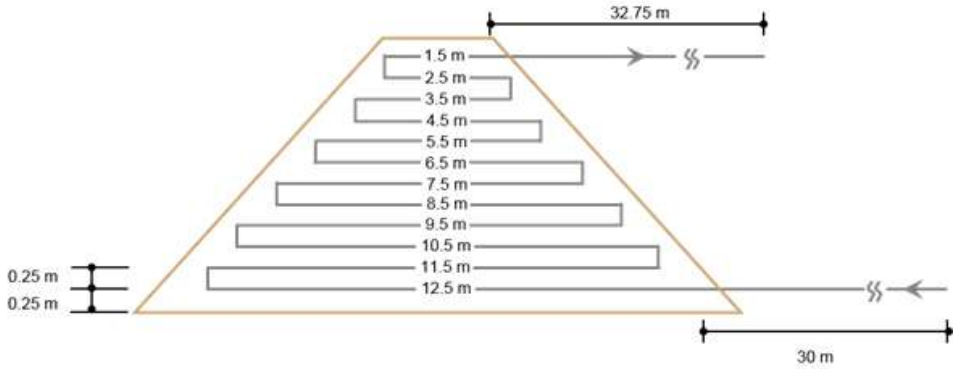


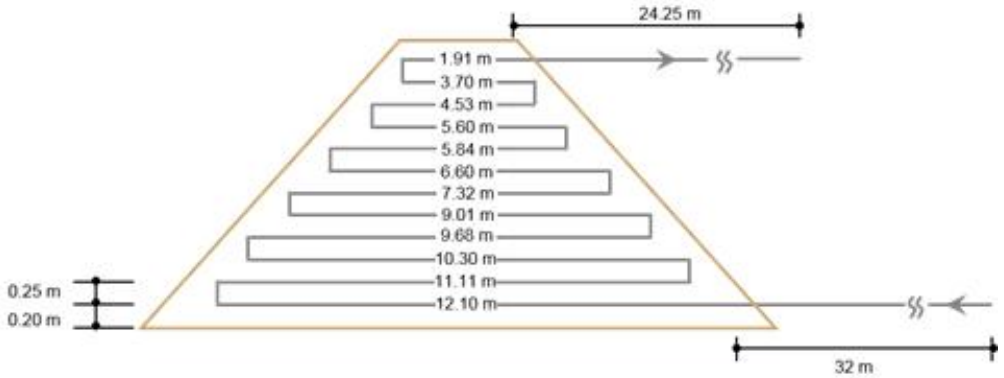
그림 2.1.16 실규모 제방 모형 및 광섬유 매립

광섬유 케이블을 매립하는 과정에서 가장 중요한 것은 광섬유가 제방 어느 위치에 설치되는지 현장에서 스케치를 하면서 매립작업을 수행하는 것이다. 광섬유를 매립하기 전에 매립 계획도를 작성하지만 실제 현장에서는 매립 계획도에 맞춰서 광섬유 케이블을 설치한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서, 매립계획(안)에 맞춰 광섬유 케이블 매립작업을 수행하면서 실제 광섬유의 길이와 설치된 위치를 현장에서 스케치하는 작업이 필요하다. 이러한 이유는 광섬유를 매립한 정확한 위치를 알아야 제방 내부의 온도변화를 명확하게 해석할 수 있기 때문이다. 따라서, 현장에서 광섬유를 매립하면서 스케치를 함께 진행해야하며, 광섬유 케이블 시작되는 위치부터 매립되는 길이, 제방의 높이와 사면으로부터 떨어진 거리를 정확하게 측정 및 스케치하여 최종 매립도를 작성해야 한다. 본 실험에서도 그림 2.1.17의 (a)와 같은 매립계획(안)에 따라 광섬유 케이블을 매립하였으나, 현장에서 스케치한 결과를 토대로 광섬유 매립도를 재작성한 결과 그림 2.1.17의 (b)와 같이 매립된 결과를 확인 할 수 있었다.

본 실험에서는 먼저, 기초지반에서 수직방향으로 약 0.2 m 떨어진 위치에 12.10 m의 광섬유를 매립하고 흙을 포설한 후 진동롤러로 다짐을 수행하였다. 다짐 후 수직방향으로 0.25 m 올라간 층에 광섬유 케이블을 11.11 m 설치하고 흙을 포설한 후 다시 층 다짐을 수행하였다. 이렇게 연속적으로 광섬유 케이블을 설치하고 다짐을 반복하면서 제방 모형에 맞춰 총 87.7 m 광섬유 케이블을 매립하였다. 또한, 광섬유 케이블로부터 안정적인 온도 센싱 결과를 얻기 위해 광섬유 케이블의 시작과 끝 부분에 안정구간을 확보했으며, 본 실험에서는 광섬유 케이블의 시작구간 32 m, 케이블 끝나는 구간 24.25 m의 안정구간을 확보하여 광섬유를 매립하였다. 제방 내부에 광섬유 케이블 매립을 완료한 후 광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템(DTS)을 연결하여 제방 내부의 온도를 센싱하였다. 광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템으로 광섬유 케이블 1 m 간격의 위치에서 6초 간격으로 제방 내부의 온도 데이터를 수집하였다. 이와 더불어, 제외지 측의 수위 상승 및 제방 내부의 침투에 따른 수위 저하를 검토하기 위해 제외지 좌측에 압력식 수위계(OTT Pressure Level Sensor)를 설치하여 수위를 측정하였다. 제외지의 수위는 압력식 수위계를 이용하여 10초 간격의 수위 데이터를 획득하였다. 앞서 설명한 바와 같이 광섬유 케이블 매립 및 층 다짐, 압력식 수위계 설치가 끝난 후에 제외지에 유량을 공급하여 실규모 제방 실험을 수행하였다. 그림 2.1.18은 실규모 제방 실험을 위한 설치 및 사전 작업의 전반적인 과정을 나타낸 것이다.



(a) 광섬유 케이블 매립계획(안)



(b) 제방에 매립된 광섬유 케이블 실제 매립도

그림 2.1.17 광섬유 케이블 매립계획(안) 및 매립도

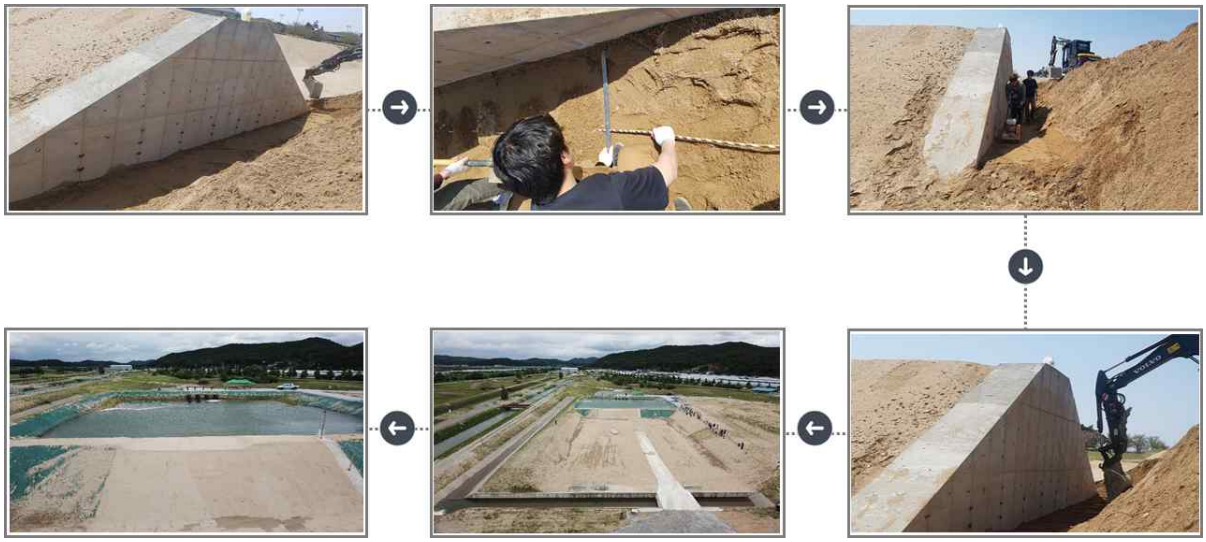


그림 2.1.18 실규모 제방 실험 과정

(나) 실규모 제방의 침투 모니터링 실험

실규모 제방 실험은 2회에 걸쳐 수행되었으며, 1차 실험은 광섬유 케이블을 매립하고 1개월 후에 실험을 진행하였으며, 제방 실험장의 펌프 2대를 가동하여 제외지(저류지)에 유량을 공급하였다. 제방 내부에 광섬유 매립 후 저류지에 유량을 처음 공급하였으며, 저류지에 유량을 공급하여 제외지 수위가 2.5 m로 상승한 시점에서 유량 공급을 중단하고 실규모 제방의 침투실험을 진행하였다. 실험이 진행되는 동안 압력식 수위계로 제외지 수위을 측정하였고, 광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템(DTS)으로 제체 내부의 온도를 모니터링하였다. 그 결과, 그림 2.1.19에 나타난 바와 같이 저류지에 유량을 공급하여 상승시킨 2.5 m의 수위가 4시간 만에 제방 바닥까지 떨어진 것을 확인할 수 있었다. 1차 실험의 경우, 저류지에 공급된 유량이 매우 짧은 시간에 모두 제방으로 침투되어 수위가 저하된 것이라고 판단하기는 어렵다. 이러한 원인은 대부분 제방이 아닌 지반으로 침투되어 제외지의 수위가 저하된 것으로 판단된다. 즉, 실규모 제방 실험장 주변의 지하수위가 포화된 상태에서 실규모 제방 침투실험이 진행되어야 제방 침투로 인해 저류지 수위가 저하된 것으로 해석할 수 있다. 이와 같은 문제점을 1차 실험을 통해 인지하였고, 2차 실험은 1차 실험에서 확인된 문제점들을 보완 및 개선하여 진행하였으며, 2차 실규모 제방 침투실험은 1차 실험이 끝난 후 제방 내부에 광섬유 케이블을 존치하고 2개월 후에 수행하였다. 2차 실험이 수행되기 전에 실규모 제방 실험장 주변의 지하수위를 포화상태로 유지하기 위해 제방 실험과 무관하게 제방 실험장 주변의 실험수로와 제방 실험장 저류지에 유량을 공급하였다.

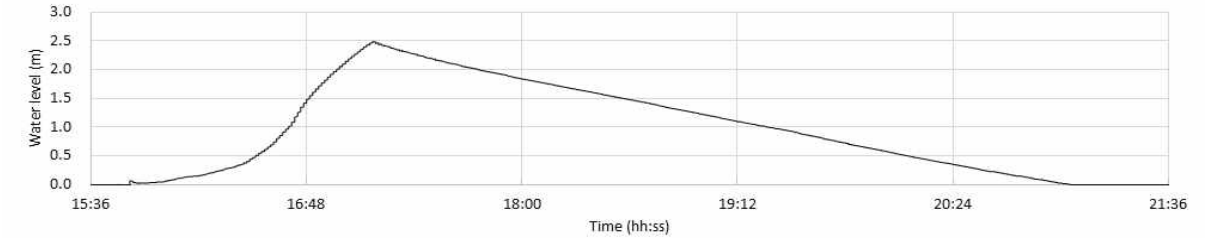


그림 2.1.19 실규모 제방 실험 1차 - 수위 측정 결과

2차 실규모 제방 실험은 제외지에 설치한 압력식 수위계와 광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템(DTS) 작동여부를 확인한 후 진행하였다. 제방 실험장의 펌프 2대를 가동하여 저류지에 유량을 공급하여 제외지 수위를 점진적으로 상승시켰다. 1차 실험과 동일하게 수위가 2.54 m 상승한 시점부터 유량 공급을 중단하고 침투실험을 진행하였다. 2차 실험에서는 1차 실험의 문제점들을 보완하여 제방의 침투를 유도할 수 있었다. 제방 침투실험은 4시간 동안 진행되었으며, 침투가 진행되는 동안 제외지 좌측에 설치한 압력식 수위계로 수위를 모니터링하여 제방 침투에 따른 수위변화를 확인하였다. 압력식 수위계로 10초 간격의 수위 데이터를 획득하였으며, 그림 2.1.20에 나타난 바와 같이 제체에 침투가 진행되면서 제외지 수위가 서서히 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 침투실험 시작 후 1시간이 경과했을 때, 수위는 0.19 m 저하되었으며, 2시간 경과했을 때는 0.32 m 저하되었다. 3시간 경과했을 때는 초기 수위보다 0.39 m 저하되었다. 침투실험을 종료한 시점에서는 실험을 시작할 때의 수위(2.54 m)보다 약 0.4 m의 수위가 저하된 것으로 확인되었다. 2차 실험에서는 1차 실험과 달리 제외지 수위가 급격하게 변하지 않았으며, 이러한 수위변화는 제체 침투로 인한 수위 저하로 판단된다. 이와 더불어, 제방 실험장의 지하수위가 포화된 상태에서 실험을 진행했으므로 저하된 수위만큼의 저류량은 제방 내부로 침투되었다고 해석할 수 있다. 이에 따라, 2차 실규모 제방 침투실험에서는 실제 제방의 침투 현상을 재현하여 침투로 인한 제방 내부의 온도변화를 분석할 수 있는 데이터를 획득할 수 있었다. 광섬유 온도 센싱을 통해 획득한 제방 내부의 온도 자료와 제외지의 수위변화 자료를 활용하여 제방의 침투 여부 및 침윤선 등을 분석하였다. 특히, 침투실험의 경과시간에 따른 제방 내부의 온도 분포를 분석하여 제방의 침투 시점과 정도, 침윤선 등을 확연하게 확인할 수 있었다.

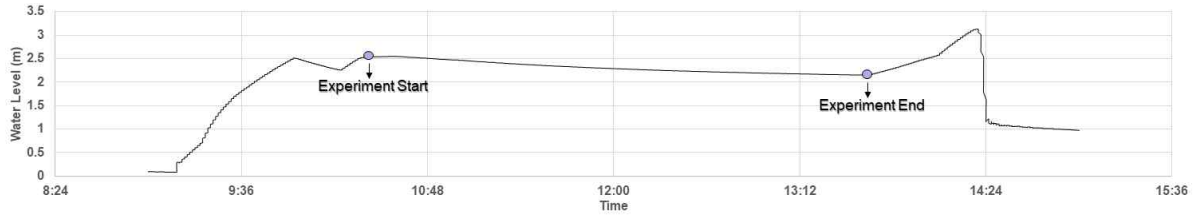


그림 2.1.20 실규모 제방 실험 2차-수위 측정 결과

(다) 실규모 제방 실험 결과

광섬유 온도 센싱을 통한 실규모 제방 침투 실험에서 획득한 제방 내부의 온도 자료와 제외지의 수위 변화 자료로 침투로 인한 제체 온도변화 및 침윤선 등을 분석하였다. 실규모 제방 실험 결과 분석을 위한 데이터는 2차 실규모 제방 실험 결과만 활용하였다. 앞서 언급한바와 같이 1차 실규모 제방 실험은 실험과정에서 발생한 문제점으로 인해 결과 분석에 활용할 수 없었다. 이에 따라, 2차 실규모 제방 실험 결과로 다양한 분석을 시도하였다.

광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템(DTS)를 이용하여 획득한 제체의 온도 자료는 센싱 과정에서 발생하는 랜덤 오차로 인해 변동성이 존재한다. 따라서, 이러한 변동성을 줄이고 장시간의 데이터의 변화 양상을 검토하기 위해서는 데이터 후처리 과정이 필요하다. 광섬유 온도 센싱 데이터와 같은 방대한 양의 데이터를 후처리하는 방법은 다양하므로 본 연구에서는 Bae and Ji(2019) 연구에서 제시한 후처리 알고리즘을 적용하였다. 데이터 스무딩 처리 기법 중 지수가중이동평균법(Exponentially Weighted Moving Average)은 과거 데이터에 지수적으로 낮은 가중치를 부여하는 스무딩 기법으로 최신 수집된 데이터에 높은 가중치를 반영하여 신뢰성이 있는 후처리 결과를 얻을 수 있다(Ahn et al., 2019). 이에 따라, 본 연구에서는 수집된 온도 데이터를 지수가중이동평균법으로 스무딩 처리하여 제체의 온도변화를 분석하였다.

시간 t에 대한 온도 자료를 x_t로 표현할 때 지수가중이동평균법으로 스무딩한 결과(S_t)는 식(2.1)과 식(2.2)로 정리할 수 있다(Brown, 1963).

$$S_t = ax_t + (1-a) \cdot S_{t-1}(x) \tag{2.1}$$

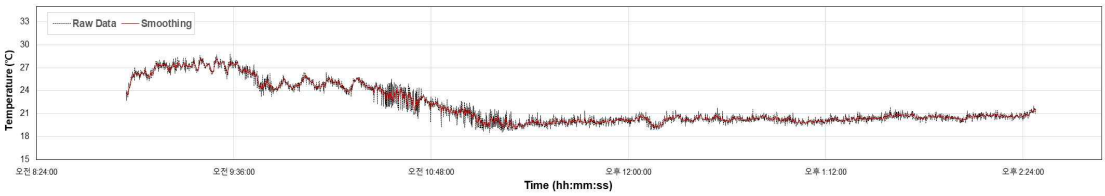
$$S_o = x_0 \tag{2.2}$$

여기서, a는 스무딩 계수, S_0는 초기 측정 값을 스무딩 처리한 값, x_0는 초기 측정값이다.

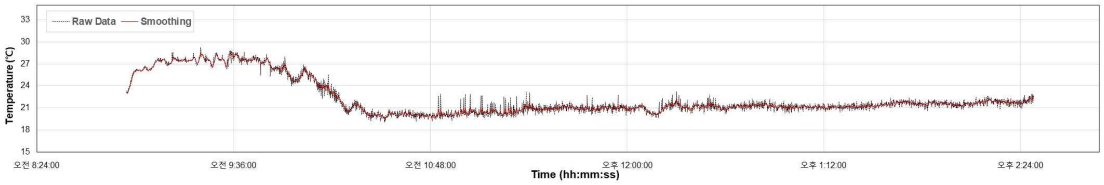
본 연구에서 스무딩 계수(a)는 0.3을 적용하였으며, 스무딩 계수가 감소할수록 시간적으로 오래된 데이터의 가중치가 높아지므로 원자료의 스무딩 처리 효과가 상승한다. 광섬유 온도 센싱의 원자료를 스무딩한 결과는 그림 2.1.22에 나타난 바와 같으며, 검은색 점선은 광섬유 온도 센싱을 통해 획득한 온도의 원자료이고, 빨간색 실선은 스무딩한 결과로 원자료의 랜덤 오차 및 변동성이 감소된 것을 확인할 수 있다.

광섬유 온도 센싱을 통해 제방 앞비탈면(제외지 사면)의 시간에 따른 온도 데이터를 획득하여 제방 위치별 온도의 원자료와 스무딩 처리한 결과 그래프는 그림 2.1.21과 같다. 그림 2.1.21의 (a)는 기초지반에서 수직방향으로 약 0.45 m 위치의 앞비탈면 온도 데이터와 온도 데이터를 스무딩한 결과의 그래프이고, (b)는 제방 높이 0.95 m 위치의 앞비탈면, (c)는 제방 높이 1.45 m 위치의

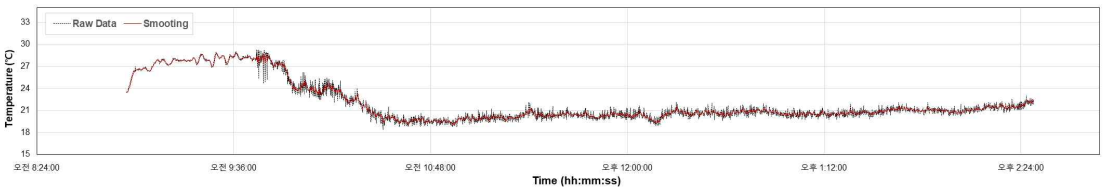
앞비탈면, (d)는 제방 높이 1.95 m, (e)는 제방 높이 2.45 m, (f)는 제방 높이 2.95 m 위치의 앞비탈면에서 광섬유 센서로부터 센싱된 온도 데이터와 온도 데이터를 스무딩한 그래프를 나타낸 것이다.



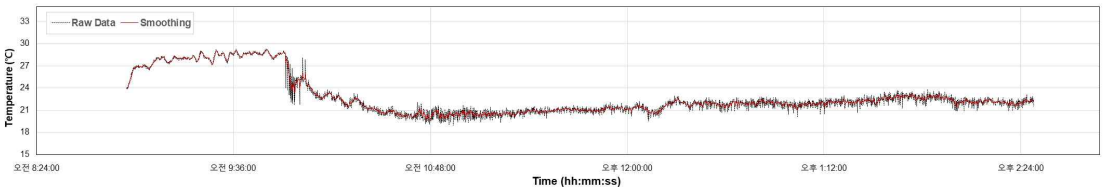
(a) 제방 높이 0.45 m 위치의 앞비탈면



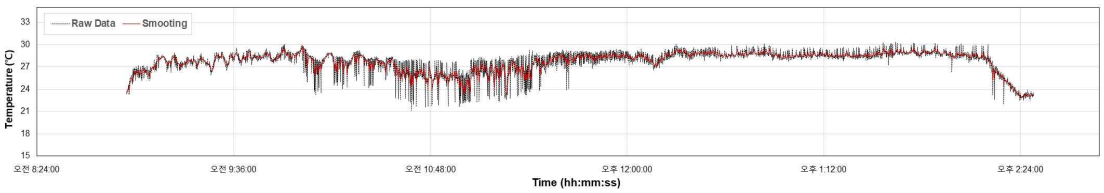
(b) 제방 높이 0.95 m 위치의 앞비탈면



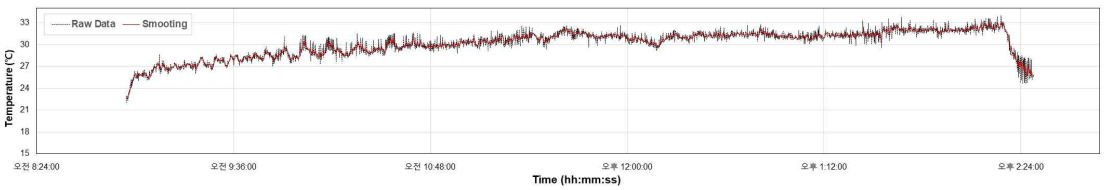
(c) 제방 높이 1.45 m 위치의 앞비탈면



(d) 제방 높이 1.95 m 위치의 앞비탈면



(e) 제방 높이 2.45 m 위치의 앞비탈면

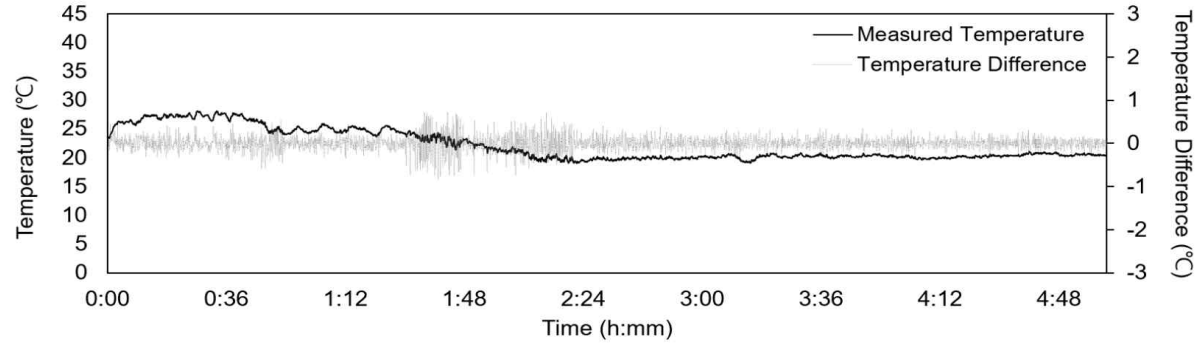


(f) 제방 높이 2.95 m 위치의 앞비탈면

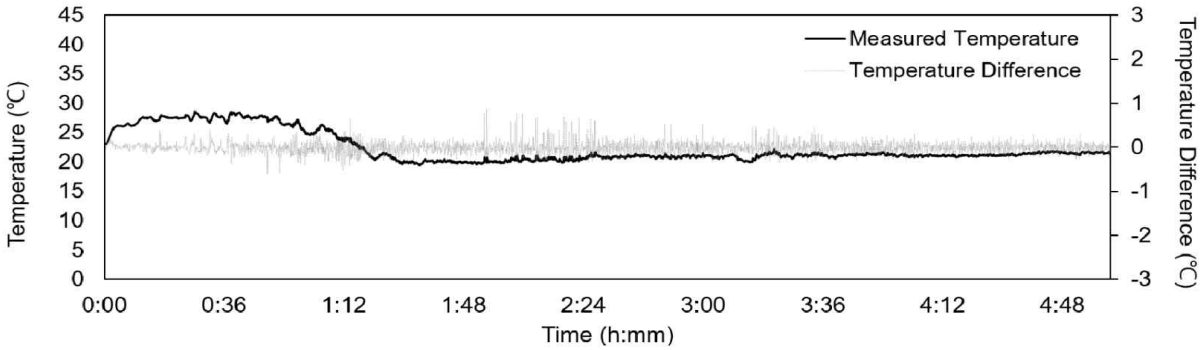
그림 2.1.21 제방 앞비탈면의 광섬유 온도 센싱 데이터 및 스무딩 처리 결과

그림 2.1.21의 (a)는 저류지에 유량을 공급하는 시점에는 약 27℃온도를 유지하다 수위가 약 2 m까지 상승했을 때부터 온도가 떨어지면서 24~26℃ 범위의 온도를 나타냈다. 수위를 2.5 m까지 상승시키고 침투실험이 시작되는 시점부터 서서히 온도가 감소하고 침투가 약 1시간 경과한 시점에는 온도가 19℃까지 저하된 것을 확인할 수 있었다. 제방 높이 0.95 m 위치의 앞비탈면에서 센싱된 온도는 침투가 진행됨에 따라 초기 온도보다 7℃ 저하되어 19~20℃ 범위로 나타났다. 그림 2.1.21의 (b)와 (c)는 그림 2.1.21(a)와 비슷한 경향으로 나타났으며, 침투가 진행됨에 서서히 온도가 저하되어 초기 온도보다 각각 7℃, 8℃ 감소된 것으로 나타났다. 또한, 그림 2.1.21의 (d)는 유량을 공급하는 과정에서 온도가 급격하게 감소하는 경향이 나타났으며, 침투 실험 후에는 서서히 온도가 감소하면서 침투 경과 1시간 경과 시점에서는 침투실험 시작한 시점의 온도보다 2℃ 감소된 것을 확인하였다. 그림 2.1.21의 (e)는 제방 높이 2.45 m 위치의 앞비탈면의 온도 자료로 온도변화의 범위가 크게 나타났다. 이러한 결과는 광섬유가 설치된 위치에 수위가 도달하여 침투가 발생하고, 침투 실험이 진행됨에 따라 수위가 저하되어 다시 온도가 상승하는 상황이 발생한 것으로 판단된다. 마지막으로 그림 2.1.21의 (f)는 제외지 수위보다 높은 곳의 광섬유 온도 센싱 데이터 결과이며, 광섬유가 설치된 위치까지 수위가 오르지 않았기 때문에 온도는 큰 변화가 없다. 또한, 다른 위치의 온도보다 상대적으로 높은 온도가 센싱되었으며, 이러한 이유는 제방 마루에 가장 가까운 위치에 설치되어 자외선과 케이블 히팅으로 인해 점점 온도가 상승한 것으로 해석된다.

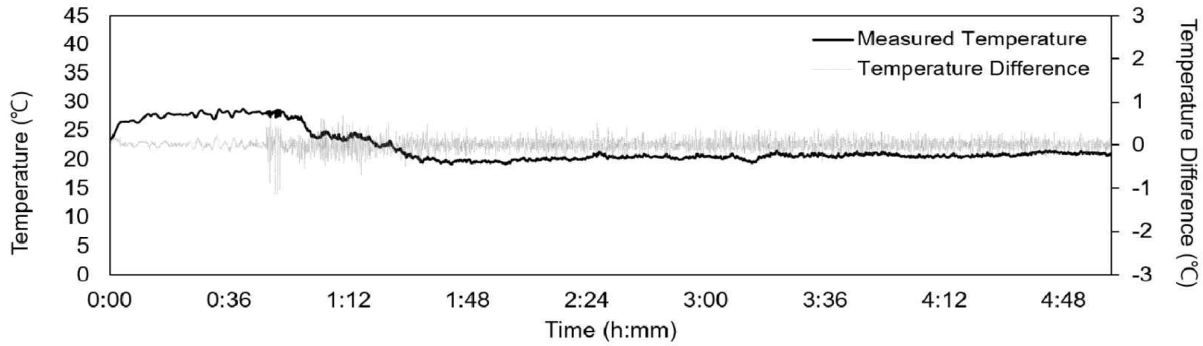
광섬유 센서로 온도 정보를 기반으로 제체의 이상현상 발생여부를 판단하기 위해 6초 간격으로 측정된 온도 값에 대해 바로 이전에 측정된 온도 값의 차이를 각각 계산하였다. 그림 2.1.22의 회색선에서 양(+)의 값인 경우 현재 온도가 6초전에 온도보다 상승한 것을 의미하고, 음(-)의 값인 경우 현재 온도가 6초전에 온도보다 감소한 것을 의미한다. 이러한 온도 차는 급격한 온도 변화가 발생하는 시점과 위치를 판별하기 위한 것이며, 온도 변화가 발생하는 시점에서 온도 차 또한 변동 폭이 크게 나타났다. 제방 높이 0.45 m 관측된 자료에서 온도 차의 표준편차는 0.16℃이며, 표준편차 범위를 벗어나는 시점에서 온도 변화가 급격하게 나타났다. 제방 높이 0.95 m, 1.45 m 위치에서 센싱된 온도 변화는 비슷한 경향으로 변화하였으며, 온도 차의 표준편차는 각각 0.13℃, 0.14℃로 산정되었다. 또한, 제방 높이 1.95 m 온도 차의 표준편차는 0.14℃로 산정되었다. 전반적으로 제방 내부 온도 데이터에서 온도차가 0.14℃ 이상으로 발생한 시점에서는 급격한 온도 변화가 있는 것으로 해석된다.



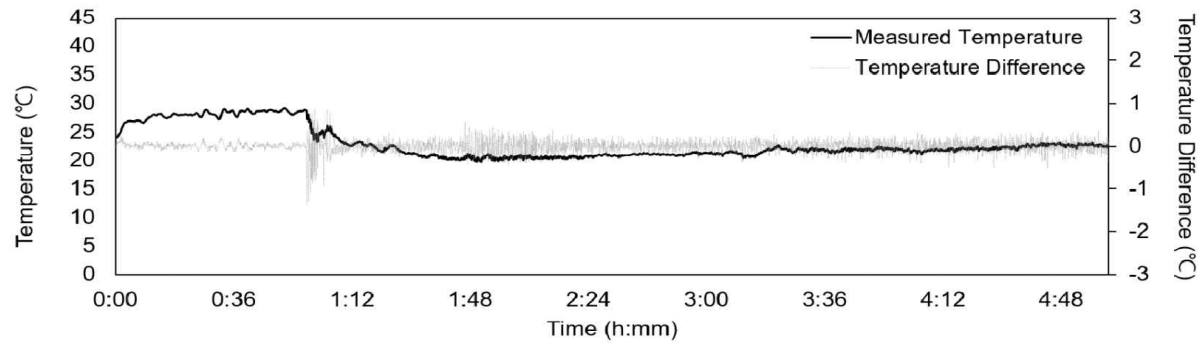
(a) Levee height = 0.45 m



(b) Levee height = 0.95 m



(c) Levee height = 1.45 m

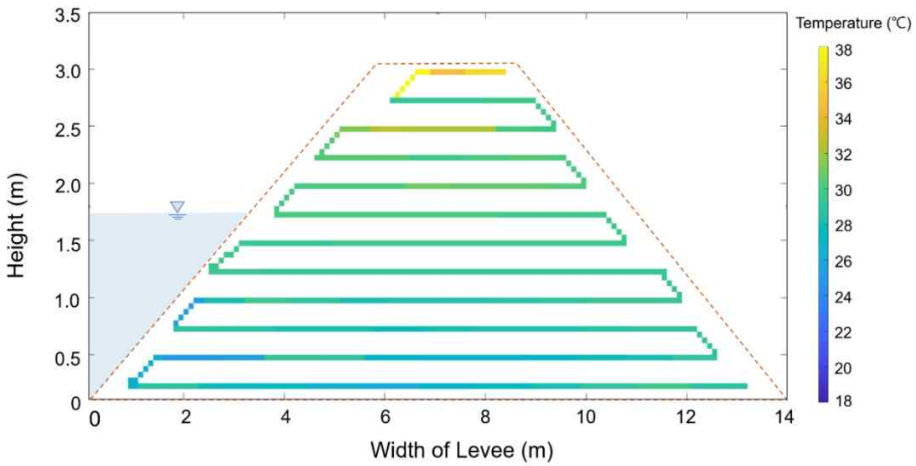


(d) Levee height = 1.95 m

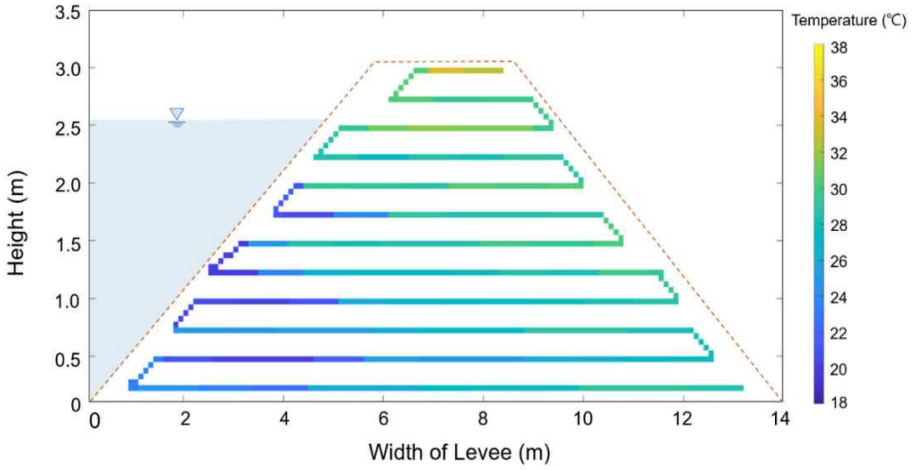
그림 2.1.22 실규모 제방 내부의 온도 변화 및 온도차 그래프(Ahn et al., 2020)

제방 내부의 온도변화를 공간적으로 분석하기 위해 제방 단면에 대한 광섬유 온도 센싱 데이터를 도시하였다(그림 2.1.23). 그림 2.1.23의 (a)는 저류지에 유량이 공급되고 약 35분이 경과된 시점의 제방 내부의 온도 분포이며, 저류지 수위(1.75 m)를 고려했을 때 저류지 측의 사면의 온도 변화가 발생한 것으로 판단된다. 유량공급 후 약 1시간 35분 경과한 시점에서 저류지 수위가 최고 수위(2.54 m)에 도달하였으며, 이때의 제방 내부의 온도 분포는 그림 2.1.23 (b)에 나타난 바와 같다. 저류지 수위가 2.54 m인 시점에서의 저류지 사면의 온도 저하는 뚜렷하게 나타났으며, 제방 저면에서는 제내지 측까지 온도가 감소된 것으로 해석된다. 제방 내부의 온도 감소는 시간이 경과함에 따라 제외지에서 제내지 방향으로 확장되었으며(그림 2.1.23 (c)), 이는 저류지에서 제내지 방향으로 침투가 진행되면서 나타난 온도 변화임을 추정할 수 있다. 제방 내부에 매립한 광섬유로부터 센싱된 온도 정보를 통해 제방의 시간적, 공간적 온도 변화를 분석하였으며, 이를 통해 제방에 침투가 발생하면서 온도가 확연하게 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 제방 앞비탈면의 온도 센싱 데이터를 해석한 결과, 제외지 수위에 따라 제방 사면의 온도가 변하는 것을 명확하게 확인할 수 있었고, 광섬유 온도 센싱 데이터로 제체에 침투가 발생하는 시점과 어느 정도 침투가 진행되는지 예측할 수 있었다.

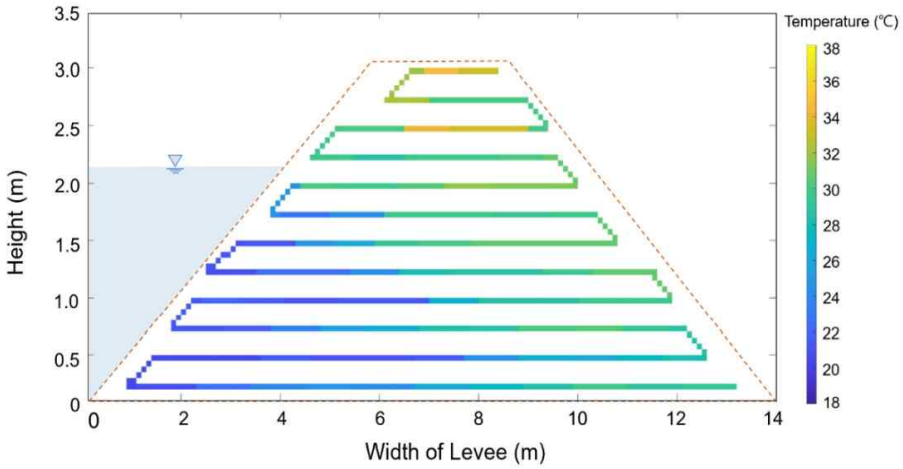
광섬유 온도 센싱을 통한 실규모 제방 침투실험을 통해 침투에 따른 제방 내부의 온도 변화로 제체 상태를 간접적으로 판단할 수 있었으며, 제방 앞비탈면의 온도 센싱 데이터에서 수위 상승 및 저하에 따라 온도변화가 발생하는 것으로 확인할 수 있었다. 또한, 제방 내부의 온도 분포로 침윤선을 확인할 수 있었고, 침투가 어디까지 진행되었는지 판단할 수 있었다. 이러한 결과는 제방 제외지에 수위에 따른 온도 분석 결과는 제방 제외지의 수위를 예측할 수 있는 정보로 활용될 수 있으며, 제방의 취약한 부분을 파악하고 제방 붕괴를 예방하고 사전에 대책을 수집할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있다고 판단된다.



(a) 35 mins after the start of the experiment (water level = 1.75 m)



(b) 1 hr 35 mins after the start of the experiment (water level = 2.54 m)



(c) 4 hrs 35 mins after the start of the experiment (water level = 2.15 m)

그림 2.1.23 침투 경과 시간에 따른 제방 내부의 온도 분포(Ahn et al., 2020)

다. 광섬유 센서를 활용한 제체 위험성 감지 소프트웨어 유저 인터페이스 구축

(1) 광섬유 온도 센싱 데이터 구축

제방 내부에 매립된 광섬유 케이블을 광 접속을 통해 광섬유 분포형 온도 센싱 시스템(DTS)과 연결하여 광섬유 센서로 부터 제방 내부의 온도 정보를 생성할 수 있도록 한다. 광섬유 온도 센싱 데이터에는 측정 시간, 광섬유 길이, 온도 정보를 포함되어야 한다. 그리고 광섬유 케이블로부터 안정적인 온도 데이터를 획득하기 위해서는 케이블의 시작과 끝 구간에 여유 구간을 확보해야하며, 여유 구간은 최소 20 m 이상의 길이가 필요하다. 온도 센싱 데이터의 파일 형태는 .xlsx, .csv로 생성하여 인터페이스에 입력 자료로 활용하며, 온도 정보 데이터는 그림 2.1.24에 나타난 바와 같은 형식으로 구축한다.

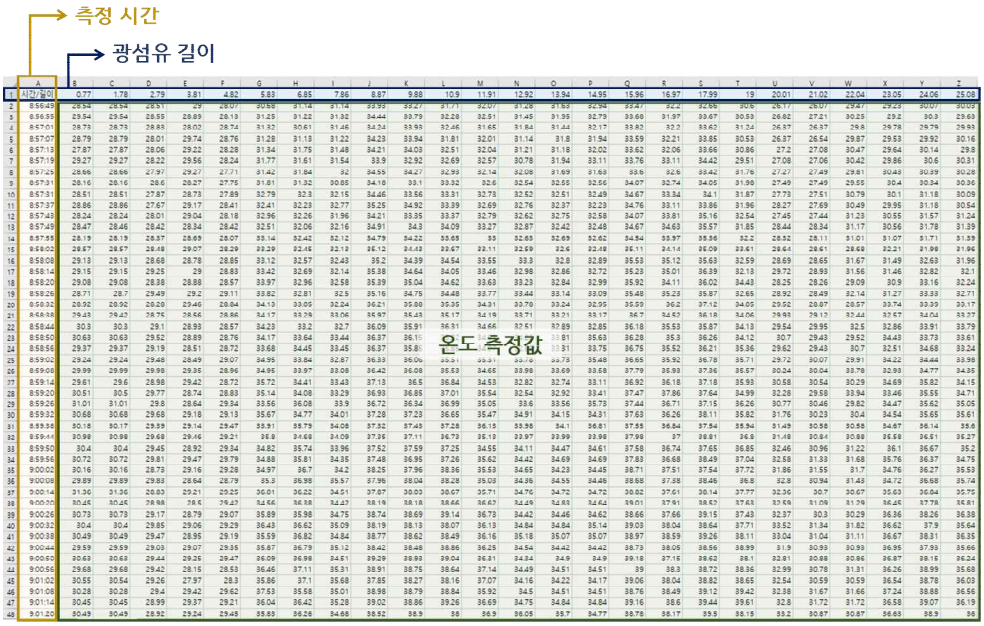


그림 2.1.24 광섬유 온도 센싱 데이터

(2) 광섬유 온도 센싱 데이터 후처리 인터페이스 실행 및 자료입력

광섬유 온도 센싱 데이터를 구축한 후 인터페이스 실행파일로 프로그램을 실행하고(그림 2.1.25), 인터페이스 내에 온도 데이터를 불러올 수 있다. 인터페이스에서 온도 데이터를 선택한 후 제방의 높이, 바닥 폭, 마루 폭, 제방 길이, 사면경사 등 제방 제원에 대한 정보를 입력할 수 있다. 또한, 광섬유 케이블로 안정적인 온도 데이터를 획득하기 위한 안정 구간에 대한 길이를 입력해야 한다. 케이블의 인입길이와 매립 종료 길이를 인터페이스에 입력하면 이를 제외한 온도 데이터를 활용하게 된다. 그리고 광섬유 센서로 측정된 원자료에서 이상치를 제거하고 스무딩 처리를 하기 위해 스무딩 계수(k)를 입력하면 데이터 후처리가 수행된다(그림 2.1.26). 제방 내부에 온도 정보를 시·공간적으로 파악하기 위해 제체에 매립된 광섬유 매립도를 기반으로 제방 저면을 기준으로 광섬유 케이블이 매립된 높이(그래프 시작좌표(y))를 입력한다. 그리고 제외지를 기준으로 광섬유 케이블이 매립되기 시작한 제방 폭의 위치(그래프 시작좌표(x))를 입력하고, 광섬유 케이블의 매립 간격(레이어 높이)을 입력할 수 있다. 마지막으로, 광섬유 케이블 설치과정에서 방향이 전환되는 부분을 인터페이스에 입력하면 광섬유가 설치된 제방의 위치 정보를 획득할 수 있다. 광섬유 케이블을 매립하는 과정에서 현장 매립도를 스케치한 정보를 기반으로 방향이 전환되는 광섬유 케이블 길이를 클릭하도록 한다. 방향이 전환되는 정보를 입력하면 인터페이스 내에서 그래프 좌표를 계산하여 2차원 그래프를 작성하게 된다.



그림 2.1.25 제방 내부에 설치된 광섬유 온도 센싱 데이터 후처리 프로그램



그림 2.1.26 온도 데이터의 선택 화면 및 입력 자료의 구축

(3) 광섬유 센서 길이별 시간에 따른 온도 변화 그래프

개발된 인터페이스에서는 온도 자료의 이상치를 제거하고 스무딩 처리한 후 광섬유 길이별로 원자료와 후처리된 그래프를 모두 확인할 수 있다(그림 2.1.27). 매설된 광섬유 전체 길이에 대한 그래프를 확인할 수 있으며, 시간에 따른 온도 변화를 관찰할 수 있다. 광섬유 센서로 획득되는 온도의 원자료는 검은색 실선으로 표기되고, 이상치 제거 및 스무딩 처리된 데이터는 빨간색 실선으로 나타난다. 후처리된 데이터에서 정량적인 온도 변화를 확인하기 위해 온도 차를 계산하여 그래프를 작성하였으며, 온도차가 일정 범위에서 벗어나는 값이 표출되는 시점에서 제방 내부에서 이상 현상이 나타난 것을 판단할 수 있다. 온도차 그래프에서는 이상치 제거 및 스무딩 처리된 그래프가 검은색 실선으로 표기되고, 현재의 온도와 이전의 온도의 차이를 계산한 그래프는 회색 실선으로 표기된다(그림 2.1.28). 온도차 그래프에서 온도차가 0을 기준으로 상승 또는 하강하는 경향이 나타날 경우 제방 내부에서 이상 현상이 발생할 수 있다는 가능성을 판단할 수 있으며, 온도 차가 표준편차 이상으로 나타날 경우 균열, 침투, 파이핑 등의 이상 현상이 발생한 것으로 판단할 수 있는 자료로 활용될 수 있다.

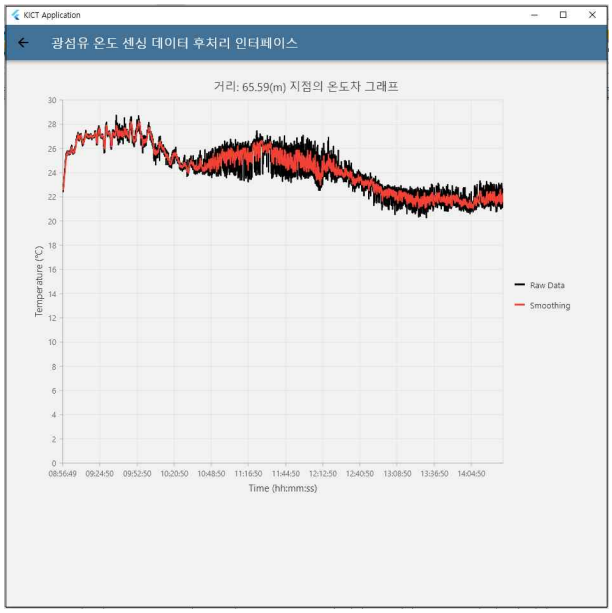


그림 2.1.27 이상치 제거 및 스무딩 후처리 그래프

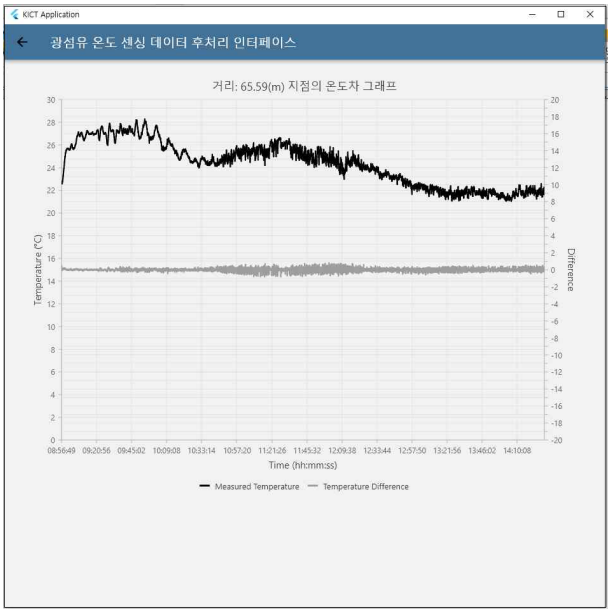


그림 2.1.28 시간에 따른 제방 내부의 온도변화 그래프

(4) 제방 단면의 시간에 따른 온도 변화 그래프

제방 내부의 공간적인 온도 변화를 살펴보기 위한 제방 단면의 시간에 따른 온도 변화 그래프를 인터페이스를 활용하여 확인할 수 있다(그림 2.1.29). 인터페이스에 입력한 자료를 기반으로 제방에 매립된 광섬유의 좌표를 계산한 후 시각적으로 시간에 따른 온도 센싱 결과 표출이 가능하다. 그래프의 x축은 제방의 폭을 의미하고 y축은 제방의 높이를 의미한다. 또한, 제방의 크기는 빨간색 점선으로 나타냈으며, 제방 내부에 설치된 광섬유 케이블의 위치를 시각적으로 확인할 수 있다. 그래프 상단에 빨간색 스크롤을 좌우로 이동하여 시간에 따른 온도 변화를 표출할 수 있으며(그림 2.1.30), 제방 내부에 침투, 균열, 파이핑 등의 이상 현상으로 인한 온도 변화가 발생한 위치를 판단할 수 있다. 이와 더불어, 온도 차의 통계적 분석을 통해 그림 2.1.31과 그림 2.1.32에 나타난 바와 같이 온도 차의 95% 신뢰구간을 초과하는 시점에 대해 이상현상이 발생함을 빨간색 선으로 나타낸다. 이러한 정보는 제방 내부의 안정성을 판단할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있으며, 이를 기반으로 정밀 진단 및 현장 조사를 실시할 수 있다. 본 연구에서 개발한 '광섬유 센서를 활용한 제체 위험성 감지 소프트웨어 유저 인터페이스'는 제방 내부의 시점과 공간에 따른 온도 분포 자료를 기반으로 제방의 취약한 구간을 판단함으로써 제방 보강에 대한 대책을 마련하기 위한 정보를 수집하는데 활용할 수 있다. 또한, 국부적인 자료 기반이 아니므로 제방 내부의 전반적인 안정성을 판단하고 평가할 수 있는 제방 유지관리를 위한 소프트웨어로 활용이 가능하다.

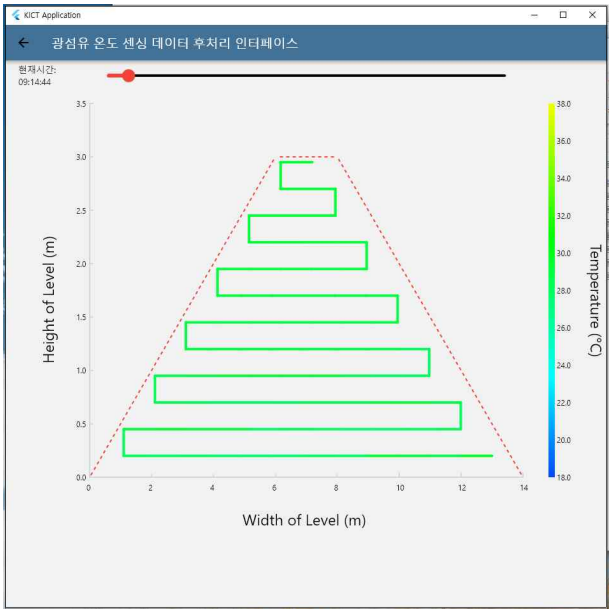


그림 2.1.29 제방 단면의 온도 분포(침투 전)

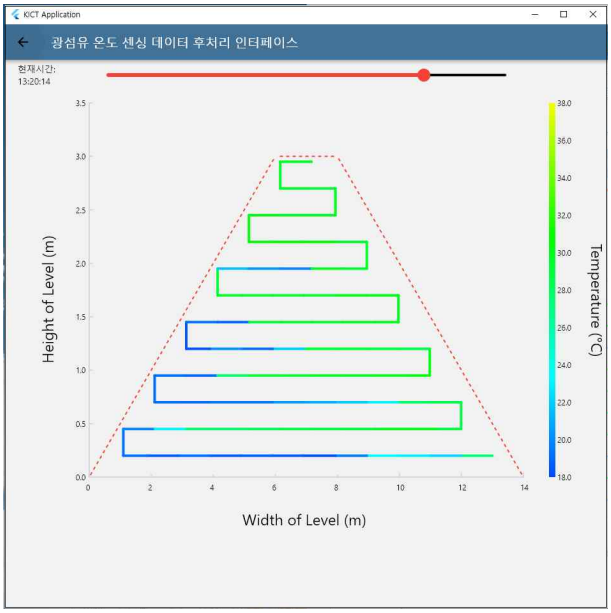


그림 2.1.30 제방 단면의 온도 분포(침투 진행)

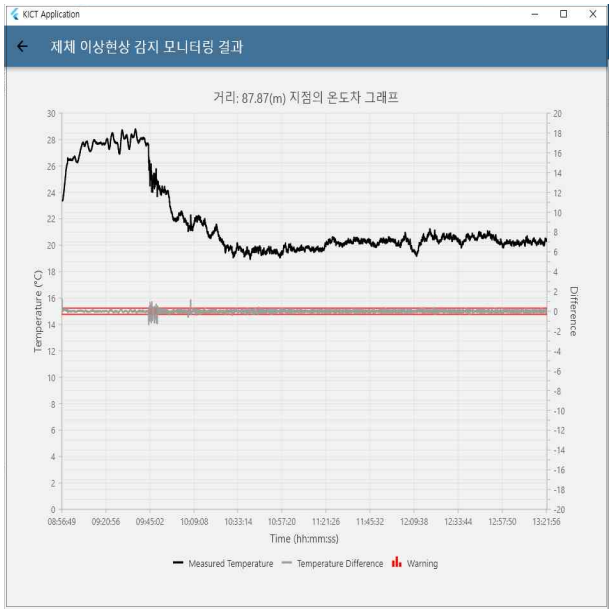


그림 2.1.31 제방 내부의 온도차를 이용한 이상현상 모니터링 결과

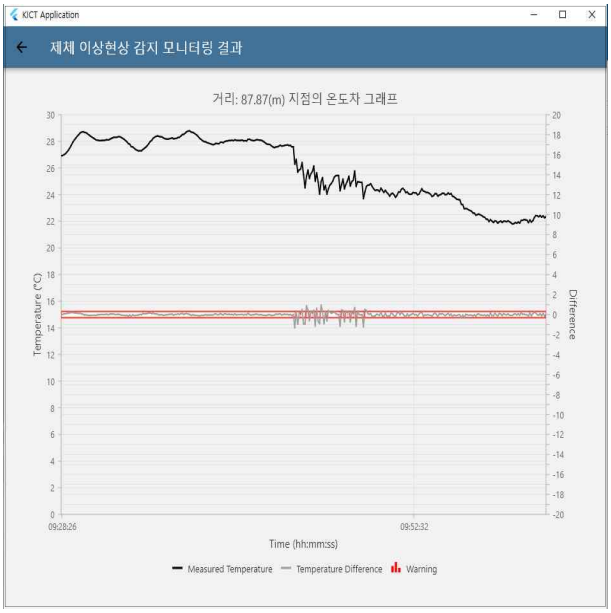


그림 2.1.32 신뢰구간을 초과하는 구간의 이상현상 감지

2. 국내 실정을 고려한 제방 내진점검 및 모니터링 가이드라인

가. 국내외 지진으로 인한 하천 제방의 피해조사

(1) 국내 포항 및 경주 지진으로 인한 하천구조물 피해현황

2016년 9월 12일 경주에서 규모 5.1의 전진이 발생했고, 약 48분 후에 규모 5.8의 본진이 발생하였다. 본진 발생 후 약 3개월 동안 규모 3.0 이상의 여진이 6번 발생하였다. 경주지진은 우리나라에서 지진 관측이 본격적으로 시작된 1978년 이후 최대 규모의 지진이다. 지진 발생 후 제방의 붕괴가 발생하는 피해는 없었으나 미세한 균열이 발생하여 응급복구를 수행하였다. 지진으로 인한 제방 균열은 응급복구 작업을 통해 보강하여 제방의 내구성을 회복시키고 지속적으로 안전점검을 실시하였다. 그러나, 지진에 따른 피해 복구가 끝나기도 전에 태풍과 홍수로 인한 2차 자연재해가 발생하여 제방이 붕괴되고 피해 규모는 더 심각했다(그림 2.2.1).



그림 2.2.1 경주 지진 발생 후 태풍으로 인한 제방 붕괴(사진출처-좌: 연합 뉴스, 2016; 우: SBS뉴스, 2016)

2017년 11월 15일 포항시에서 규모 5.4의 지진이 발생하였으며, 본진이 발생한 후 약 3월 동안 규모 3.8 이상의 여진이 6번 발생하였다. 지진으로 인해 제방이 붕괴되는 피해까지는 발생하지 않았으나, 제방 및 댐 주변에 그림 2.2.2에 나타난 바와 같은 약 1 cm 정도의 균열이 발생하였다. 또한, 포항지진은 그림 2.2.3과 같이 액상화 현상이 발생하여 심각성 대두되었으며, 하천 주변에 액상화 현상이 발생하여 향후 제방의 안정성에 영향이 있을 것으로 판단된다.

경주지진과 포항지진은 우리나라의 지진재해에 대해 안전하다는 인식을 바꾸는 계기가 되었으며, 앞으로 지진의 발생 빈도가 증가하고 규모 6.0 이상의 중대형 지진이 발생할 수 있다는 가능성을 보여주었다. 따라서, 점차 지진의 빈도가 증가하고 있고, 지진에 대한 피해와 2차 자연재해로 인한 피해 규모가 크므로 지진재해에 대응할 수 있는 하천구조물 유지관리 및 모니터링 기술에 대한 연구가 필요하다.



그림 2.2.2 포항 지진으로 인한 균열



그림 2.2.3 포항 지진으로 인한 액상화 현상(사진출처-한국일보, 2017)

(2) 일본 규슈 구마모토현의 지진 및 호우 등 복합재난에 의한 제방 피해

2016년 구마모토 지진은 4월 14일에 구마모토현 구마모토 지역에서 깊이 11 km를 진원으로 하는 규모 6.5의 전진과 이틀 후에 동일한 지역에서 깊이 12 km에서 규모 7.3의 본진이 발생했다. 이러한 지진으로 인해 주거지 및 제방, 도로 등 다양한 사회 인프라가 막대한 피해를 입었다. 특히, 하천 제방의 경우 미도리강(綠川) 수계에서 127곳, 시라카와강(白川)가 44곳에서 제방 피해가 발생했다. 제방 피해는 종, 횡단의 균열과 제체의 침하가 대부분이며, 일부 제체에서 전면이 슬라이딩하여 붕괴한 피해도 있었다. 재난 발생 직후부터 응급복구공사가 이루어져 국가관리하천에서는 비교적 피해 규모가 작은 곳에는 간단한 보수를 실시하고, 피해가 큰 제방에 대해서는 보강이 실시되었다. 이렇게 응급복구공사가 진행되는 도중에 구마모토현을 중심으로 100 mm 이상의 강한 비가 내렸다. 고사지역 아메다스관측소에서는 시간당 150 mm의(일본 사상 4위) 호우를 기록했다. 이 기록적인 호우로 인해 미도리강 수계 기야마강(木山川) 제방의 결궤가 발생했다. 기야마강의 경우, 구마모토 지진에 의해 제체가 침하했기 때문에 그 응급대책으로 제방 마루부분에 흙더미가 설치되어 있었는데, 호우로 인해 흙더미를 월류할 정도의 홍수가 발생해 결궤에 이르렀다.

(가) 지진에 의한 제방 피해

구마모토 지진발생으로 인한 제방 피해상황을 파악하기 위해 지진발생으로부터 약 10일 후에 현장조사를 실시하였고, 현장 조사한 결과 그림 2.2.4와 같이 제방의 종·횡단의 균열, 단차 및 침하, 슬라이딩 등의 피해가 발생하였다. 제방 호안이 갈라지거나 0.9 m 정도 어긋나고, 비탈머리의 호안의 균열이 약 30 cm 발생하였으며 제방 비탈면 및 비탈머리의 피복이 파손되어 있는 것을 확인하였다. 지진발생으로 인한 아키즈강의 제방 마루의 높이 변화를 확인하기 위해 그림 2.2.5와 같이 지진 전·후의 제방마루 높이를 비교하였다. 표고 자료는 지진 전 일본 국토지리원이 공개한 DEM 자료를 활용하였으며, 지진 후는 2016년 5월 18일에 계측된 RTK-GNSS에 의한 자료를 활용하였다. 그림 2.2.5는 아키즈강 우안 측의 소표교를 원점으로 하류방향 종단거리를 나타냈으며, 지진 전·후 제방

마루를 높이를 비교한 결과, 그림에 화살표로 표기한 약 200 m 구간에 걸쳐 0.5 m에서 1 m 정도의 침하가 발생했음을 알 수 있다. 또 아키즈강 좌안 측은 액상화 현상도 발견되었다. 지진에 의한 광역적 지반침하는 20 cm 정도였으므로, 주변 지반보다 제방 쪽이 침하가 컸다는 사실이 아키즈강에서도 확인되었다.

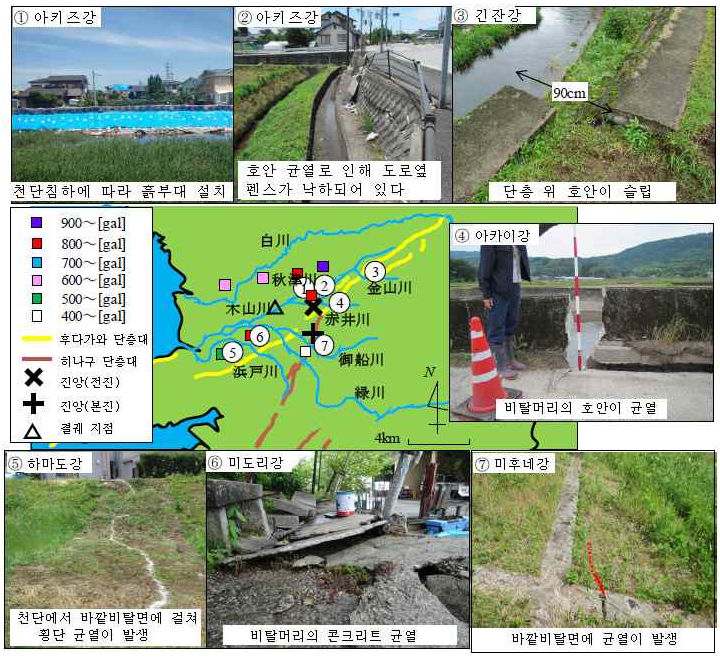


그림 2.2.4 구마모토 지진으로 인한 제방피해 조사결과(Kurakami, 2018)

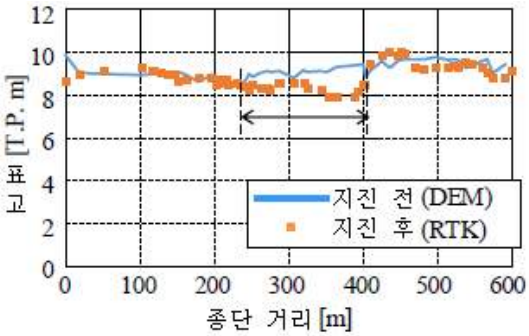


그림 2.2.5 아키즈강 우안의 지진 전후의 제방 마루 비교(Kurakami, 2018)

(나) 지진·호우의 복합적인 재해로 인한 제방 피해

구마모토현 주변의 하천에 지진으로 인한 하천 제방 피해 규모에 따라 임시적으로 복구공사를 실시하였다. 그러나, 약 2개월 후에 시간당 50 mm를 넘는 비가 2시간 동안 지속되면서 불과 6시간 만에 177 mm의 단시간 호우가 발생했다. 이 호우로 인해 수위는 시간당 4.5 m 상승하였다. 지진 발생 후에 호우로 인한 2차 복합재난의 피해상황을 조사한 결과, 그림 2.2.6에 나타난 바와 같이 기

야마강 주변의 호우·지진재해의 복합재난으로 인한 하천구조물의 피해가 상당했다. 기야마강에서는 지진으로 인한 제방의 균열 및 침하 등을 임시적으로 복구하였으나, 호우로 인해 약 50 m의 제방 결궤가 발생하였다. 이와 더불어 둑마루에 높이 1 m의 흙더미가 쌓여있었음에도 불구하고 깊이 0.13 m에서 0.20 m인 세굴로 인한 파이핑 현상이 일어 난 것으로 추측된다. 고가쿠교는 단차 34 cm의 침하가 발생하였다. 제방의 침하량을 정략적으로 검토한 결과 평균과 최대치는 각각 0.27 m, 0.39 m로 분석되었으며, 제방 주변 지반의 침하 정도는 평균 0.18 m, 최대 0.30 m로 조사되었다. 기야마강 제방에서도 주변 지반보다 호우로 인한 2차 침하가 0.1 m정도 발생한 것으로 조사된다.



그림 2.2.6 구마모토 지진 후 호우로 인한 2차 재난재해 피해현황(Kurakami, 2018)

나. 제방 붕괴유형 실험 사례조사

(1) 가진 발생을 통한 제방 붕괴 실험 사례

(가) 실험의 개요

최근 일본에서는 지진 발생 후 이상홍수 등으로 인한 2차 재난재해의 피해가 더 심각하므로 기후변화의 진행과 지진의 복합적인 재난재해에 대한 연구가 활발하게 수행중이다. 도쿄 이과대학에서는 지진과 홍수의 복합적인 재난을 규명하고, 이에 대한 대책기술을 개발하기 위해 제방 붕괴 실험을 수행하였다. 실험수로는 그림 2.2.7과 같이 전체 길이 약 33 m, 수로 폭 0.6 m, 높이 1 m이며, 하류단 5 m 구간에 제방을 축조하였다. 축조한 제방의 높이는 0.5 m, 마루 폭 0.5 m, 비탈경사는 1:2이며 기초지반의 두께는 30 cm이다. 제체 재료는 실제 하천의 모래(D_{50}는 0.22 mm, 최대건조밀도 1.72 g/cm^3, 최적함수비 13.5%, 투수계수 $k=2.0\times10^{-3}$ cm/s)를 사용하여 최적함수비

13.5%로 제방 모형을 제작하였다. 제방을 축조한 5 m 구간의 수로는 본 수로와 분리가 가능하며, 본 수로와 제방을 축조한 수로를 연결하는 수로는 2 m로 구성되어있다. 실험 수행 전에 지진을 발생시키기 위해서 제방을 축조한 5 m 구간의 수로를 본 수로와 분리하여 지진 발생 장치를 통해 가진을 발생시킨다. 가진 발생 장치를 통해 지진을 발생시킨 후 제방을 축조한 수로와 본 수로를 연결하려 유량을 공급할 수 있도록 구성되어있다(그림 2.2.8).

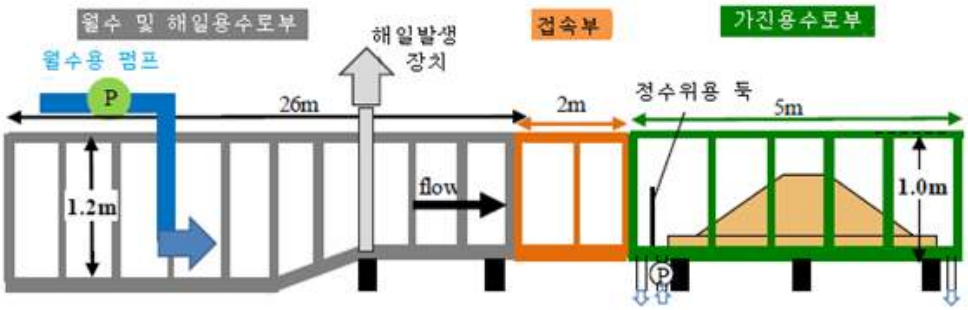


그림 2.2.7 지진의 영향을 고려한 제방 실험의 실험수로(Kurakami, 2018)

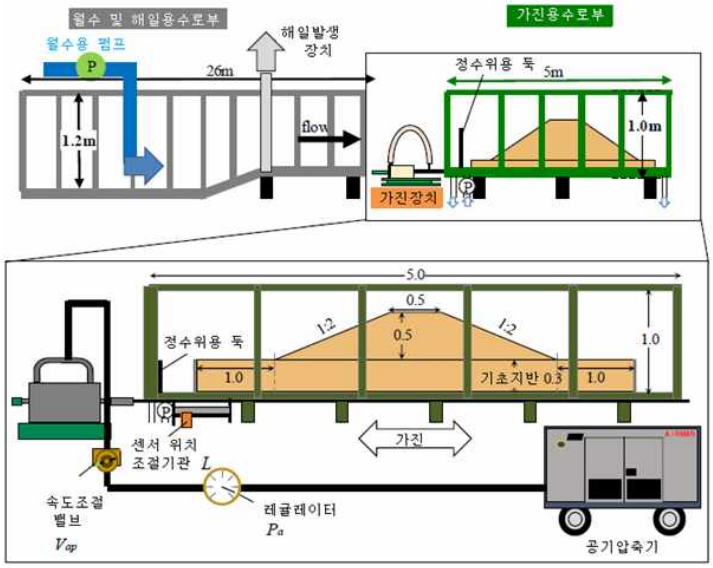


그림 2.2.8 지진 영향을 고려한 제방 실험의 가진 발생 장치(Kurakami, 2018)

(나) 제방실험 지진 발생 방법 및 실험 조건

가진 장치는 공기압축기를 통해 공기를 압축 및 생산하고 에어실린더를 통해 피스톤 왕복운동을 발생시켜 수로의 흐름방향으로 가진을 발생시킨다. 가진 장치는 중력(1g=980gal)장의 실험 장치이며, 부하 하중이 2.5 ton이고, 최대 지반가속도 1000 gal (cm/s^2)를 재현할 수 있도록 제작되었다. 가진 장치를 통해 흐름방향으로 정현파를 발생할 수 있고, 레귤레이터 및 컨트롤 밸브를 통해 정

현파의 진폭이나 주기를 조절할 수 있다. 또한, 수로의 부하 하중에 따라서도 정현파의 진폭과 주기가 변화하므로 한 가지의 정현파 조건에서 파의 정상상태에서 정현파의 가속도 진폭 및 주기의 평균과 표준 편차에 대한 보정이 필요하다. 또한, 레귤레이터의 공기압과 컨트롤 밸브를 조절하면서 본 실험에서 최대로 재현할 1000 gal의 지반가속도를 발생하는 공기압을 찾는 실험 초기의 셋팅을 수행해야 한다. 지진 및 홍수의 복합적인 제방 실험의 순서는 다음과 같다(그림 2.2.9).

1단계에서 제방이 축조된 5 m 구간의 수로와 가진 장치를 연결하여 400 gal 정도의 가진을 1차적으로 발생시키고, 800~900 gal 정도의 2차 가진을 발생시킨다. 2단계에서는 기초지반까지 침윤상태가 되도록 침투를 발생시켜 약 1~3일 안정화를 시킨다. 그 후에 3단계는 1단계와 동일한 지반가속도 400 gal로 1차 가진을 발생시키고, 2차적으로 800~900 gal의 가진을 발생시킨다. 4단계에서는 가진 장치를 제거하고 접속용 수로를 연결하여 제방 축조 5 m 구간의 수로와 본 수로를 연결한다. 마지막으로 제방이 월류되는 조건의 유량을 공급되도록 펌프를 가동한다.

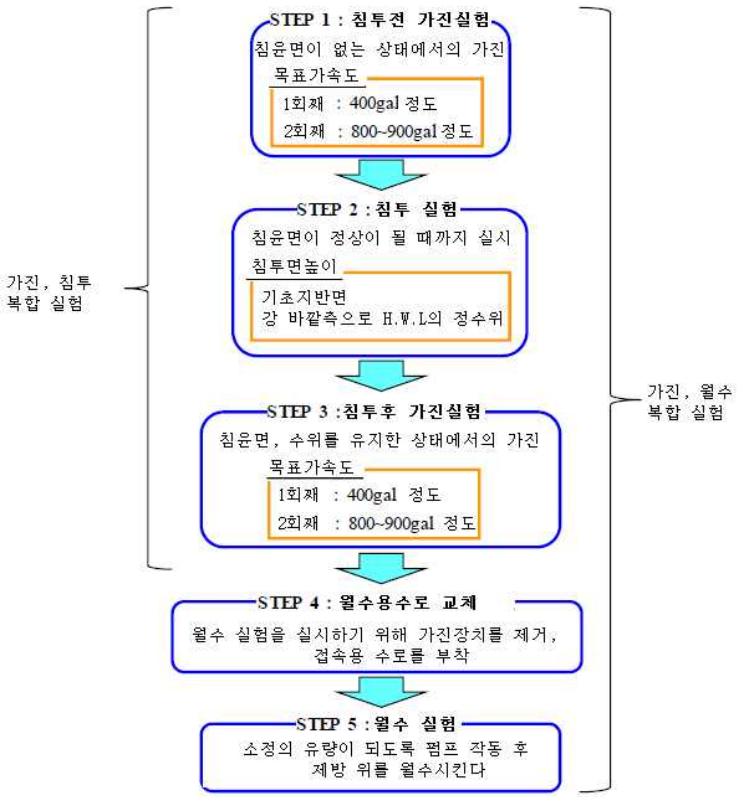


그림 2.2.9 가진 발생 과정 및 실험 절차(Kurakami, 2018)

위와 같은 단계를 수행하고 침투 및 월류 조건에 따라 네 가지의 실험 조건을 설정하여 실험을 수행하였다(표 2.2.1).

표 2.2.1 지진을 고려한 제방 실험 조건(Kurakami, 2018)

Case	지진가속도(gal)		침투조건 (Step2)	월류조건 (Step5)
	침투 전 (Step1)	침투 후 (Step3)		
A	① 411(1.9Hz)	① 400(1.9Hz)	0.3 m	-
	② 801(2.3Hz)	② 698(2.1Hz)		
B	① 451(2.0Hz)	① 408(1.9Hz)	0.65 m	-
	② 797(2.3Hz)	-		
C	① 478(2.6Hz)	① 467(2.5Hz)	0.3 m	월류수심 0.1 m, 유량 0.029 m^3/s
	② 922(2.3Hz)	② 858(2.3Hz) ②' 765(2.2Hz)		
D	-	-	-	

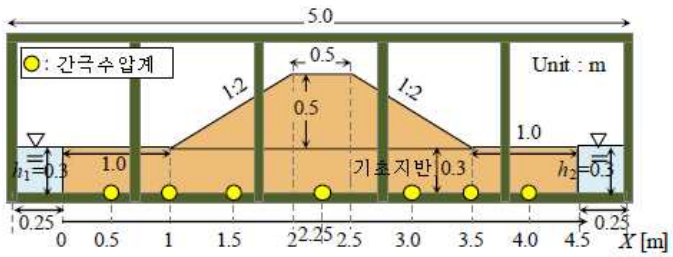


그림 2.2.10 Case A와 Case C의 제방 및 수로 모식도(Kurakami, 2018)

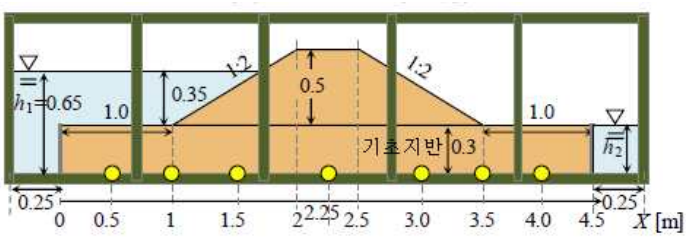


그림 2.2.11 Case B의 제방 실험 조건 제방 및 수로 모식도(Kurakami, 2018)

Case A는 기초지반의 높이 0.3 m가 수심이 되도록 설정하고 침투 전과 후의 지진 가속도를 측정하였으며, 가진만 발생시키고 제방의 월류는 없는 조건이다(그림 2.2.10). Case B의 경우는 제체 높이의 70%인 0.65 m인 수심으로 Case A와 동일하게 가진만 발생시킨 조건으로 설정하였다(그림 2.2.11). Case A와 Case B는 가진을 발생시키는 도중에도 수심을 유지하므로 수위에 따른 제방의 균열 및 침식 정도를 분석할 수 있다. Case C는 Case A와 동일하게 기초지반의 높이 0.3m가 수심이 되도록 설정하고 5단계에서 0.029 m^3/s의 유량을 공급하여 0.1 m의 제방의 월류수심을 발생시킨 조건이다. 마지막으로 Case D의 경우는 가진 발생 없이 제방의 월류만 재현한 조

건이며, Case C와 Case D는 월류하여 붕괴가 발생했을 때 과거에 발생한 지진이 제방 붕괴에 미치는 정도를 분석하기 위해 설정한 실험 조건이다. 지진파의 입력 조건으로 표 2.2.1에 나타난 바와 같이 일정한 범위내의 정현파의 진폭과 주기를 발생시켰으며, 모든 조건에서 30회의 정현파를 발생시켰다. Case A와 Case B에서는 침투 전·후로 2회씩 가진을 발생시켰으며, ①, ②에서 각각 목표 400, 800-900 gal로 발생시켰다. Case C의 경우 ①, ②의 가진에서는 변형되지 않았기 때문에 ②′(목표 800 gal)의 정현파를 한 번 더 발생시켰다. 모든 실험 조건에서 제체의 시간에 따른 변화를 계측하기 위해 여러 개의 카메라를 설치하였으며, 지반 변형의 시각화를 위해 색이 다른 규사를 벽면에 포설했다. 또한, 가진 및 침투 시에 간극수압 측정을 위해 간극수압계를 수로 바닥에 설치하였고 수위를 확인하기 위해 여러 개의 수위계를 설치하였다.

(다) 가진 및 침투의 복합적인 제방 실험 결과

Case A와 Case B의 실험의 경우, 가진 후에 그림 2.2.12와 그림 2.2.13에 나타난 바와 같이 제방의 균열 및 침식이 발생했다. 그림 2.2.12에서 검은색 점선은 원래의 제방의 형상이고, 파란색 실선은 균열형상을 나타낸다. Case A에서는 정현파 20회부터 앞쪽과 뒤쪽 비탈면에 종단 균열이 발생하고, 정현파 25회부터는 이러한 균열이 더욱 깊어짐과 동시에 제방 마루에도 균열이 발생해 마루의 침하와 앞쪽과 뒤쪽 비탈면이 부풀어 오르는 현상이 발생했다. 최종적(정현파 30회)으로는 이러한 변형이 진행되면서 깊이 26 cm까지 균열이 발생하였다. 부풀어 오름 현상은 수평 방향으로 최대 약 12 cm까지 발생하였다. 또한 제체의 앞쪽과 뒤쪽 비탈면의 형상은 좌우대칭은 아니지만, 특징적인 차이는 나타나지 않았다. 제체의 수심이 깊은 Case B의 경우(그림 2.2.13), 정현파 15회까지는 균열 및 침하가 발생하지 않았으며, 20회에서 비탈면에 균열이 발생하였다. 균열은 뒤쪽 비탈면이 많았으며 이러한 경향은 25회, 30회에서도 동일하다. 제방 마루에서도 균열은 발생했지만 Case A보다는 균열의 수는 적게 나타났다. 하천수가 있는 앞비탈면의 경우, 부풀어 오르는 현상이나 균열은 대부분 발생하지 않았고, 전체적으로는 앞비탈면의 균열이 뒷비탈면의 균열보다 적다는 것을 확인할 수 있었다. Case B의 경우는 Case A에 비해 균열 수가 전반적으로 적으며, 균열심도도 얕고 뒷비탈면의 부풀어 오른 정도도 약 6 cm로 적다. 이러한 결과는 Case B의 앞비탈 수위가 일종의 압밀 성토공법과 같은 역할을 수행해 뒷비탈면의 변위를 억제한 것으로 판단된다.

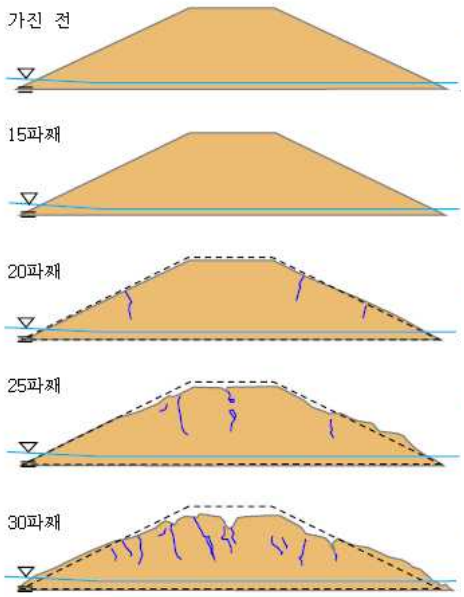


그림 2.2.12 Case A의 실험 결과(Kurakami, 2018)

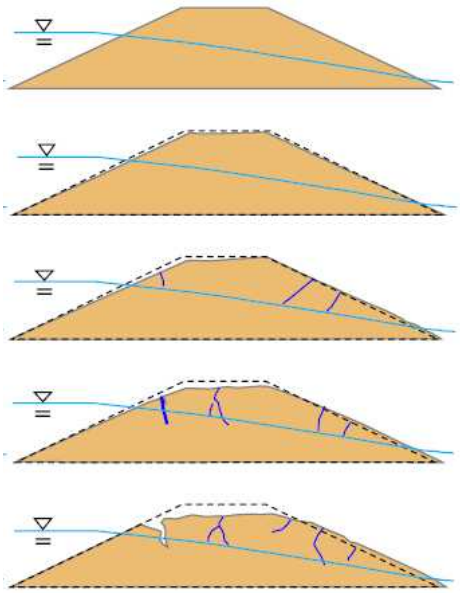
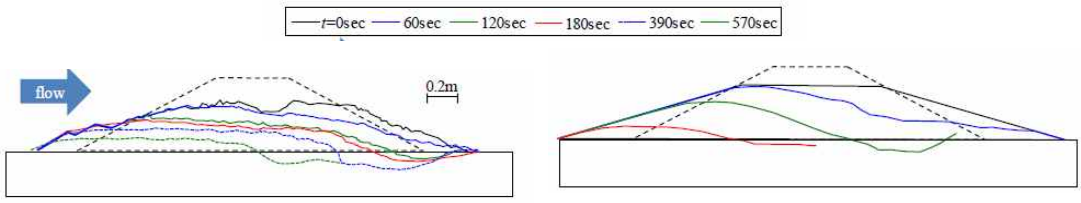


그림 2.2.13 Case B의 실험 결과(Kurakami, 2018)

제방 월류가 발생했을 경우 제체 변형에 미치는 영향을 검토하기 위해 Case C와 Case D의 실험 조건을 비교하였으며, 그림 2.2.14는 월류 발생 경과시간에 따른 제체의 변형과정을 나타낸 것이다. 실험 결과를 통해 가진의 영향을 받은 Case C의 경우는 가진의 영향을 받지 않은 Case D보다 월류 침식이 되기 어렵다는 사실을 알 수 있었다. 즉, Case D에서는 거의 일정한 속도로 침식이 진행되었지만, Case C에서는 월류 발생 후의 경과시간(t)이 120초를 지난 시점부터 침식 속도가 대폭 감소했다. 이는 Case C에서는 가진으로 인해 제체가 변형되면서 다짐도가 증가했기 때문으로 추측된다. 이를 보다 정량적으로 파악하기 위해 월류 실험을 수행한 Case C와 Case D를 월류 발생 후의 경과시간에 따른 초기 면적 잔존율 및 수로바닥으로부터의 제체 높이를 분석하였다. 여기서 초기 면적 잔존율은 가진 후(STEP 3)의 단면적을 초기치로 한다. Case C와 Case D를 비교하면 면적 잔존율이 80%가 되는 t=50s까지는 Case C와 D의 침식 속도는 동일하였지만, t=50s 이후에서는 Case C의 침식 속도가 Case D에 비해 대폭 감소했다. 이러한 결과는 지진으로 인해 제체가 변형, 침하됨으로써 제방 체내부의 다짐도가 증가했기 때문으로 추측된다.



(a) Case C　　(b) Case D

그림 2.2.14 월류 후 경과시간에 따른 체적 변화(Kurakami, 2018)

(2) 토질특성에 따른 제방 붕괴 실험 사례

(가) 실험의 개요

제방은 홍수로부터 제내지를 보호하기 위한 목적으로 건설되지만, 홍수시 제방이 붕괴될 경우 막대한 피해를 야기한다. 제방 월류로 인한 붕괴 현상은 수리학과 지반학적 해석이 함께 수행되어야하는 복잡한 현상이며, 이에 대한 실험 연구 결과가 최근 많이 제시되고 있다. 제방의 붕괴과정에서 다짐함수비와 다짐도는 제방 붕괴에 영향을 미친다는 결과가 제시되었으며(Hanson and Hunt, 2006), 다짐 함수량, 토양밀도, 일축압축강도 등과 같은 토질 성질에 따른 제방 붕괴 과정에 대한 실험 연구도 수행된 바 있다. 대표적으로 Feliciano et al.(2014)은 길이 17 m, 폭 0.5 m, 높이 0.7 m인 실험수로에서 제방 높이 0.25 m, 마루 폭 0.1m, 비탈경사 1:3인 소규모 제방 실험을 수행하였다(그림 2.2.15). 제방 마루 높이를 기준으로 총 저류량은 1.39 m^3이며, 최대 공급 유량은 5.4 L/s이다. 실험을 통해 월류로 인한 제방 붕괴 과정을 관찰하였으며, 토질 특성(점성과 비점성)이 제방 붕괴에 미치는 영향을 검토하였다. 또한, 제방의 붕괴류(breach flow)와 토질 특성에 대한 관계를 분석하였다.

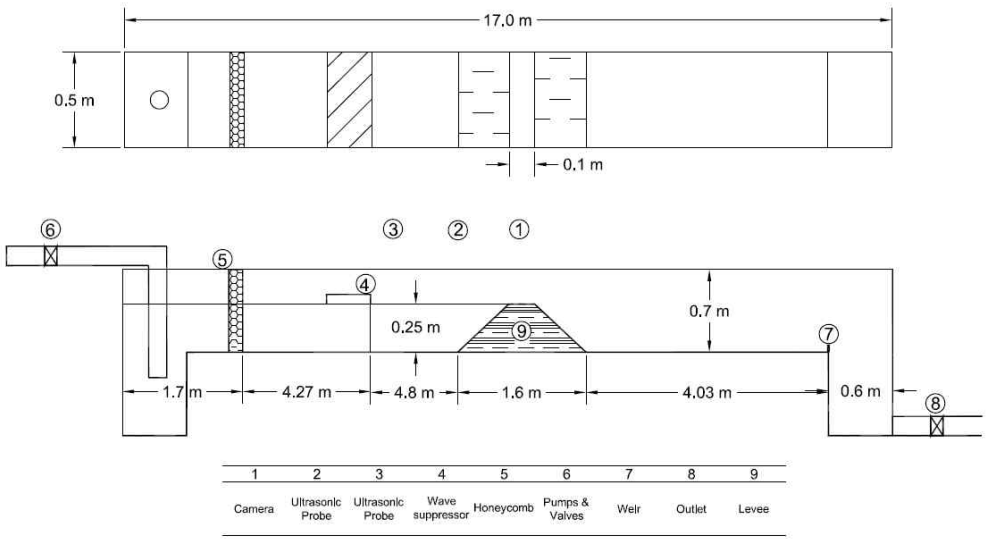


그림 2.2.15 실험 수로 및 제방 모형 제원(Feliciano et al., 2014)

(나) 실험 조건 및 방법

Feliciano et al.(2014)는 토양 특성이 제방 붕괴에 미치는 영향을 파악하기 위해 제방 축조에 모래(중앙입경 d_{50} = 0.628 mm), 실리카, 카올린 점토를 혼합하여 흙을 혼합하였다. 세 가지의 토질재료로 흙을 조합하여 그림 2.2.16과 같이 실험 조건을 설계하였다. 실험 조건별 성토재료의 최대건조밀도와 최적함수비는 샘플링하여 표준다짐시험을 통해 산정하였다. 또한, 토질의 입도분포분석은 체분석실험과 비중계 실험으로 수행하였다. 제방은 0.05 m 높이만큼 단계적으로 다지면서 축조하였으며, 다짐장비는 수동식 tamper(0.25 m × 0.25 m, 7.5 kg)를 이용하였고 2 m 높이에서 낙하하여 층 다짐을 수행하였다. 각 층마다 다짐 전에 느슨한 흙을 샘플링하여 함수량 산정하였으며, 이를 최적함수비와 비교하여 다짐도를 확인하였다. 제방축조에 사용된 흙의 무게는 기록하여 제방의 습윤밀도를 산정하였으며, 산정한 습윤밀도를 이용하여 흙의 한계전단강도를 산출하였다(Mitchener and Torfs, 1996). 모든 층의 최적함수비는 ±5%범위 이내를 만족시켰다. 제방을 정해진 높이까지 축조한 후, 제방 모형에 맞춰 비탈면을 다듬어서 축조를 마무리하였다. 이와 더불어 직경 20 mm, 두께 1 mm의 다양한 색깔의 추적자를 각 층마다 설치하고, 추적자를 이용하여 제방 붕괴의 폭과 침식 깊이를 추적하였다. 성토재료의 표준다짐시험 및 입도분포분석, 제방의 습윤밀도 등으로 흙의 특성을 분석한 결과 그림 2.2.17과 같이 나타났으며, 이러한 토질 특성을 기반으로 제방 붕괴에 미치는 영향을 검토하였다. 제방 축조가 끝난 후에 시간에 따른 제방 붕괴량을 분석하기 위해서 제방위에 카메라 설치하였으며, 붕괴유량 산정을 위해 상류단에 초음파 수위계를 설치하였다.

Experiment	Sand (%)[a]	Silt (%)[a]	Clay (%)[a]	Notes
1	50	40	10	Validation, not further analysis
2	100	—	—	—
3	55	45	—	—
4	55	45	—	Repeatability/ effect of tracers
5	50	45	5	—
6	50	40	10	—
7	45	40	15	—
8	43	37	20	—

[a]Percentage of total weight, constituent source material commercially sold.

그림 2.2.16 흙의 구성에 따른 실험조건(Feliciano et al., 2014)

Experiment	ρ_s (kg/m^3)	ρ_{dm} (kg/m^3)	R (%)[a]	w_0	m	d_{50} (mm)	G_s	q_u (kPa)	τ_{cr} (Pa)[b]
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	1,538	1,507	98.7	3.49	3.32	0.628	2.650	0	—
3	1,986	1,883	97.7	8.23	7.93	0.336	2.650	40.6	2.30
4	1,986	1,883	97.8	8.23	7.83	0.336	2.650	47.3	2.30
5	1,922	1,960	91.0	7.83	7.70	0.228	2.647	31.5	2.19
6	2,050	1,990	95.6	8.18	7.80	0.229	2.644	55.6	2.41
7	2,018	1,993	93.4	8.19	8.40	0.190	2.641	67.0	2.35
8	2,066	1,946	97.5	9.17	8.92	0.159	2.638	111.7	2.43

[a]$R = (\rho_{dry}/\rho_{dm}) \times 100\%$.
[b]Computed using Eq. (1).

그림 2.2.17 실험조건별 토질특성 분석 결과(Feliciano et al., 2014)

(다) 토질특성에 따른 제방 붕괴실험 결과

흙의 구성에 따른 제방 붕괴유형을 실험을 통해 검토한 결과, 붕괴유량과 붕괴 폭은 흙의 특성에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 특히 붕괴유량은 흙 구성에 따라 증감현상이 확연하게 나타났으며, 붕괴유량을 비교하면 점토 5% 혼합재료가 실트질 모래보다 붕괴유량이 더 크게 산정되었다. 이는 실트질 모래가 더 큰 저항력을 갖고 있다고 해석할 수 있으며, 월류로 인한 침식 붕괴는 점성보다는 흙의 강도에 의존하는 결과를 확인할 수 있었다. 또한, 시간에 따른 상류 수위와 붕괴 유량의 변화를 분석한 결과, 제방의 붕괴가 시작되면서 상류단 수위가 감소하고 붕괴유량이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이와 더불어, 추적자와 영상분석을 통해 월류로 인한 붕괴 폭과 침식 깊이를 산정하였으며, 그 결과 그림 2.2.18에 나타난 바와 같이 흙의 구성에 따라 두부침식이 발생하는 시간 및 위치, 붕괴 폭의 변화에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 또한, 점토 5% 혼합재료(실험 case 5)의 경우 하류단에서 침식이 발생하면서 상류단으로 침식이 확장되어 마루부까지 침식되는 결과를 관찰할 수 있었고, 점토 20 %의 혼합재료(실험 case 8)에서는 하류부 경사면을 가로질러 두부침식이 발생하였지만 마루부까지 침식이 발생하진 않았다. 이와 같은 실험 결과를 통해 흙 구성이 제방 붕괴과정에 미치는 영향을 분석하였으며, 제방의 붕괴유량과 붕괴 폭을 흙의 건조단위중량, 함수량, 일축압축강도와 비교분석하여 정량적인 결과를 제시하였다.

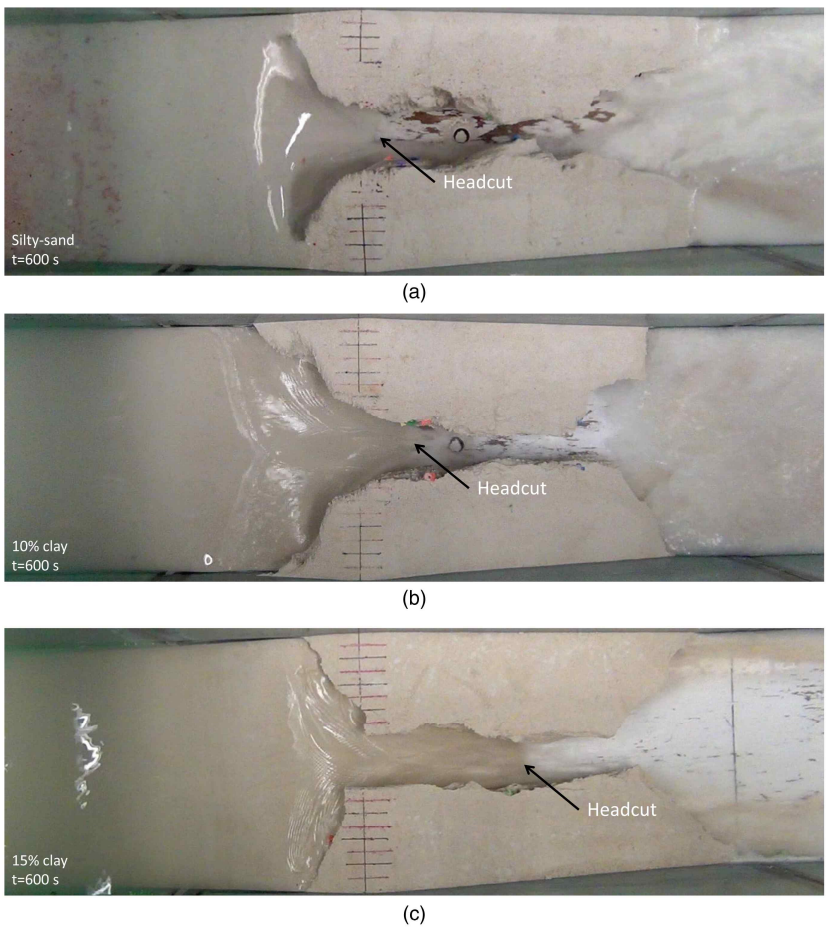


그림 2.2.18 흙의 구성에 따른 제방 두부침식 위치(Feliciano et al., 2014)

다. 지진의 영향을 고려한 제방파괴 실험 및 분석

(1) 제방 수리실험 설계(안)

국내외 지진으로 인한 하천 제방 붕괴에 대한 사례조사 및 실험 연구를 검토한 결과, 지진 발생 전·후의 제방 안정성에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 다짐도(compaction)라는 것을 확인하였다. 하천설계기준(2018)에 따르면 제방 축제재료의 다짐도는 90% 이상으로 하며, 하천 구조물 주변은 다짐도 95% 이상을 확보해야한다고 제시되어 있다. 지진이 발생할 경우, 제방 다짐도는 90% 이하로 저하되므로 이로 인해 야기되는 제방의 파괴 및 붕괴에 대한 철저한 예측과 대비가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 제방의 다짐의 차이를 지진 발생 전·후의 실험 조건으로 적용하여 지진으로 인해 발생할 수 있는 제방 붕괴에 대한 매커니즘을 파악하기 위한 제방 수리실험 설계(안)을 제시하였다.

실험목적 및 적용범위

본 제방 수리실험 설계(안)은 지진으로 인한 제방 붕괴유형에 대해 수리실험을 통해 검토하는 목적으로 작성된 것이다. 지진이 발생하면 하천 제방의 다짐도가 감소한다는 기존 연구의 결과를 토대로 다짐도에 따른 제방 붕괴 수리실험을 수행하는 것이 본 실험의 주된 목적이며, 지진파 발생 장치를 이용한 지진 발생 재현이 실험 내용에 포함되지는 않는다.

제방의 구조 및 종류

제방의 구조 및 종류는 정규 제방 단면의 모형으로 제한하며, 하천설계기준 제방편에서 규정하는 사항들을 준수하도록 한다.

성토재료의 입도분포분석 및 표준다짐시험

① 제방 성토에 활용할 재료를 샘플링하여 KS F 2302의 규정에 따라 입도분포 분석을 실시한다.

② 입도분포분석을 통해 그림 2.2.23과 같은 입도분포곡선을 도출하고, 균등계수(C_u)와 곡률계수(C_g)를 계산하여 제방 성토재료의 적절성을 판단한다.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \tag{2.3}$$

$$C_g = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \tag{2.4}$$

여기서, D_{10}은 통과백분율 10%일 때의 입경, D_{30}은 통과백분율 30%일 때의 입경, D_{60}은 통과백분율 60%일 때의 입경이다.

③ 제방 성토재료의 적절성을 판단한 후 성토재료의 표준다짐시험을 KS F 2312의 규정에 따라 실시한다.

④ 제방의 성토재료는 축제 재료의 다짐 기준에 따라 KS F 2312 A다짐시험으로 실시하며, A다짐시험을 통해 최대건조밀도(ρ_{dm}), 최적함수비(OMC, Optimum Moisture Content)를 산정한다.

⑤ 위와 같은 분석 및 시험 절차를 통해 표 2.2.2의 형식으로 분석 결과를 작성하고 제방 성토재료의 적절성 및 설계 다짐도를 판단한다.

표 2.2.2 성토재료의 입도분포 및 다짐도시험 결과표 양식

항목		결과
흙의 밀도(g/cm²)		
입도분포분석	최대입경(mm)	
	60%입경(mm)	
	30%입경(mm)	
	10%입경(mm)	
	균등계수	
	곡률계수	
표준다짐도시험	최대건조밀도(g/cm³)	
	최적함수비(%)	

제방 모형의 축조

① 수리실험을 진행할 실험수로 내의 제방을 축조하기 위해 기초 지반을 형성하고, 제방을 지지할 수 있도록 충분히 다진다.

② 제방의 밀도 및 현장 다짐도를 측정하기 위해서 제방 설계도보다 여유 있게 제방을 축조하도록 한다(그림 2.2.19)

③ 제방 높이 5 cm 만큼 축조할 흙의 무게를 측정한 후 수로 내의 흙을 포설하고 그림 2.2.20과 같은 수동식 다짐기 soil tamper를 이용하여 층 다짐한다. 이 과정을 전체 제방 축조가 완료될 때까지 반복한다.

④ 제방 축조에 사용된 흙의 무게를 산정하여 제방의 밀도를 산정한다(다짐도 측정 및 제방 성형 후 제거한 흙의 무게를 제외한 순수 제방 무게 산정).

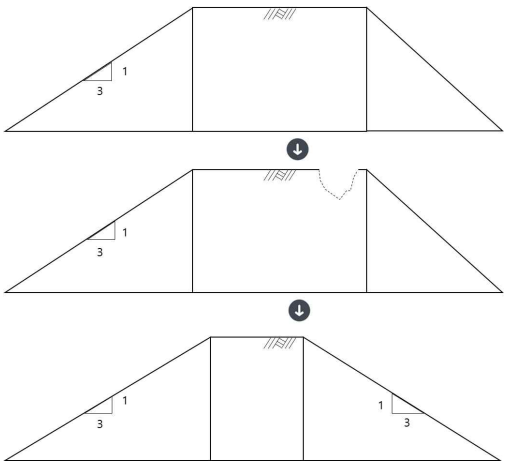


그림 2.2.19 제방 축조 및 다짐도 측정 절차



전체 길이 : 1,080 ~ 1,680 mm
탬퍼 : 200 × 200 mm
탬퍼 두께 : 11 mm
중량 : 6.4 kg

그림 2.2.20 수동식 다짐기(soil tamper)

제방의 다짐도 측정

① 축조한 제방의 다짐도를 측정하기 위해 현장다짐시험을 실시한다. 현장다짐시험은 모래치환법, 고무막법을 이용하여 흙의 무게와 흙을 파낸 공간의 부피로 다짐도를 계산한다.

② 본 설계(안)에서는 효율적이고 정확한 다짐도를 산정하기 위해 3D 레이저 스캐너를 이용하여 흙을 파낸 부피를 산정하는 것을 제안한다.

③ 제방 설계도보다 여유있게 축조한 영역에서 제방의 다짐도 산정을 위해 흙을 일정량 파내어 샘플링한다.

④ 흙을 파낸 공간의 부피 산정을 위해 3D 레이저 스캐너를 이용하여 스캔한다.

⑤ 샘플링한 흙을 건조하여 무게를 측정한 후 흙을 파낸 부분의 부피로 나누어 흙의 건조밀도를 산정한다.

$$\rho_{field} = \frac{W}{V} \tag{2.5}$$

$$R = \frac{\rho_{field}}{\rho_{dm}} \times 100(\%) \tag{2.6}$$

여기서, W는 파낸 부분의 흙의 무게, V는 흙을 파낸 부분의 부피, ρ_{dm}는 최대건조밀도이다.

제방 모형의 성형

① 제방 다짐도 측정 절차가 마무리된 후 제방의 설계도에 맞춰 제방 모형을 마무리 한다.

② 일반적인 제방 파괴를 유도하기 위해 마루부 중앙에 파일럿 채널을 형성한다.

③ 마지막으로 제방 마루와 제내지 측에 5 cm × 5 cm 격자를 백색 먹가루와 실을 이용하여 그린다.

④ 제방 모형이 완성된 후 3D 레이저 스캐너로 제방 모형을 스캐닝하여 정확한 크기와 부피를 산정하도록 한다.

제방의 침투 및 월류 수리실험 절차 및 과정

① 제방 모형을 다듬고 제방 모형으로부터 상류(제외지)와 하류(제내지)로 약 1 m 떨어진 위치에 수위 측정을 위한 초음파 수위계를 설치한다.

② 상류에서 공급되는 유량을 확인하기 위해 위어에 포인트 게이지를 설치하고, 제방의 붕괴 속도 및 붕괴 폭을 분석하기 위해 제방 위에 캠코더를 설치한다. 또한, 제방 측면에서 침투 속도 및 침윤선을 관찰하기 위해 카메라를 설치한다.

③ 실험 준비가 완료되면, 일정 수위까지 유량을 공급하고 포인트 게이지로 위어의 월류 수심을 측정한다.

④ 유량을 공급한 후 제방의 침윤선을 관찰하고, 제방 전체가 포화된 후 침투가 발생하므로 상류 수위를 실시간으로 모니터링하여 침투량을 관찰한다.

⑤ 일정 시간동안 침투실험을 진행하여 상, 하류의 수위변화를 확인하고 침투로 인한 제방의 변화를 관찰한다.

⑥ 침투실험이 끝난 후 일정한 유량을 공급하여 상류(제외지)의 수위를 상승시키고 월류 실험을 진행한다.

⑦ 월류실험은 파일럿 채널을 통해 흐름이 발생하면 제방 뒷비탈면에서 파괴가 시작되어 제방 전체의 파괴로 이어지는 실험으로 짧은 시간에 제방이 붕괴한다. 따라서, 붕괴 영상을 촬영하여 붕괴 과정 및 붕괴 폭, 붕괴 속도, 제방의 침식과 퇴적 등을 분석하기 위해 제방 위에 설치된 캠코더로 영상을 촬영한다.

⑧ 제방의 월류 발생시 흐름장 및 유속을 분석하기 위해 상류에서 SIV(Surface Image Velocimetry) 입자를 공급한다.

⑨ 월류로 인해 제방이 붕괴된 후 유량 공급을 중단하고 붕괴된 최종 형태를 관찰하도록 한다. 또한, 수로에 완전 배수가 된 후에 3D 스캐너로 붕괴된 제방 모형을 스캐닝하여 붕괴된 형태 및 붕괴된 양을 분석하도록 한다.

(2) 지진으로 인한 다짐도 변화가 제방 붕괴에 미치는 영향 검토 수리실험

(가) 실험의 개요

지진이 발생한 후 하천 제방이 붕괴되는 유형을 검토하기 위해 2.3.1절 '제방 수리실험 설계(안)'에 따라 제방 다짐도에 따른 붕괴유형 검토 수리실험을 수행하였다. 지진이 발생하면 하천 제방이

바로 붕괴되는 현상보다 지진으로 인해 제방 다짐도가 감소되고 돌발홍수, 집중호우 등과 같은 자연재해가 발생하여 제방이 붕괴되는 2차 재난재해가 발생하는 경우가 더 많다. 이에 따라, 본 실험에서는 제방 다짐도에 따른 침투 및 월류 실험을 수행하여 제방의 침투 속도 및 침투량, 월류로 인한 제방 붕괴 속도 및 붕괴 폭, 흐름장 등을 분석하였다.

제방 다짐도에 따른 침투 및 붕괴 실험은 한국건설기술연구원 안동하천연구센터 내의 순환수로에서 수행하였다. 실험을 수행한 수로는 그림 2.2.21에 나타난 바와 같이 길이 37 m, 높이 1.2 m, 폭 1.0 m인 순환식 수로이며, 수로 유입부에는 삼각위어가 설치되어 공급되는 유량을 산정할 수 있다. 수로 중앙의 10 m 구간에는 상, 하류단과 0.3 m의 높이차가 있으므로 수로 중앙 10 m를 제방의 기초지반으로 흙을 포설하여 다진 후 기초지반 위에 제방 모형을 축조하였다. 다짐도에 따른 침투실험은 2회, 다짐도에 따른 월류 붕괴 실험은 4회 수행하였으며, 제방 모형 및 성토재료, 수리조건 등은 동일하고 다짐도만 다른 조건으로 실험을 진행하였다. 수로 중앙에 제방 길이 1 m, 제방 높이 0.4 m, 마루폭 0.2 m, 비탈경사 1:3인 제방 모형을 축조하여 실험을 수행하였다(그림 2.2.22). 먼저, 실험을 수행하기에 앞서 제방 성토재료의 적절성을 판단하기 위해 성토재료 약 60 kg를 샘플링하여 입포분포분석 및 표준다짐시험을 진행하였다. 입도분포분석은 KS F 2302의 규정에 따라 수행되었으며, 표준다짐시험은 KS F 2312의 따라 수행되었다.

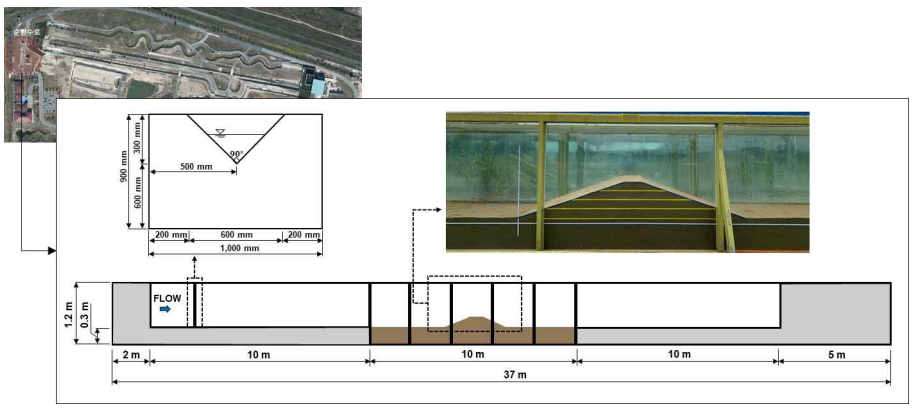


그림 2.2.21 하천연구센터 내의 순환수로 제원 및 제방 축조 위치

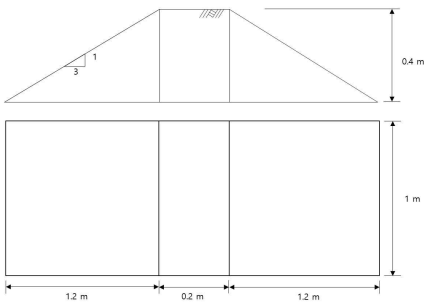


그림 2.2.22 제방 모형의 설계도

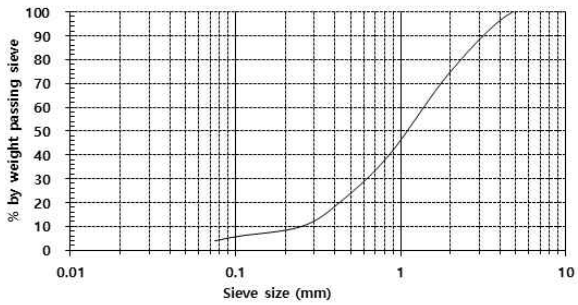


그림 2.2.23 제방 성토재료의 입도분포곡선

성토재료의 입도분포를 분석한 결과, 4.8 mm에서 0.075 mm의 범위의 입경이 분포하였고 대부분 모래로 구성되어 있었다. 중앙입경(D_{50})은 1.1 mm이며, 최대 입경은 4.8 mm, D_{60}과 D_{30}, D_{10}은 각각 1.4 mm, 0.6 mm, 0.3 mm로 확인되었다. 또한, 균등계수(Cu)는 5.2, 곡률계수(C_g)는 1.1로 분석되어 제방 성토재료의 입도분포가 양호한 것으로 판단되었다. 제방 성토재료의 입도분포곡선은 그림 2.2.23과 같다. 또한, 표준다짐시험(A다짐시험) 결과, 제방 성토재료의 최대건조밀도는 1.853 g/cm^{3}이고, 최적함수비 11.7%로 분석되었다. 이에 따라, 제방 실험을 수행하기 위한 입도분포분석 및 표준다짐시험 결과는 표 2.2.3과 같으며, 제방의 성토재료의 적절성 판단 및 제방의 다짐도 산정을 위한 기초자료를 만들었다. 제방 성토재료의 분석이 끝난 후 성토재료의 적절성을 판단하였다.

표 2.2.3 제방 실험의 성토재료 입도분포 및 다짐도시험 결과표

항목		결과
흙의 밀도(g/cm^2)		2.651
입도분포분석	최대입경(mm)	4.8
	60%입경(mm)	1.4
	30%입경(mm)	0.6
	10%입경(mm)	0.3
	균등계수	5.2
	곡률계수	1.1
표준다짐도시험	최대건조밀도(g/cm^3)	1.853
	최적함수비(%)	11.7

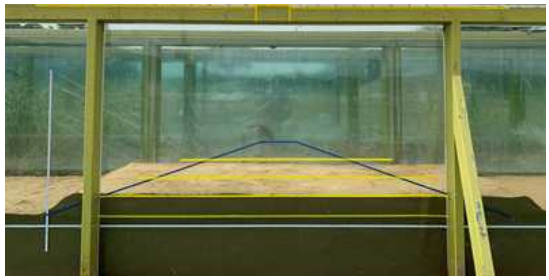
(나) 제방 실험의 조건 및 방법

제방 다짐도에 따른 침투 및 월류 붕괴를 관찰하기 위해 제방의 다짐횟수와 층 다짐 두께로 실험 조건을 설정하였다. 표 2.2.4에 나타난 바와 같이 Case A와 Case C는 5 cm 간격의 층 다짐 두께로 각각 15회, 5회 수동식 다짐기로 다짐을 수행하였고, Case B와 Case D는 10 cm 간격의 층 다짐 두께로 각각 15회, 5회 다짐하였다. 제방 축조 및 층 다짐 과정은 제방 높이 5 cm, 10 cm까지 흙을 포설하고 포설한 흙을 평탄하게 고른 후 다짐을 하는 순서이며, 이를 제방 마루까지 축조하는데 반복하였다. 흙을 포설할 때는 제방 축조에 사용되는 흙의 무게를 측정한 후 흙을 포설하도록 하였다. 본 실험에서는 최대로 측정 가능한 무게가 150 kg이고, 소수점 2자리까지 측정 가능한 산업용 저울로 흙의 무게를 측정한 후 포설하였다. 5 cm, 10 cm 높이에 흙을 쌓아 soil tamper(수동식 다짐기)를 활용하여 한 위치에서 다짐횟수만큼 다짐을 수행하였다. 그림 2.2.24는 Case A에서 제방을 축조하는 과정이며, soil tamper로 5 cm 간격으로 층 다짐한 과정이다. 그림 2.2.24 (a)는 층 다짐 후 위에 찍은 사진이

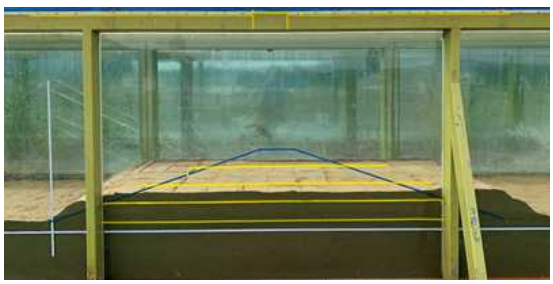
고, (b)-(h)는 층 다짐 후 제방 측면에서 찍은 사진이다. 그림에서 나타난 바와 같이 제방 제내지 측을 실제 제방 모형보다 여유있게 축조하였다.



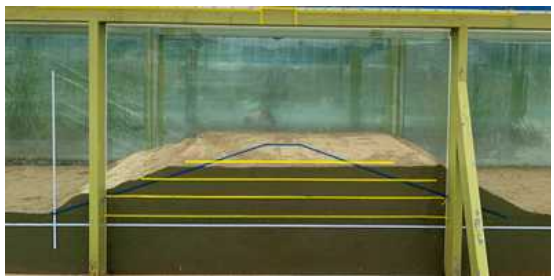
(a) 높이 5 cm 층 다짐



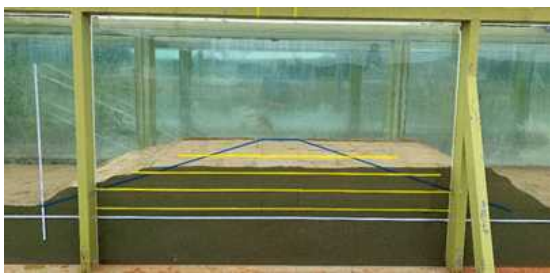
(b) 높이 10 cm 층 다짐



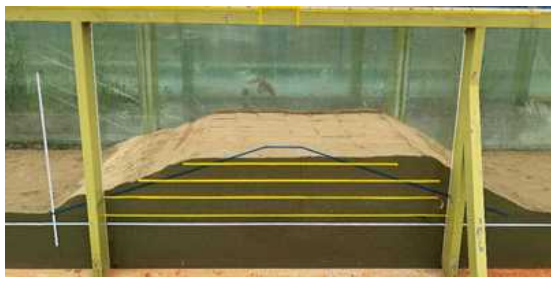
(c) 높이 15 cm 층 다짐



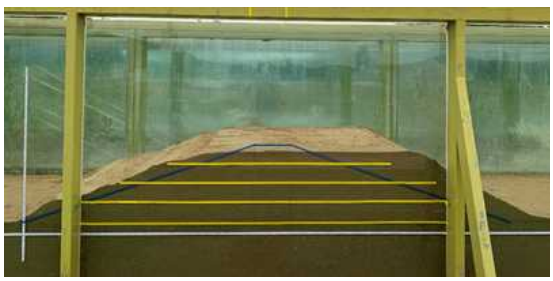
(d) 높이 20 cm 층 다짐



(e) 높이 25 cm 층 다짐



(f) 높이 30 cm 층 다짐



(g) 높이 35 cm 층 다짐



(h) 높이 40 cm 층 다짐

그림 2.2.24 다짐도에 따른 제방 붕괴유형 검토 실험의 층 다짐 과정

제방 축조 및 층 다짐이 끝난 후에 제방의 다짐도를 측정하기 위해 제방 제내지 측에서 흙을 샘플링하고 Leica RTC 360 Scanner(Leica Geosystems)를 이용하여 흙을 파낸 부분을 스캐닝하였다. 흙을 파낸 부분의 부피를 정확하게 산정하기 위해서 6 mm의 정밀도 로 스캔하였으며, 그림 2.2.25와 같이 부피를 산정할 수 있는 스캐닝 결과를 얻었다. 스캔한 파일에서 흙을 파낸 부분만 추출하여 point cloud를 mesh 형태로 후처리하여 부피를 산정하였다. 다짐도 측정을 위해 샘플링한 흙과 부피로 제방의 다짐도를 산정한 결과, Case A와 Case B의 다짐도는 각각 90.39%, 86.57%이고, Case C와 Case D의 다짐도는 76.64%, 74.40%로 산정되었다(표 2.2.4)

표 2.2.4 실험 케이스별 제방의 다짐도 및 유량 조건

Case	다짐횟수	층 다짐 두께(cm)	건조 밀도(g/cm^3)	다짐도(%)	공급 유량(l/s)
A	15	5	1.675	90.39	1.23
B	15	10	1.604	86.57	1.21
C	5	5	1.420	76.64	1.25
D	5	10	1.379	74.40	1.28



그림 2.2.25 다짐도 측정을 위한 부피 산정 과정

제방 다짐도 측정을 위한 스캐닝 작업이 끝난 후 제방 모형 설계도에 맞춰 제방 성형을 마무리 하였다(그림 2.2.26). 제방 모형을 다듬은 후 제방의 월류를 유도하기 위해 제방 마루 중앙에 폭 20 cm, 높이 2 cm인 파일럿 채널을 만들었다. 그리고 제방 붕괴 폭을 시각적으로 판단하고 정확하게 분석하기 위해서 제방의 마루와 뒷비탈경사에 5 cm × 5 cm 격자를 백색 먹가루로 그렸다(그림 2.2.27). 제방 모형의 축조가 마무리된 후 축조된 제방 모형의 크기 및 부피를 산정하기 위해 3D 스캐너로 제방 및 하상을 스캐닝하였다. 모든 실험 Case에서 이러한 절차로 제방 축조 및 다짐도를 측정하였다. 제방의 침투와 붕괴로 인한 수위 변화를 모니터링하기 위해 제방에서 상류방향으로 1 m와 2 m 떨어진 위치에 초음파 수위계를 설치하여 3초 간격의 수위 자료를 획득하였다. 그리고 제방 측면에 GoPro를 설치하여 2분 간격의 타임랩스 촬영을 수행하였다. 계측 장비 설치가 끝난 후에

유량 공급을 시작하여 제방의 침투 및 월류 붕괴 실험을 수행하였다.

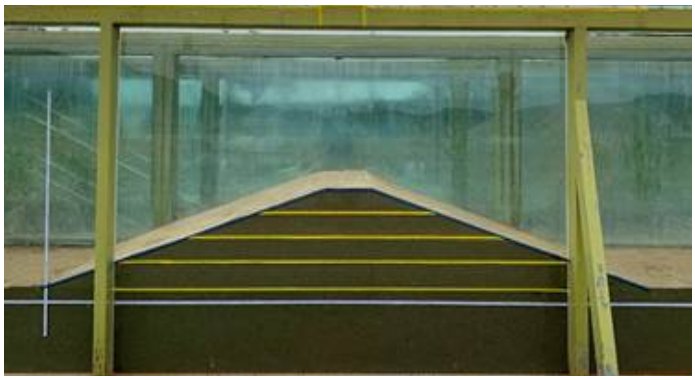


그림 2.2.26 제방 모형 축조 결과



그림 2.2.27 제방 사면 격자 작도

월류 실험에서 공급된 유량은 유입부에 설치된 삼각위어를 통해 산정하였으며, 위어에서 월류 수심을 측정하여 식 (2.7)과 식(2.8)을 통해 유량을 산정하였다.

$$Q = Ch^{\frac{5}{2}} \tag{2.7}$$

$$C = 81.2 + \frac{0.24}{h} + (8.4 + \frac{12}{\sqrt{D}})(\frac{h}{B} - 0.09)^2 \tag{2.8}$$

여기서, Q는 유량(m^3/s), C는 유량계수, h는 월류 수심(m), D는 위어 높이(m), B는 수로 폭(m)이다.

(다) 제방 침투실험 결과

제방의 침투 실험은 층 다짐 두께가 5 cm이고, 다짐횟수가 각각 15회, 5회인 Case A와 Case C 조건에서만 수행되었다. 제외지(상류) 수위가 35 cm에 도달할 때 까지 일정하게 유량을 공급하였고, 수위가 35 cm 도달한 시점으로부터 13시간의 침투 실험을 진행하였다. 침투실험은 수위가 상승하면서 침윤선이 나타났고, 침투가 점차적으로 진행되어 제방이 완전히 포화되었을 때 침투가 발생되었다. 제방에서 상류방향으로 1 m 떨어진 위치에서 초음파 수위계로 측정한 수위 데이터는 그림 2.2.28에 나타난 바와 같이 수위가 저하되는 경향이 비슷하게 나타났다. 침투실험 시작시점의 수위와 침투실험 종료시점의 수위차를 산정한 결과 Case A 실험은 9 cm, Case C 실험은 9.8 cm의 수위가 저하된 것으로 확인되었다. 다짐도가 낮은 Case C 실험에서 0.8 cm가 더 많이 침투된 것으로 나타났다. 수위는 0.8 cm 감소했지만 침투량으로 환산하면 약 0.064 m^3이며, 상당히 많은 양이 더 많이 침투된 것으로 해석된다. 또

한, 침투실험이 종료된 후의 제방을 관찰한 결과, 제방 뒷비탈면에 작도한 그리드를 통해 침투의 정도를 간접적으로 확인할 수 있었다. 그림 2.2.29는 Case A 실험의 침투실험이 종료된 후 제방 위에서 찍은 사진이며, 제방 뒷비탈면에 작도한 그리드가 침투로 인해 지워진 것을 확인할 수 있었다. 그림 2.2.30도 마찬가지로 Case C 실험의 침투실험이 종료된 후의 찍은 제방의 사진이며, 뒷비탈면에 작도한 그리드가 침투로 인해 지워진 것을 확연하게 확인할 수 있었다. 이러한 현상을 통해 제외지에서 제내지로 침투가 진행될 때, 어느 위치에서 침투가 발생하였는지 판단할 수 있었고 다짐도에 따라 침투가 발생하는 영역에 차이가 있는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과를 수치적으로 판단하기 위해 각각의 실험결과에서 침투영역 면적을 산정하였으며, Case A 실험의 제내지 사면 하단부에서의 침투영역 면적은 0.1350 m^2, Case C 실험의 침투영역 면적은 0.1825 m^2으로 산정되었다. 침투영역 면적은 Case C 실험에서 더 넓게 산정되었으며, 다짐도가 낮은 Case C 실험의 경우 더 많은 영역에서 침투가 발생한 것으로 판단된다. 따라서, 제방 다짐도에 따른 제외지의 수위 변화 및 제내지로의 침투량, 침투영역을 고려했을 때, 다짐도가 낮은 경우가 높은 경우보다 더 많이 침투되는 결과가 나타났다.

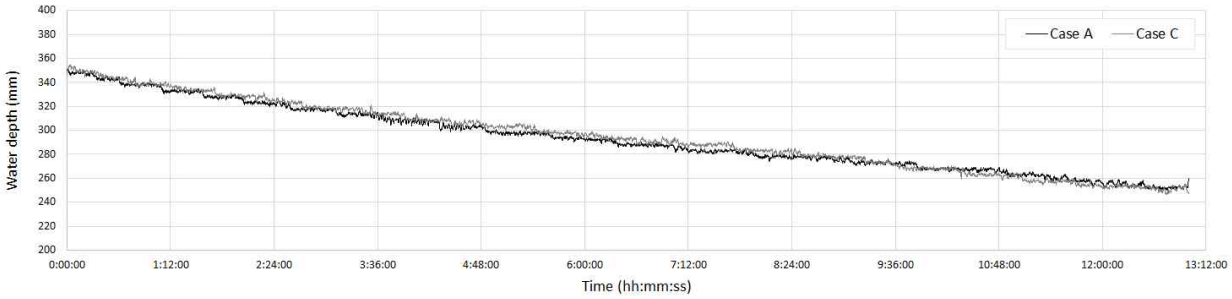


그림 2.2.28 다짐도에 따른 침투실험의 제외지 수위 변화·비교

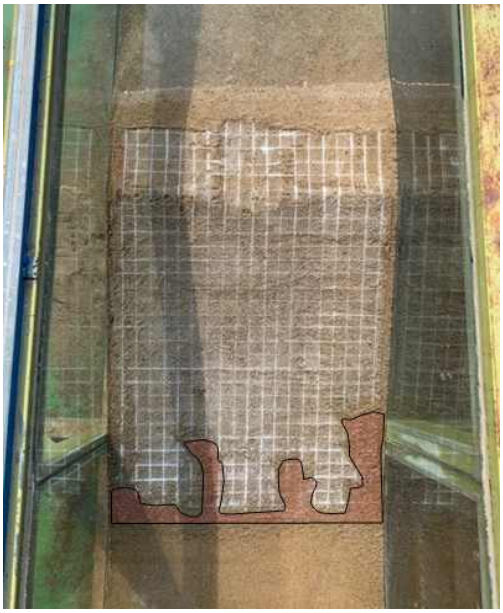


그림 2.2.29 다짐도에 따른 침투실험-1차 침투실험 결과(Case A)



그림 2.2.30 다짐도에 따른 침투실험-2차 침투실험 결과(Case C)

(라) LSPIV 기법을 이용한 제방 월류시 유속장 분석

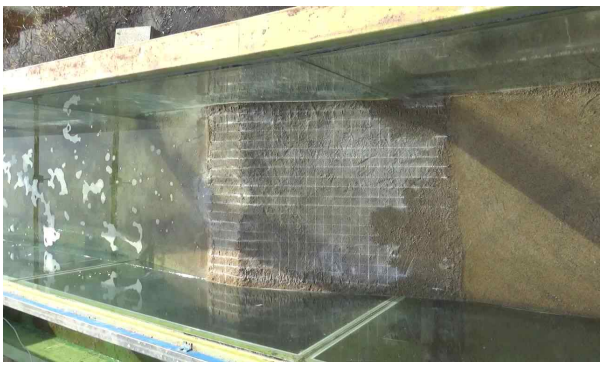
본 연구에서는 월류시 제방 파괴의 단계별 특징을 분석하기 위해 LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry)를 이용하여 시간에 따른 유속장의 변화를 검토하였다. 영상 분석을 위해 촬영에 사용된 카메라는 SONY HDR-CX450으로 일반 비디오 캠코더이며, 영상은 모두 30 fps로 촬영되었다. 촬영 해상도는 각 케이스별로 다르며, Case 1과 2는 1280 x 720 해상도, Case 3와 4는 1920 x 1080 해상도로 촬영되었다. 영상의 촬영은 모든 실험 케이스에서 수로 상단의 이동식 대차 위에 캠코더를 부착하여 제방 마루의 흐름 접근영역과 마루, 제내지 사면 및 제내지 바닥(toe)이 보이도록 설치하여 수행되었다.



(a) Case A



(a) Case B



(a) Case C



(a) Case D

그림 2.2.31 다짐도에 따른 월류 실험(월류 발생 직전)

그림 2.2.31과 같이 촬영된 영상은 3차원 공간이 2차원 평면으로 표현되는 과정에서 영상 내에 원근에 의한 왜곡이 존재하는데, 이에 대한 보정을 위해 Fujita et al. (1998)과 Roh (2004)에서 소개된 2차원 투영좌표 변환법(2-D projective coordinate transformation)을 이용하여 영상의 왜곡 보정이 수행되었다. 왜곡이 보정된 영상을 이용하여 유속장 분석이 수행되었으며, 유속장은 제내지측 사면과 마루의 경계면으로부터 상류측으로 1 m 구간에 대해 도출되었다. 이 때 유속장 분석은 시간적으로 연속된 이미지간 동일한 화소의 명암 값 분포를 가진 영역을 매칭하고 이를 이미지간 단위 시간으로 나누어 유속 벡터를 계산하는 방법이 적용되었다. 여기서 매칭을 위해 지정되는 입자군의 영역을 상관영역(interrogation area)이라 하며 시간적으로 연속된 다른 이미지에서 이와 매칭되는 영역을 찾기 위한 범위를 탐색영역(searching area)라고 한다. 이 때 상관영역의 명암값 분포가 유사한 영역을 판별하기 위해 Raffel et al. (2007)에서 제시된 상호상관기법(cross-correlation method)이 적용되었으며, 이를 통해 상관영역 및 탐색영역의 명암값 분포간 상관계수를 계산하여 최대 상관계수를 갖는 입자군을 결정하여 유속을 도출한다.

이미지의 명암값 분포를 이용하여 수표면 내 흐름의 변화를 분석하는 LSPIV 기법의 경우 상관영역 내 명암값 분포에 구분이 가능한 패턴이나 추적자가 필요하며, 따라서 수표면에 거품과 같은 이물질이 존재하지 않거나 파문(ripple)이 없는 경우 분석이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는

LSPIV 분석을 위해 거품과 쌀튀밥을 이용하여 인위적인 추적자를 형성하여 흐름장을 가시화하여 영상을 촬영하였다.

본 연구에서 수행된 모든 실험케이스의 영상은 모두 30 fps로 촬영되었으나 흐름이 매우 느린 영역의 유속장을 분석하기 위해 영상을 10 fps로 분할하여 분석을 수행하였다. 본 실험에서 발생한 접근 영역 내 유속은 약 0.01 ~ 0.2 m/s 로 한계류가 발생하는 월류 영역에 비해 상대적으로 작다. 1차적으로 분석이 완료되어 도출된 유속장은 추적자가 없는 영역과 햇빛의 반사 등의 이유로 발생하는 이상치를 제거하기 위해 유속값의 범위를 제한하여 이를 벗어나는 유속 데이터를 제거하는 필터링 기법을 통해 후처리가 수행되었다. 유속값의 범위는 각 실험 영상의 조건과 분석자의 시행착오 및 경험에 기반하여 결정된다. LSPIV를 이용한 유속장의 도출은 각 실험 케이스별로 월류가 시작되는 시점으로부터 20초 단위로 180초 후까지의 영상에 대해 수행되었으며, 즉 각각의 유속장 분석 결과는 20초의 영상을 기반으로 도출되었다.

(마) 유속장 분석 결과 및 월류 붕괴실험 결과

추적자가 없는 영역에서는 분석되는 유속값이 0에 가까운 이상치가 발생하며, 그림 2.2.31 (a)와 같이 햇빛에 의한 반사가 있는 경우에도 과도하게 유속값이 크게 발생하는 이상치가 발생할 수 있다. 이 때 월류영역과 접근영역의 유속 범위가 크게 다르기 때문에 각각의 유속장을 도출하기 위한 필터링 처리 조건이 다르게 적용되어야 한다. 따라서 하나의 유속장 분석 결과에 두 가지 u, v의 유속 범위를 적용하여 2회에 걸쳐 분할하여 후처리가 수행되었다.

먼저 접근 영역의 유속장 분석을 위해 적용된 u의 범위는 0.01 m/s - 1.0 m/s로 추적자가 없는 영역에서 발생하는 0에 가까운 유속 벡터를 제거하기 위해 0.01 m/s 미만의 값을 제거하고 빛 반사 등의 이유로 정상적인 유속 범위를 초과하는 유속 벡터를 제거하기 위해 1.0 m/s를 초과하는 데이터가 필터링되었다. 또한 v의 경우 과도하게 회전하는 흐름이 거의 존재하지 않기 때문에 -0.2 m/s 미만 또는 0.2 m/s를 초과하는 데이터를 필터링하여 이상치를 제거하였다. 다음으로 월류에 의해 한계류가 발생하는 영역은 접근영역에 비해 유속이 상대적으로 빠르고 추적자가 매우 빠르게 지나가기 때문에 유속 분석이 가능한 영역이 매우 제한적이다. 따라서 분석시 추적자가 지나갈 때의 순간 유속값을 검토하여 이를 기반으로 월류 영역에서 발생 가능한 유속의 범위를 경험적으로 지정하여 필터링 처리를 수행하였다. 또한 이는 실험 케이스별로 제방 붕괴 단계에 따라 형성되는 유속장의 값 범위가 달라지기 때문에 각 단계별로 u의 최소값 필터링 조건이 달리 적용되었다. 유속이 느린 월류 초기단계에서는 접근 영역의 유속 값을 제외하기 위해 0.05 m/s의 u 최소값이 적용되었으며 제방 붕괴가 진행됨에 따라 0.2 m/s까지 점차 큰 값을 적용하여 필터링이 수행되었다. 후처리가 완료된 접근 및 월류 영역의 유속장을 합성하여 도출된 각 실험 케이스별 유속장을 표 2.2.5에 나타내었다. 유속장의 합성은 접근 영역 유속 (u_a)와 월류 영역 유속(u_o)를 비교하여 큰 값을 합성유속(u_c)로 나타내었다. 유속장의 합성은 파이썬을 이용하여 별도의 코드를 작성하여 수행되었다.

표 2.2.5 다짐도에 따른 월류실험 결과 - CASE A

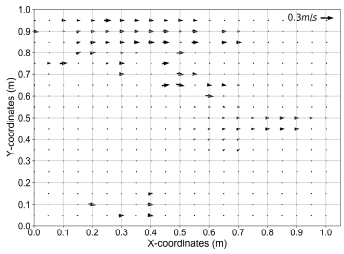
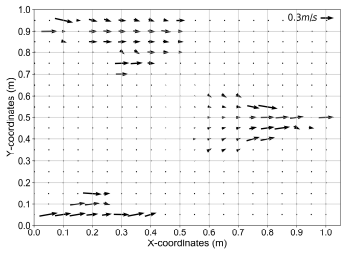
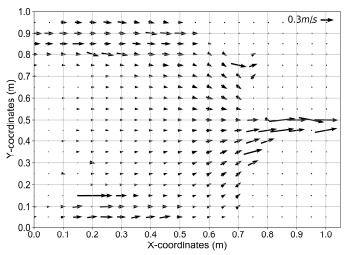
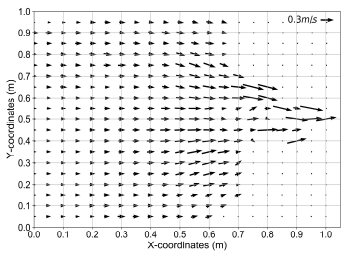
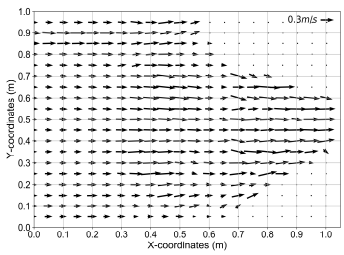
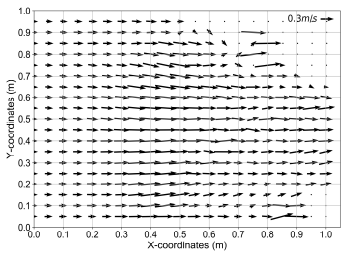
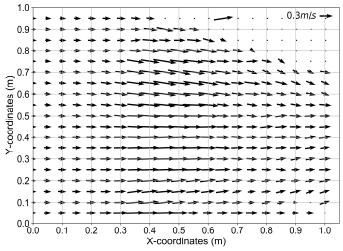
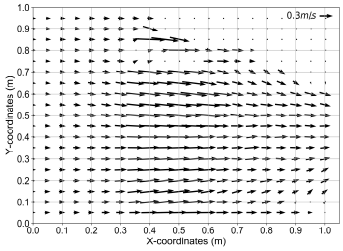
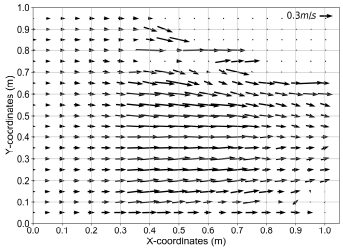
시간	Image	Vector Field
월류 후 20초 경과		
월류 후 40초 경과		
월류 후 60초 경과		
월류 후 80초 경과		
월류 후 100초 경과		
월류 후 120초 경과		

표 2.2.5 다짐도에 따른 월류실험 결과 - CASE A (계속)

월류 후 140초 경과		
월류 후 160초 경과		
월류 후 180초 경과		

다짐도가 90.39% (다짐횟수 15회, 층 다짐 두께 5 cm)로 가장 높은 Case A의 경우 20초가 경과한 시점에 마루부터 제내지 바닥까지 유수가 형성된 것을 확인할 수 있으며 이를 따라 연직방향으로 침식이 점차 진행되어 유출된 토사가 제내지 바닥 부근에 부채꼴 형태로 퇴적되는 것을 확인할 수 있다(표 2.2.5). 연직방향의 침식 단계가 지난 60초 경과 후의 이미지를 보면 유수를 따라 침식된 영역으로 월류 유속이 증가함에 따라 제방의 하단으로부터 제방 내부의 붕괴가 진행된다. 반면 이 때 마루의 붕괴 영역은 마루 중앙 파일럿 채널의 폭에서 크게 벗어나지 않으며, 제외지 측에서 흐름이 하강함에 따라 부채꼴 형태로 침식이 발생된다. 유속장 분석 결과를 보면 제외지 측의 흐름 접근 영역에서 제방의 방향으로 점차 흐름이 발달하기 시작하였다. 이 후 100초 경과 후로부터는 제외지의 부채꼴 형태 침식이 수로 폭의 크기로 점차 발달하고 제방 내부의 침식 영역이 점차 넓어짐에 따라 마루 상단 영역의 붕괴가 시작되었다. 또한 제내지 측에 수위가 바닥고 이상으로 상승함에 따라 제외지 사면 바닥 부근에서 도수가 발생되었다. 이와 같은 도수 현상은 제내지 수위가 지속적으로 상승함에 따라 월류 후 120초가 경과한 시점에 제방의 내부 영역으로 이동되고 제방 내부와 제내지 사면의 추가적인 파괴를 발생시켰다. 이 후 140초가 경과한 시점부터는 제내지의 수위가 제외지의 수위와 유사한 수준으로 증가함에 따라 도수 현상이 종료되며 추가적인 제방의 붕괴는 발생되지 않았다.

표 2.2.6 다짐도에 따른 월류실험 결과 - CASE B

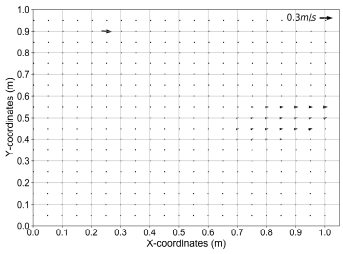
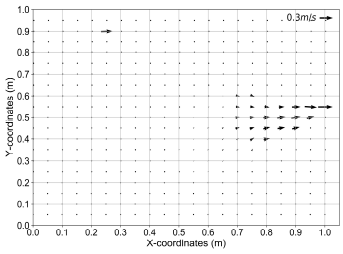
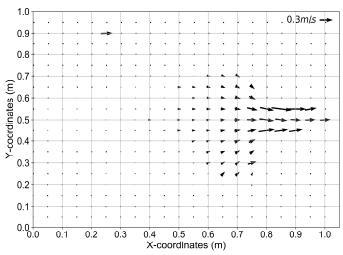
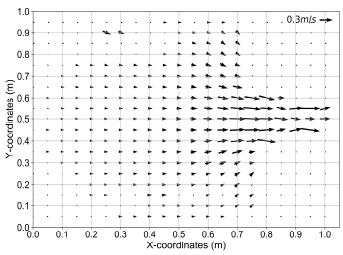
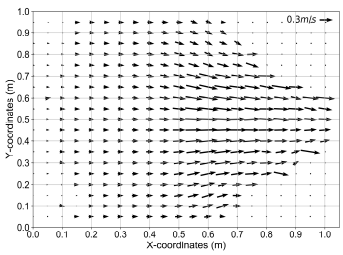
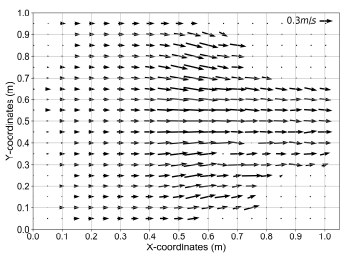
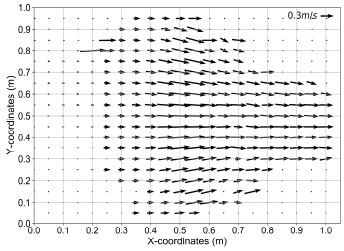
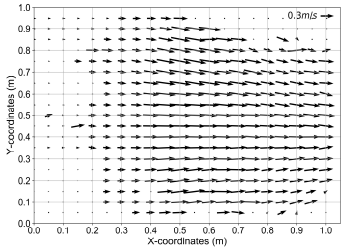
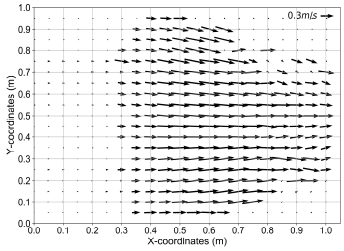
시간	Image	Vector Field
월류 후 20초 경과		
월류 후 40초 경과		
월류 후 60초 경과		
월류 후 80초 경과		
월류 후 100초 경과		
월류 후 120초 경과		

표 2.2.6 다짐도에 따른 월류실험 결과 - CASE B (계속)

월류 후 140초 경과		
월류 후 160초 경과		
월류 후 180초 경과		

다짐도가 86.57% (다짐횟수 15회, 층 다짐 두께 10 cm) 인 Case B의 경우 Case A와 마찬가지로 월류 시작 후 20초 경과 후에 마루상단부터 제내지 바닥까지 유수가 형성되었으며 제내지 바닥 부근에 부채꼴 형태로 퇴적의 발생이 시작되었음을 확인할 수 있다(표 2.2.6). 또한 Case A에 비해 60초 경과 후 시점에 제내지 사면의 붕괴 폭이 상대적으로 넓으며 100초 경과 시점에는 Case A와 마찬가지로 마루 상단과 제내지 사면의 붕괴가 넓은 폭으로 발생한 것을 확인할 수 있다. 또한 제내지 수위 상승에 따른 제방 내 도수 현상은 발생한 시점이 모두 80초 경과후로 Case A와 유사하며 이에 따라 제방 내부의 붕괴 폭이 점차 확장되기 시작하였다. 140초가 경과한 시점에서 제내지 측 수위가 제외지 측과 유사한 수준으로 상승함에 따라 도수 현상이 종료되고 제방 붕괴 현상이 종료되었다. Case B의 경우 시공된 제방 마루의 파일럿 채널과 제내지 사면의 수평 기울기에 문제가 있어 월류 초기부터 60초 경과 후 시점까지 유수가 좌안측으로 사선형태로 형성되었으나, 도수가 발생하기 시작하는 80초 시점부터는 제방 붕괴 과정에 있어 Case A와 크게 다르지 않다.

표 2.2.7 다짐도에 따른 월류실험 결과 - CASE C

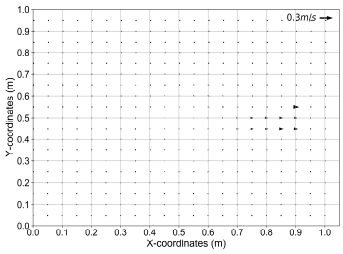
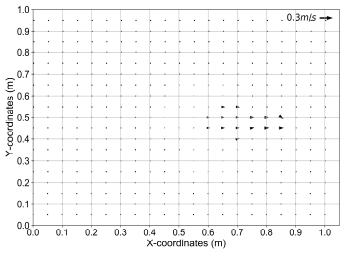
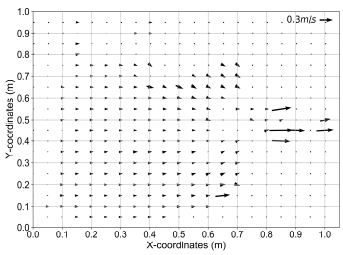
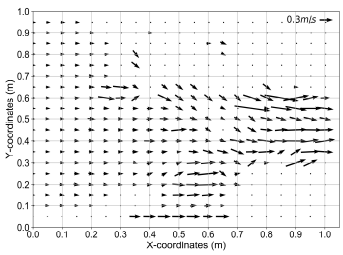
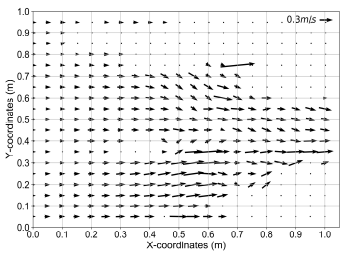
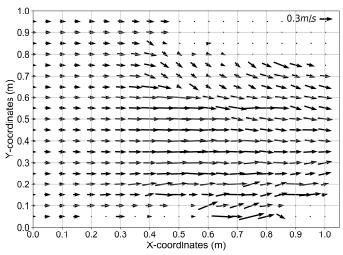
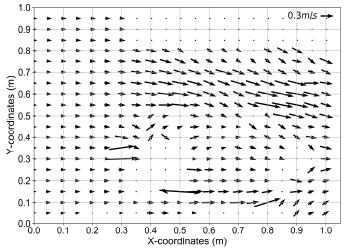
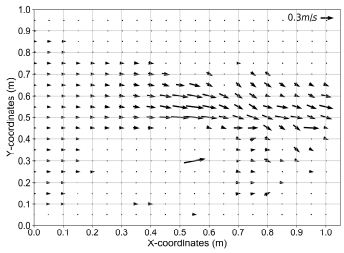
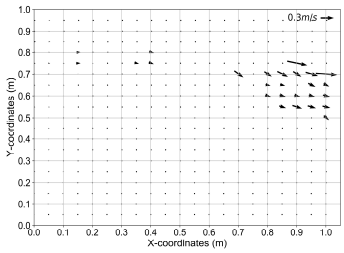
시간	Image	Vector Field
월류 후 20초 경과		
월류 후 40초 경과		
월류 후 60초 경과		
월류 후 80초 경과		
월류 후 100초 경과		
월류 후 120초 경과		

표 2.2.7 다짐도에 따른 월류실험 결과 - CASE C (계속)

월류 후 140초 경과		
월류 후 160초 경과		
월류 후 180초 경과		

다짐횟수가 5회로 크게 줄어들고 층 다짐 두께를 Case A와 같은 5 cm로 제방을 시공한 Case C의 경우 다짐도는 76.64%로 Case A (다짐도 90.39%), Case B (다짐도 86.57%)에 비해 상대적으로 작다(표 2.2.7). 본 실험 케이스의 경우 월류 후 20초가 경과한 시점에 Case A, B와 마찬가지로 유제내지 사면 바닥까지 유수가 형성되고 유출된 토사가 부채꼴 형태로 퇴적되었다. 반면에 유수가 형성됨과 동시에 이를 따라 연직방향으로 침식이 빠르게 진행되었음이 시각적으로 확인된다. 또한 40초가 경과된 시점에는 유수 영역 내 연직방향의 침식이 크게 진행되었고 제내지 영역에 수위가 상승하기 시작함이 확인되었다. 이 후 60초 경과 시점에는 제내지 수위 상승으로 인해 제방 내부에서 도수가 발생하기 시작하였고 제내지 사면이 큰 폭으로 붕괴되었다. 이와 같은 현상은 상대적으로 다짐도가 높은 Case A와 B의 경우에 비해 상대적으로 빠르게 나타났으며 이에 따라 80초가 경과된 시점에서 제내지 사면 및 마루 영역의 횡적 파괴가 야기되었다. 이에 따라 120초가 지난 상대적으로 이른 시점에서 대부분의 제방 붕괴가 이루어졌으며, 140초가 경과된 시점부터 점차 제내지 수위가 상승함에 따라 추가적인 붕괴는 발생되지 않았다.

표 2.2.8 다짐도에 따른 월류실험 결과 - CASE D

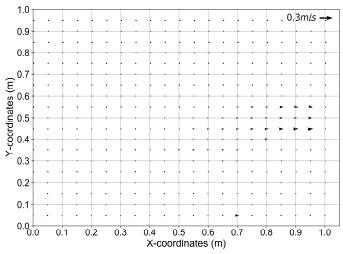
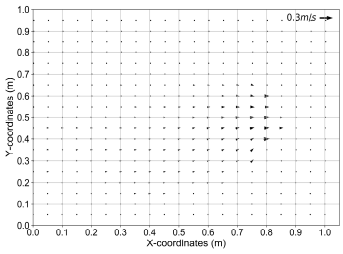
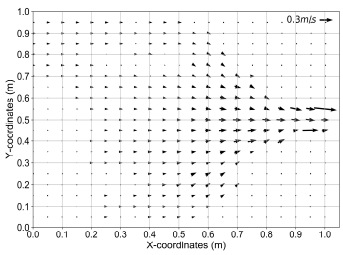
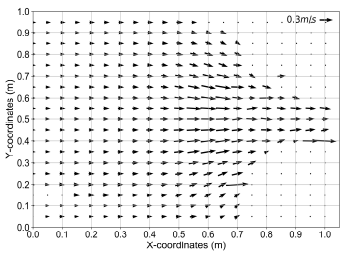
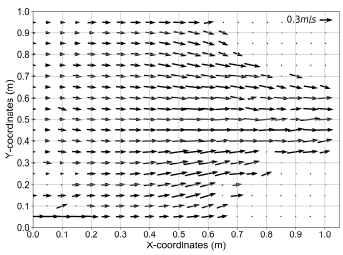
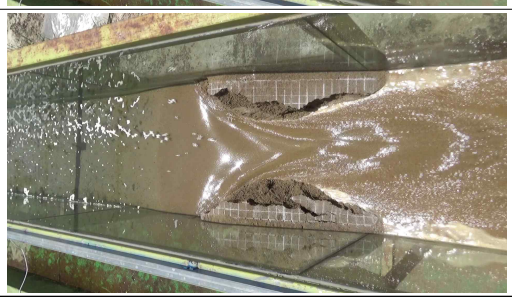
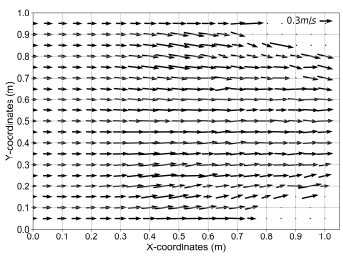
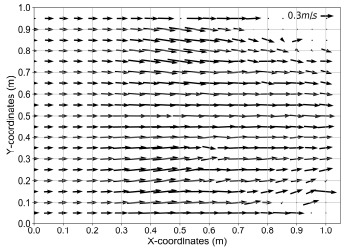
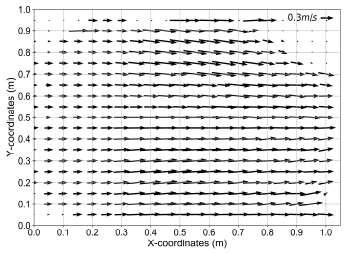
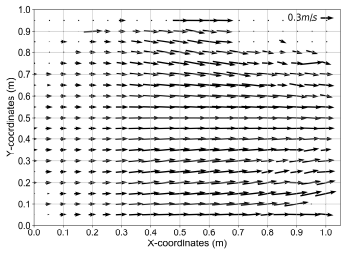
시간	Image	Vector Field
월류 후 20초 경과		
월류 후 40초 경과		
월류 후 60초 경과		
월류 후 80초 경과		
월류 후 100초 경과		
월류 후 120초 경과		

표 2.2.8 다짐도에 따른 월류실험 결과 - CASE D (계속)

월류 후 140초 경과		
월류 후 160초 경과		
월류 후 180초 경과		

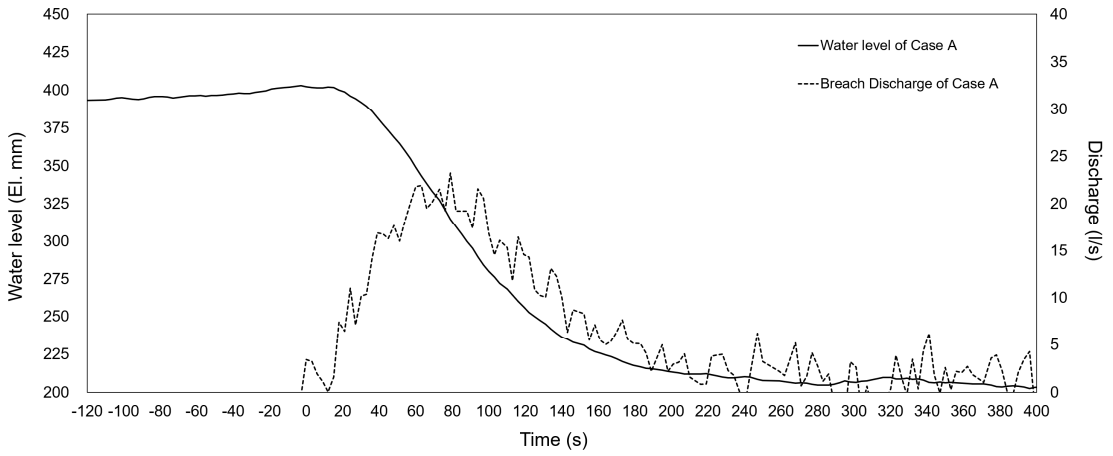
다짐 횟수가 5회로 Case C와 같고 층 다짐 두께가 10 cm인 Case D의 경우 74.40%의 가장 낮은 다짐도를 가지는 제방의 월류 테스트이다(표 2.2.8). Case C에 비해 더 낮은 다짐도를 가지나 월류 후 20초 및 40초가 경과한 시점에서 연직방향의 침식이 크게 발생했던 Case C와 달리 연직방향의 침식은 시각적으로 확인이 되지 않았다. 그러나 Case C와 유속장을 비교할 경우 마루 영역에서 유수를 이루는 영역의 폭이 상대적으로 넓은 것을 확인할 수 있다. 또한 제내지 사면 바닥부근에 유출된 토사의 퇴적되는 높이를 보았을 때 Case C에 비해 상대적으로 유출되는 토사의 양이 큰 것으로 판단된다. 60초가 경과한 시점에는 Case C와 마찬가지로 제내지 사면이 넓은 폭으로 붕괴되기 시작하였으며, 80초가 경과되는 시점에서 발생한 도수에 의해 횡적 파괴가 이루어졌다. 이후 120초가 경과된 시점에는 대부분의 제내지 사면 영역이 파괴되었으며 140초가 경과된 시점에는 대부분의 마루 영역이 파괴되었다. 붕괴가 완료되고 최종적으로 남은 제방의 형상을 보았을 때 Case D에서 상대적으로 가장 많은 파괴가 이루어졌음이 확인된다.

다짐도에 따른 실험 결과를 기반으로 월류로 인한 파괴 유량 산정 및 붕괴 폭을 정량적으로 분석하였다. 월류로 인한 파괴 유량은 Singh (1996)와 Morris et al. (2007)이 제시한 식 (2.9)를 통해 산정하였다.

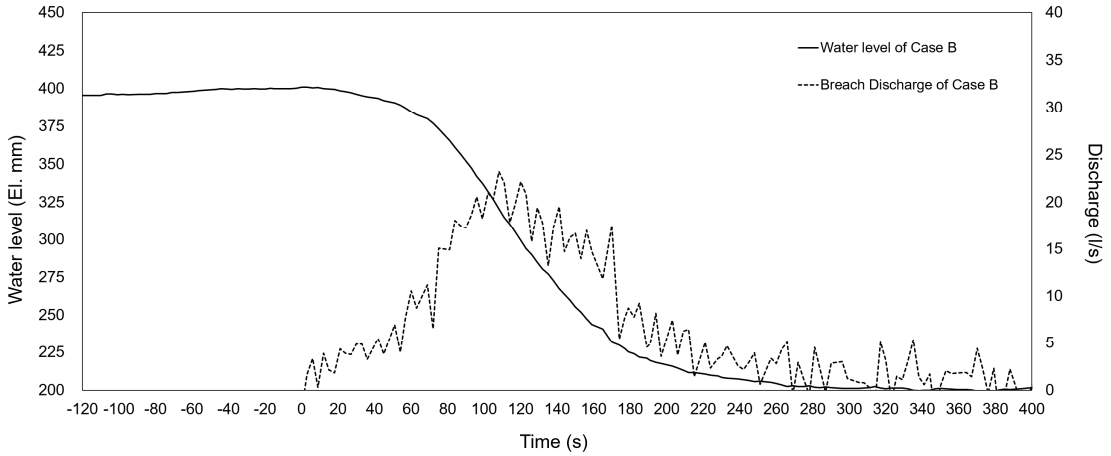
$$Q_b(t) = Q_o(t) - A_s(h)\frac{\triangle h(t)}{\triangle t} \tag{2.9}$$

여기서, $Q_o(t)$는 유입유량(m^3/s), A_s는 제외지 표면적(m^2), $\triangle t$는 t시간 동안 변화된 제외지 수위(m)이다.

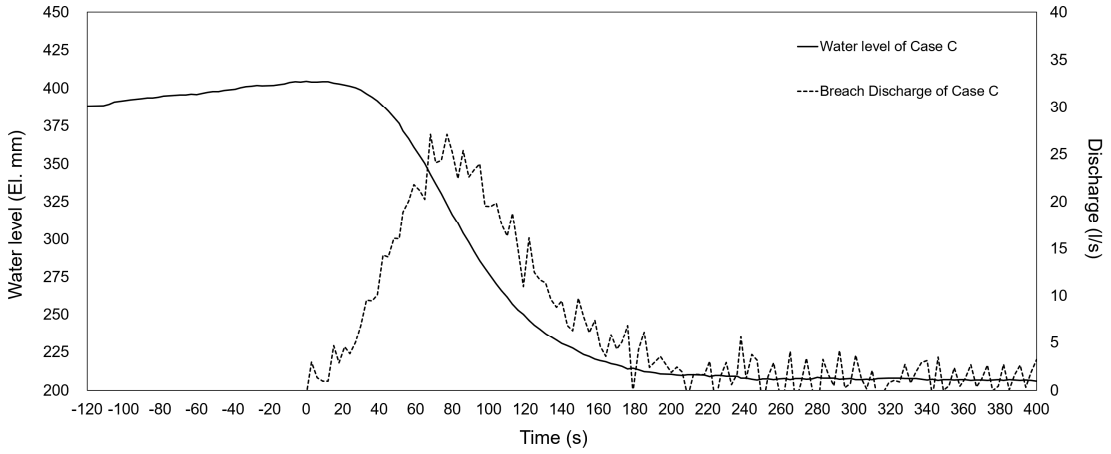
다짐도에 따른 월류 파괴 유량은 제외지에 설치된 초음파 수위계를 통해 획득한 수위 자료와 공급 유량을 이용하여 산정하였다. 먼저, 제외지 수위가 최대인 시점(0초)을 월류가 시작되는 시점으로 시간에 따른 수위 변화를 계산하였다. 그리고 수위 변화에 따른 제외지 수표면적을 산정하였으며, 수로의 제외지 길이와 폭으로 수표면적을 산정하였다. 수위 변화로 인한 제외지 길이는 변화된 수위와 비탈경사(1:3)를 이용하여 변화된 제외지 길이를 추정하였다. 유입 유량은 삼각위어에서 전자식 포인트 게이지로 측정한 월류 수심을 식(2.7)과 식(2.8)에 적용하여 산정하였다. 제외지 수위는 그림 2.2.32에 나타난 바와 같이 월류가 시작됨과 동시에 수위가 저하되기 시작한다. 수위 저하는 Case A와 Case C가 Case B와 Case D보다 급격하게 나타났으며, 이는 사전 침투 실험 여부가 초기 수위 저하 속도에 영향을 미친 것으로 판단된다. 최저 수위 발생 시점은 다짐도가 가장 낮은 Case D가 가장 빠르게 도달했고, 그 다음 Case C가 도달한 것으로 나타났다. 이는 Visser (1999) 실험 결과에서 나타난 바와 같이 제방 파괴 유량은 제방의 범람과 파괴 속도에 직접적인 영향을 주는 것으로 나타났다.



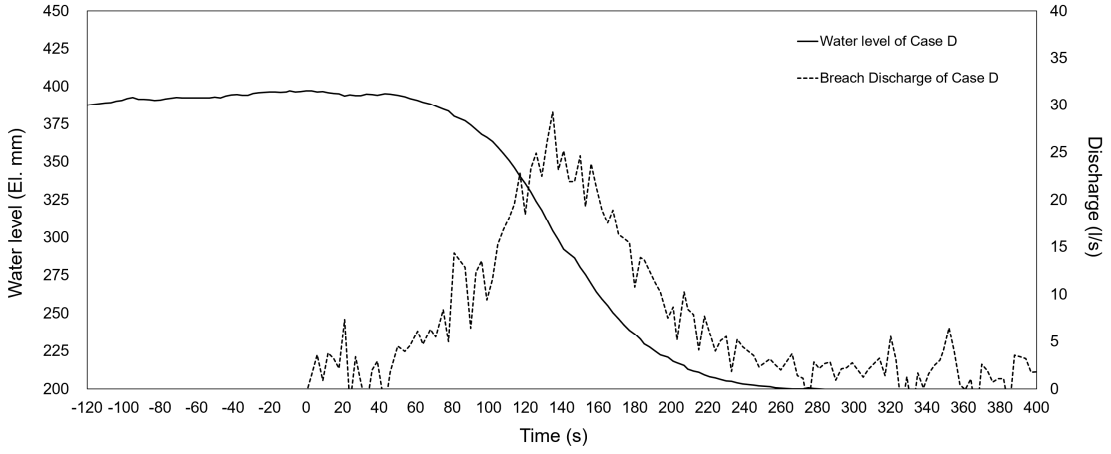
(a) Case A



(b) Case B



(c) Case C



(d) Case D

그림 2.2.32 다짐도별 수위변화 및 월류 파괴 유량 산정 결과

월류가 시작되는 시점인 0초부터 제외지 수위가 저하되면서 파괴 유량은 증가하기 시작하였고, 다짐도에 따라 파괴 유량의 변화 양상에 차이가 나타났다. 특히, 최대 파괴 유량 값에서 제방 다짐도의 영향이 두드러지게 나타났다. 그림 2.2.33은 다짐도별 최대 파괴 유량을 나타낸 것이며, 다짐도가 낮은 Case D의 파괴 유량은 135초에 29.25 l/s로 가장 크게 나타났다. 반면에 다짐도가 높은 Case A와 Case B의 파괴유량은 각각 23.24 l/s, 23.21 l/s로 매우 비슷한 값으로 산정되었다. 본 연구에서는 4가지의 다짐도 조건에 대한 결과이므로 일반화할 수 없지만 다짐도가 낮을수록 최대 파괴 유량이 커지는 것을 확인할 수 있었고, 이는 제방 다짐도와 최대 파괴 유량의 상관성이 있다는 유의미하다는 결과를 도출하였다.

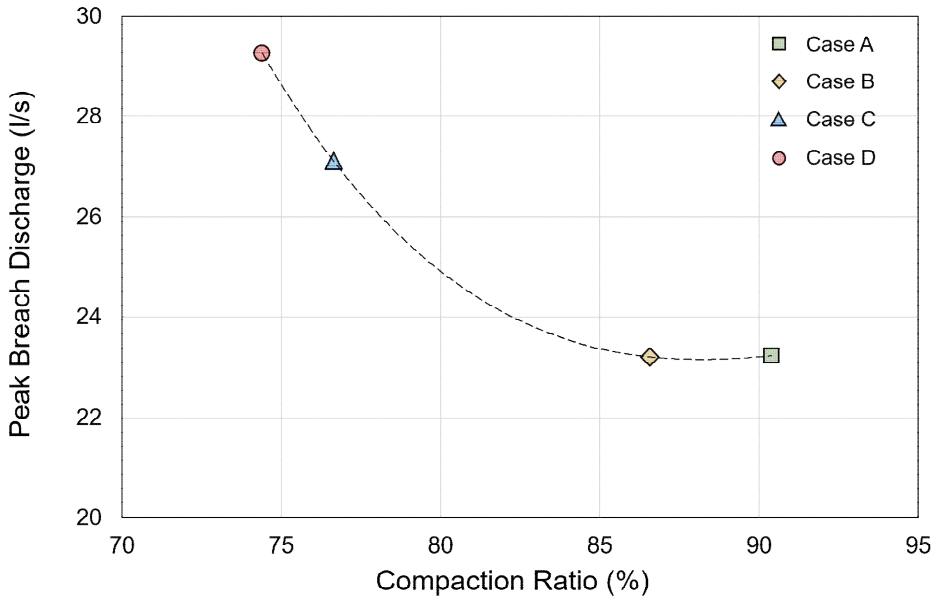
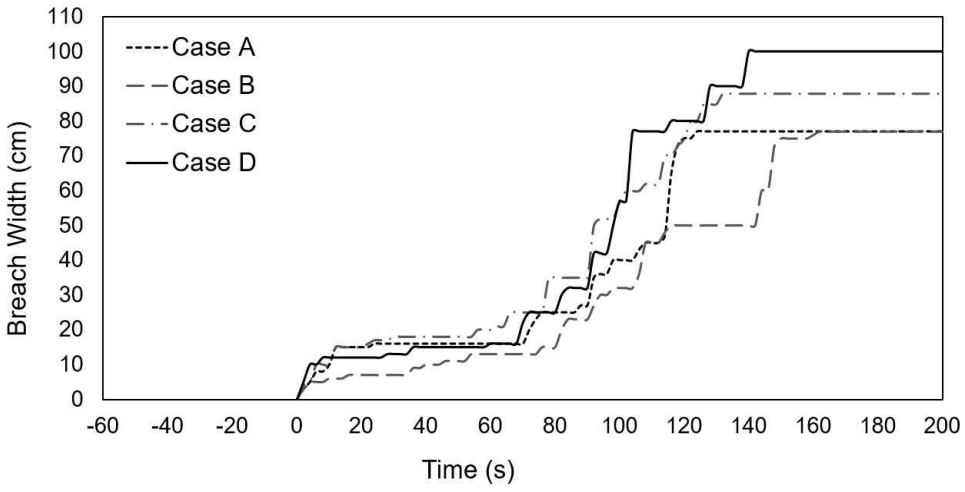


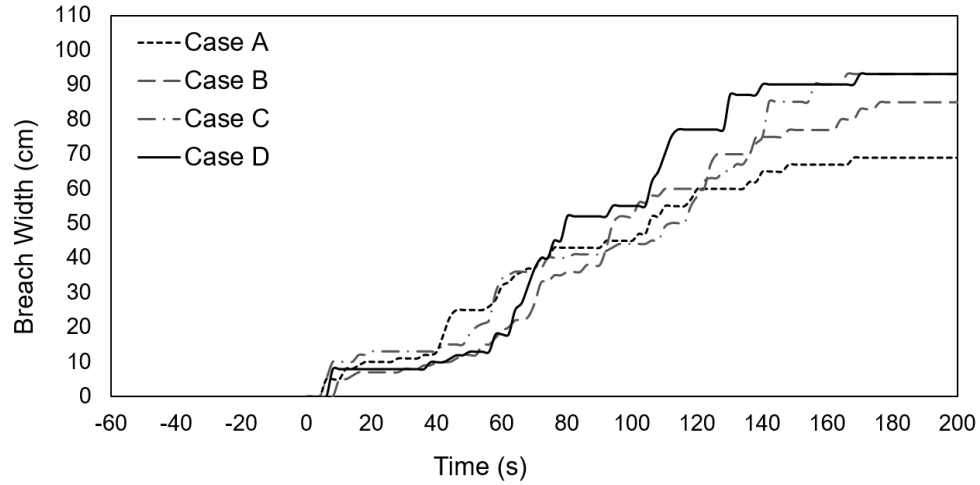
그림 2.2.33 다짐도별 최대 파괴 유량 산정 결과

제방 붕괴 폭은 월류 붕괴 영상에서 제방 마루와 제내지 사면의 5 cm ×5 cm 그리드를 이용하여 추정하였다. 월류 붕괴 영상을 2초 간격으로 분할하고, 분할 이미지를 정사영상으로 변환하여 분석하였다. 붕괴 폭은 제방 마루(crest)와 비탈면 끝단(toe), 마루와 비탈면 끝단의 중간 측선까지 3개의 측선에서 월류가 시작되는 시점(0초)을 기준으로 측선별 2초 간격의 붕괴 폭을 산정하였다. 제방 마루에서의 붕괴 폭은 0초부터 50초까지는 변화의 추이가 비슷하게 나타났다. 1분 경과한 시점부터 붕괴 폭의 증가량은 다짐도에 따라 차이가 나타났고, 하안 침식으로 인해 붕괴 폭이 급격하게 증가하는 경향이 나타났다(그림 2.2.34). 또한 다짐도에 따라 최대 붕괴 폭의 차이가 나타났으며, Case A와 B는 월류로 인한 파괴가 시작되면서 서서히 붕괴 폭이 증가하다 각각 110초, 140초에 매우 급격하게 증가하여 최대 77 cm까지 파괴되었다. 이러한 붕괴 폭의 급격한 증가는 하안 침식으로 인한 것이다. Case C의 마루 측선 최종 파괴 폭은 88 cm이고, Case D는 마루 폭 전체가 파괴되었다.

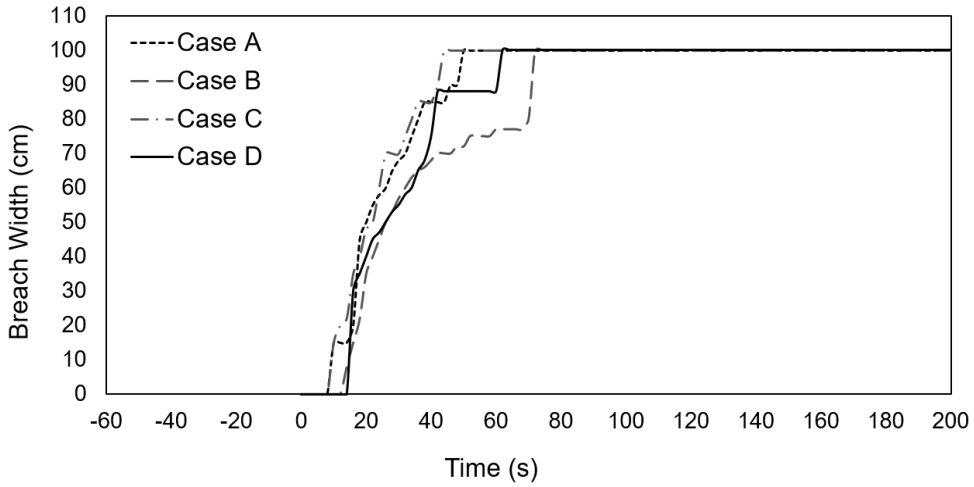
비탈면 중간 측선의 붕괴 폭은 다짐도에 따라 차이가 있었지만 증가하는 추세는 비슷하게 나타났다. 중간 측선의 최종 붕괴 폭은 Case A와 C 각각 69 cm, 85 cm이고, Case B와 D는 93 cm로 산정되었다. 비탈면 toe 측선의 붕괴 폭은 초기에 급격하게 증가하고, 다른 측선에 비해 빠른 시점에 폭 전체가 파괴되었다. 이러한 결과를 통해 제방이 파괴되기 시작하면 가장 취약한 곳이 toe 부분인 것을 확인할 수 있었다. 대부분의 측선에서 월류 초기에는 월류수를 동반한 침식만 발생하여 붕괴 폭의 큰 변화는 없었다. 월류수로 인한 침식량이 증가하면서 미끄러지는 토사로 인해 비탈면 끝단(toe)의 붕괴 폭은 급격하게 증가하였다. 제내지 toe의 전체 폭이 파괴된 이후 두부침식이 발생하면서 비탈면 중간 측선의 붕괴 폭이 증가하기 시작하였다. 중간 측선의 최종 붕괴 폭은 다짐도에 따라 명확하게 차이가 나타났다. 이는 다짐도로 인한 파괴 속도가 제내지 수위 상승 속도에 영향을 미치고, 제내지 수위 상승에 따른 도수 발생 시점의 간격 차가 발생하여 다짐도가 높은 경우 최종 붕괴 폭이 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 제내지 하단부가 대부분 파괴되고 월류 파괴가 진행됨에 따라 제방 마루에서 하안침식이 발생하면서 붕괴 폭은 증가하기 시작한다. 다짐도에 따라 마루에서 발생하는 하안침식의 정도가 상이하며, 이는 마루 측선의 최대 붕괴 폭으로 확인할 수 있다. 또한, 제방 마루 붕괴 폭은 유속장 분석 결과에서 관찰된 바와 같이 파일럿 채널 부근 좌안과 우안의 사수역 흐름이 확장되면서 증가하였다.



(a) 제방 마루(crest) 측선



(b) 비탈면 중간 측선



(c) 비탈면 끝단(toe) 측선

그림 2.2.34 제내지 비탈면의 측선별 붕괴 폭 산정 결과

3. UAV 부착용 이미지 센싱 인터페이스 장치 개발

가. UAV 부착용 이미지 센싱 인터페이스 설계

(1) UAV 제원

본 연구에서 활용한 UAV는 Aibotix X6 V2이며, 회전익 무인항공기 짐벌(Gimbal)에 비행 목적에 따라 일반 카메라부터 분광센서, 열화상카메라 등을 탑재하여 비행할 수 있다. Aibotix X6 V2는 6축 회전익 드론으로써 비행 중에 외부충돌 방지를 위한 Outer guard를 탑재하여 비행이 안정적이고 Google Map 기반의 경로 설명 및 자동비행이 가능한 특징이 있다. 또한, 2축 짐벌이 장착되어 있으며 비행 가능한 적재하중은 최대 3.0 kg이고, GPS 수신 및 수동을 무선으로 제어하면서 빠르고 정확하게 영상을 획득할 수 있다. 앞서 설명한 Aibotix X6 V2는 리모트 컨트롤을 이용하여 자동 비행 및 이착륙을 통해 매핑 및 지형 분석, 3D 모델링 데이터 획득 등 다양한 목적으로 활용이 가능하다. UAV의 사양 및 기능은 그림 2.3.1과 같다.



- 6축 회전익 UAV(드론)
- 최대 3.0 kg 적재하중(payload)
- 외부충돌 방지를 위한 Outer guard
- 간편 조종과 기동성의 멀티콥터
- GPS 수신 및 수동제어
- 자동 이착륙과 원 버튼 복귀기능
- Google Map 기반의 경로 설정 및 자동비행
- 최소 허용 고도 설정
- 공중 정지 비행
- 2축 짐벌로 다양한 센서 탑재 지원(DSLR, Mirrorless, Movie)
- 지리부호화

그림 2.3.1 UAV(Aibotix X6 V2) 사양 및 기능(사진출처-http://www.ua-sp.com/aibotix)

(2) 짐벌(Gimbal)의 2축과 3축 원리

UAV는 무게 중심을 기준으로 3개의 직각 축(X, Y, Z)에 의한 회전 운동을 하며, 움직임을 제어하는 방식은 다음과 같다.

- ○ 롤(Roll) : 비행 물체의 좌·우 움직임을 제어
- ○ 피치(Pitch) : 비행 물체의 상·하 움직임을 제어
- ○ 요(Yaw) : 비행 물체의 회전 움직임을 제어

2축 짐벌의 원리는 그림 2.3.2와 같이 2개의 회전축(또는 2개의 모터)으로 구성되어 있으며, 2축 짐벌은 요(Yaw)축에 대한 회전축이 존재하지 않는다. 따라서, 회전으로 움직이는 흔들림에 대한 보정을 할 수 없는 짐벌이다. 대신 1개의 회전축이 빠지기 때문에 무게와 부피가 줄어들어 휴대성이 극대화되어 있다.

3축 짐벌은 그림 2.3.3에 나타난 바와 같이 UAV가 비행 중 수평을 유지하려면 세 가지 축의 회전이 없어야 하므로 세 가지 축에 대한 모션을 보정하여 영상의 떨림을 잡아준다. 따라서, 3축 짐벌의 회전축은 요(Yaw), 피치(Pitch), 롤(Roll)의 3개의 축의 흔들림으로부터 제어(보정)한다.

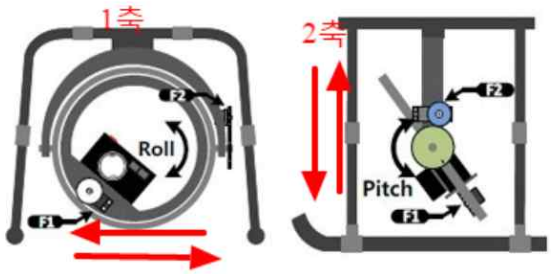


그림 2.3.2 2축 짐벌의 원리(사진출처-http://bbiribbari.blogspot.com)

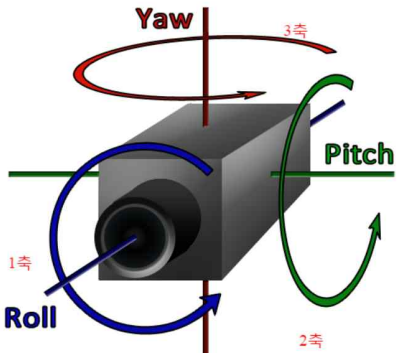


그림 2.3.3 3축 짐벌의 원리(사진출처-http://bbiribbari.blogspot.com)

(3) Aibotix X6 V2 2축 짐벌의 한계성 및 애로사항

Aibotix X6 V2는 2축 짐벌로 좌우, 상하로만 흔들림 보정을 한다. 3축 짐벌은 좌우, 상하, 회전까지 제어함으로써 흔들림으로 인한 영향이 2축보다 적다. 최근 영상촬영을 위한 드론에 범용적으로 적용되는 짐벌은 3축이며, 현재 보유한 UAV에 초분광센서를 장착하여 촬영한 경우 흔들림이 많이 발생하여 3축 적용을 통한 안정적인 고품질 영상 자료 획득이 필요하다.

현재 보유한 UAV에 장착된 짐벌은 탈부착 및 초분광센서 중심축 위치 밸런스를 제어하는 장치에 문제점을 보이고 있다. 장비 활용 초기에는 짐벌 문제로 인해 촬영 영상의 품질이 매우 떨어진다. 하지만, 3축에 대한 고려가 되지 않고 수직방향으로만 고정하여 촬영하도록 밸런스를 조정하였으며, 이 단계까지 많은 시간이 소요되었다. 본 연구의 목적에 맞추어 다양한 각도를 설정할 수 있는 3축 짐벌을 활용한다면, 촬영 대상(예: 식생 등)에 대한 보다 정확하고 신뢰할 수 있는 데이터 획득이

가능할 것으로 예상된다.

(4) 부착용 인터페이스 설계안

기본적으로 3축 짐벌은 탑재체인 초분광 카메라의 중량과 크기 및 형상에 따라 달라지며 이를 통해 각 축의 관성 모멘트를 계산한다. 동작하는 부분은 크게 3개로 나누어지는데 Roll운동을 표현하는 1축(Inner Gimbal) 부분과 Pitch 운동을 표현하는 2축(Middle Gimbal), 그리고 Yaw 운동을 표현하는 3축(Outer Gimbal) 부분으로 나누어 설계안을 구성하였다. 또한 설계 후 제작에 있어서 위험성 및 비용의 절감을 위해 각 부품의 설계 및 조립이 각각 가능하도록 하였다.

1축판의 경우 탑재체의 1.5배로 설계를 진행하고 있으며 Pitch 운동을 표현하는 2축 운동판은 1축(Roll)의 가이드 역할과 동시에 3축(Yaw)과 연결 역할을 하도록 하였다. 또한 모터, 인터페이스 보드 등에 대한 설계를 진행 중이며 모터에 전원을 공급하기 위한 전원선 및 데이터선의 통로 위치 등에 대한 설계안이 추가로 필요하다. 그림 2.3.4는 설계을 위한 기본도면을 나타내고 있다.

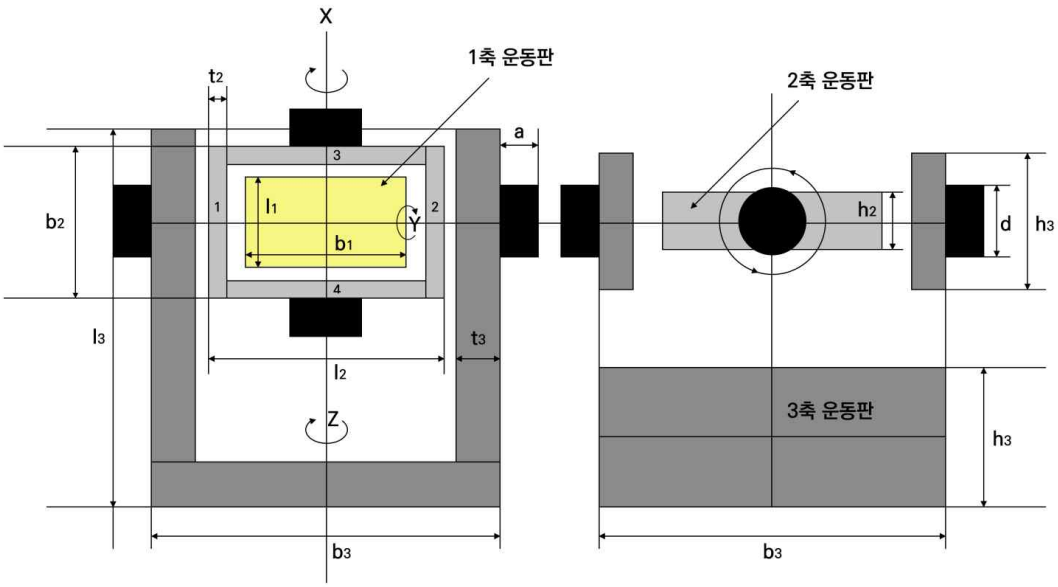


그림 2.3.4 부착용 인터페이스 3축 짐벌 설계(안)

나. 인터페이스 시제품 개발 및 시험적용

UAV 기반의 초분광 영상촬영 시 기존 2축 짐벌은 바람 등 기상조건의 영향을 받기 때문에 정확한 촬영이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 정확한 ORS 영상정보 획득을 위해 UAV 부착용 3축 짐벌을 제작하였다. 기존 2축 짐벌의 경우 2개의 회전축(또는 2개의 모터)이 있기 때문에 회전으로 움직이는 흔들림에 대한 보정을 할 수 없는 짐벌이며 대신 1개의 회전축이 빠지기 때문에 무게와 부피가 줄어들어 '휴대성'이 극대화된다. 3축 짐벌은 3개의 축(Pitch, Roll, Yaw)을 중심으로 회전하며 수평을 맞추므로 구성 축에 따라 짐벌의 앞뒤, 좌우, 상하 등 움직임의 반대로 움직이며 흔들림을 보정할 수 있다. 구체적인 치수 검토 및 설계안에 대한 검증을 위해 전문 업체(주식회사 헬리캠 : www.helicam.co.kr)와 제작 및 개선 사항에 대해 협의 후 시제품을 제작하였다. 시제품은 카본(carbon)으로 제작하였다. 그림 2.3.5는 UAV 부착용 3축 짐벌의 설계도면이며, 그림 2.3.6은 초분광 영상촬영을 위한 UAV 부착용 3축 짐벌 시스템을 나타낸다.

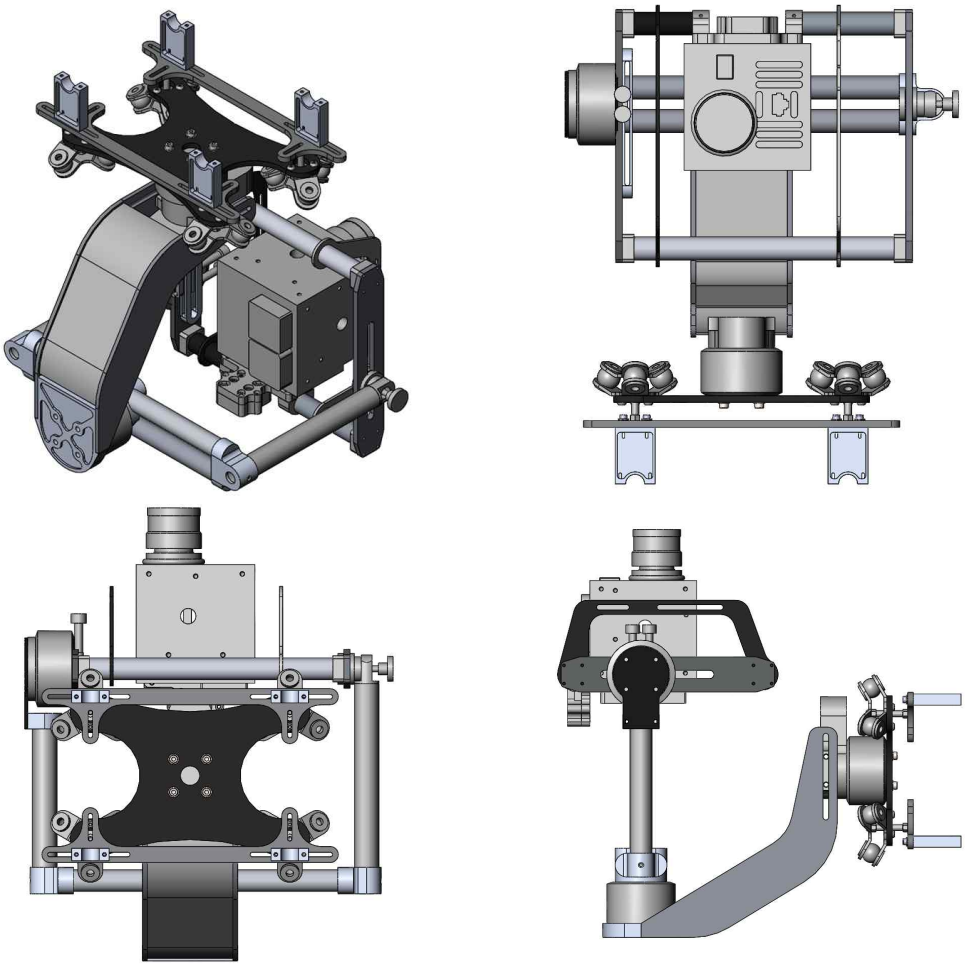


그림 2.3.5 UAV 부착용 3축 짐벌 설계도면



그림 2.3.6 초분광 영상촬영을 위한 UAV 부착용 짐벌시스템



그림 2.3.6 초분광 영상촬영을 위한 UAV 부착용 짐벌시스템(계속)

다. 실규모 및 현장적용을 통한 인터페이스 장치 검증

(1) 이미지 센싱 인터페이스 장치(3축 짐벌)의 기능

이미지 센싱 인터페이스 장치는 3축은 모든 방향으로 흔들림을 보정할 수 있기 때문에 채택되었으며, 가로축(Pitch), 세로축(Roll), 수직축(Yaw) 3가지 축을 중심으로 회전하며 수평을 맞춘다. 구성 축에 따라 짐벌의 앞뒤, 좌우, 상하 등 움직임의 반대로 움직이며 흔들림을 보정한다. 표 2.3.1은 3축 짐벌의 주요기능을 나타낸 것이며, 초분광 카메라 무게에 따른 3축 짐벌의 모터의 힘과 제어값을 최적화하였다. 또한 미세 제어값 수정이 가능하며, 외부전원을 사용하여 조종이 가능하도록 하였다.

표 2.3.1 3축 짐벌의 주요기능

항목	주요기능
크기	240(W)mm × 250(L)mm × 300(D)mm
조작방식	3가지 축 중심 회전 제어
구성	재질 (외관)듀랄루민 도금처리, (진동판) 카본 플레이트
특이 사항	- 초분광 카메라 무게에 따른 3축 짐벌 모터의 힘과 제어값 최적화 - 외부전원을 사용가능 방식 - 미세 제어값 조종 및 수정 방식

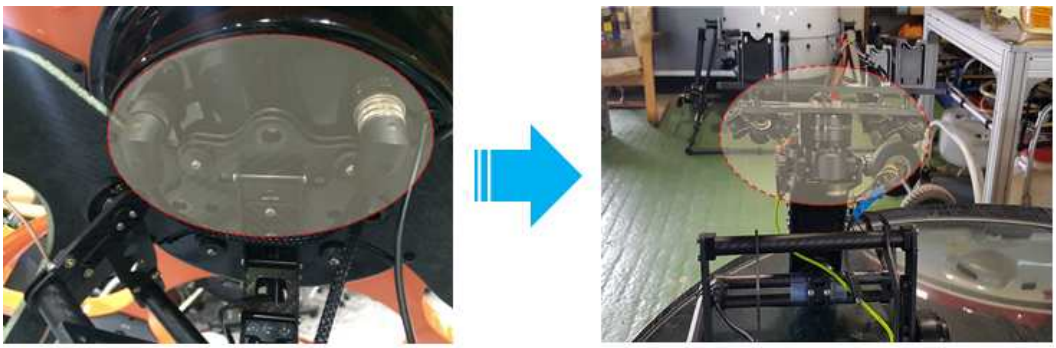


그림 2.3.7 초분광센서 중심축 위치 밸런스 제어

(2) 시험운영 대상지

포항시 소재의 용연저수지에 대한 시험운영 대상지로 선정하였다. 그림 2.3.8은 용연저수지 제방 취약구간에 대한 항공사진 자료를 나타낸 것이다. 용연저수지는 흥해읍-신광면을 연결하는 도로의 확장공사가 완료된 상태이며, 제방 비탈면이 침식 및 균열 구간이 발생하였다.

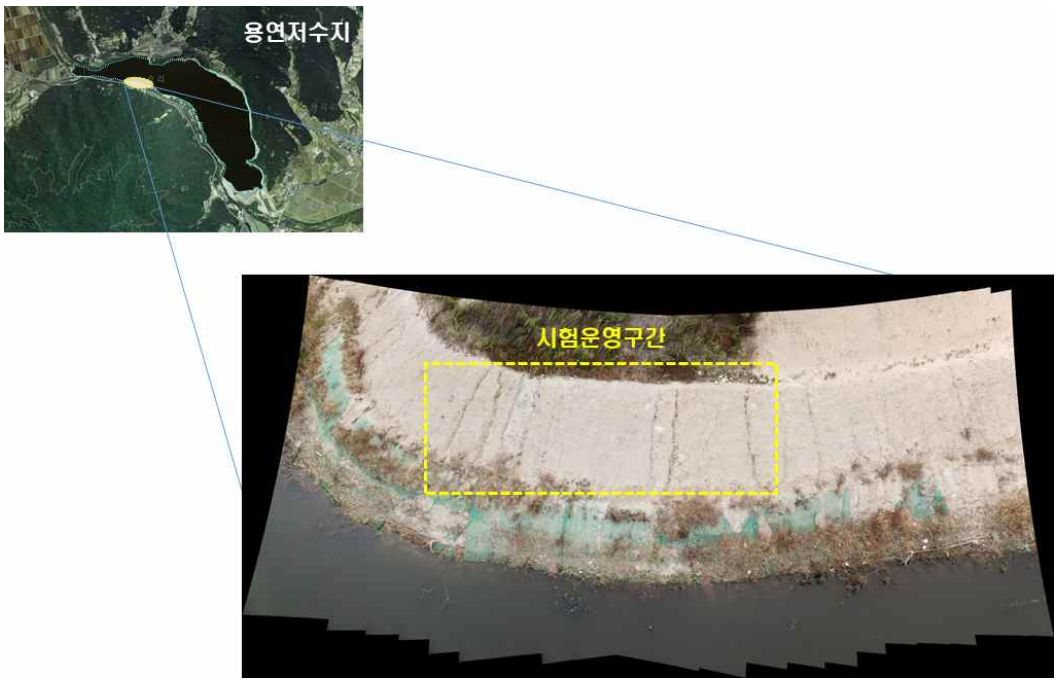


그림 2.3.8 시험운영 대상지(용연저수지)

(3) UAV기반 초분광 영상 촬영(3축 짐벌)

UAV기반 초분광 영상을 촬영하기 위해 무인비행체(Aibotix_Aibot X6 V2), 초분광카메라(Headwall_Nano- Hyperspec), 3축 짐벌, 노트북(설정 및 촬영 소프트웨어 설치 : HyperSpec Ⅲ), 표준백색판(White Reference) 등을 준비하였다. 촬영에 앞서 초분광 센서의 정확한 데이터 취득을 위한 설정값, 촬영 환경조건, 비행경로 고도 및 속도를 지정한 후 촬영 진행하였다. 시험운영 대상지에 대한 제방 취약구간을 0.026 m 공간해상도의 270개 밴드(400~ 1000 nm) 초분광 영상 획득하였다.



(a) 2축 짐벌을 이용한 초분광 영상자료



(b) 3축 짐벌을 이용한 초분광 영상자료

그림 2.3.9 2축 짐벌 및 3축 짐벌을 이용한 초분광 영상자료 비교(하천연구센터)

(4) 인터페이스 장치 성능 검증

기존 2축 짐벌의 경우 2개의 회전축(또는 2개의 모터)이 있기 때문에 회전으로 움직이는 흔들림에 대한 보정을 할 수 없는 짐벌이다. 개발된 3축 짐벌은 3개의 축(Pitch, Roll, Yaw)을 중심으로 회전하며 수평을 맞추므로 구성 축에 따라 짐벌의 앞뒤, 좌우, 상하 등 움직임의 반대로 움직이며 흔들림을 보정할 수 있다. 또한 3축 짐벌은 동작 온도 범위 -30~60℃, 짐벌 컨트롤 각 해상도 ±0.01°, 짐벌 축 회전 속도 ±180°/s, 습도 80% 이하, 고도 1000 m 이하에서 운영이 가능하며, 표 2.3.2는 3축 짐벌의 정량적 항목을 나타낸 것이다.

표 2.3.2 3축 짐벌의 정량적 항목

평가 항목 (주요성능 Spec)	단위	2축 짐벌	3축 짐벌	검증 방법
1. 동작 온도 범위	℃	없음	-30~60	성능시험 결과
2. 짐벌 컨트롤 각 해상도	°(도)	없음	±0.01	
3. 짐벌 축 회전 속도	°/s	없음	±180	
4. 짐벌 탐재중량(kg)	kg	3	3	
5. 습도(%)	%(상대습도)	-	80이하	
6. 고도(m)	m	-	1000	
7. 회전축 개수	개	2	3	

(5) 인터페이스 장치 현장검증

짐벌 개선에 따른 인터페이스 장치의 현장검증을 실시하였다. 흔들림 없는 고해상도 초분광 영상자료를 취득하였으며, 이를 기반으로 제방 모니터링 적용 여부를 판단하였다. 현장검증은 2017년 지진이 발생한 포항지역 저수지 제방을 대상으로 하였으며 드론은 Aibot X6, 초분광 센서는 Nano-Hyperspec을 활용하였다. 저수지 제방의 경우 제방 균열 뿐만 아니라 걸리침식의 확장으로 인한 다양한 균열이 발생한 상태이며 절개사면의 형태를 보이고 있다. GCP측량 후 균열 정보를 획득하였으며 분석결과 균열에 대한 구분이 가능한 것으로 나타났다(그림 2.3.10).

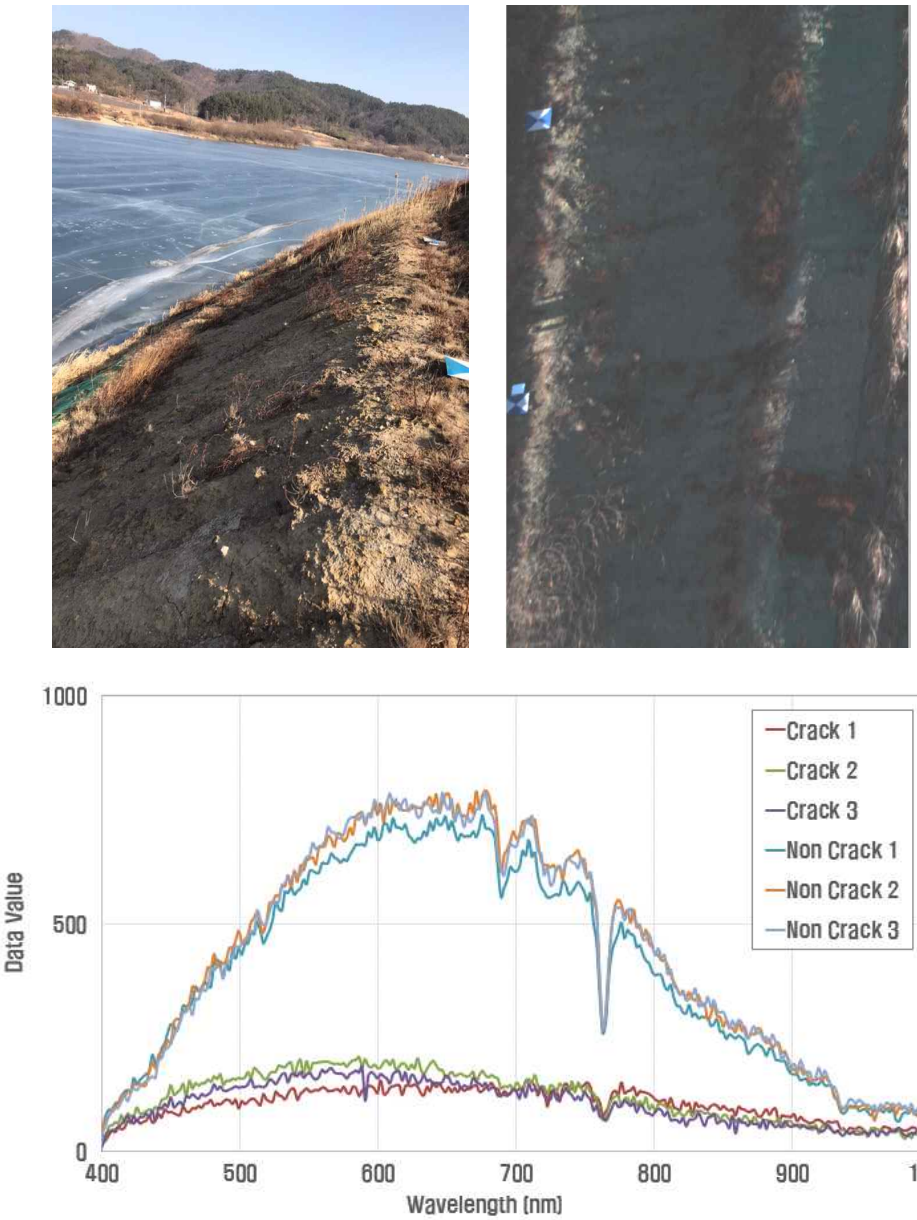


그림 2.3.10 저수지 제방 및 초분광 영상촬영 결과

4. ORS 모니터링을 통한 제방 안전 진단 플랫폼 구축

가. 제방 안정성 취약 구간 탐지 인덱스 조사

(1) 제방 안정성 취약 항목

제방 안정성 취약 항목을 조사하기 위해 다음과 같이 국내 제방 관련 자료를 조사하였다. 본 연구에서의 제방 안정성 취약 항목은 제체의 안정성에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 항목을 고려하였다. 한국건설기술연구원(2004)의 하천제방 관련 선진기술 개발보고서에서는 월류, 세굴, 제체 불안정, 구조물에 대해 파괴 유형의 원인을 분석하였다. 국토해양부(2012)의 하천유지·보수 매뉴얼에서는 토사와 구조물로 구분하여 월류, 세굴, 침하, 구조물 파손 등 제방의 안정성 점검하였으며, 국토해양부(2012) 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침해설서(제방)에서는 표준제와 특수제로 구분하여 침하, 활동, 세굴, 파손, 균열 등 시설별 상태변화의 평가항목에 대해 점검하였다. 제방 안정성 취약을 판단할 수 있는 항목은 표 2.4.1과 같다.

표 2.4.1 제방 안정성 취약 항목

구분	항목	내용
1	월류	· 계획홍수위와 제방고와의 차이(여유고) 확인 · 수리단면의 부족 확인 · 교량, 토석류, 유목 등에 의한 통수단면적 감소 확인
2	활동	· 둑마루의 종방향 균열 및 비탈면 층분리 현상 확인
3	세굴 및 침식	· 하안침식현황, 교량, 낙차공 등 구조물 접속부 및 하상의 국부세굴, 만곡부의 세굴 및 침식 파악 · 하천의 급경사, 급격한 만곡부 확인 · 상류의 하폭보다 하류의 하폭이 협소해지는 하천 구간 확인
4	훼손	· 제내·외측 인위적 굴착 현황 등 확인 · 시공 중이거나 최근에 완공된 제방 안정되지 않은 상태 확인
5	누수	· 뒷비탈면 국부세굴 및 파이핑 현상, 제방 횡단구조물 주변누수 확인
6	침하	· 주변보다 낮아진 제방부위 확인(부등침하로 인한 붕괴, 단차 등)
7	동물서식구멍	· 두더지, 들쥐 등의 동물서식구멍 확인
8	토양	· 제방의 축제성토의 재료가 모래와 모래 섞인 자갈 등인지 확인
9	수목식생	· 수목으로 인해 제체손상 및 유수소통지장 여부 확인
10	제체 표준 단면적	· 제방 폭이 기준보다 좁거나 법면경사가 급한지 확인
11	직립구조물 침하	· 주변보다 낮아진 제방 및 직립구조물 부위 확인, 계획홍수위와 제방고와의 차이(여유고) 확인
12	기울어짐/전도	· 직립구조물의 기울어짐 및 전도의 위험성 확인
13	기초부 세굴	· 구조물의 파손상태 확인
14	구조물 파손	· 옹벽기초부의 하상세굴상태 확인

(가) 월류

제방고와 계획홍수위에 의한 여유고를 고려하여 제방의 월류 가능성을 검토한다. 월류 제방은 제방의 침식, 세굴 등을 조사한다. 유로 만곡부는 수위 상승이 우려되는 지점이므로 특히 세심히 점검한다. 또한 교량, 토석류, 유목 등에 의한 통수단면적 감소가 예상되는 구간을 점검한다.

(나) 활동

제방 비탈면의 활동은 그림 2.4.1에 나타난 바와 같이 비탈면의 경사가 가파른 경우에 따라 발생하며, 특히 제방은 홍수 시 제체 함수비가 급격히 높아짐에 따라 안전율이 크게 저하된다. 제방활동에 대한 검토는 시설기준에서 정한 제방의 비탈경사보다 급한 제방은 모두 조사 및 검토의 대상이 되어야 한다.

(다) 세굴 및 침식

세굴은 하도전반적인 곳에서 발생되나 특히 제방의 안전과 직결되는 세굴은 호안의 기초부, 제방 비탈 끝단에서의 세굴이다. 통문이나 통관 주변에서의 세굴도 제체파괴를 일으킬 수도 있다. 고수부지 및 저수부 끝단에서의 세굴이 제방에 직접적으로 주는 영향은 적으나, 이 부분의 세굴이 계속 진행되어 제방 비탈면 끝까지 다다를 경우도 있으므로, 고수부지 폭이 좁은 곳에서는 고수부지의 세굴 정도도 조사되어야 한다. 다음과 같은 상황에 대하여는 보다 면밀히 현장조사를 하여야 함과 아울러 제체 및 기초지반에 대하여 토질조사를 시행하는 것이 바람직하다. 특히, 통문 및 통관이 있는 곳, 구하도의 체절부, 과거의 파괴 개소, 제체의 폭이 주변에 비하여 좁은 곳, 제내의 지반이 낮은 곳, 두더지 및 들쥐 등이 서식하기 쉬운 쓰레기장 등을 조사를 실시해야 한다.



그림 2.4.1 제방 활동 파괴의 예(국토해양부, 2012)



그림 2.4.2 하상보호사석 세굴로 기초구조물 노출의 예(국토해양부, 2012)

(라) 훼손

제내·외측 인위적 굴착 현황 등 확인한다. 또한 시공 중이거나 최근에 완공된 제방 안정되지 않은 상태 확인한다.

(마) 누수

누수는 제방파괴의 가장 큰 요소 중의 하나이다. 그림 2.4.3은 수문 접합부 누수로 인한 제방 붕괴 사례이며, 제방의 누수는 제체단면(둑마루폭, 제체저폭)의 부족한 경우 제체부와 제방을 관통하는 통문, 통관 등의 주변부에서 주로 발생한다. 제방에서의 누수는 하천에 어느 정도 이상의 홍수위가 유지되고 홍수의 지속시간이 일정시간 이상 유지될 경우에만 발생이 되므로 평상시의 누수를 확인하기는 매우 어렵다. 제체의 누수는 현장조사를 충분히 하여야 한다.



그림 2.4.3 수문 접합부 누수로 인한 제방 붕괴의 예(국토해양부, 2012)

(바) 침하

제방의 침하는 제방높이를 낮춰 홍수의 제방 월류를 초래하는 원인이 된다. 제방에서의 침하는 기초지반이 연약한 경우나 제체시공 시 충분한 다짐이 이루어지지 않을 경우에 발생이 되며, 이러한 침하는 대부분 준공 즉시 단기간 내에 침하가 종료되며, 오랜 기간이 경과된 제방에서는 더 이상의 침하현상은 없다. 침하에 대한 조사는 제방종단측량을 시행하여 조사하여야 하나, 종단측량의 목적은 제방의 침하량 확인보다는 계획홍수위와 제방고와의 관계를 검토하여 홍수의 제방 월류에 대한 안전도를 확인한다.



그림 2.4.4 제체 마루 침하의 예(국토해양부, 2012)

(사) 동물서식구멍

두더지, 들쥐 등 야생동물의 구멍은 누수 파괴의 원인되므로 세심한 조사를 해야하며, 점검 시 상태평가기준은 다음과 같다.

· 양호 : 비탈면에 동물의 서식구멍 직경이 0~1 cm 이하, 개수 0~1개
· 보통 : 비탈면에 동물의 서식구멍 직경이 1~5 cm, 개수 2~4개
· 불량 : 비탈면에 동물의 서식구멍 직경이 5 cm 이상, 개수 5개 이상

(아) 토양

제방의 축제성토의 재료가 모래와 모래 섞인 자갈 등인지 확인하고 실내 실험 등을 통해 입도, 소성지수 등을 검토한다.

(자) 수목식생

수목으로 인해 제체손상 및 유수소통지장 여부 확인해야하며, 점검 시 상태평가기준은 다음과 같다.

· 양호 : 수목식생이 거의 없는 상태
· 보통 : 수문이 식생하고 있으나, 유수와 접하는 계획홍수위 이하에서는 문제가 될 식생이 없는 상태
· 불량 : 유수와 접하는 계획홍수위 이하에서 문제가 될 수목이 식생하고 있고, 일부는 유실되어 제체에 손상을 유발시킨 상태

(차) 제체 표준 단면적

제방 폭이 기준보다 좁거나 법면경사가 급한지 확인한다.

(카) 직립구조물 침하

주변보다 낮아진 제방 및 직립구조물 부위 확인하거나 계획홍수위와 제방고와의 차이(여유고) 확인한다. 점검 시 상태평가기준은 다음과 같다.

· 양호 : 경미한 침하가 있으나 구조물 표고가 설계 시 표고 이상을 확보하고 있는 상태
· 보통 : 구조물 표고는 계획홍수위 이상을 확보하나 침하로 인해 구조물에 경미한 균열, 시공이음부 이격 등의 손상이 발생한 상태
· 불량 : 구조물 표고가 계획홍수위 이하로 침하되고, 구조물에 다소 폭이 균열, 시공이음부 이격 등의 손상이 발생한 상태

(타) 기울어짐/전도

직립구조물의 기울어짐 및 전도의 위험성 확인한다.

· 양호 : 최대기울기범위(0~2%)로서 부분적으로 경미한 기울어짐/전도가 발생한 상태이나 근본적인 보수는 필요가 없는 상태
· 보통 : 최대기울기범위(2~3%)로서 기울어짐/전도의 정도가 보통 정도이나 지속적인 관찰로 진행성을 감시할 필요가 있는 상태
· 불량 : 최대기울기범위(3% 이상)로서 기울어짐/전도의 정도가 심각하여 구조물의 구조적인 안정에 심각한 영향을 미칠 수 있는 상태

(파) 기초부 세굴

구조물의 파손상태 점검 시 상태평가기준은 다음과 같다.

· 양호 : 하상이 세굴되었으나 기초부는 노출되지 않은 상태
· 보통 : 하상세굴로 기초부가 노출되어 기초부 보호사석이 부분적으로 교란 또는 유실된 상태
· 불량 : 기초부 보호사석의 대부분이 유실되어 기초부 하단까지 하상이 세굴되어 구조물의 안전성에 영향을 미치는 상태

(하) 구조물 파손

옹벽기초부의 하상세굴상태 확인 및 점검 시 상태평가기준은 다음과 같다.

· 양호 : 경미한 손상이 있으나 보수는 필요하지 않는 상태
· 보통 : 국부적인 파손으로 보수를 필요로 하는 상태
· 불량 : 구조물 안전성에 영향이 있을 정도의 파손으로 긴급 보수·보강을 필요한 상태

(2) UAV를 이용하여 하천 제방 촬영

1차년도에 국내하천을 대상으로 UAV를 이용하여 제방을 촬영하였다. 대상하천은 청미천과 대청천이며, 청미천은 경기도 용인시 원삼면에서 발원하여 한강으로 합류하는 지방하천으로 길이 37.56 km, 유역면적 399.42 km^2이다. UAV를 이용하여 제방을 촬영한 지점은 경기도 여주시 점동면 사곡리 일대이다(그림 2.4.5).

대청천은 경상남도 김해시 대청동에서 발원하여 조만강으로 합류하는 지방하천으로 길이 5.5 km, 유역면적 23.11 km^2이다. 경상남도 김해시 무계동 일대를 UAV를 이용하여 촬영하였다(그림 2.4.6).



그림 2.4.5 청미천 촬영 구간

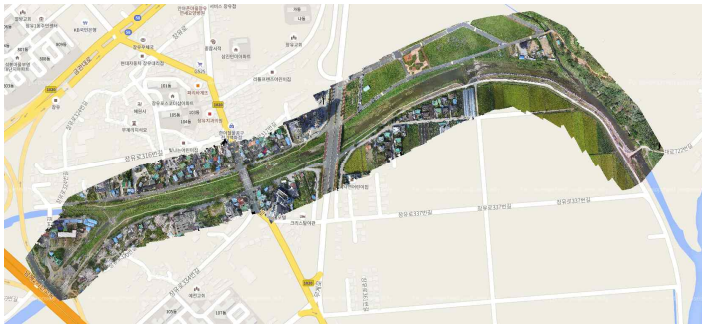


그림 2.4.6 대청천 촬영 구간

(3) 영상분석을 통해 제방 안정성 취약인자에 대한 조사 실시

촬영한 영상을 활용하여 그림 2.4.7과 그림 2.4.8와 같이 제방의 안정성 취약 인자에 대한(식생, 토양 등) 비율을 분석하였으며, 분석 결과 사면 내 식생과 토양의 비율이 대부분인 것으로 나타났다. 청미천의 경우 사면의 길이는 15 m 에서 20 m이며, 식생매트 활착 정도에 따라 비율이 다르게 나타났다. 구성 비율은 식생매트 44.31%, 식생 32.69%, 흙 23.0%로 분석되었다. 대청천의 경우 사면 하부에 옹벽 설치로 인해 사면 하부 침식은 적으나 사면 상부에는 걸리침식(gully erosion)이 다수 발생(토양인자에 따른 침식 발생)한 것으로 나타났으며, 구성 비율은 흙 49.71%, 돌옹벽 28.22%, 식생 22.07%로 분석되었다.



그림 2.4.7 청미천 제방사면 취약 인자 분석 결과



그림 2.4.8 대청천 제방사면 취약 인자 분석 결과

나. UAV를 활용한 제방 ORS 영상 획득 시스템 구축

(1) 영상 획득 시스템 구축

기존 제방 모니터링은 현장조사를 중심으로 수행되고 있으며, 제체의 손상형태를 조사하는 항목은 침식, 세굴, 박리 등 제체의 피복 상태와 연관성이 있다. 따라서, 원격탐사를 통해 획득한 영상의 제방 구성 요소 분석은 기존 방식에 비해 보다 효율적으로 제방의 안전 상태 모니터링을 위한 주요 자료로 활용할 수 있을 것이다. 또한, 드론 기반의 고해상도 영상 획득은 보다 세밀한 공간을 분석하기에 유리하며, 초분광 영상은 수백개의 연속적인 분광 파장대 영역임으로 상세하게 대상의 정보를 취득할 수 있다는 장점이 있어 제체 모니터링을 위한 활용성을 확대시킬 수 있다.

본 연구에서는 ORS 영상 획득 시스템 구축을 위해 초분광을 이용하여 대상구간에 대한 영상촬영을 우선 실시하였다. 영상 획득 시스템을 통해 구축된 분광지수 등을 적용한 제방 구성 요소 분석은 보다 객관적이고 안정적인 자료 획득을 가능하게 한다. 이를 위해 시험하천을 선정하여 초분광 영상을 획득하였으며, 현장조사 시 사면 안정성 취약 인자 중 토양과 식물에 대한 지수를 선정하여 시험적용을 실시하였다. 대상지는 약 10 m 폭의 수로로 제방부에 일부 침식으로 인한 손상이 존재하는 구간을 선정하였다. 영상 획득에 사용한 초분광 센서는 Nano-Hyperspec(Headwall)으로 Aibot X6 V2 드론(Aibotix)에 장착하였으며, 0.026 m 공간해상도의 270개 밴드(400~1000 nm) 초분광 영상을 획득하였다. 또한, 영상 전처리를 위해 방사보정 및 기하보정을 수행하였으며, 영상의 각 화소별 반사도 값을 산정하여 영상 분석이 활용하였다.

초분광 영상은 각 화소마다 자외선, 가시광선 및 적외선 파장에 대한 특정 명암값 정보를 가지고 있기 때문에 촬영 대상의 고유한 분광정보를 추출할 수 있어 기존의 RGB 영상 분석 기술의 한계를 극복하여 좀 더 많은 정보를 영상 내에서 판별하고 이를 정량화할 수 있다(그림 2.4.9).

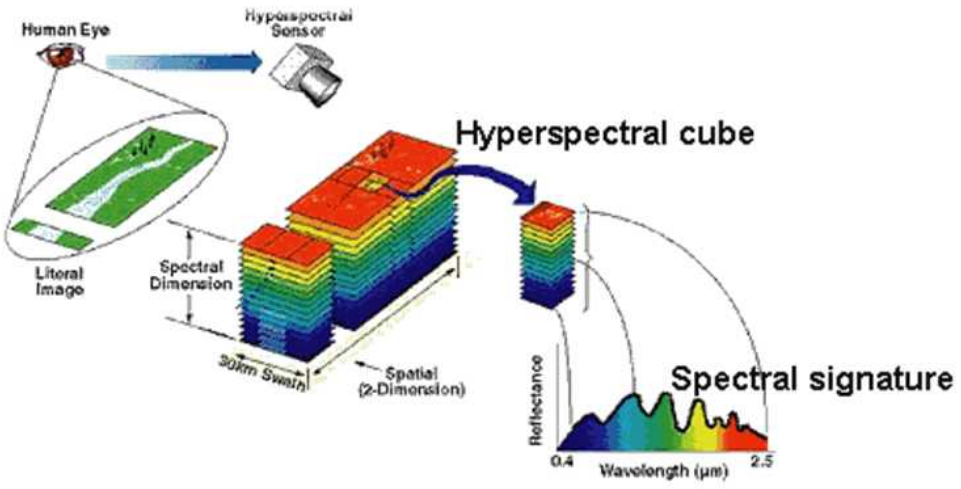


그림 2.4.9 초분광 영상의 자료 구조

또한 초분광 영상을 이용한 하천환경 조사는 짧은 시간동안 넓은 지역에 대한 상세한 자료를 획득할 수 있으며, 계측 시에 발생하는 위험성을 최소화 할 수 있어 기존의 원격탐사의 장점에 추가적으로 눈에 보이지 않는 자외선과 적외선 영역에 해당하는 빛의 세기를 이용하여 더 많은 하천환경 정보를 획득할 수 있다는 장점이 있다. 특히 하천 제방 조사를 위한 비용과 시간 및 인력을 획기적으로 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

초분광 영상은 일반적인 RGB 영역의 영상으로는 확인할 수 없는 즉, 사람의 눈으로는 볼 수 없는 특성인 자외선과 적외선 영역의 분광정보 특성을 활용하여 하천 제방 균열 여부를 분류할 수 있는 기술이며 기존의 RGB 영상으로 현장 상황 검토에 추가적으로 하천 제방 균열에 대한 판별 및 분포 측정까지 가능하다. 또한 하천 제방 조사가 정량적으로 가능하기 때문에 시간과 인력을 줄일 수 있으며 향후 하천시설물 평가를 위한 자료의 질적 및 양적 요구를 모두 만족시킬 수 있는 장점이 있다.

표 2.4.2 기존 모니터링 기법과 비교

구분	기존 모니터링기법 (현장조사 + RGB 영상 촬영기법)	새로운 모니터링기법 (초분광 영상 촬영기법)
기술성	· 육안검사 및 RGB 영상으로는 빨간, 녹색, 파란색으로 표시하며 검토자의 주관적인 기준에 의해 판별	· 각 화소마다 고유한 분광정보를 이용하여 판별이 가능
효율성	· 모니터링 수행 시간 및 인력 투입이 대비 정복 획득의 비효율성 존재	· 모니터링 지속 시간 및 인력 투입 관점에서 상대적인 효율성 증대
경제성	· 비용과 시간 및 인력 다수 필요	· 비용과 시간 및 인력 획기적 감소

또한 영상분석 프로그램인 ENVI(Harris Geospatial Solutions사의 ENVI 5.5 버전)를 활용하여 균열 여부에 대한 정량적인 분석이 가능하다. ENVI 프로그램의 기능은 색상, 명암, 필터링 등을 다룰 수 있는 라이브러리를 제공, multispectral 자료와 hyperspectral 자료의 분석 및 정보추출, 다양한 이미지와 벡터 형식 지원, 기존의 전형적인 이미지 처리 기본 작업 등이 가능하다. 그림 2.4.10은 UAV를 활용한 제방 ORS 영상 획득 시스템의 구성 및 과정을 나타낸다.

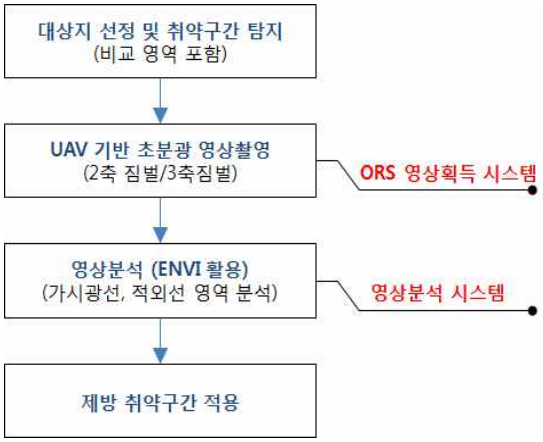


그림 2.4.10 UAV를 활용한 제방 ORS 영상 획득 시스템의 구성 및 취약구간 분석 과정

(2) 영상 획득 시스템 운영

(가) UAV를 활용한 초분광 영상의 하천공간특성 분류

최근 드론과 같은 소형 UAV를 활용하여 경제적인 비용으로 시공간해상도가 높은 영상을 획득하는 것이 가능하게 되었다. 더불어 분광정보를 수집하는 영상 장비의 발전으로 드론에 탑재가 가능한 경량의 소형 초분광센서가 개발됨으로써 보다 높은 분광해상도의 영상을 취득할 수 있게 되었다. 본 연구는 효율적인 하천환경조사를 위해 UAV를 활용하여 고해상도 초분광 영상을 취득하였으며, 차원축소법과 분류기준 적용에 따른 공간 분류 정확도 분석을 통해 초분광 영상의 획득 시스템을 구축하였다.

(나) 시스템 운영 방법

○ 연구대상지역

연구대상지역인 안동하천실험센터 시험구간은 우리나라 소하천에 존재하는 대표적인 하천환경요소들을 포함하고 있다. 영상 촬영 대상은 인공구조물, 식생, 하상재료 등 다양한 하천환경 인자로 구성되어 있으며, 일정한 수위가 유지되는 흐름이 있어 수역 및 비수역이 존재하는 구간을 선정하였다(그림 2.4.11).

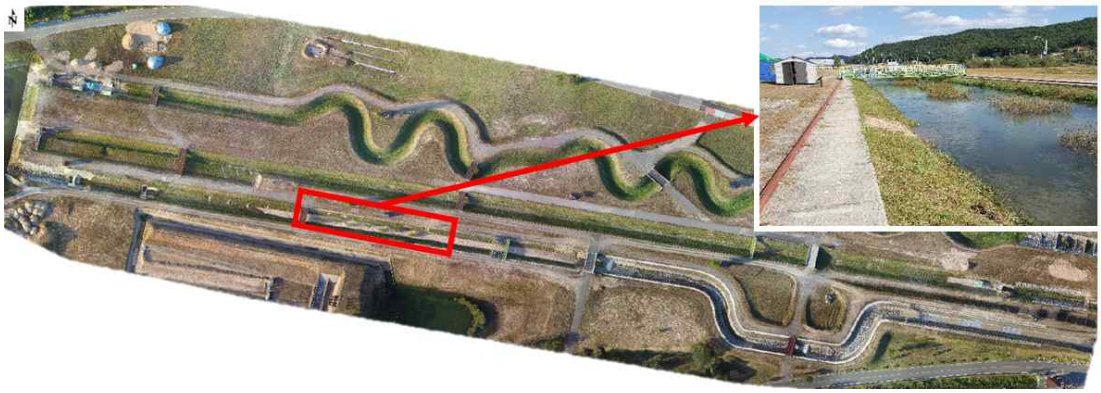


그림 2.4.11 연구대상지역(하천연구센터)

○ 영상획득

본 연구에서의 영상획득은 안정적인 드론 비행 조건을 위해 풍속이 낮은 시간에 촬영을 수행하였으며, 대상 구간은 하천 중심선을 따라 약 1,500 m^2의 면적에 해당하는 지역이다. 영상은 미국 Headwall에서 개발한 초소형 초분광센서 Nano-Hyperspec으로 촬영하였으며, 독일 Aibotix의 Aibot X6 V6 드론에 장착하였다(표 2.4.3).

표 2.4.3 드론과 센서의 제원

이미지	센서의 제원	
	파장 범위	400-1000 nm
	공간 밴드	640
	스펙트럼 밴드	270
	스캔 모드	Push-broom
	렌즈	17mm, FOV15.9°
	출력	16 bit

○ 영상전처리

영상이 지니고 있는 화소별 고유값을 분석에 활용하기 위해서는 방사보정 및 기하보정을 수행하여야 한다. 본 연구에서는 영상전처리를 위해 SpectralView(Headwall Photonics Inc., U.S.) 소프트웨어를 활용하였다. 기기적인 방사보정은 센서와 함께 제공되는 노출시간에 따른 복사보정 파일과 현장에서 수집한 Dark Reference 파일을 기반으로 원 영상을 각 화소별 복사휘도(Radiance) 값으로 변환하였다. 영상의 기하학적 왜곡은 센서에 부착되어 있는 GPS/IMU를 통해 촬영 시 획득한 자료를 통해 보정하였다.

본 연구에서는 하천공간특성에 따른 영상분류와 더불어 각 인자의 분광반사특성을 분석하고자 하

며 반사율은 현장에서 취득한 표준백색판(White Reference) 값을 기준으로 전체 영상의 각 화소별 반사도 값을 산정하는 방식을 적용하였다.

○ 차원축소

초분광 영상은 수백개의 밴드로 이루어져 있으므로 자료의 양이 방대하며, 인접한 밴드가 가지는 중복성과 불필요한 잡음을 포함하고 있다. 차원축소 기법은 이로 인해 발생하는 문제를 보완하기 위한 방법으로 초분광 자료의 손실을 최소화하면서 자료량을 줄이고, 특정 정보를 추출하기 위한 목적으로 사용한다.

원격탐사에서 대표적으로 사용되어 온 특징추출기법은 고차원의 데이터를 저차원의 데이터로 환원시키는 주성분분석(Principle Component Analysis, PCA)과 노이즈가 많은 초분광 자료에 더 적합하도록 보완된 최소잡음추출(Minimum Noise Fraction, MNF) 기법이 있다. PCA는 원 영상에 있는 대부분의 정보를 나타내는 변수들의 조합에 의해 주성분을 만드는 방법으로 초기 소수 주성분밴드로 원 영상 분산의 최대비율을 설명할 수 있다. 국내에서도 초분광 영상에 PCA기법을 적용한 연구가 이루어진바있다. MNF기법은 PCA를 보완한 방법으로 잡음 효과를 제거하여 고유 분산을 최대화 하는 방법이며, 초분광 영상에 적용하여 분류 정확도를 향상시키는데 보다 유용하게 사용된다.

○ 영상분류

초분광 자료를 활용한 영상분류는 공간을 정해진 등급으로 분류(Classification)하는 것을 넘어 특정 대상물을 탐지(Target Detection)하고 인식(Material Identification)하는 개념으로 확장되고 있다. 본 연구에서는 무감독 분류를 통해 고해상도의 초분광 영상을 활용하여 하천인자의 분광특성을 파악하고, 이를 기반으로 하천 공간을 보다 세밀하게 분석하였다.

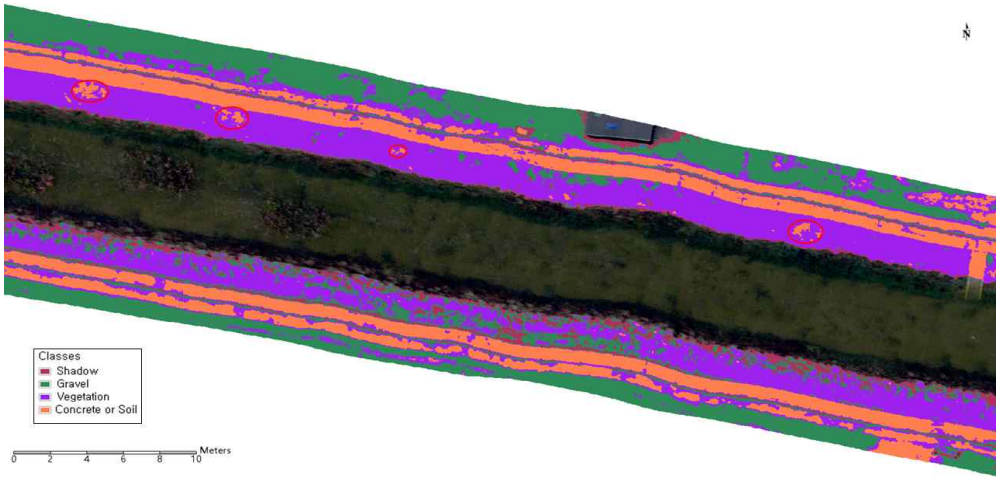
(3) 영상 분석 결과

(가) 무감독분류

무감독분류는 훈련자료 없이 유사한 분광정보를 지닌 대상을 분류하는 기법으로 ISODATA를 적용하여 제방 구성 요소를 분류할 수 있다. 이에 따라, 분류기법 적용 결과, 각 class는 대상 인자의 특성에 따라 특정 지었으며, 제방사면의 침식지역은 둑마루의 콘크리트와 동일 class로 분류된 것을 확인하였다. ISODATA 적용 분석 결과는 사면 침식부의 분류가 가능하지만, 무감독분류는 대상 객체의 종류 및 분포에 따라 다양한 결과가 나타나므로 모니터링에 활용하기 위해서는 정확도 평가가 필요한 것으로 판단된다.



(a) 초분광 영상 촬영 이미지 및 침식지역



(b) 제방부 ISODATA 무감독분류 결과

그림 2.4.12 무감독분류 분석 결과

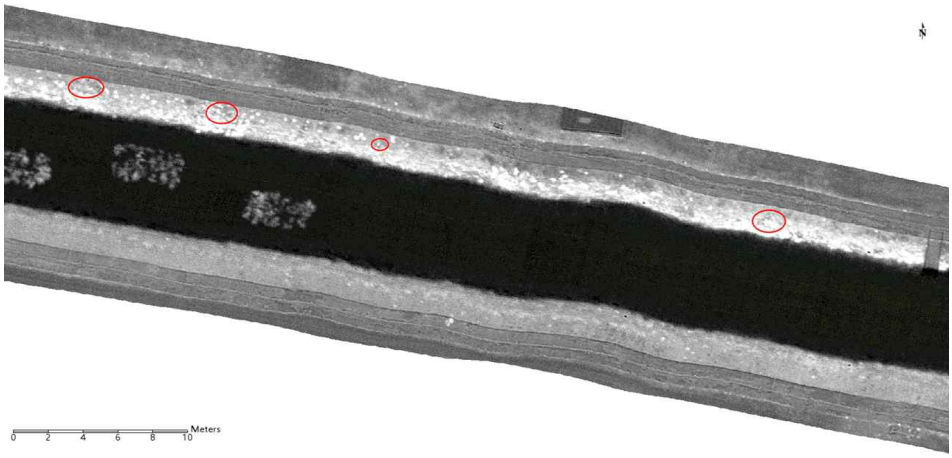
(나) 분광지수 분석

분광지수(spectral indices)는 2개 이상의 특정 밴드간의 조합을 통해 분석 대상의 상대적인 분포를 표현하는 지표이며, 촬영 시 환경 조건의 영향을 감소시켜 보다 안정적으로 대상 인자의 분류 및 탐지에 활용이 가능하다. 식물과 토양을 대상으로 사용되고 있는 분광지수 중 SAVI(Soil Adjusted Vegetation Index)와 SBI(Soil Brightness Index)를 시험적으로 적용하였다. SAVI 및 SBI 분광지수를 적용한 제방 구성 요소 분석은 보다 객관적이고 안정적인 자료 획득이 가능하며, 이와 같은 결과를 기반으로 제방의 불안정 요소 분석을 위한 활용이 가능하다.

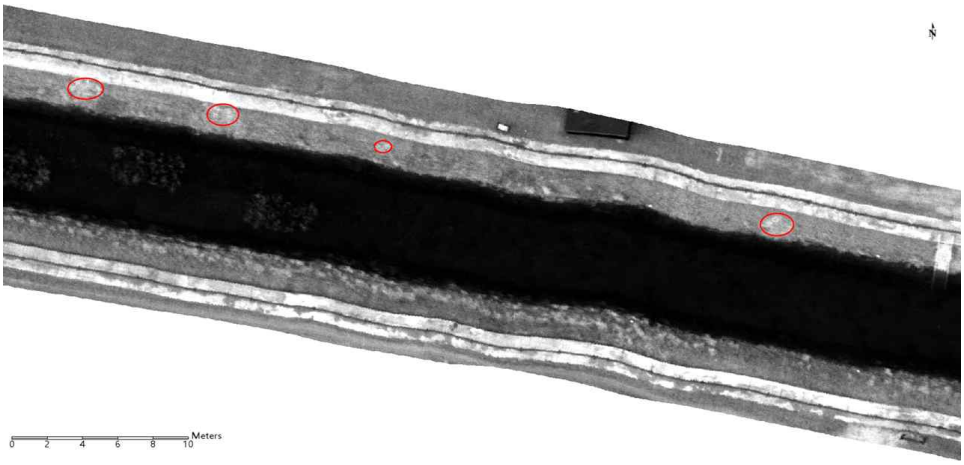
(4) 지진발생지역 대상(경주 및 포항) 시스템 시범 운영

(가) 지진발생지역 대상(경주 및 포항) 기존문헌자료 조사

○ 국토교통부 “도로·하천 피해 점검”



(a) 초분광 영상 촬영 이미지 및 침식지역



(b) 제방부 분광지수 분석

그림 2.4.13 분광지수 분석 결과

포항지진으로 국토교통부 중앙사고수습본부에서 자체 시설물(도로 : 3,724개소, 하천 : 1,101개소)을 점검하고 피해 시설 8개소(교량 6, 포장 1, 건물1)의 조치를 완료하였으며, 하천 제방에 대한 피해는 발생하지 않았다. 표 2.4.4는 포항지진 발생 시 피해시설물 복구 현황을 나타낸 것이다(행정안전부, 2018).

표 2.4.4 2017년도 포항지진발생에 따른 피해 시설물 복구 현황(행정안전부, 2018)

구분	시설물	조치 현황
1	포장(국도7호선 흥해)	· 2.6 km 중 2.6 km 균열보수 및 절산 재포장
2	곡강교(7호선)	· 교좌 장치 몰탈 보수, 빔보강
3	학림교(28호선)	· 교좌 장치 필랫 용접
4	성곡IC교(28호선)	· 교좌 장치 몰탈 보수
5	연화RAMPF교(31호선)	· 신축 이음 자재, 교좌 교체, 몰탈 보수
6	이인IC교(31호선)	· 교좌 장치 필랫 용접, 옹벽균열 보수
7	곡강천교(흥해우회)	· 교좌 장치 파손 구간 보수 방안 적정성 검토
8	포항국토사무소	· 청사 보수

○ 한국농어촌공사 “포항 소재 저수지 긴급점검 결과보고”

2017년 포항지진에 따른 제방 붕괴 등 저수지 사고 예방을 위해 포항시와 농어촌공사 합동점검반을 구성하여 280개소를 전수 조사를 실시하였다. 합동점검 결과 제방 균열 5개소의 저수지 피해를 확인되었다(그림 2.4.14). 표 2.4.5와 같이 포항 소재의 저수지 긴급점검결과를 나타낸 것이다. 회학저수지, 둔각저수지에선 전기비저항탐사를 실시하여 균열 발생 구간이 포화대가 아닌 습윤대로 나타나 누수가 없는 것을 확인하였고, 삼정저수지 및 지땡이저수지는 총 저수량 1만톤 미만 소형 저수지로 전기비저항탐사를 미실시하였다. 저수지 보수·보강 대책으로 회학, 둔각, 삼정, 지땡이, 소동저수지는 균열깊이까지 제방토사를 걷어내고 되메움 다짐이 이루어졌다(한국농어촌공사, 2017, 행정안전부, 2018).

표 2.4.5 2017년도 포항지진발생에 따른 저수지 점검결과(한국농어촌공사, 2017)

구분	저수지명	위치	점검결과
1	회학저수지	경북 포항시 청하면 청계리	· 제체(댐마루) : 제방 시점부(No.0+5~1+5) 종방향 균열(L=20m, b=1.0cm, h=15cm이상) 발생
2	둔각저수지	경북 포항시 흥해읍 덕장리	· 제체(댐마루) : 제방 No5+10 횡방향 균열(L=3m, b=5cm, h=20cm이상) 및 No17 종점부 횡방향 균열(L=5m, b=5cm, h=20cm이상) 발생 · 취수시설(복통) : 복통 주변부 토공과 콘크리트 접속부 이완 및 공동(L=2m, b=2cm, h=60cm이상) 발생
3	삼정저수지	경북 포항시 흥해읍 금장리	· 제체(댐마루) : 제방 중간부 종방향 균열(L=50m, b=1.5cm, h=15cm이상) 발생
4	지땡이저수지	경북 포항시 흥해읍 남송리	· 제체(댐마루) : 제방 No.2+6~4+14 종방향균열(L=56m, b=1.0cm, h=15cm이상) 발생
5	소동저수지	경북 포항시 청하면 소동리	· 제체(댐마루) : 제방 종방향 및 횡방향 균열 발생



(a) 둔각저수지



(b) 소동저수지

그림 2.4.14 저수지 제방 균열

○ 농업용 저수지 내진설계기준 설정 대상 확대

농림축산식품부는 농업용 저수지 내진설계기준 설정 대상 시설 확대를 건의하여 “지진·화산재해대책법 시행령”에 반영하였다(개정 2017년 12월 19일, 시행 2018년 6월 20일).

표 2.4.6 농업용 저수지 내진설계기준 설정 대상 확대

구분	전체	기존		개정		증감
		지진대책법	대상	지진대책법	대상	
농업용 저수지 (개소수)	17,313	총 저수용량 50만톤 이상이고, 제방 높이 15 m이상 저수지	648	총 저수용량 30만톤 이상 저수지	1,256	608

○ 최근 저수지 붕괴 및 문제발생 관련 언론기사

2013년부터 2019년까지 최근 인터넷 언론기사에 소개된 저수지 붕괴 및 문제발생 관련 내용을 조사하였다. 저수지 붕괴는 저수지 보수·보강 공사 중, 집중호우 발생시, 노후화 등으로 발생하였으며, 저수지 문제발생은 저수지 시설물(수문, 집수정 등)에서 물이 유출되면서 안전상에 문제가 발생하였다. 표 2.4.7은 총 10건의 저수지 붕괴 및 문제발생 현황을 나타낸 것이다.

표 2.4.7 2013년도~2019년도 저수지 붕괴 및 문제발생 현황

구분	저수지명	위치	붕괴 및 문제발생
1	산대저수지	경북 경주시 안강읍 산대리	· 2013년 4월 21일 저수지 둑높이기 공사현장 사고 발생으로 저수지 붕괴
2	북군저수지	경북 경주시 북군동	· 2014년 9월 6일 저수지 수문 근처에서 다량의 물이 유출
3	이인저수지	경북 포항시 북구 흥해읍 이인리	· 2019년 3월 25일 저수지의 집수정에서 물이 유출
4	구천저수지	경북 청송군 부남면 화장리	· 2014년 3월 29일 저수지 둑 3 m 가량이 1 m 높이로 유실
5	괴연저수지	경북 영천시 괴연동	· 2014년 8월 21일 저수지 둑이 붕괴 (저수지 퇴적토 때문에 담수용량 축소)
6	부미골저수지	경북 영덕군 영덕읍 화개리	· 2014년 9월 25일 저수지 노후화로 인해 둑 6 m가량이 무너져 2천t의 농업용수가 유출
7	내덕저수지	부산 기장군 장안읍 덕선리	· 2014년 8월 25일 1시간 만에 117.5 mm의 집중호우가 내리는 바람에 하천 범람과 저수지 붕괴 발생
8	모항저수지	충남 태안군 소원면 모항리	· 2017년 10월 20일 제방 쌓는 공사를 진행하던 중 제방 붕괴된 사고가 발생
9	조산저수지	전북 고창군 고수면 두평리	· 2013년 7월 5일 전날 많은 양의 비로 인해 저수지 수량이 급격하게 불어나면서 둑 높이기 공사 중이던 옹벽 일부가 붕괴
10	모원저수지	전남 보성군 회천면 회령리	· 2018년 7월 1일 200 mm 이상의 많은 양의 비가 내리면서 저수지 붕괴

(나) 지진발생지역 대상(경주 및 포항) 현장조사 및 시범운영구간 선정

국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에 낙동강권역 경상북도 농업용 저수지는 총 5411개이며, 이중 경주시 소재 저수지는 444개이고, 포항시 소재 저수지는 282개로 조사되었다. 준공 후 사용기간이 50년 이상, 유효저수량이 50,000 m^3 이상, 제방 높이 5 m 이상, 제방 길이 50 m 이상 저수지와 2017년도 포항지진 피해 저수지, 2013년~2019년 붕괴된 저수지 중에서 경주시 소재 저수지는 5개소, 포항시 소재 저수지는 9개소에 대해 현장조사를 진행하였다. 표 2.4.8과 표 2.4.9에 나타난 같이 조사된 경주 및 포항시 소재의 저수지 현황을 나타낸 것이다(그림 2.4.15).

표 2.4.8 조사된 경주 소재 저수지 현황

구분	저수지명	위치	저수지 현황
1	유금저수지	경북 경주시 강동면 유금리	· 준공 후 사용기간 : 74년 · 유효저수량 : 60,000 m^3 · 제방 높이 : 11 m · 제방 길이 : 150 m
2	산대저수지	경북 경주시 안강읍 산대리	· 준공 후 사용기간 : 55년 · 유효저수량 : 194,400 m^3 · 제방 높이 : 12 m · 제방 길이 : 206 m
3	하곡저수지	경북 경주시 안강읍 두류리	· 준공 후 사용기간 : 87년 · 유효저수량 : 4,783,800 m^3 · 제방 높이 : 15.9 m · 제방 길이 : 593 m
4	대제저수지	경북 경주시 조양동	· 준공 후 사용기간 : 74년 · 유효저수량 : 339,100 m^3 · 제방 높이 : 6 m · 제방 길이 : 236 m
5	영지저수지	경북 경주시 외동읍 괘릉리	· 준공 후 사용기간 : 74년 · 유효저수량 : 467,500 m^3 · 제방 높이 : 13 m · 제방 길이 : 144 m

표 2.4.9 조사된 포항 소재 저수지 현황

구분	저수지명	위치	저수지 현황
1	회학저수지	경북 포항시 북구 청하면 청계리	· 준공 후 사용기간 : 70년 · 유효저수량 : 721,800 m^3 · 제방 높이 : 13.8 m · 제방 길이 : 215 m
2	둔각저수지	경북 포항시 북구 흥해읍 덕장리	· 준공 후 사용기간 : 56년 · 유효저수량 : 21,800 m^3 · 제방 높이 : 7 m · 제방 길이 : 440 m
3	덕성저수지	경북 포항시 북구 흥해읍 덕성리	· 준공 후 사용기간 : 74년 · 유효저수량 : 79,000 m^3 · 제방 높이 : 12 m · 제방 길이 : 90 m
4	용연저수지	경북 포항시 북구 신광면 호리	· 준공 후 사용기간 : 57년 · 유효저수량 : 696,100 m^3 · 제방 높이 : 20.8 m · 제방 길이 : 203 m

5	반곡저수지	경북 포항시 북구 신광면 반곡리	· 준공 후 사용기간 : 74년 · 유효저수량 : 668,100 m^3 · 제방 높이 : 13 m · 제방 길이 : 262 m
6	안신저수지	경북 포항시 북구 신광면 안덕리	· 준공 후 사용기간 : 71년 · 유효저수량 : 80,100 m^3 · 제방 높이 : 4 m · 제방 길이 : 450 m
7	피박곡저수지	경북 포항시 북구 신광면 냉수리	· 준공 후 사용기간 : 74년 · 유효저수량 : 62,400 m^3 · 제방 높이 : 10 m · 제방 길이 : 250 m
8	학야저수지	경북 포항시 북구 기계면 학야리	· 준공 후 사용기간 : 74년 · 유효저수량 : 125,600 m^3 · 제방 높이 : 18 m · 제방 길이 : 187 m
9	이인저수지	경북 포항시 북구 흥해읍 이인리	· 준공 후 사용기간 : 30년 · 유효저수량 : 187,000 m^3 · 제방 높이 : 14 m · 제방 길이 : 136 m



(a) 유금저수지



(b) 산대저수지



(c) 하곡저수지



(d) 대제저수지



(e) 회학저수지



(f) 둔각저수지



(g) 학야저수지



(h) 이인저수지

그림 2.4.15 조사한 경주 및 포항 저수지

조사 시 저수지 댐체(댐마루, 상류사면, 하류사면), 여수로(접근수로, 조절부, 도수로, 감세공), 취수시설 및 방수로에 대해 균열, 비탈면 층분리 현상, 인위적인 굴착, 공사, 훼손, 누수, 침하, 침식, 세굴 등 육안조사를 실시하였다. 하곡저수지, 회학저수지 및 이인저수지는 점검 시 특이사항이 없으면, 이외 저수지에서는 식생들의 활착으로 점검이 어려웠다. 총 14개소에 대한 현장조사 결과 용연저수지 상류부근 제방 공사 현장에 침식 및 균열 구간이 있어서 시범운영구간으로 용연저수지 선정하였다(그림 2.4.16, 그림 2.4.17).



그림 2.4.16 시범운영구간(용연저수지)



(a) 제방 침식 및 균열(Ⅰ)



(b) 제방 침식 및 균열(Ⅱ)



(c) 제방 침식 및 균열(Ⅲ)

그림 2.4.17 시범운영구간 제방 침식 및 균열

(5) 제방안정성 취약항목에 대한 초분광 영상 분석

용연저수지 상류부근 제방 공사 현장의 침식 및 균열 구간에 대해 2019년 9월 16일 드론을 활용하여 RGB 영상촬영과 초분광(hyperspectral) 영상촬영을 실시하였다. RGB 영상촬영은 DJI사의 Inspire1을 활용하여 가로 약 230 m, 세로 약 115 m 범위에 대해 촬영을 하였고, 초분광 영상촬영은 AIBOTIX사의 Aibotix X6 V2를 활용하여 가로 약 31 m, 세로 약 12 m 범위의 제방 침식 및 균열 구간에 대해 촬영을 진행하였다. 그림 2.4.18은 시범운영구간의 촬영위치이며 그림 2.4.19는 RGB 영상자료와 초분광 영상자료를 나타낸 것이다.



그림 2.4.18 시범운영구간에 대한 촬영위치(용연저수지)



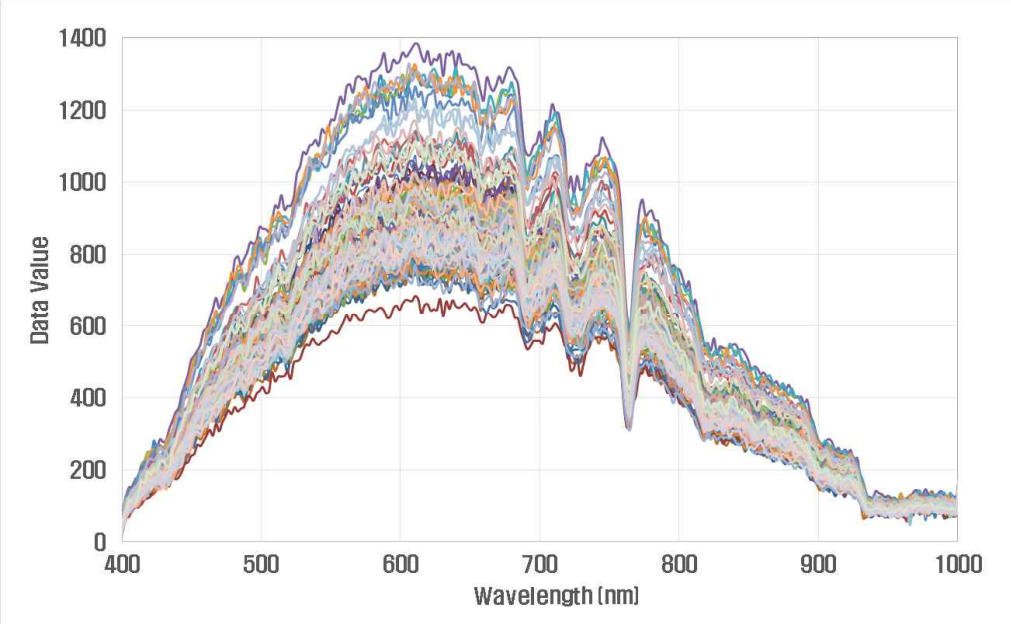
(a) RGB 영상자료



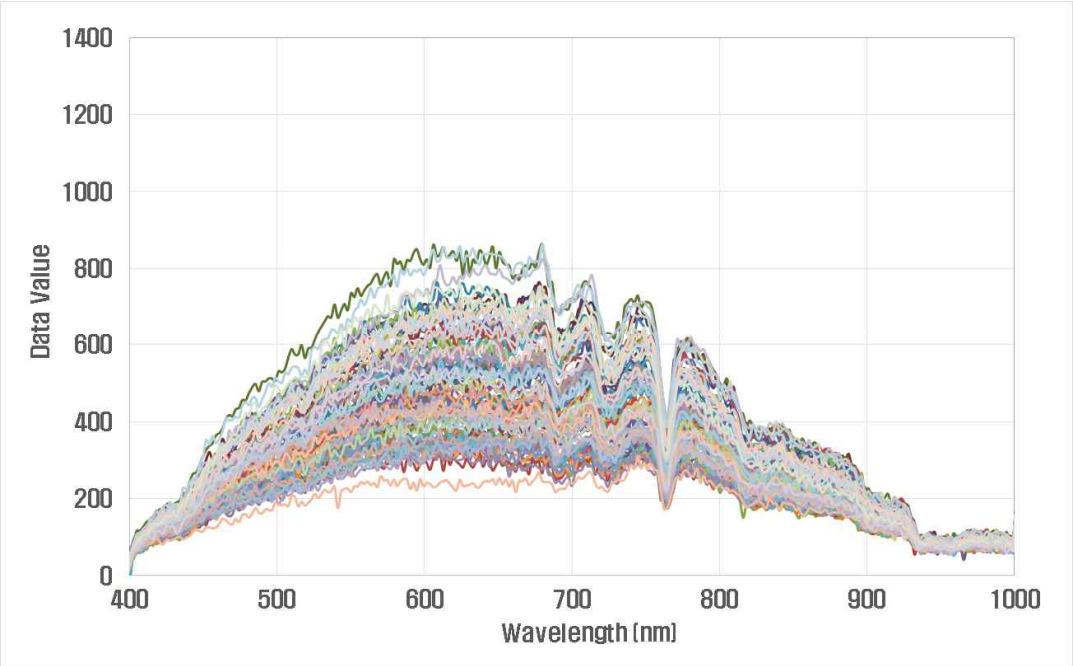
(b) 초분광 영상자료

그림 2.4.19 RGB 영상자료 및 초분광 영상자료

그림 2.4.19의 (b) 초분광 영상자료에 대해 제방 균열 여부에 따른 분석을 실시하였다. 영상분석은 Harris Geospatial Solutions사의 ENVI 5.5버전을 사용하였다. 촬영구간 내 균열이 있는 부분과 균열이 없는 부분으로 구분하여 각각 100개 지점에 대한 최대 강도값을 비교하였다. 그림 2.4.20은 균열 유무에 따른 각 100개 지점에 대한 최대 강도값을 비교한 그래프이다. 데이터 강도(Data Value) 값은 분광복사량(radiance) 값을 말하며, 최대 데이터 강도 값은 Wavelength (400~1000 nm) 범위에서 최대로 크게 측정된 분광복사량을 의미한다. 분석결과 균열이 없는 지점에서 최대 강도값이 높게 나타났으며 대부분 가시광선 영역인 것으로 확인되었다.



(a) 균열 없는 지점(100개)



(b) 균열 있는 지점(100개)

그림 2.4.20 균열 없는 지점과 균열 있는 지점에 대한 최대 강도값 비교

다. 분광 및 공간정보 기반 취약 구간 탐지 알고리즘 개발

(1) 취약 구간 탐지

본 연구에서는 제방 붕괴에 대한 취약구간이자 1차 위험요소인 수심에 대한 분광정보를 활용하여 하천정보를 획득할 수 있는 방법에 대해 분석하였다. 이를 위해 드론 기반의 초분광 센서를 활용하여 1개 측선 100개 지점에 대한 영상값을 취득하였으며 ADCP를 통해 확보된 실제 수심정보와 비교하여 상관관계를 분석하였다. 결과자료는 향후 제방 취약구간의 수심을 드론 기반의 영상자료를 활용하여 신속하게 예측하고 붕괴 방지를 위한 대책을 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

현재 초분광 센서는 수질분석 분야에서 가장 많이 사용되고 있다. 국내에서는 플랑크톤 모니터링을 위한 초분광 영상에 대한 연구가 수행되었으며 밴드비율을 이용하여 부유성 녹조지수를 분석한 연구도 발표되었다(Lee and Lee 2012, Park et al. 2014). Park and Choi(2017)는 항공 초분광 영상을 이용해 토지피복분류를 수행하였으며, 정확도 향상을 위해 다양한 입력자료 및 알고리즘을 적용하여 분석하였다. Seo(2017)는 항공 초분광 영상을 활용하여 환경부에서 제공하는 토지피복도의 세분류 단계에 대한 평가 및 분석을 수행하고 토지피복분류 정확도 향상을 위해 데이터 마이닝(Data Mining)을 통한 감독분류 분석을 실시하였다.

국외의 경우 초분광 센서를 이용한 연구들은 광물 및 식생에 대한 초분광영상 기법 연구가 진행되었다(Kodikara et al., 2012; Lausch et al., 2013; Behmann et al., 2014; Haest et al., 2013). 또한 해양에서 조류에 대해 초분광 센서를 이용하여 분석하고 각 분광정보에 대한 비교연구가 수행되었으며 초분광 영상을 활용해 지표면에 대한 피복정도와 표적탐지를 위한 방법 연구도 발표되었다(Mhanolakis et al. 2003, Dierssen et al. 2015).

취약구간 탐지를 위해 본 연구에서는 미국 Headwall Photonics사의 초분광 센서(Nano-Hyperspec)를 사용하였다. 드론용 초분광 센서로 뛰어난 공간 및 스펙트럼 해상도와 높은 SNR(Signal to Noise Ratio)을 가지고 있으며, 272개 밴드의 고해상도 초분광 영상을 획득할 수 있다. 영상촬영을 위한 무인항공기는 독일 Aibotix의 Aibot X6 드론을 사용하였다. 2축 짐벌이 장착되어 있으며 비행 가능한 적재하중은 최대 3.0 kg이고, GPS 수신 및 수동을 무선으로 제어하면서 빠르고 정확하게 영상을 획득할 수 있다. 영상분석은 Harris Geospatial Solutions사의 ENVI 5.5버전을 사용하였다. ENVI 프로그램의 기능은 색상, 명암, 필터링 등을 다룰 수 있는 라이브러리를 제공, multispectral 자료와 hyperspectral 자료의 분석 및 정보추출, 다양한 이미지와 벡터 형식 지원, 기존의 전형적인 이미지 처리 기본 작업 등이 가능하다. 실제 수심 측정에 사용한 ADCP는 SonTek사의 River Surveyer M9이 사용되었다. 진폭이 작은 음파를 사용하며 수심 0.2 m부터 30 m까지 저수심과 고수심에 사용이 가능하다. 유속 및 수심 측정센서를 포함한 9개의 빔 (센서)으로 구성되어 있다. 표 2.4.10은 초분광 센서의 특성 및 기능을 나타낸 것이다.

표 2.4.10 초분광 센서의 특성 및 기능

Wavelength range (nm)	Spectral bands	Spatial bands	Scan mode	Lens	Output	Sensor Weight (kg)	Sensor size (m)
400 ~ 1000	272	640	Push-broom	17 mm, FOV15.9°	16 bit	0.52	0.076 x 0.076 x 0.119

(2) 취약 구간 탐지 알고리즘 개발 및 검증

낙동강 본류 연구대상 지역 측선을 대상으로 ADCP를 이용한 수심측정과 초분광 영상촬영을 수행하였다. 1개 측선에 대해 측정하였으며 ADCP 측정결과 가장자리에서 중앙으로 갈수록 수심이 깊어지는 경향을 보이고 있다. 수심은 평균 0.81 m이며 최대 수심은 1.49 m, 최소 수심은 0.32 m로 나타났다.

초분광 영상에 대한 ENVI 프로그램 분석 결과, 임의의 100개 지점은 각각 272개 밴드와 밴드별 고유 파장이 있으므로 파장별 최대 강도값을 분광정보로 선정하였다. 표 2.4.11은 100개 지점에 대한 실제 수심측정 자료와 영상분석을 통해 확보한 각 지점의 최대 강도값을 비교한 표이다. 100개 지점을 수심에 따라 번호를 지정하고 각 지점의 최대 강도값을 표시하였다. 100번 지점에서 최대 강도값은 645로 가장 높게 나타났으며 1번 지점에서 최대 강도값은 278로 가장 낮게 나타났다. 그림 2.4.21은 실제 수심과 초분광 영상분석결과의 상관성을 나타낸 그래프이다. 심도별 관계식의 차이는 있지만 최대 강도값이 감소할수록 수심은 증가하는 것으로 나타났다. 취약구간 탐지 및 알고리즘 개발을 위한 관계식은 아래와 같으며 결정계수는 0.9575로 매우 높게 나타났다.

$$y = -242.18x + 708.89 \quad (2.9)$$

향후 하천 내 수생식물의 유무와 종류, 하상 재료 등에 따른 최대강도값 분석이 추가로 요구된다. 또한 가시광선과 근적외선 영역에서 심도별 차이가 발생하고 있어 조도차이에 따른 영상 변화 분석이 이루어지면 촬영정보의 오차를 줄일 수 있기 때문에 하천환경에 대한 정확한 평가가 이루어질 것으로 판단된다.

표 2.4.11 초분광 영상분석결과와 수심측정 결과

Point	Peak Data Value	Depth (m)	Point	Peak Data Value	Depth (m)	Point	Peak Data Value	Depth (m)
1	278	1.49	35	453	1.14	68	541	0.63
2	289	1.46	36	453	1.12	69	544	0.62
3	317	1.42	37	457	1.11	70	556	0.61
4	338	1.42	38	458	1.10	71	559	0.60
5	338	1.41	39	458	1.08	72	560	0.59
6	339	1.40	40	459	1.06	73	566	0.58
7	344	1.39	41	465	1.05	74	571	0.57
8	360	1.38	42	468	1.03	75	573	0.56
9	362	1.37	43	470	1.00	76	576	0.55
10	369	1.37	44	471	0.99	77	577	0.55
11	371	1.36	45	478	0.97	78	580	0.54
12	383	1.36	46	488	0.95	79	583	0.53
13	392	1.35	47	490	0.95	80	586	0.52
14	393	1.35	48	493	0.91	81	590	0.51
15	396	1.34	49	493	0.90	82	594	0.50
16	398	1.34	50	494	0.86	83	595	0.49
17	405	1.33	51	496	0.83	84	595	0.48
18	412	1.32	52	498	0.82	85	600	0.47
19	412	1.31	53	498	0.81	86	603	0.46
20	412	1.30	54	501	0.79	87	604	0.45
21	421	1.29	55	505	0.77	88	612	0.44
22	422	1.28	56	506	0.75	89	613	0.43
23	427	1.27	57	506	0.72	90	613	0.42
24	428	1.25	58	515	0.70	91	616	0.41
25	432	1.24	59	516	0.69	92	619	0.40
26	433	1.23	60	519	0.69	93	621	0.39
27	435	1.22	61	522	0.68	94	621	0.38
28	435	1.21	62	523	0.67	95	624	0.37
29	442	1.20	63	533	0.66	96	627	0.36
30	443	1.19	64	536	0.66	97	629	0.35
31	444	1.18	65	538	0.65	98	633	0.34
32	444	1.18	66	540	0.64	99	640	0.33
33	446	1.16	67	541	0.63	100	645	0.32
34	452	1.15	-	-	-	-	-	-

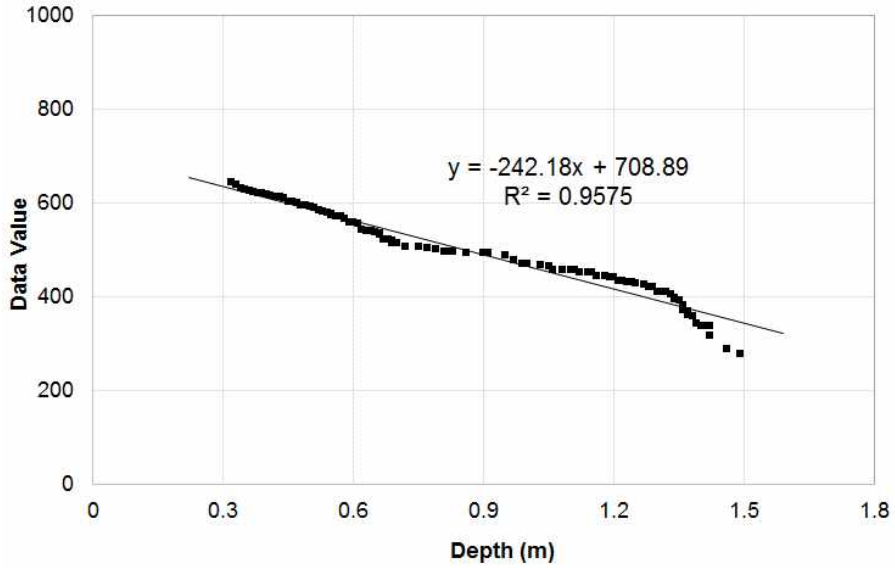


그림 2.4.21 실제수심과 최대강도값의 비교 그래프

(3) 소프트웨어 개발

제방 취약구간 탐지를 위한 알고리즘 및 관계식을 활용하여 소프트웨어를 개발하였다. 소프트웨어는 초분광 카메라를 통해 측정된 데이터를 입력값으로 하여 제방 취약구간을 예측하고 계산을 일괄적으로 처리하는 것을 목적으로 하였다. 프로그램 명칭은 제방 취약구간 탐지를 위한 수심예측계산 자동화 프로그램으로써 코드명은 depth-hyperspectral이며 프로그래밍 언어는 Python 3, Tkinter, 지원환경은 Windows, Linux, MacOS이다. 구체적인 소프트웨어의 구성은 그림 2.4.22와 같으며 실행화면은 그림 2.4.23과 같다. 프로그램의 특징은 초분광 센서 데이터 계산을 일괄 처리할 수 있는 프로그램으로써 측정 지점 마다 별도의 초분광 데이터 파일이 주어졌을때, 해당 데이터에 대한 수심 예측 계산을 수행하고 1개의 종합된 결과 파일을 생성할 수 있다. 주요기능은 제방 취약구간 예측 계산 일괄 처리 및 데이터 입력 및 출력 경로 지정과 수식 변경을 위한 GUI 인터페이스를 제공한다.

depth-hyperspectral/	**dist/** : Windows 용 바이너리	**input/** : 초분광 측정 데이터 입력
		output/ : 수심 예측 결과 출력
		depth-hyperspectral.exe : Windows용 실행 파일
	src/ : Python 소스코드	**depth-hyperspectral.py** : GUI 소스 코드
		hyperspectral.py : 파일 입출력 및 계산 소스 코드

그림 2.4.22 프로그램의 구성

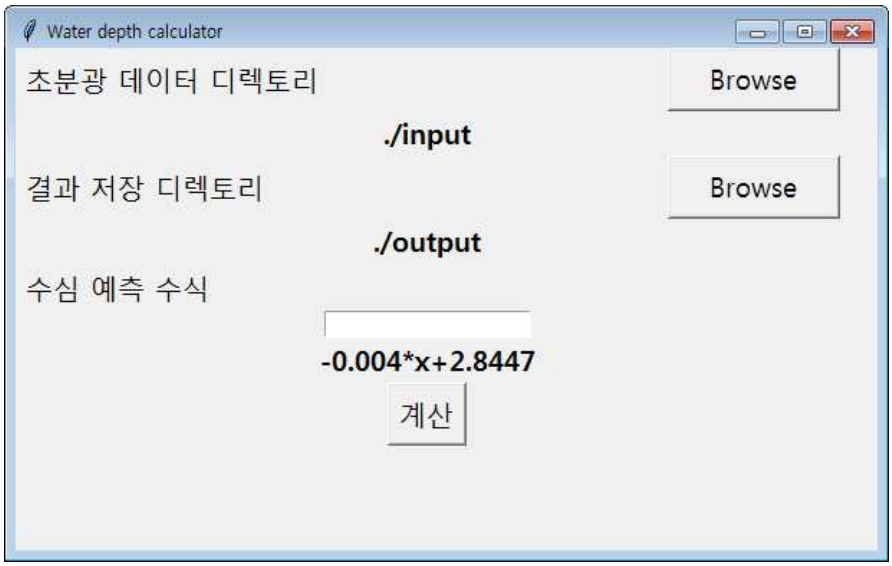


그림 2.4.23 프로그램 실행 화면

(4) 조도에 따른 제방 취약 구간 탐지

제체의 안전율을 감소시키는 원인 중 하나는 균열의 확장이다. 이런 이유로 균열에 대한 탐지 및 모니터링은 제방의 안정성을 확보하기 위해 매우 중요하다. 그러나 균열을 탐지하기 위한 현장조사는 환경조건에 따라 한계가 있다.

원격탐사의 경우 균열 탐지를 위해 광범위한 지역의 정보 수집과 활용이 가능하다. 특히 초분광 영상은 육안으로 관찰이 불가능한 다양한 재료의 정보를 확보할 수 있으며 드론 탑재가 가능해지면서 활용 영역이 넓어져 식생 등으로 구분이 어려운 균열에 대한 정확한 구별이 가능하다.

본 연구에서는 균열 탐지를 위해 초분광 영상을 활용하여 균열(cracked area)과 비균열 영역(uncracked area)에 대한 조도별 반사율 특성을 비교하고 균열 영역의 고유정보를 확인하는 것이 목적이다. 영상은 드론에 탑재된 초분광 센서를 활용하였으며 낙동강 하천제방 내 균열을 대상으로 촬영하였다. 측정은 각 영역별로 5개 포인트를 선정 후 조도 변화에 따라 촬영을 실시하였다. 또한 영상분석 프로그램을 이용하여 최대강도값(PDA, peak data value)을 산정하였으며 백색판(white reference)을 기준으로 각 영역에 대한 반사율을 보정하였다.

드론(독일 Aibotix의 Aibot X6, 2축 짐벌)에 탑재된 초분광 센서는 미국 Headwall Photonics사의 Nano-Hyperspec을 사용하였으며, 영상분석은 Harris Geospatial Solutions사의 ENVI 5.5버전을 활용하였다.

드론을 이용한 영상자료 획득은 대기에 의한 흡수, 반사 등의 영향을 받기 때문에 보정이 필요하다. 그러나 현장의 낮은 고도에서 초분광 센서를 이용하여 분광정보를 획득할 경우에는 대기에서 발생하는 복사휘도나 재료에서 반사되는 에너지가 대기의 영향을 거의 받지 않기 때문에 본 연구에서는 대기보정을 고려하지 않았다. 특히 균열 영역과 비균열 영역에 대한 비교를 목적으로 하고 지상에서 근접 촬영하였으므로 드론 흔들림과 대기의 영향을 거의 받지 않은 것으로 판단되어 기하보정을 고려하지 않았다.

또한 반사율은 99% 이상의 반사특성을 갖는 백색판을 이용하여 태양복사에너지의 변화에서 발생할 수 있는 오차를 최소화하고 반사율로 변환시켰으며 영상분석을 통해 산정되는 강도값(data value)은 분광복사량 (radiance) 값을 의미한다.

표 2.4.12는 CASE 및 측정 포인트 구분을 위한 표를 나타낸다. 영역은 균열과 비균열로 구분하였으며 CASE는 조도에 따라 구분하였다. 측정 포인트는 영역별 동일한 지점 5개에 대해 조도별로 촬영 후 강도값과 최대강도를 분석하였다.

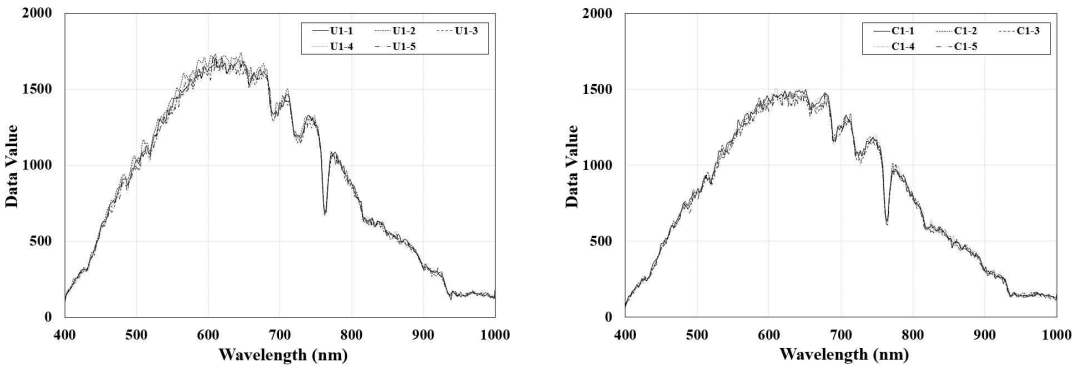
표 2.4.12 CASE 및 측정 포인트

Area	Illumination	CASE	Point No.
Uncracked area	98,447	1	U1-1 ~ U1-5
	67,545	2	U2-1 ~ U2-5
	28,315	3	U3-1 ~ U3-5
Cracked area	98,447	1	C1-1 ~ C1-5
	67,545	2	C2-1 ~ C2-5
	28,315	3	C3-1 ~ C3-5

(5) 조도에 따른 제방 취약 구간 탐지 알고리즘 개발 및 검증

비균열 영역과 균열 영역을 대상으로 조도에 따른 최대강도값의 변화를 분석하기 위해 먼저 5개 포인트에 대한 강도값을 분석하였다. 그림 2.4.24 ~ 그림 2.4.26은 5개 포인트에 대한 파장별 강도값을 나타낸다.

그림 2.4.24는 CASE 1(조도 98,447 lx)에 대한 파장 대비 강도값으로써 각 영역별 5개 포인트는 가시광선 영역의 특징에 따라 비슷한 패턴을 보였다. 비균열 영역의 최대강도는 U1-2의 1739이며 각 포인트별 최대강도의 범위는 1703 ~ 1739(밴드범위 : 94 ~ 112), 균열 영역에서 최대강도는 1505(C1-4)이며 범위는 1464 ~ 1505(밴드범위 : 96 ~ 114)로 나타났다. 표 2.4.13은 CASE 1의 각 지점별 최대강도, 최대강도 시 파장과 밴드를 나타낸다.



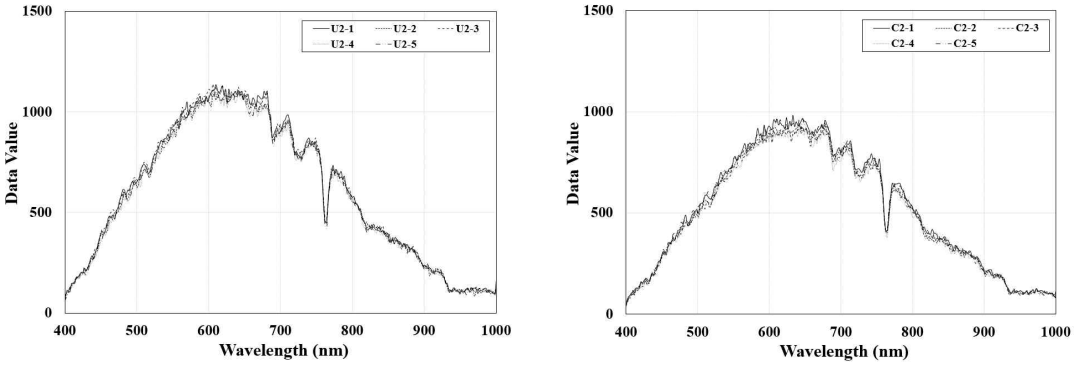
(a) 비균열 영역 (b) 균열 영역

그림 2.4.24 CASE 1의 비균열 영역과 균열영 역의 파장대비 강도값

표 2.4.13 CASE 1의 각 지점별 최대강도(Peak Data Value, P.D.V), 최대강도 시 파장과 밴드

CASE 1	P.D.V.	Wavelength on PDV	Band on PDV
U1-1	1708	619.43	100
U1-2	1739	646.25	112
U1-3	1712	608.26	95
U1-4	1715	608.26	95
U1-5	1703	606.03	94
C1-1	1496	650.71	114
C1-2	1479	621.67	101
C1-3	1464	619.43	100
C1-4	1505	610.49	96
C1-5	1475	646.25	112

그림 2.4.25는 CASE 2(조도 67,545 lx)에 대한 파장대비 강도값으로써 각 영역별 5개 포인트는 가시광선 영역의 특징에 따라 비슷한 패턴을 보였다. 비균열 영역의 최대강도는 U2-3의 1137이며 최대강도의 범위는 1102 ~ 1137(밴드범위 : 94 ~ 112), 균열 영역에서 최대강도는 981(C2-1), 최대강도의 범위는 923 ~ 981(밴드범위 : 106 ~ 126)로 나타났다. 표 2.4.14는 CASE 2의 각 포인트별 최대강도, 최대강도 시 파장과 밴드를 나타낸다.



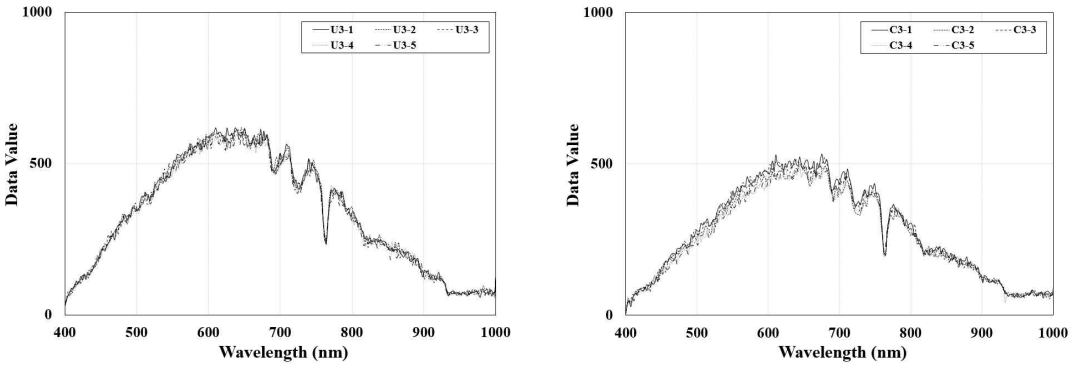
(a) 비균열 영역 (b) 균열 영역

그림 2.4.25 CASE 2의 비균열 영역과 균열영 역의 파장대비 강도값

표 2.4.14 CASE 2의 각 지점별 최대강도(Peak Data Value, P.D.V), 최대강도 시 파장과 밴드

CASE 2	P.D.V.	Wavelength on PDV	Band on PDV
U2-1	1136	610.49	96
U2-2	1104	646.25	112
U2-3	1137	606.03	94
U2-4	1106	606.03	94
U2-5	1102	610.49	96
C2-1	981	632.84	106
C2-2	946	677.53	126
C2-3	936	673.06	124
C2-4	923	650.71	122
C2-5	964	646.25	112

그림 2.4.26은 CASE 3(조도 28,315 lx)에 대한 파장대비 강도값으로써 각 영역별 5개 포인트는 가시광선 영역의 특징에 따라 비슷한 패턴을 보였다. 비균열 영역에서 최대강도는 U3-2의 619이며 각 포인트별 최대강도의 범위는 602 ~ 619(밴드범위 : 96 ~ 112), 균열 영역에서 최대강도는 532(C3-1)이며 최대강도의 범위는 493 ~ 532(밴드범위 : 111 ~ 127)로 나타났다. 표 2.4.15는 CASE 3의 각 포인트별 최대강도, 최대강도 시 파장과 밴드를 나타낸다. 전체 영역에 대해 최대강도가 확인된 파장의 범위는 606.03 nm ~ 679.76 nm로써 조도에 상관없이 일정 범위를 보이는 것으로 나타났다.



(a) 비균열 영역 (b) 균열 영역

그림 2.4.26 CASE 3의 비균열 영역과 균열영 역의 파장대비 강도값

표 2.4.15 CASE 3의 각 지점별 최대강도(Peak Data Value, P.D.V), 최대강도 시 파장과 밴드

CASE 3	P.D.V.	Wavelength on PDV	Band on PDV
U3-1	618	610.49	96
U3-2	619	646.28	112
U3-3	614	639.54	109
U3-4	602	646.25	112
U3-5	604	646.25	112
C3-1	532	675.29	125
C3-2	498	644.01	111
C3-3	520	679.76	127
C3-4	495	679.76	127
C3-5	493	673.06	124

그림 2.4.27은 각 영역별 평균 강도값을 CASE별로 비교한 그래프로써 가시광선의 파장에 따라 패턴은 비슷하게 나타났으나 강도값은 조도 및 균열 여부에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다. 그림 2.4.28은 각 CASE에 대한 5개 포인트의 평균 최대강도를 조도와 비교한 그래프이다. 조도와 최대강도의 비교 결과 조도가 높아질수록 최대강도값도 높아졌으며 비균열 영역과 균열 영역의 결정계수(R2, determination coefficient)는 각각 0.9864, 0.9851로 계산되었다. 모든 CASE에서 비균열 영역의 최대강도가 균열 영역보다 높게 나타났다. CASE 1에서는 비균열과 균열의 최대강도 차이는 231.6, CASE 2에서 차이는 167.0, CASE 3에서 차이는 103.8으로 조도가 높을수록 최대강도의 차이는 큰 것으로 나타났다.

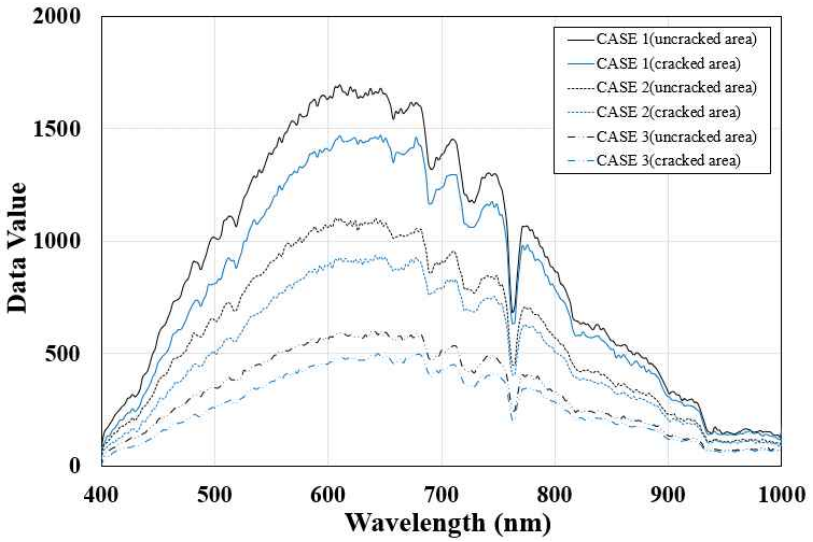


그림 2.4.27 비균열과 균열 영역의 파장에 따른 강도값 비교

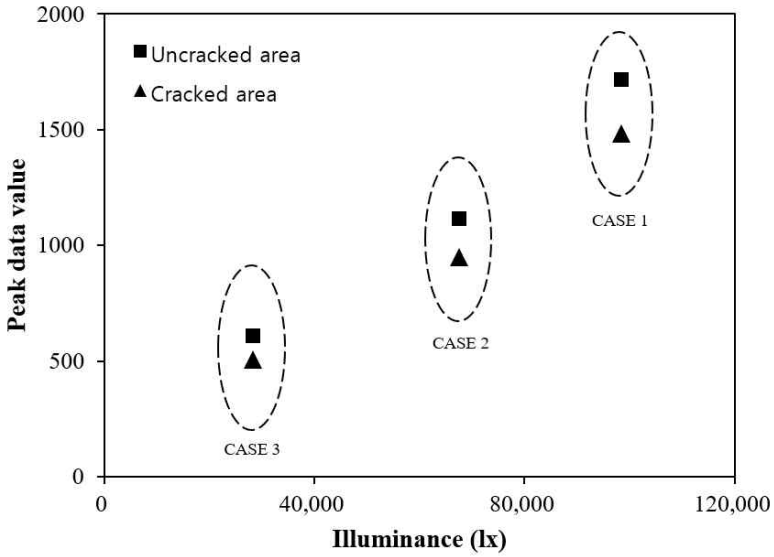


그림 2.4.28 각 CASE에 대한 최대강도와 조도 비교

조도에 대한 반사율 보정을 위해 백색판을 활용하였으며 그래프를 통해 비교하였다. 백색판은 균열 주변에 설치하였으며 반사율 계산은 식(2.10)과 같이 기준이 되는 표준백색판에 해당되는 강도값(복사량)과 해당 영역(균열 및 비균열 영역)의 강도값(복사량)을 비교하여 반사율(R)을 계산하였다.

$$R = V_{target} / V_{reference} \tag{2.10}$$

여기서, V_{target}는 목표 강도값이며, $V_{reference}$ 표준백색판에 해당되는 참고 강도값이다.

그림 2.4.29는 조도별 각 영역의 반사율을 나타내며 그림 2.4.30은 조도에 따른 반사율을 평균하여 각 영역별로 나타낸 그래프이다. 반사율 분석결과 비균열 영역과 균열 영역에서 차이가 있는 것으로 나타났으나 패턴은 비슷하게 나타났다.

반사율은 가시광선 파장 영역인 400 nm ~ 700 nm 까지는 증가하였으며 근적외선 영역에서는 일정수준을 유지하다가 다시 증가하는 것으로 나타났다. 표 2.4.16은 각 영역과 파장에 대한 반사율을 나타낸 표이며 그림 2.4.31은 각 파장별 최대값, 최소값, 중앙값과 40%, 60%에 해당되는 값을 나타낸 그래프(box plot)이다. 본 연구에서는 가시광선과 근적외선으로 파장 영역을 나누고 가시광선은 청색광, 녹색광, 적색광으로 다시 구분하여 각 영역에 대한 고유정보를 비교하였다. 가시광선의 경우 각 파장별(청색, 녹색, 적색광) 45개, 근적외선의 경우 134개의 분석 데이터(반사율 계산 데이터)를 활용하여 통계분석을 실시하였다. 분석결과 비균열 영역에서 가시광선 평균 반사율은 32.20%, 균열 영역의 가시광선은 26.55%이며 근적외선에서 비균열 영역은 반사율이 49.63%로써 균열 영역의 반사율(45.05)보다 높게 나타났다. 영역별 평균 반사율의 차이는 가시광선에서 5.65%, 근적외선에서는 4.58%로 나타났으며 표준편차(SD, standard deviation)는 가시광선에

비해 근적외선 파장에서 높게 나타났으며 반사율 범위가 넓기 때문인 것으로 판단된다.

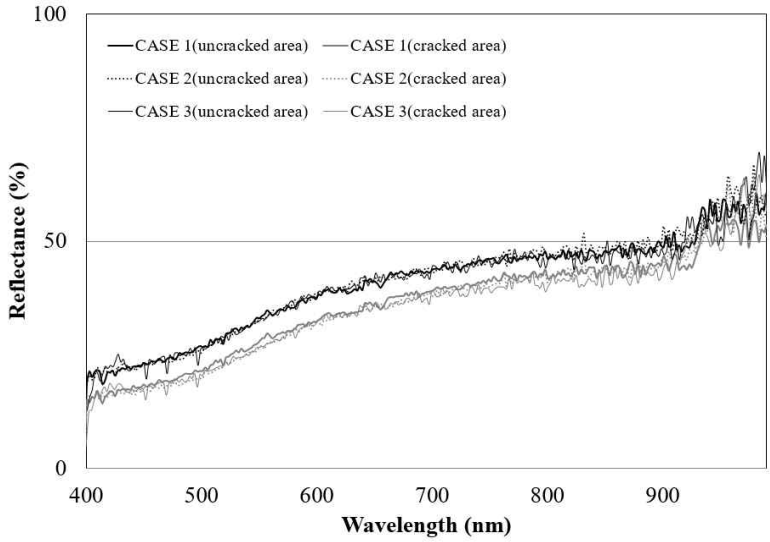


그림 2.4.29 각 케이스별 반사율과 파장 관계

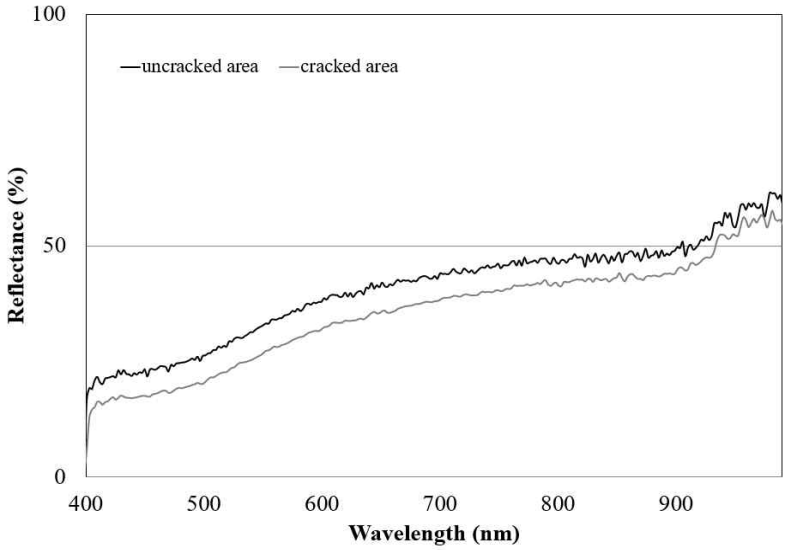
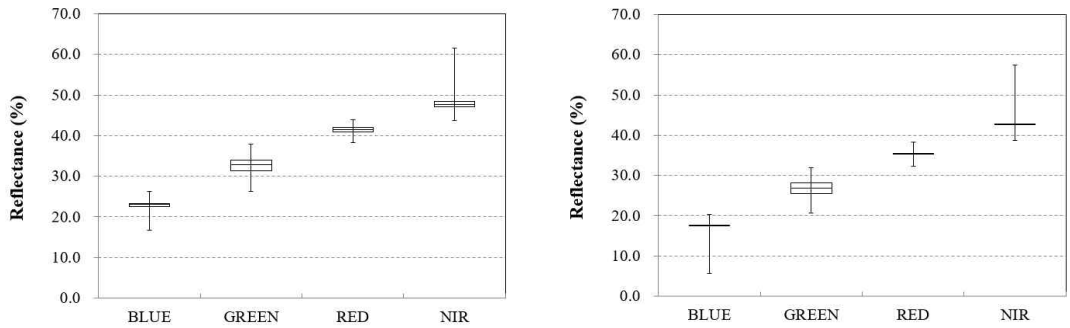


그림 2.4.30 비균열 및 균열 영역의 파장에 따른 반사율

표 2.4.16 반사율 평균값 종합

Area	Wavelength	Reflectance (%)				
		Min.	Max.	Average		S/D
Uncracked area	BLUE (400 nm ~ 499 nm)	16.74	26.20	22.86	32.20	1.96
	GREEN (500 nm ~ 599 nm)	26.29	37.86	32.55		3.57
	RED (600 nm ~ 699 nm)	38.33	44.02	41.18		1.61
	NIR (700 nm ~ 999 nm)	43.78	61.54	49.63		5.05
Cracked area	BLUE (400 nm ~ 499 nm)	5.72	20.36	17.50	26.55	2.38
	GREEN (500 nm ~ 599 nm)	20.60	31.91	26.64		3.40
	RED (600 nm ~ 699 nm)	32.38	38.30	35.50		1.77
	NIR (700 nm ~ 999 nm)	38.65	57.50	45.05		5.46



(a) 비균열 영역 (b) 균열 영역

그림 2.4.31 비균열 및 균열 영역의 반사율 분포

본 연구는 초분광 영상을 활용하여 균열과 비균열영역 5개 포인트에 대한 분광정보 및 조도별 반사율을 비교하고 균열 탐지를 위한 고유정보를 분석하는 것이 목적이다. 각 영역에 대한 비교 결과 조도에 따라 강도값의 차이가 있었으며 조도의 증가에 따라 최대강도값도 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 비균열 영역과 균열 영역의 최대강도가 나타난 파장 및 밴드의 범위는 유사하게 나타났다.

또한 반사율은 균열 영역과 비균열 영역의 범위 등 고유정보의 차이가 뚜렷하기 때문에 드론을 이용한 면단위 분석 시 육안으로 관찰이 어려운 균열에 대한 정확한 탐지가 가능할 것으로 판단한다.

(6) 제방 균열 평가 소프트웨어 개발

제방 균열 평가를 위한 알고리즘 및 관계식을 활용하여 소프트웨어를 개발하였다. 소프트웨어는 측정된 조도와 최대강도 데이터를 입력값으로 하여 제방 균열 평가하고 계산을 일괄적으로 처리하는 것을 목적으로 하였다. 프로그램 명칭은 제방 균열 평가 소프트웨어로써 코드명은 bankcrack_classifier이며 프로그래밍 언어는 Python 3, Tkinter, 지원환경은 Windows, Linux, MacOS이다. 구체적인 소프트웨어의 구성은 그림 2.4.32과 같으며 실행화면은 그림 2.4.33과 같다. 프로그램의 특징은 측정된 데이터를 바탕으로 균열 여부를 판별할 수 있는 프로그램으로써 측정 지점 마다 별도의 조도와 최대강도 데이터가 주어졌을 때, 해당 데이터에 대한 균열 여부를 판별할 수 있다. 주요기능은 제방 균열 여부 판단, 데이터 입력 및 판단을 출력하기 위한 GUI 인터페이스를 제공한다.



그림 2.4.32 제방 균열 평가 소프트웨어의 구성

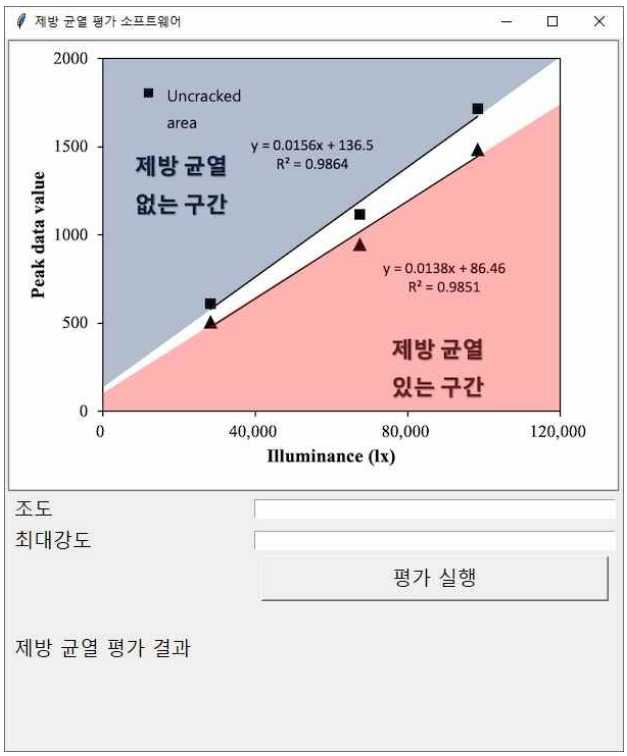


그림 2.4.33 제방 균열 평가 소프트웨어의 실행 화면

라. ORS 기반의 제방 안전 진단 현장적용 결과

(1) 현장 적용

제방안전진단 소프트웨어의 평가를 위해 현장검증을 실시하였다. 현장검증은 낙동강 본류 하천제방이 위치한 안동지역을 대상으로 영상촬영 및 분석을 수행하였다(그림 2.4.34~그림 2.4.37). 드론은 Aibot X6을 사용하였으며 초분광 센서는 Nano-Hyperspec을 활용하였으며 3축 짐벌 개선을 통해 안정적인 비행이 가능한 초분광 촬영을 실시하였다. 하천 제방은 토질상태에 따라 미소크랙 등 다양한 규모의 균열이 발생하였으며 대부분 자연적으로 발생한 균열로 판단된다. 지질은 중생대 백악기의 일직층으로써 적색이암, 셰일, 역질사암 등이 주를 이루고 있으며 제방 내 토양은 대부분 입도가 균일하며 일부 역암이 관찰되는 지역으로 조립토가 주를 이루고 있다.



그림 2.4.34 현장검증 위치(경북 안동시)



그림 2.4.35 개선된 3축짐벌 및 초분광 카메라



그림 2.4.36 하천제방 균열사진



그림 2.4.37 낙동강 본류 제방 일대 현장사진 및 초분광 영상

(2) 현장 적용 결과

초분광 영상촬영 당시 조도 42500lx에서 하천제방 균열 및 비균열에 대해 촬영하여 그림 2.4.38과 같은 균열 분석 결과를 도출하였고, 도출결과 균열의 최대강도 1505, 비균열의 최대강도 396에 대해 제방 균열 평가 소프트웨어를 적용하여 균열과 비균열에 대한 탐지가 가능한 것으로 나타났다(그림 2.4.39). 특히 비균열 포인트의 경우 암석이나 토양의 성질, 빛의 반사에 따라 일부 차이가 있는 것으로 나타났지만 균열은 매우 유사한 데이터 강도를 보이는 것으로 나타났다.

향후 홍수피해 등으로 인한 대책 마련을 위해 지방청, 지자체 등에서 다양한 수요가 예상되므로 이를 활용한 제방 모니터링에 대한 추가 검증 및 다양한 기초자료 확보가 요구된다. 특히 산학연 공동의 장기적인 네트워크 구축과 기술의 선점을 통해 지속적인 연구개발이 필요하다.

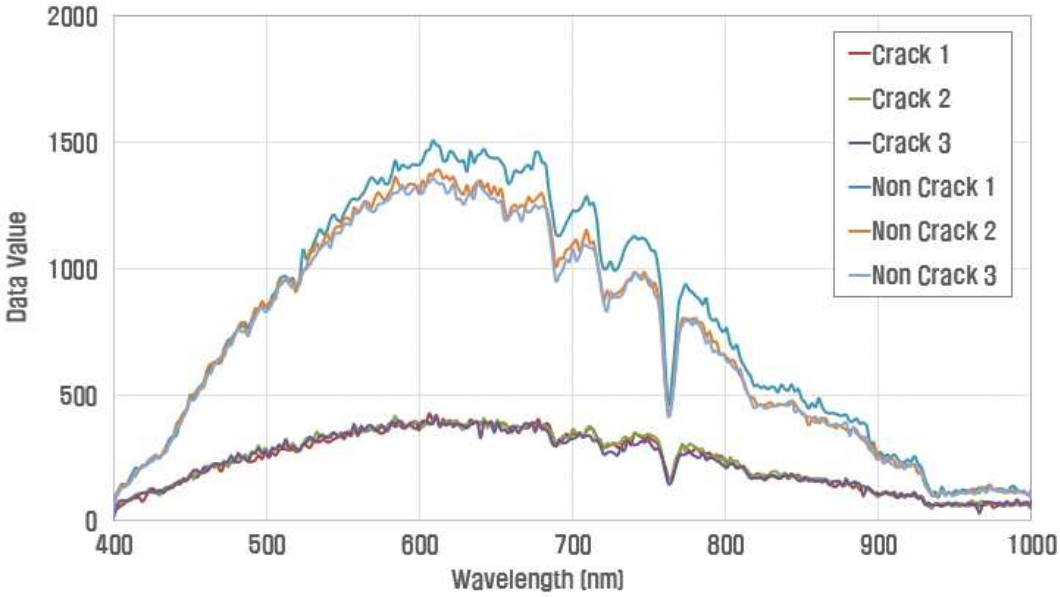
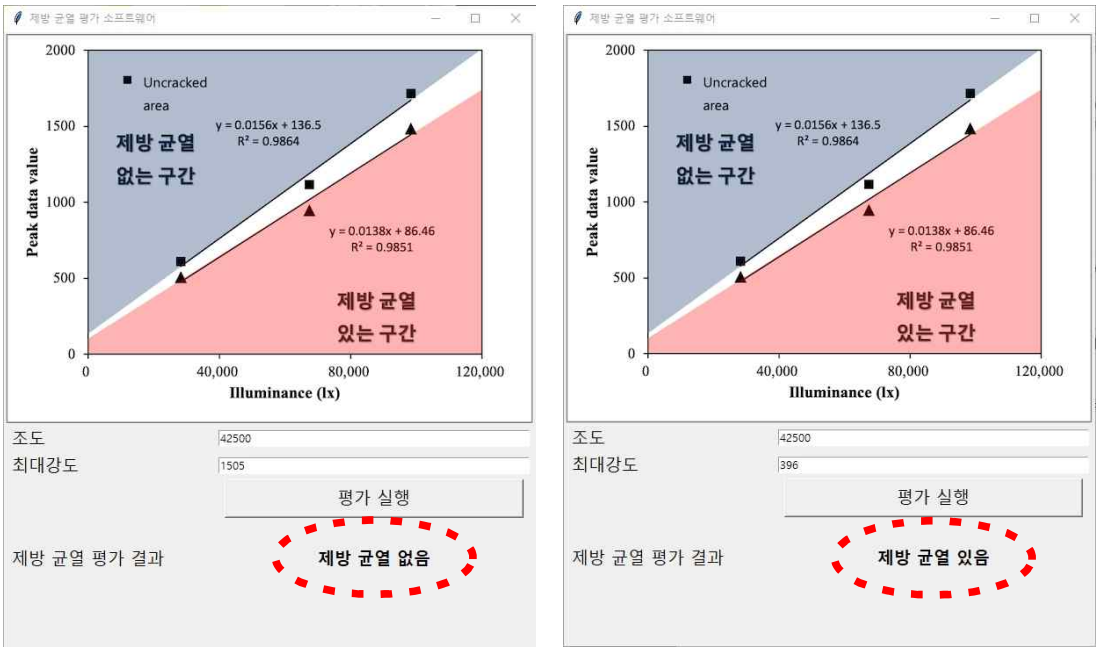


그림 2.4.38 균열 분석 결과



(a) 비균열 영역 안전진단 결과 (b) 균열 영역 안전진단 결과

그림 2.4.39 비균열 및 균열 영역의 안전진단 결과

제3장

목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 연구 목표

본 연구의 최종 목표는 ORS(Optical Remote Sensing)와 광섬유 기반 광역/국부 제방 모니터링 시스템 개발을 통한 노후 제방 진단/관리 및 내진 대응 제방설계 기술 개발이다. 최종 목표를 달성하기 위해 연차별 세부 목표를 설정하였으며, 연구목표 달성을 위해 수행한 연구 내용 및 연구 결과는 표3.1.1과 같다.

표 3.1.1 연차별 개발 목표 및 결과

구분(연도/단계)	세부 과제명	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차 연도 (2018)	광섬유(Fiber Optic)를 이용한 제방 제체 모니터링 장치 활용 기술 개발 및 내진 점검 기술 개발	광섬유 센싱 시험 시스템 구축안 설계	· 광섬유 센서를 활용한 제체 변화 모니터링을 위한 중규모 제방 실험 수행	· 제방의 침투 및 붕괴 현상을 인식할 수 있는 데이터 획득
		국내 지진에 대한 제방 피해 사례 조사 및 분석/국내외 내진설계 정리 및 분석	· 일본의 제방 내진성능 조사 지침 및 매뉴얼 조사 · 지진을 고려한 제방 실험사례 조사	· 지진을 고려한 제방 실험의 방법론 및 구체성 도출 · 한국형 내진 점검 및 모니터링 가이드라인 제시를 위한 자료 수집
	광학원격탐사(Optical Remote Sensing)를 이용한 광역 제방 모니터링 시스템 개발	UAV 부착용 이미지 센싱 인터페이스 설계(안) 개발	· UAV 영상보정을 위한 2축, 3축 짐벌 검토 및 인터페이스 설계안 개발	· 2축 짐벌 사용 시 흔들림 발생 확인 · 3축 짐벌 사용 시 정확한 데이터 획득 가능
		ORS 모니터링을 통한 제방 안전 진단 플랫폼 구축	· 제방 안정성 취약항목 분석 · UAV 활용 제방 영상 촬영 · UAV 활용 ORS 영상 획득 시스템 구축	· 14개 제방안정성 취약 인자 분석 · 2개 하천 대상 UAV 영상촬영 및 취약인자 선정 · ORS 영상취득 및 획득 시스템 구축

	제방 제체 분석을 위한 광섬유(Fiber Optic) 최적 센싱 및 분석 기법 개발	기존 광섬유 시스템을 이용한 제체 센싱 정도 평가	· 광섬유 센싱을 통한 제체 내부의 온도 측정	· 제방 실험을 통해 제체 내부의 정확한 온도 변화를 센싱할 수 있는 실험 결과를 도출함
2차 연도 (2019)	광섬유(Fiber Optic)를 이용한 제방 제체 모니터링 장치 활용 기술 개발 및 내진 점검 기술 개발	하천 제방의 제체 구조 및 붕괴 유형 검토	· 국내외 하천 제방의 붕괴 원인 및 유형 조사	· 국내외 하천 제방의 붕괴 원인 및 붕괴 과정에 대한 정리· 제방 붕괴 실험사례 조사 및 결과 정리
		제방 제체 모니터링 실규모 실험 및 검증	· 광섬유 온도 센싱을 통한 실규모 제방 침투 실험 2회 수행	· 광섬유 온도 센싱으로 실규모 제방의 침투 현상을 모니터링 및 제체 온도 데이터 획득 · 침투 경과시간에 따른 제체 온도변화 분석 및 침윤선 시각화
		지진 영향을 고려한 제방파괴 실험 및 분석	· 지진을 고려한 제방 수리실험 설계(안) 작성 · 다짐도에 따른 제방 붕괴실험 수행	· 지진 발생은 제방의 다짐도에 큰 영향을 미치므로 제방 다짐도에 따른 제방 붕괴 실험 설계(안) 제시 · 하천설계기준의 제방 설계의 다짐도 기준을 고려하여 다짐도가 높은 경우(90%), 다짐도가 낮은 경우(76%)로 제방 붕괴 실험 수행 및 결과 분석
	광학원격탐사(Optical Remote Sensing)를 이용한 광역 제방 모니터링 시스템 개발	인터페이스 시제품 개발 및 시험적용	· ORS 영상정보 획득을 위한 UAV 부착용 3축 짐벌 제작	· 기존 2축 짐벌의 흔들림 보정의 한계점을 보완하기 위해 3축 짐벌 시스템 설계 및 제 · UAV 부착용 3축 짐벌 시범운행 및 현장 테스트 수행
		UAV 활용 제방 ORS 영상 획득 시스템 구축	· 드론에 초분광 센서를 탑재한 ORS 영상 획득 시스 구축 · UAV 활용 초분광 영상 획득 및 분석	· 지진발생 지역을 대상(포항)으로 초분광 영상 획득 · 제방의 침식 및 균열과 같은 취약항목에 대한 초분광 영상 분석
		분광 및 공간정보 기반 취약구간 탐지 알고리즘 개발	· 초분광 영상정보를 활용한 제방의 취약 구간 탐지 알고리즘 개발	· 초분광 영상 정보를 통한 제방 취약 구간에 대한 최대강도값 분석 · 분광 정보를 이용한 제방 취약 구간 탐지 GUI 구축
	제방 제체 분석을 위한 광섬유(Fiber Optic) 최적 센싱 및 분석 기법 개발	제방 모니터링을 위한 광섬유 센싱 최적 시스템 구축	· 광섬유 온도 센싱 데이터 획득 및 데이터 분석	· 실규모 제방에 매립된 광섬유 케이블의 위치별 시간에 따른 온도 정보 획득 · 방대한 양의 제방 내부 온도 정보를 이용하여 제방의 이상현상(침투)을 감지함

3차 연도 (2020)	광섬유(Fiber Optic)를 이용한 제방 제체 모니터링 장치 활용 기술 개발 및 내진 점검 기술 개발	실규모 실험 현장 모니터링 및 적용성 검증	· 실규모 제방 현장 모니터링 및 검증의 완성도 제고	· 광섬유 온도 센싱 시스템을 통한 실규모 제방 현장의 제체 모니터링 수행 · 제방 내부에 설치된 광섬유 온도 센싱 데이터 후처리 프로그램 검증
		하천 제방의 내진 점검 및 모니터링 가이드라인	· 지진에 따른 하천 제방 점검 가이드라인 제시	· 하천설계기준의 제방 설계의 다짐도 기준을 고려하여 제방 다짐도(86%, 74%)에 따른 월류 붕괴 실험 수행 및 결과 분석 · 제방 내진성능 평가 및 안전진단을 위한 가이드라인 작성
		하천 제방의 내진 성능평가를 위한 모니터링 방법	· 내진 성능평가 모니터링 방법의 완성도 제고	· 광학원격탐사 및 광섬유 센싱을 통한 하천 제방의 모니터링 기법 및 가이드라인 작성 · 하천 제방의 유지관리 및 안정성 평가 실무에 활용 가능한 가이드라인 제시
	광학원격탐사(Optical Remote Sensing)를 이용한 광역 제방 모니터링 시스템 개발	실규모 및 현장적용을 통한 인터페이스 장치 검증	· 인터페이스 개발 시제품 시험운행	· 현장적용을 통한 인터페이스 장치 성능 검증 · 제방 취약구간 UAV 기반 초분광 영상촬영 및 초분광 영상자료 검증
		UAV 활용 ORS 영상 분석 기반 제방 안전 진단 플랫폼 구축	· ORS 제방 안전 진단 플랫폼 구축 · 분광 및 공간 정보 기반 제방 안전 진단 현장 적용	· 조도에 따른 제방 취약 구간 탐지 알고리즘 개발 및 검증 · ORS 기반의 제방 안전 진단 현장적용
	제방 제체 분석을 위한 광섬유(Fiber Optic) 최적 센싱 및 분석 기법 개발	제방 모니터링을 위한 광섬유 센싱 최적 시스템 구축	· 광섬유 센싱 시스템 최적화	· 광섬유 온도 센싱 데이터를 활용한 제방 이상 현상 감지 및 모니터링 수행

2. 목표 달성여부

가. 질적성과

본 연구의 연구개발 성과 목표치를 모두 달성하였으며, 연구 수행기관별 수행내용 및 질적성과 목표 달성도는 다음과 같다.

주관연구기관인 한국건설기술연구원은 광섬유를 이용한 제방 제체 모니터링 장치 활용 기술 개발과 제방 내진 점검 및 모니터링 가이드라인 제시를 위해 1차년도에 하천 제방의 제체 구조 및 붕괴 유형 검토와 제방 제체 모니터링 실규모 실험 및 검증, 제방의 지진실험 및 내진설계 선행연구조사, 지진 영향을 고려한 제방파괴 실험 및 분석을 수행하였다. 2차년도에는 하천 제방의 제체 구조 및 붕괴 유형 검토와 제방 제체 모니터링 실규모 실험 및 검증, 지진 영향을 고려한 제방파괴 실험 및 분석을 수행하였다. 마지막으로 3차년도에 수행한 연구는 광섬유를 이용한 제방 제체 모니터링 장치 활용 기술 개발의 적용성 검증을 위해 실규모 제방 실험 현장 모니터링을 수행하였다. 또한, 하천 제방의 내진 점검 및 모니터링 가이드라인을 제시하였다. 이에 대한 연구개발의 질적성과 달성여부는 연구성과 보고서 전문가 평가로 진행하였으며, 전문가 평가를 통해 연구개발 성과 목표치를 달성하였다.

공동연구기관인 주식회사 자연과기술은 UAV 부착용 이미지 센싱 인터페이스 장치 개발과 ORS 모니터링을 통한 제방 안전 진단 플랫폼 구축을 위해 1차년도에 UAV 부착용 이미지 센싱 인터페이스 설계(안), 제방 제체 안정성 취약 구간 탐지 인덱스 조사, UAV 활용 제방 ORS 영상 획득 시스템 구축의 연구를 수행하였다. 2차년도에는 인터페이스 시제품 개발 및 시험적용, UAV 활용 제방 ORS 영상 획득 시스템 구축, 분광 및 공간 정보 기반 취약 구간 탐지 알고리즘 개발의 연구를 수행하였다. 마지막으로 3차년도에 수행한 연구는 UAV 활용 ORS 영상 분석 기반 제방 안전 진단 플랫폼을 구축하여 실규모 및 현장 적용을 수행하였으며, UAV 부착용 이미지 센싱 인터페이스 시제품 시험 운행을 진행하였다. 이에 대한 연구개발의 질적성과 달성여부는 연구성과 보고서 전문가 평가로 진행하였으며, 전문가 평가를 통해 연구개발 성과 목표치를 달성하였다.

공동연구기관인 네덜란드 Delrates는 광섬유 센싱 모니터링 시스템 구축을 위해 제방 모니터링을 위한 광섬유 센싱 최적 시스템 구축 연구를 수행하였다. 연구 수행을 통해 광섬유 센싱 시스템 최적화 및 광섬유 센싱 시스템의 대용량 데이터 분석 기법을 제시하였다. 이에 대한 질적성과 평가방법은 보고서 전문가 평가로 수행하였으며, 전문가 평가를 통해 연구개발 성과 목표치를 달성하였다.

표 3.2.1 성과점검기준표(총괄)

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수
						질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	A	광섬유를 이용한 제방 제체 모니터링 장치 활용 기술 개발	A-1	하천 제방의 제체 구조 및 붕괴 유형 검토	①	수리/수문 구조 분석 사례 자료 조사 보고서	80점	88점	보고서 전문가 평가	평가 점수	10	논문 : 4/3*(1) 학술발표 : 7/7 가이드라인 : 1/1 SW : 1/11 *(): SCI(E) 1건 심사중(2021.2)
					②	제방 붕괴 유형 조사 및 검토 보고서	80점	93점	보고서 전문가 평가	평가 점수	10	
			A-2	제방 제체 모니터링 실규모 실험 및 검증	①	시스템 구축에 대한 구체성 – 검토 대상항목 5개	80점 /5개 항목	88점	보고서 전문가 평가	평가 점수	15	
					②	실험 모형 설계 및 제작	1건	1건	설계(안)	설계(안) 작성 여부	10	
					③	제방 모니터링 실규모 실험방법 적정성 및 검증 횟수 2회	80점 /2회	93점/2회	보고서 전문가 평가	평가 점수	10	
			A-3	현장 모니터링 및 적용성 검증	①	후보지 선정 및 기초자료 조사의 적절성	90점	93점	보고서 전문가 평가	평가 점수	5	
					②	후보지 특성 분석 및 센서 설치의 완성도	90점	93점	보고서 전문가 평가	평가 점수	10	
					③	현장 모니터링 및 검증의 완성도	현장 적용 1건	현장적용 1건	현장적용 보고서	시스템 구축 여부	15	
주관	B	광학원격탐사 및 광섬유 센싱을 통한 제방 내진 점검 및 모니터링 가이드라인 개발	B-1	제방의 지진실험 및 내진설계 선행연구조사	①	제방의 지진실험 및 내진설계 관련 자료 조사의 완성도	80점	88점	보고서 전문가 평가	평가 점수	20	
			B-2	지진 영향을 고려한 제방파괴 실험 및 분석	①	실험 방법론의 구체성 및 적절성	80점	87점	학술논문 및 보고서 전문가 평가	평가 점수	10	
					②	지진파괴 유형실험 모형 규모 및 적정 실험 설계(안) 도출	1건	1건	설계서 작성	설계서 작성 여부	5	
					③	수리실험 수로 구축 실험장치 제작	1건	1건	장비 구축 영상	동영상 증빙	5	
					④	수리실험실증	80점	93점	실험영상 및 보고서 전문가 평가	평가 점수	15	
			B-3	하천제방의 내진 점검 가이드라인	①	지진에 따른 하천 제방의 점검 가이드라인	1건	1건	가이드라인	가이드라인 제시 여부	15	
			B-4	하천제방의 내진 성능평가를 위한 모니터링 방법 개발	①	내진 성능평가 모니터링 방법의 완성도	85점	91점	보고서 전문가 평가	평가 점수	10	
공동	C	UAV 부착용 이미지 센싱 인터페이스 장치 개발	C-1	UAV 부착용 이미지 센싱 인터페이스 설계(안)	①	인터페이스 설계(안)적정성	80점	84점	설계(안) 전문가 평가	평가 점수	15	
			C-2	인터페이스 시제품 개발 및 시험적용	①	인터페이스 시제품 개발 완성도	90%	90%	설계안과 일치여부	시제품 제시	15	
			C-3	실규모 및 현장적용을 통한 인터페이스 장치 검증	①	인터페이스 개발 시제품 시험운행	1건	1건	인터페이스 장착 및 작동 여부	시제품시연 /특허출원	15	
공동	D	ORS 모니터링을 통한 제방 안전 진단 플랫폼 구축	D-1	제방 제체 안정성 취약 구간 탐지 인덱스 조사	①	제체 안정성 취약 인자 및 지표 추출	85점	100점	인자 및 지표 최소 2개 이상 추출	보고서	10	특허 : 출원 1/1 등록 1/1 학술발표 : 3/5 시제품 : 1/1 S/W : 2/2 현장검증 : 3/3 연구개발홍보 : 1/1
			D-2	UAV 활용 제방 ORS 영상 획득 시스템 구축	①	영상 획득 시스템 구축	해상도 데시미터급 이하	해상도 데시미터급 이하	시스템 시험 운영	시스템 운영 계획서 제시 여부	15	
					②	영상 획득 시스템 안정성 확보	80점	89점	전문가 평가	평가 점수	10	
			D-3	분광 및 공간 정보 기반 취약 구간 탐지 알고리즘 개발	①	취약 구간 탐지 알고리즘 개발	1건	1건	SW개발	SW등록	15	
			D-4	UAV 활용 ORS 영상 분석 기반 제방 안전 진단 플랫폼 구축	①	ORS 제방 안전 진단 플랫폼 구축	90점	91점	보고서 전문가 평가	평가 점수	10	
					②	분광 및 공간 정보 기반 제방 안전 진단 현장적용 결과	유의수준 10% 이내	유의수준 10% 이내	현장조사 결과 유의성 (10% 이내)	보고서 /논문	15	
공동	E	광섬유 센싱 모니터링 시스템 구축	E-1	제방 모니터링을 위한 광섬유 센싱 최적 시스템 구축	①	광섬유 시스템 사전 테스트를 통한 제체 센싱 정도 평가	온도 변화 센싱 1회	1회	사전 테스트 결과 보고서	결과 보고서 작성 여부	5	현장검증 : 1/1
					②	광섬유 센싱 시스템의 대용량 데이터 분석 기법	85점	90점	실험 분석 보고서	평가 점수	5	
					③	광섬유 센싱 시스템 최적화 결과	90점	94점	보고서 전문가 평가	평가 점수	5	
계											300	특허 : 출원 1/1 등록 1/1 논문 : 4/3(1) 학술발표 : 10/12 시제품 : 1 /1 S/W : 3/13 현장검증 : 4/4 가이드라인 : 1/1 연구개발홍보 : 1/1

나. 양적성과

본 연구의 양적성과의 목표치는 SCI(E) 1건, 국내논문 3건, 학술발표 10건, 특허 출원 1건, 특허 등록 1건, 시제품 제작 1건, S/W 등록 3건, 연구개발홍보 1건, 현장검증 4건이며, 연구 수행결과 양적성과 건수는 SCI(E) 1건(심사중), 국내논문 3건, 학술발표 12건, 특허 출원 1건, 특허 등록 1건, 시제품 제작 1건, S/W 등록 13건, 연구개발홍보 1건, 현장검증 4건으로 목표치 추가 및 초과 달성하였다

표 3.2.2 연구개발 양적성과 달성

구분	성과지표	목표	달성건수	달성도	비고
학술적 성과	1. 학술지 게재 논문건수(국내/국외)	3	3	100%	-
	2. SCI(E)급 학술지 게재 논문건수	1	1	100%	심사중
	3. 학술회의 발표 논문건수(국내/국외)	10	12	100% 초과	-
기술적 성과	4. 특허 출원(국내/국외)	1	1	100%	-
	5. 특허 등록(국내/국외)	1	1	100%	-
	6. 소프트웨어(S/W) 등록건수	3	13	100% 초과	-
	7. 신기술 지정	-	-	-	-
	8. 시제품 출시/현장시험 건수	1	1	100%	-
경제적 성과	9. 사업화/제품화(매출실적)	-	-	-	-
	10. 현장적용에 의한 비용절감 또는 수입대체효과	-	-	-	-
공공적 성과	11. 정책제안/채택	-	-	-	-
기타 성과	12. 현장시험 및 검증	4	4	100%	-
	13. 인력양성	-	-	-	-
	14. 포상	-	-	-	-
	15. 산학연간 기술지원(MOU 등)	-	-	-	-
	16 연구개발 관련 홍보건수	1	1	100%	-

제4장

연구개발성과의 활용 계획

1. 연구성과 활용분야 및 방안

가. 제방 유지관리 모니터링 및 내진점검 분야 정책 반영

(1) 정부 지자체 실무 적용 방안

· 정부/지자체가 관리하고 있는 하천의 제방 유지관리 모니터링 작업의 효율성 제고를 위한 개발 기술의 실무 적용 지침 마련

· 국토관리청별로 수행 중인 드론을 이용한 하천지형조사, 하상변동조사 등의 시법사업에서 도출될 표준수행절차 및 품셈(공정별 대가기준) 자료를 참고하여 광학원격탐사를 활용한 제방 모니터링 현장 적용성과 활용성 검증

· 국토교통부의 하천기본계획 수립을 위한 하천측량 부분뿐만 아니라 제방 안전관리 서비스에도 개발기술이 활용될 수 있도록 구체적 적용 방안 제시(제방 관리자 점검 기준표 등)

· 경상북도 및 포항시를 대상으로 개발기술(소프트웨어 등) 활용을 위한 지자체 협의 및 현장적용, 연구성과물의 지속적인 개선과 보완을 통해 실용화(조달청 등록, 기술사업화 등) 추진

(2) 하천설계기준 등 설계 기준 개정 방안

· 한국건설기술연구원의 국가건설기술센터는 국가주요시설물의 설계 기준(하천설계기준 포함) 개정, 수요조사, 분과별 위원회 등을 운영하고 있으며 이를 통해 설계기준의 수요와 방향성 등을 검토하고 국토교통부와의 연계를 통해 설계 기준을 개정하는 업무를 수행

· 본 연구에서는 이러한 국가건설기술센터와의 협력을 통해 수요처와의 협의를 수행하고 하천설계기준 등에 반영할 수 있는 개정 방안을 제시할 계획

· 또한 한국건설기술연구원과 국토교통부 및 환경부, 지방국토관리청, 한국수자원공사 등과의 정책 협의회를 활용하여 제방 유지관리 분야의 실무자와의 협의를 추진하고 수요처에 맞는 연구 성과로 도출하기 위한 방안을 마련

· 수요를 고려한 제방 내진 점검 및 유지관리 모니터링 분야의 가이드라인 제시

나. 하천시설물 모니터링 및 재난재해 대책 마련 실무 적용

(1) 잦은 홍수해 및 지진의 발생 지역

· 홍수 위험성이 높은 지역에 대한 투자를 우선 시 할 수 있어 향후 발생할 수 있는 치수관련 피해를 줄임으로 인해 피해발생비용 및 복구비용 감축

· 빈번한 수재해 예방 측면의 방재 공조 체계 확립 가능

· 지진, 홍수 등 자연재해 후 제방균열 등 변화에 대한 진단 및 평가 모니터링 활용

(2) 효율적인 방재시설의 위치선정 및 효과 검증

· 미리 진단된 Data를 제방 붕괴위험 예측과 방재대책, 주민대피 대책 수립

· 범람 시 홍수가 미칠 수 있는 범위를 진단하여 방재대책 수립

(3) 하천 주변 재해 시뮬레이션 시스템 개발

· 모니터링과 안전 진단을 통한 재해 예방, 피해 예상, 재해 복구 등의 분야에서 활용 가능

2. 최종성과물 활용계획

○ 하천의 제방 유지관리 모니터링 작업의 효율성 제고를 위한 개발 기술의 실무 적용 지침(안) 제시

· 국토관리청별로 수행 중인 드론을 이용한 하천지형조사, 하상변동조사, 하상변동조사 교육 등의 시범사업('18.11~'21.12)에서 도출될 표준수행절차 및 품셈(공정별 대가기준) 자료를 참고하여 광학 원격탐사를 활용한 제방 모니터링 현장 적용성과 활용성 검증

○ 하천 유지관리 분야 드론 활용 제도(안) 사업 종료 이후 하천설계기준 등 설계 기준 개정(안) 제시(본 연구과제 종료 이후)

· 한국건설기술연구원의 국가건설기술센터는 국가주요시설물의 설계 기준(하천설계기준 포함) 개정, 수요조사, 분과별 위원회 등을 운영하고 있으며 이를 통해 설계기준의 수요와 방향성 등을 검토하고 국토교통부와의 연계를 통해 설계 기준을 개정

○ 정책적 수요를 고려한 제방 내진 점검 및 유지관리 모니터링 분야의 설계 기준(안) 제시

○ 국내 하천 제방을 대상으로 다양한 지질조건의 균열, 비균열 분광정보의 구축 및 현장검증 통한 국토교통부 기술사업화 과제(22년 제안 추진) 추진

참고문헌

국토교통부(2018), 하천설계기준

국토해양부(2012), 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침해설서(제방).

국토해양부(2012), 하천유지·보수 매뉴얼.

한국건설기술연구원(2004), 하천제방 관련 선진기술 개발보고서.

한국농어촌공사 기술안전품질원(2017) 경북지역본부 요청 저수지 긴급점검 결과보고.

행정안전부(2018) 2017 포항지진 백서.

Ahn M., Bae. I., Ji U. and Kang J. (2020). "Large-scale Levee Monitoring Experiment Using Fiber-optic Sensor and Distributed Temperature Sensing System" Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering, Vol. 7, pp.181-188.

Ahn M., Ko. D., Ji U. and Kang J. (2019). "Experimental Study on Levee Monitoring System for Abnormality Detection Using Fiber Optic Temperature Sensing" Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering, Vol. 6, pp. 120-127.

ASCE/EWRI Task Committee on Dam/Levee Breaching. (2011). Earthen embankment breaching. Journal of hydraulic engineering, 137(12), 1549-1564.

Bae, I. and Ji, U. (2019). "Outlier detection and smoothing process for water level data measured by ultrasonic sensor in stream flows." Water, Vol. 11(5), pp. 951.

Behmann, J., Steinrücken, J. and Plümer, L. (2014), "Detection of early plant stress responses in hyperspectral images." Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 93, pp. 98-111.

Brown, R.G. (1963). "Smoothing, Forecasting and Prediction of Discrete Time Series." https://books.google.co.kr/books?id=JnZjNAEACAAJ. Accessed 14 June 2019.

Danka, J., and Zhang, L. M. (2015). "Dike failure mechanisms and breaching parameters." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 141: 04015039.

Dierssen, H. M., Chlus, A. and Russell, B. (2015), "Hyperspectral discrimination of floating mats of sea grass wrack and the macroalgae Sargassum in coastal waters of Greater Florida Bay using airborne remote sensing." Remote sensing of environment, Vol. 167, pp. 247-258.

Evangelista, S. (2015). Experiments and numerical simulations of dike erosion due to

a wave impact. Water, 7(10), 5831-5848.

Feliciano Cestero, J. A., Imran, J., and Chaudhry, M. H. (2014). "Experimental investigation of the effects of soil properties on levee breach by overtopping". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 141, No. 4, 04014085.

Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A. (1998). "Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic application." Journal of Hydraulic Research, Vol. 36, No. 3, pp. 397-414.

Habel, W. R., and Krebber, K. (2011). "Fiber-optic sensor applications in civil and geotechnical engineering." Photonic sensors, 1(3), 268-280.

Haest, M., Cudahy, T., Rodger, A., Laukamp, C., Martens, E. and Caccetta, M. (2013), "Unmixing the effects of vegetation in airborne hyperspectral mineral maps over the Rocklea Dome iron-rich palaeochannel system (Western Australia)." Remote Sensing of Environment, Vol. 129, pp. 17-31.

Hanson, G. J., Cook, K. R., and Hunt, S. L. (2005), "Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments." Trans. ASABE, Vol.48, No.5, 1783-1794.

Hanson, G. J., and Hunt, S. L. (2006). "Lessons learned using laboratory jet test method to measure soil erodibility of compacted soils." In 2006 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Kim J. M. and Moon I. J. (2017), "Analysis of River Levee Failure Mechanism by Piping and Remediation Method Evaluation." Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 18, No. 3, pp. 600-608.

Kim J. M., Park M. C., Moon I. J. and Jin Y. H. (2017), "Model Tests for Examination of Overflow Failure Mechanism on River Levee." Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol.16, No.1, pp. 41-52.

Kim J. Y., Kim Y. S. and Soog Y. H. (2007), "A Study on the Comparison between an Optical Fiber and a Thermal Sensor Cable for Temperature Monitoring." Journal of the Korean Geotechnical Society , Vol.23, No.4, pp. 15-24.

Kim K. S., Bae D. S. Koh Y. K. and Kim J. Y. (2009), "Monitoring System of Rock Mass Displacement and Temperature Variationfor KURT using Optical Sensor Cable." Journal of Engineering Geology, Vol.19, No.1, pp. 63-70.

Kim S., Choi S. H. and Lee S. (2016), "Analysis of Influence for Breach Flow According to Asymmetry of Breach Cross-section." Journal of the Korea

Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 17, No. 5, pp. 557-565.

Ko D. W. and Kang J. G. (2018), "Analysis of Breach Mitigation Effect on Levee made with New Substance by Overtopping." Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 19, No. 2 pp. 1-8.

Kodikara, G. R., Woldai, T., Van Ruitenbeek, F. J., Kuria, Z., Van der Meer, F., Shepherd, K. D. and Van Hummel, G. J. (2012), "Hyperspectral remote sensing of evaporate minerals and associated sediments in Lake Magadi area Kenya." International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 14, pp. 22-32.

Kurakami (2018)." 耐越水…性 · 耐浸透性 · 耐震性を兼ね備えた 新しい複合型河川堤防の提案と 大型模型實驗による檢証" Ph.D Dissertations, Tokyo University of Science.(In Japanese).

Lausch, A., Heurich, M., Gordalla, D., Dobner, H. J., Gwillym-Margianto, S. and Salbach, C. (2013), "Forecasting potential bark beetle outbreaks based on spruce forest vitality using hyperspectral remote-sensing techniques at different scales." Forest Ecology and Management, Vol. 308, pp. 76-89.

Lee, C. K., Kim, Y. S., Gu, M. M., and Kim, B. G. (2010). "Real time temperature monitoring system using optic fiber sensor." Journal of The Korea Society of Computer and Information, Vol. 15, pp. 209-216.

Lee J. (2011). "Damage Detection Method for Structures Using Distributed Fiber Optic Sensor and Strain Mode." Journal of the Architectural Institute of Korea 27:47-54.

Lee, K. H. and Lee, S. H. (2012), "Monitoring of floating green algae using ocean color satellite remote sensing." Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, Vol. 15, pp. 137-147.

Mhanolakis, D., Marden, D. and Shaw, G. (2003), "Hyperspectral image processing for automatic target detection applications." Lincoln Laboratory Journal, Vol. 14, pp. 79-116.

Mitchener, H., and Torfs, H. (1996). "Erosion of mud/sand mixtures." Coastal engineering, 29(1-2), 1-25.

Mohamed, M.A.A., Morris, M., Hanson, G.J. and Lakhal, K.(2004), "Breach Formation: Laboratory and Numerical Modeling of Breach Formation", Proc. Dam Safety 2004, ASDSO Phoenix, Arizona, USA.

Nakajima, H. (2003), River Levee, Kibodang Press, pp.65-89(In Japanese).

Park, H. L. and Choi, J. W. (2017), "Accuracy evaluation of supervised classification by using morphological attribute profiles and additional band of hyperspectral imagery." Journal of the Korean Society for Geo-Spatial Information Science, Vol. 25, pp. 9-17.

Park, Y. J., Jang, H. J., Kim, Y. S., Baik, K. H. and Lee, H. S. (2014), "A research on the applicability of water quality analysis using the hyperspectral sensor." Journal of the Korean Society for Environmental Analysis, Vol. 17, pp. 113-125.

Pyayt, A., Kozionov, A., Mokhov, I., Lang, B., Meijer, R., Krzhizhanovskaya, V., and Sloot, P. (2014). "Time-frequency methods for structural health monitoring. Sensors," 14(3), 5147-5173.

Raffel, M., Willert, C., Wereley, S., and Kompenhans, J. (2007). Particle image velocimetry, a practical guide, Springer.

Roh, Y. (2005). Development of river discharge measurement technique using image analysis. Ph. D. dissertation, Myongji University.

Sasaki, Y., Towhata, I., Miyamoto, K., Shirato, M., Narita, A., Sasaki, T., and Sako, S. (2012). "Reconnaissance report on damage in and around river levees caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake." Soils and Foundations, 52(5), 1016-1032.

Schenato, L. (2017). "A review of distributed fibre optic sensors for geo-hydrological applications." Applied Sciences, 7(9), 896.

Schiereck, G. J. (1998). Fundamentals on water defences. TAW-ENW report.

Schmocker, L., and Hager, W. H. (2012). Plane dike-breach due to overtopping: Effects of sediment, dike height and discharge. Journal of Hydraulic Research, 50(6), 576-586.

Sekuła, K., Połeć, M., and Borecka, A. (2018). "Innovative solutions in monitoring systems in flood protection." In E3S Web of Conferences (Vol. 30, p. 01005). EDP Sciences.

Seo, J. J. (2017), "The Study on land cover classification of hyperspectral image using decision tree method." Master's thesis, Chonbuk University, Chonju.

Su, H., Ou, B., Yang, L., and Wen, Z. (2018). "Distributed optical fiber-based monitoring approach of spatial seepage behavior in dike engineering." Optics & Laser Technology, 103, 346-353.

van Baars, S., and van Kempen, I. M. (2009). "The causes and mechanisms of

historical dike failures in the Netherlands." Official Publication of the European Water Association.

Visser, P. J. (1999). Breach erosion in sand-dikes. In Coastal Engineering 1998 (pp. 3516-3528).

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 물관리연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 물관리연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.