

20AWMP-C
140166-03

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

물관리연구사업

R&D / 20AWMP-C140166-03

[부록]

광학원격탐사(ORS)와 광섬유 센싱을 통한 제방 내진점검 및 모니터링 가이드라인

2020. 12. 31.

주관연구기관 / 한국건설기술연구원
공동연구기관 / 주식회사 자연과기술
공동연구기관 / Deltares

모니터링 가이드라인
광학원격탐사(ORS)와
광섬유 센싱을 통한
제방 내진점검 및
국토교통과학기술진흥원
국토교통부

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

〈 목 차 〉

제1장 서론	1
1. 가이드라인의 개발 배경 및 필요성	1
2. 가이드라인 활용 목적	2
3. 가이드라인 내용 및 구성	2
제2장 하천 제방의 내진점검 및 모니터링	4
1. 제방의 내진 점검	4
2. 광섬유 센싱을 통한 제방(제체) 내진점검 및 모니터링	12
3. UAV 기반 ORS를 활용한 제방 내진점검 및 모니터링	19
제3장 하천 제방의 내진점검 및 모니터링 활용 프로그램	25
1. 제방 내부에 설치된 광섬유 온도 센싱 데이터 후처리 프로그램	25
2. 제방 균열 평가 프로그램	31
제4장 결론 및 제언	38
참고문헌	39

〈 표 목 차 〉

표 2.1.1 하천시설의 설계거동한계(하천설계기준, 2018)	5
표 2.1.2 하천시설별 내진등급 적용기준(하천설계기준, 2018)	5
표 2.1.3 계획홍수량에 따른 여유고	7
표 2.3.1 3축 인터페이스의 주요기능	20
표 2.3.2 드론과 센서의 제원	22
표 2.3.3 분광 분석의 통계 결과(예시)	24
표 3.2.1 Hyper SpecⅢ 및 Aipro flight(드론) 설정	33
표 3.2.2 촬영시간 및 환경조건	33

〈 그림 목 차 〉

그림 2.1.1 액상화 점검을 위한 토층분류법(일본 국토교통성, 2016)	8
그림 2.1.2 기초지반의 조건과 지진에 의한 제방 침하량의 관계(지형 구분에 따른 위험도 랭크가 A인 경우)(일본 국토교통성, 2016)	9
그림 2.1.3 기초지반의 조건과 지진에 의한 제방 침하량의 관계(지형 구분에 따른 위험도 랭크가 B인 경우)(일본 국토교통성, 2016)	9
그림 2.2.1 광섬유 온도 센싱의 원리(Lee, 2011)	13
그림 2.2.2 광섬유 센서 설치 매립 계획(안) 및 매립도	14
그림 2.2.3 광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템(DTS) 연결 및 설치	15
그림 2.2.4 DTS Model 및 Mode 설정	15
그림 2.2.5 DTS channel 설정	15
그림 2.2.6 DTS 온도 측정 설정	16
그림 2.2.7 DTS 온도 측정 그래프 설정	16
그림 2.2.8 체체 온도 측정 결과 및 후처리 결과	17
그림 2.2.9 실규모 제방 내부의 온도 변화 및 온도차 그래프(Ahn et al., 2020)	17
그림 2.2.10 침투 경과 시간에 따른 제방 내부의 온도 분포(Ahn et al., 2020)	18
그림 2.3.1 UAV 부착용 3축 짐벌 설계도면	20
그림 2.3.2 UAV를 활용한 제방 ORS 영상 획득 시스템의 구성 및 취약구간 분석 과정	21
그림 2.3.3 비균열과 균열 영역의 파장에 따른 강도값 비교	23
그림 2.3.4 균열 여부에 따른 최대강도와 조도 비교	23
그림 3.1.1 광섬유 온도 센싱 데이터 후처리 프로그램의 실행 화면	25
그림 3.1.2 온도 데이터의 선택 화면 및 입력 자료의 구축	25
그림 3.1.3 프로그램 입력 자료 구성의 예(xlsx 형식)	26
그림 3.1.4 광섬유 온도 센싱 데이터 입력	27
그림 3.1.5 광섬유 위치 정보 및 스무딩계수 입력	28
그림 3.1.6 스무딩계수가 0.1로 적용된 시간에 따른 온도 변화 후처리 결과의 예	29
그림 3.1.7 제방 내부의 온도 변화 및 온도차 결과의 예	29
그림 3.1.8 제방 단면의 온도 분포(침투 전)	29

그림 3.1.9 제방 단면의 온도 분포(침투 진행)	29
그림 3.1.10 제방 내부의 온도 정보를 기반으로 이상현상 모니터링 실행	30
그림 3.1.11 제방 내부의 온도차를 이용한 이상현상 모니터링의 예	30
그림 3.1.12 신뢰구간을 초과하는 구간의 이상현상 감지 예	30
그림 3.2.1 제방 균열 평가 프로그램의 구성	31
그림 3.2.2 수심예측계산 자동화 프로그램의 구성	32
그림 3.2.3 Fov Calculator 설정창에서 Speed to frame rate 값으로 설정	33
그림 3.2.4 Capture 설정창에서 Exposure값과 Frame period값을 Speed to Frame Rater값으로 동일하게 설정	33
그림 3.2.5 Flight Plane 고도 및 속도 비행경로 지정	34
그림 3.2.6 초분광 영상 획득	34
그림 3.2.7 제방 균열 평가 소프트웨어 실행 화면	35
그림 3.2.8 제방 균열 프로그램 결과 화면	36
그림 3.2.9 제방 취약구간 탐지를 위한 수심예측계산 자동화 프로그램 실행 화면	36
그림 3.2.10 수심예측계산 자동화 프로그램 결과 화면	37

제1장

서론

1. 가이드라인 개발 배경 및 필요성

극한 수재해 및 지진 등 예기치 못한 자연재해의 증가로 인해 국내 하천 수리구조물의 안정성 확보에 대한 중요성과 필요성이 지속적으로 제기되고 있다. 특히, 2016년 9월 경주와 2017년 11월 포항 지역에서 강진이 발생과 이로 인해 여러 곳에서 발생한 제방 붕괴로 인해 제방 내진점검 및 모니터링 방법의 기술 개발과 체계화의 필요성이 강조되고 있다. 이와 같은 지진으로 인한 제체의 변화는 집중호우 및 홍수 발생 시 제방이 붕괴되는 2차 재난재해로 이어질 수 있기 때문에 지진발생 전·후의 제방 내진점검 및 모니터링에 대한 구체적인 방법이 제시되어야 한다. 국내에서 제시된 시설물별 내진설계 기준의 설계 지진규모는 5.1~6.2이며, 지진 이후 발생하는 집중호우 및 이상홍수 등으로 인한 2차 재해 발생을 고려했을 때는 더 이상 안전한 설계기준으로 볼 수 없을 뿐만 아니라 제방 축조 이후 지속적인 제방 점검 및 모니터링 수행만이 제방의 안정성을 확보할 수 있는 방법이라고 할 수 있다. 특히 국내의 지진 피해 현황 및 지질학적 요인들을 고려하여 안정적 제방 운용을 위한 하천 제방의 내진점검 및 모니터링 기술이 개발될 필요가 있다.

하천의 제방은 수십에서 수백 km까지 축조되어 있어 기존의 물리탐사기법에만 의존할 경우 많은 비용과 시간이 소요된다. 따라서 이를 극복하기 위해 제방의 규모 및 작업의 효율성을 고려한 첨단 모니터링 기술 개발이 지속적으로 진행되어왔다. 하지만, 이러한 첨단 모니터링 기술을 하천 제방의 안정성을 진단하고 평가하는 실무에서 바로 적용하기 위한 구체적인 기술 검증과 가이드라인 개발이 아직까지는 미흡한 실정이다. 이에 본 가이드라인에서는 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 소개하고, 이를 기반으로 재난재해로 인한 제방의 균열, 붕괴, 침식 등의 피해를 사전에 예방하고 위험에 대응하는 속도를 향상시킬 수 있는 정보를 제공하고자 한다.

본 가이드라인에서는 하천 제방의 홍수 및 지진 등의 재난재해를 사전에 예방 혹은 즉각 대처할

수 있는 국내 상황에 적합한 제방 내진점검 및 모니터링 기술을 소개한다. 광학원격탐사(ORS)와 광섬유 센싱 기반의 광역·국부 제방 모니터링 시스템을 활용한 하천 제방의 내진점검 및 모니터링 방법과 프로그램 활용 가이드라인을 제공하여 궁극적으로 제방의 안정성 평가 및 의사결정을 위한 정보를 도출하는데 기여하고자 한다.

2. 가이드라인 활용 목적

기존의 물리탐사기법 기반의 모니터링 방법을 개선하기 위해 본 가이드라인에서는 광역 제방 모니터링 목적의 광학원격탐사(ORS) 방법을 소개하고자 하며, 주요 시설물 주변 등의 국부 제방 모니터링을 위한 광섬유 온도분포 센싱을 통한 제방 모니터링 시스템 활용 방법을 제시하고자 한다. 제방 안정성 진단 및 유지관리를 위한 효율성 제고를 위한 두 가지 광역 및 국부 제방 모니터링 방법의 절차를 체계화하였으며, 이를 하천 현장과 실무에 적용할 수 있는 가이드라인으로 도출하였다.

본 가이드라인에서 소개하고자 하는 광섬유 온도 센싱을 활용한 제방(제체) 모니터링 기술과 분광 및 공간 정보 기반의 광학원격탐사를 활용한 제방 표면 모니터링 기술은 2018년부터 수행한 국가연구개발사업의 연구성과를 기반으로 도출된 성과이며, 특히 실규모 제방 실험장 및 현장 제방 사이트에서의 시험 적용을 통해 기술의 완성도 및 활용 방안 검증된 기술이다. 한편, 본 가이드라인에서 다루는 제방 모니터링 기술은 광섬유 온도 분포 센싱과 광학원격탐사 기술에만 한정된 것이며, 향후 기후변화 대응 제방 모니터링 기술은 다양한 미래 기술을 활용한 개선된 기술 형태로 발전될 것이다.

3. 가이드라인 내용 및 구성

본 가이드라인에서는 하천 제방의 내진점검 절차 및 방법, 광섬유 온도 센싱을 활용한 제방(제체) 모니터링과 광학원격탐사(ORS)를 활용한 제방 내진점검 및 모니터링 기술에 대해 서술하였으며, 제방 내진점검 및 모니터링에 활용되는 첨단 센서와 장비, 측정 방법, 데이터 처리, 프로그램 소개 및 활용방법 등을 제시하였다.

하천 제방의 내진점검 및 현장 모니터링 수행을 위한 절차 및 방법은 국외(일본)의 제방 내진점검 매뉴얼을 주로 참고하였다. 내진점검의 주요 과정은 1차 내진점검을 통해 긴급 보수·보강이 필요한 하천 제방에 대해 대책을 마련하고, 경미한 제방 피해가 발생한 영역에 대해서는 2차 내진점검을 실시하여 제방의 안정성 진단 및 평가를 실시하도록 하는 순서이다. 이러한 내진점검 과정에서 활용 가능한 모니터링 방법들 중 본 가이드라인에서는 광섬유 센서와 광학원격탐사 기술을 활용한 모니터링 방법과 절차를 소개한다. 먼저, 광섬유 센서를 통해 제방 내부의 온도 변화 자료를 중장기적으로

수집하여 이를 기반으로 제방의 안정성을 판단할 수 있는 자료 구축 과정을 설명하였다. 또한, 제방의 이상 현상을 감지하고 사전 대응 및 대책 수립을 위한 의사 결정 자료를 제공할 수 있는 ‘제방에 설치된 광섬유 온도 센싱 데이터 후처리 프로그램’을 소개하고 사용 매뉴얼에 대한 내용을 제시하였다. 다음으로는 UAV(Unmanned Aerial Vehicle) 기반의 광학원격탐사(ORS, Optical Remote Sensing) 기법을 활용한 광역형 제방 모니터링 가이드라인을 제시하였으며, 광범위한 제방의 안정성 평가와 유지관리 소요시간 및 비용 절감을 위한 모니터링 방법을 설명하였다. 제방 표면에 영상 정보를 획득하여 분광 및 공간 정보 분석 기반의 제방 표면 이상 현상을 판단하는 프로그램(수심에 측계산 자동화 프로그램, 제방 균열 평가 프로그램)을 소개하고 활용 방법을 서술하였다.

제2장

하천 제방의 내진점검 및 모니터링

1. 제방의 내진점검

가. 국내 하천 시설물의 내진점검 현황

국내에서는 2016년 9월 12일 경주 및 2017년 11월 15일 포항지역에서 발생한 강진으로 지진에 대한 불안감이 크게 확산되고 있다. 경주 지진은 규모 5.8의 강진으로 한반에서 최대 규모의 지진이 발생하여 부상자 23명, 피해액 110억원, 복구비 145억원의 자연재해가 발생하였다. 포항지역은 규모 5.4의 지진으로 부상 92명, 피해액 551억원, 복구비 1,445억원의 자연재해가 발생하였다. 지진에 의한 피해 규모가 증가하면서 국내 하천 내진설계 및 법 규정이 지속적으로 강화되고 있다. 특히, 하천 내진설계는 2018년 12월에 하천 내진설계 기준을 검토하고 일부 개정하였으며, 하천 시설의 내진설계에 대한 기본적인 요건과 고려할 사항들을 제시하였다. 하천 시설 중에 제방의 경우 표 2.1.1과 같이 설계거동한계를 제시하였고, 내진등급 적용기준은 표 2.1.2와 같은 기준을 제시하였다. 하천 시설의 내진설계 기준이 강화되면서 설계 이후에 제방 내진성능 수준을 모니터링하기 위한 지침 마련의 필요성이 요구되고 있다. 제방의 내진성능이란 지진이 발생한 후에 제방의 내진성능 조사를 통해 제방으로써 기능을 유지하는가에 대한 여부를 판단한다. 여기서, 제방의 기능은 하천의 유수를 원활하게 유지시키고 제내지의 월류를 방지하여 제내지를 보호하는 중요한 기능을 의미한다. 내진설계 및 내진성능 유지관리에 대한 기준이 수립된 것에 비해 하천 제방 내진점검 및 모니터링에 대한 구체성이 매우 미흡하다. 지진으로 인해 제방의 월류 및 붕괴를 방지하기 위해서는 내진점검 및 모니터링을 체계적으로 수행하여 신뢰성 있는 조사 결과를 기반으로 보수·보강 대책을 마련해야 한다. 이에 따라, 본 가이드라인에서는 첨단 센서를 활용하여 제방 내부 및 표면을 모니터링할 수 있는 기술 개발 결과를 토대로 제방의 내진점검 및 모니터링을 위한 광학원격탐사(ORS)와 광섬유 센싱을 통한 제방 모니터링 기술을 제시하였다.

표 2.1.1 하천시설의 설계거동한계(하천설계기준, 2018)

구분		기능수행수준	붕괴방지수준
허용되는 피해	제방	· 지진에 의한 사면붕괴 및 액상화로 발생한 독마루의 침하량이 제체의 설계허용잔류침하량 이내	· 지진에 의한 사면붕괴 및 액상화로 발생한 독마루의 침하량이 내진설계 시 고려한 외수를 방어 할 수 있는 범위 이내
	콘크리트시설	· 시설물의 미세한 균열 · 미세한 지반침하 · 구조물의 미세한 변형	· 시설물의 미세한 균열 · 미세한 지반침하 · 구조물의 미세한 변형 · 전체 구조물의 안전에 관계없는 2차 부재 파괴
	개폐 시설	· 지진시 작용하는 수평력이 문기둥의 관성력 이내이고, 잔류변위가 허용잔류변위 이내	· 지진시 작용하는 수평력이 문기둥의 관성력 이내이고, 허용잔류변위가 문짝개폐를 방해하지 않는 허용변위각 이내
허용되지 않는 피해		· 허용범위를 초과하는 변위 · 과잉간극수압에 의한 액상화 · 편토압에 의한 시설물의 절대 위치 변화	· 구조물 내부의 수용시설에 대한 피해 · 제방 외 구조물에서 과잉간극수압에 의한 액상화 · 지반침하에 의한 주변시설물의 붕괴나 과도한 침하

표 2.1.2 하천시설별 내진등급 적용기준(하천설계기준, 2018)

하천시설	구 분	적 용 기 준
제방 (특수제 포함)	1) 하천의 주요구간	제내지반고가 외수위보다 낮은 감조구간은 내진Ⅰ등급, 그 외는 내진Ⅱ등급
	2) 일반구간 (주요구간 외 구간)	내진Ⅱ등급
보, 수문	1) 특수시설 ($H \geq 10\text{m}$ 인 국가하천의 다기능보 및 수문)	내진Ⅰ등급(단, 다목적댐에 상응하는 규모가 매우 크고 파괴시 대규모 피해가 예상되는 매우 중요한 보와 수문은 필요시 내진특등급을 적용할 수 있다.)
	2) 일반시설 (특수시설을 제외한 시설)	내진Ⅱ등급
수로터널		내진Ⅱ등급

나. 하천 제방 내진점검

본 가이드라인에서는 제시하는 국내 하천 제방의 내진점검 방법은 일본의 하천구조물의 내진성능 조사지침 및 해설(2016) 및 하천 제방의 내진점검 매뉴얼(2016)을 참고하여 제시하였다. 하천의 제방은 연장이 매우 길기 때문에 국부적인 안정성에 따라 제방의 안정성이 결정된다. 제방의 내진 점검은 일정 구간에 대해 지진에 의한 제방 피해를 조사하고 평가하여 지진으로 인해 발생할 수 있는 위험한 요인을 정확하게 추출하고 위험성이 부각되는 구간을 선정하는 것이다. 제방의 정확한 내진 성능을 판단하기 위해서는 다양한 제방 내진점검 및 모니터링의 현장 조사 자료가 필요하며, 이를 기반으로 제방의 성능 및 안정성을 해석한다. 따라서, 제방 내진점검 및 모니터링 현장 조사를 통해 구축된 자료의 양이나 질에 따라 신뢰성 있는 해설 결과도 도출된다.

지진으로 인해 발생한 제방의 균열 및 침하량, 침투 등 이상 현상의 규모가 충분히 작다고 판단될 경우 내진 성능을 만족한다고 간주할 수 있는 판단, 과거 이력에 따른 제방의 안정성 판단, 균열 여부 및 크기 정도에 따른 내진성능 판단 등의 의사결정을 효율적으로 할 수 있는 매뉴얼의 필요성을 인지하고, 이러한 관점에서 제방의 내진점검 절차를 수립하였다. 하천 제방의 내진점검에 대한 절차는 다음과 같다.

(1) 1차 점검

지진이 발생한 지역의 하천 제방을 대상으로 1차 내진점검 및 모니터링을 실시한다. 지진으로 인해 크고 작은 피해가 발생한 제방에 대해 제방 표면 및 내부 상태에 대한 현장 조사를 수행한다. 1차 점검에서 내진 성능은 지진에 의한 제방 마루의 최대 침하량이 허용 침하량과 같거나 작을 경우 내진성능을 만족한다고 간주할 수 있다. 지진에 의한 제방 마루의 최대 침하량 산정은 식 (2.1)을 통해 결정할 수 있다. 허용 침하량은 하천설계기준의 계획홍수량에 따른 여유고를 참고한다(표 2.1.3).

$$S_{\max} = 0.75H \quad (2.1)$$

여기서, $S_{\max}$ 는 지진에 의해 제방 마루가 침하된 최대 침하량(m)이고 H는 제방 높이(m)이다.

표 2.1.3 계획홍수량에 따른 여유고

계획홍수량(m^3/s)	여유고(m)
200 미만	0.6 이상
200 이상 ~ 500 미만	0.8 이상
500 이상 ~ 2,000 미만	1.0 이상
2,000 이상 ~ 5,000 미만	1.2 이상
5,000 이상 ~ 10,000 미만	1.5 이상
10,000 이상	2.0 이상

1차 점검을 통해 강진으로 인해 제방이 붕괴되거나 혹은 최대 침하량이 허용 침하량보다 클 경우 제방 피해에 대한 대책을 수립하고 긴급하게 보수·보강을 실시하도록 한다. 반면에 지진의 규모가 작거나 여진으로 인해 경미한 피해가 발생한 제방에 대해서는 1차 점검을 통해 현장 조사 자료를 구축한 후 2차 점검 대상 지역을 선별하고 제방의 균열과 침하 정도에 대해 정량적으로 판단한다. 미세한 균열 및 침하가 발생한 구간의 경우, 2차 재난재해로 인해 제방의 2차 피해가 발생할 우려가 있기 때문에 2차 점검을 실시한다. 1차 점검에서 내진성능을 만족하지 않는 구간에 대해 2차 점검 대상으로 설정한다. 2차 점검 대상 구간의 설정은 1차 점검의 결과를 토대로 내진성능을 만족하지 않을 가능성이 있는 구간의 기점 및 종점을 설정하여 2차 점검의 대상 구간으로 설정할 필요가 있다. 1차 점검을 실시할 때 충분한 정보를 수집하고, 만약 정보 수집이 부족한 경우는 추가 조사를 실시한다.

(2) 2차 점검

2차 점검을 수행하기에 앞서 1차 점검을 통해 선정된 2차 점검 대상 구간에 대해 1차 점검 자료를 토대로 제방의 안정성을 판단하고, 안정성이 비슷한 구간별로 대상 구간을 세분화하여 2차 점검을 실시한다. 2차 점검 대상 구간을 세분화하는 지표는 지진 피해이력, 지형 분류, 기초지반의 토층 구성 및 축재 이력을 포함한 제체의 토질, 허용 침하량 등을 이용한다. 피해 이력은 과거의 지진 발생으로 인해 액상화 및 제방 침하, 누수피해 등의 가능성이 높은 구간을 세분화 한다. 지형 분류는 토지의 성질과 상태, 그 변화의 과정 및 지반 높이 등의 자료를 조사하거나 지진에 의한 제방 침하 가능성 지형분류를 통해 위험도를 나타낸 것을 의미한다. 기초지반의 토층 구성 및 제체의 토질은 토층의 두께, 심도 및 N치 등을 지표로 세분화한다. 마지막으로 허용 침하량은 지진으로 인해 발생하는 침하량이 동일한 정도라도 허용 침하량 정도에 따라 제방의 안정성이 다르기 때문에 일반적으로 허용 침하량을 1 m씩 구간 세분화하는 것을 권장한다.

구간 세분화 후 제방 마루의 침하가 가장 크다고 판단되는 대표 단면을 선정한다. 선정 과정에서

는 재해 이력을 고려하여 가장 침하량이 클 것으로 판단되는 위치를 적절하게 선정하거나, 기초지반의 토질성질과 상태(N치의 크기) 등을 고려하는 방법이 있다. 대표 단면에 대하여 기초지반의 액상화에 대한 점검과 제체의 액상화에 대한 점검을 모두 실시하고 적어도 어느 한 쪽의 점검 결과에서 3차 점검이 필요하다고 판정된 경우에는 해당 단면을 포함한 세분화한 구간을 3차 점검의 대상으로 선정한다. 기초지반의 액상화에 대한 점검과 제체의 액상화에 대한 점검은 다음과 같다.

기초지반의 액상화에 대한 점검

대표 단면 위치에서 토층분류별 층 두께를 산정하여 액상화에 대한 점검을 판단할 수 있다. 토층분류별 층 두께는 지하수위의 설정이 필요하며, 액상화 판정이나 지반의 변형 해석결과를 크게 좌우하는 중요한 인자이므로 점검 대상 구간의 지하수위를 파악해야 한다. 토층분류별은 그림 2.1.1과 같으며, 이와 같이 산정된 결과를 활용하여 위험도 구분 및 침하관계를 검토할 수 있다(그림 2.1.2, 그림 2.1.3). 위험도 구분 및 침하량 정도를 정성적으로 판단한 후 침하가 발생했거나 발생 가능성이 있는 경우에는 침하량을 계산하는 기초지반의 액상화 판정을 실시해야 한다.

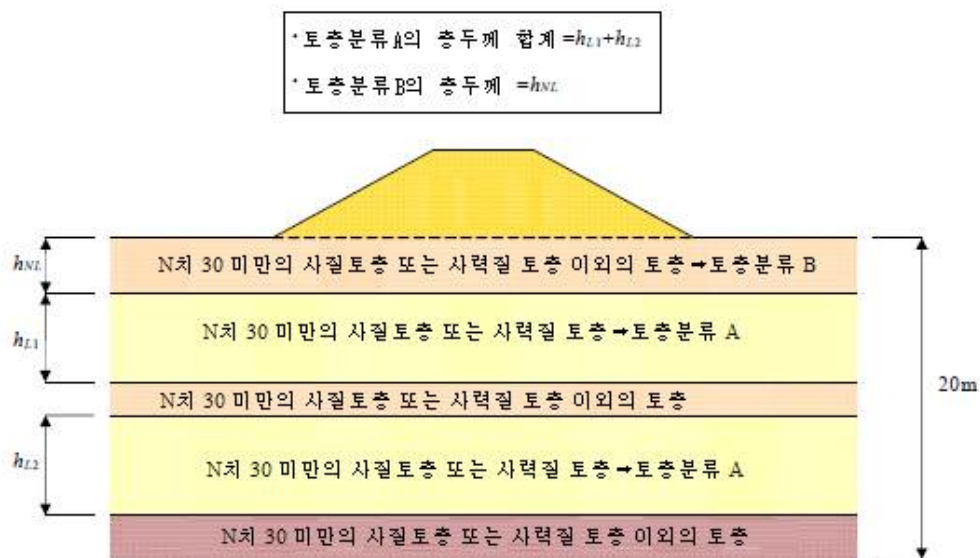


그림 2.1.1 액상화 점검을 위한 토층분류법(일본 국토교통성, 2016)

〈지형 구분에 따른 위험도 A〉

- 토층분류 A의 층 두께 합계가 5 m미만이고, 토층분류 B의 층 두께가 5 m 이상인 경우

〈지형 구분에 따른 위험도 B〉

- 토층분류 A의 층두께 합계가 5 m미만이고, 토층분류 B의 층 두께가 5 m 이상인 경우
- 토층분류 A의 층두께 합계가 2 m 이상 5 m미만이고, 토층분류 B의 층 두께가 2 m 이상인 경우

		토층분류 B의 층두께		
		0~2m	2~5m	5m~
토층분류 A의 층두께 합계	0~2m	○	○	×
	2~5m	○	○	×
	5m~	○	○	○

그림 2.1.2 기초지반의 조건과 지진에 의한 제방
침하량의 관계
(지형 구분에 따른 위험도 랭크가 A인
경우)(일본 국토교통성, 2016)

		토층분류 B의 층두께		
		0~2m	2~5m	5m~
토층분류 A의 층두께 합계	0~2m	○	×	×
	2~5m	○	○	×
	5m~	○	○	○

그림 2.1.3 기초지반의 조건과 지진에 의한 제방
침하량의 관계
(지형 구분에 따른 위험도 랭크가 B인
경우)(일본 국토교통성, 2016)

위험도 구분에 따라 기초지반의 조건과 지진에 의한 제방 침하량 관계가 다르며, 그림 2.1.2와 그림 2.1.3에서 ‘○’는 제방 마루에 침하가 발생했거나 혹은 발생 가능성이 있을 경우이고, ‘×’는 침하가 발생하지 않을 경우를 나타낸 것이다. 토층분류와 위험도 구분을 통해 침하 발생 여부 및 가능성을 판단하고 제방 마루에 침하가 발생했거나 혹은 발생 가능성이 있을 경우에는 다음과 같은 방법으로 침하량을 산정하여 액상화에 대한 추가적인 판단을 실시해야 한다. 제방 마루의 침하량을 아래와 같은 식으로 산정하고 허용 침하량을 초과하는지에 대한 검토를 수행한다.

$$S = 1.41H \times H_L^{1.56} \times 10^{-7.54R_L} + 0.0655H_L^{0.930} \leq S_{\max} \quad (2.2)$$

여기서, S는 제방천단의 침하량(m), H는 제방 높이(m), H_L 은 표층의 액상화층 두께(대표 단면에서 복수의 보링 데이터가 있는 경우에는 제내지, 천단 직하, 제외지 표층의 액상화층 두께의 평균치(m), R_L 는 표층의 액상화층의 반복 3축 강도비(산정된 R_L 의 평균치), $S_{\max}$ 는 과거에 지진에 의한 제방마루의 최대 침하량(m)으로, 식 (2.2)에 따라 산정한다.

식 (2.2)은 제체 및 기초지반의 상황을 제방 높이, 액상화층 두께, 반복 3축 강도비로 대상 단면에서의 제방 및 기초지반의 상황을 적절히 고려한다. 만약, 액상화 층이 2층에 걸쳐 존재하는 경우

에는 두 개의 액상화 층에 대해 제방 마루의 침하량을 산정하고 둘 중의 큰 침하량을 이용하여 조사를 실시할 수 있다.

제체의 액상화에 대한 점검

기초지반의 액상화에 대한 점검을 실시하고, 제체의 토질 등에 의한 판정으로 제체의 액상화에 대한 점검을 수행해야한다. 대표 단면에서 아래의 세 가지 조건의 모든 조건을 충족하는 경우에는 제체의 액상화에 의한 피해가 발생할 가능성이 있다는 점에서 3차 점검을 실시해야 한다.

○ 제체 하부가 사질토에서 아래 양쪽 모두의 조건에 해당하는 경우

- 세립분 함유율이 35% 이하의 토층 또는 35%를 초과해도 소성 지수 IP가 15 이하인 토층
- D_{50} 이 10 mm 이하이고, 또는 D_{10} 이 1 mm 이하인 토층

○ 아래 조건에 해당하는 경우

- 제방 아래에 점성토층이 존재하며 포함량이 1.0 m 이상인 경우
- 하천수가 제체 내에 침투하는 등으로 인해 제체 내 수위가 높다고 가정되는 경우

○ 액상화층 두께나 투수 계수에 따라 반복 3축 강도비에 보정을 가해 액상화 판정을 실시하여 액상화가 발생할 것으로 판정된 토층의 두께가 1.0 m 이상, 및 제방 높이의 20% 이상의 경우

$$\varepsilon_{v\max} = \frac{k\sigma'_v}{\gamma_w H^2} t_d \quad (2.3)$$

$$R_L^* = \log_{10}(65000 \varepsilon_{v\max} + 10) R_L \quad (2.4)$$

여기서, $\varepsilon_{v\max}$ 는 최대 부피변형, k 는 액상화가 염려되는 제체토층의 투수 계수(m/s), σ'_v 는 액상화가 염려되는 제체토층 중앙의 유효 연직 응력(kN/m^2), γ_w 는 수의 단위 체적 중량(kN/m^3), H 는 액상화가 우려되는 제체토층의 두께(m), t_d 는 지진동 지속 시간(초)이며, 일반적으로 지진동 타입에 상관없이 10초로 한다. R_L^* 는 보정 후의 반복 3축 강도비, R_L 은 보정 전의 반복 3축 강도비이다.

다. 3차 점검

3차 점검에서의 내진 성능 조사는 2차 점검의 결과를 통해 3차 점검이 필요하다고 판정된 구간의 대표 단면에서 내진 성능 조사를 실시한다. 3차 점검의 결과, 내진 성능을 충족하지 않는 것으로 간

주될 경우, 해당 단면을 포함한 대상 구간의 제방은 대책 간주 구간으로 취급할 수 있다. 내진 성능을 충족하지 않는 제방에 대해서는 향후 적절한 내진 대책을 검토해야하며, 제방 종단방향의 토질 구성을 더욱 상세하게 파악할 필요가 있다. 또한, 3차 점검은 정적 조사법에 근거하여 실시하며, 정적 조사법은 제체의 액상화를 고려하여 정밀한 침하량 추정이 가능하므로 정적인 지반 변형 해석에 근거해 내진성능의 조사를 실시하는 것으로 했다. 3차 점검에서 내진성능을 만족하지 않는 구간의 제방에 대해서는 향후 적절한 내진 대책을 검토 및 수립이 필요하다.

2. 광섬유 센싱을 통한 제방(제체) 내진점검 및 모니터링

가. 제체 내진점검 및 모니터링 개요

제방이 축조된 후 제방 내부의 물리적 변화를 육안으로 판단할 수 없으므로 제방 내부의 상태를 파악하고 취약한 부분에 대한 정보를 제공할 수 있는 모니터링 기술이 필요하다. 광섬유 센서(Fiber-optic Sensor)는 광범위한 영역을 효율적이고 경제적으로 모니터링 할 수 있는 특징이 있으며, 수십에서 수 백 km로 축조된 하천 제방의 상태를 모니터링하기 위해 광섬유 센서를 적용하였다. 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. Su et al.(2018)은 광섬유에 열을 가열하여 주변 온도와 차이를 구별하고, 침투실험을 수행하여 시간에 따라 온도가 상승하고 감소하는 것을 모니터링한 바 있다.

광섬유 센서로 제방 내부의 온도 정보를 획득하여 제체 온도 변화를 기반으로 제방의 상태를 모니터링하는 시스템을 구축하였다. 광섬유 센싱을 활용한 하천 제방(제체) 모니터링 방법은 홍수 피해 및 노후화로 인한 제방 보강이 필요한 구간, 제방 신설이 필요한 구간을 대상으로 광섬유 센서를 설치한 후 중장기적으로 제방 내부의 온도 자료를 구축할 수 있다. 제방 내부 온도 변화의 폭과 임계값 도달 등의 데이터 해석을 통해 제방의 이상 현상을 예측할 수 있다. 제방의 균열, 침투, 파이프 등으로 인해 제방 내부의 온도 변화가 발생하면 온도 자료를 기반으로 제방의 안정성을 평가하고 진단하여 보수·보강 대책을 마련할 수 있다. 광섬유 센싱을 활용한 제방 모니터링을 위한 광섬유 센서 설치 방법과 제방 내부의 온도 자료의 후처리 및 해석을 위한 기술을 서술하였다.

나. 광섬유 센서 설치 및 매립

(1) 광섬유 센서의 원리

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 2.2.1). Rayleigh 산란은 대체로 광섬유 주위의 밀도 변화와 연관되며, 큰 진폭을 갖고 파장 변위는 거의 없다. Raman 산란은 광섬유 주변의 온도변화에 영향을 크게 받는다. Stokes 범위에 속한 후방-Raman 산란은 온도변화에 무관하지만 anti-stokes 범위의 전방-Raman 산란은 온도변화에 따라 그의 진폭이 예민한 반응을 보여준다. 특히, Raman

산란은 온도 변화에 따라 파장 변위 폭이 크기 때문에 온도 측면에서 매우 용이하며, 온도 측정 분해능(angular resolution)을 높이는데 유리하다(Lee et al., 2010). 이러한 산란은 광섬유의 위치 및 광섬유 주변 환경의 영향 등의 정보를 갖고 있기 때문에 여러 가지 물리 정보를 획득할 수 있다.

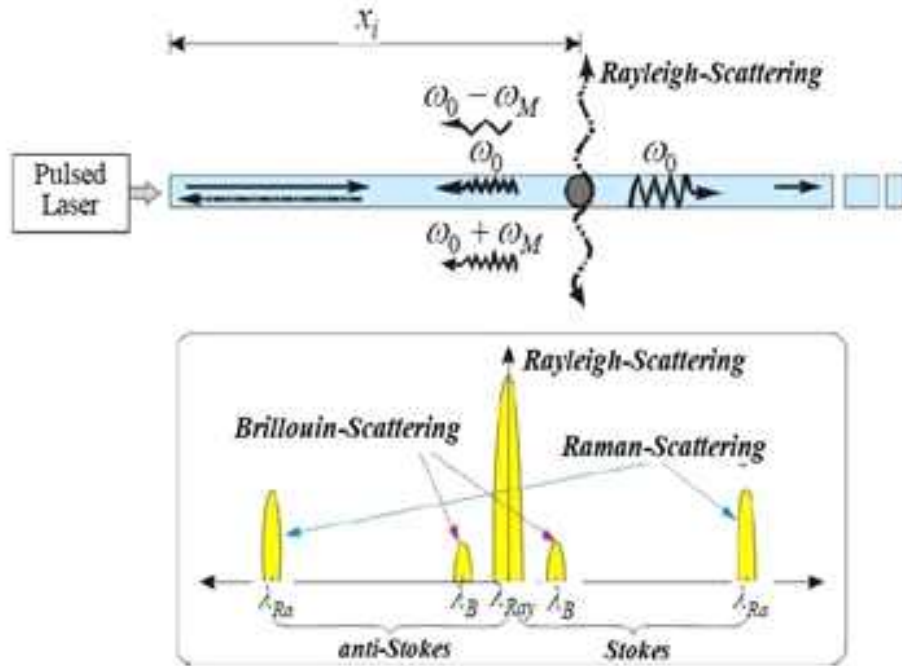
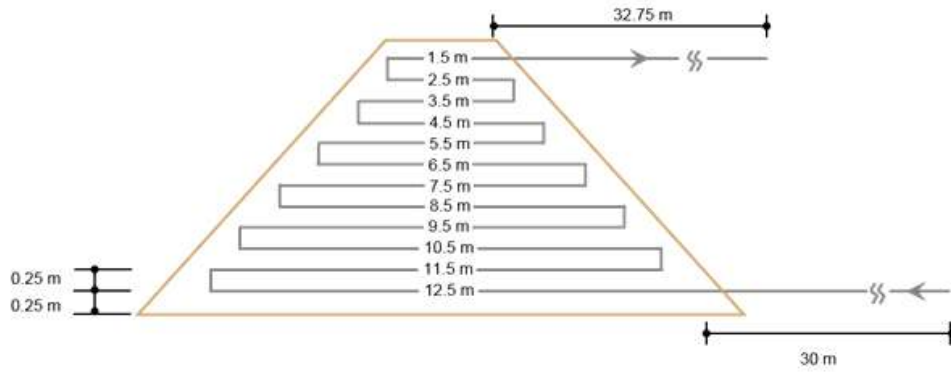


그림 2.2.1 광섬유 온도 센싱의 원리(Lee, 2011)

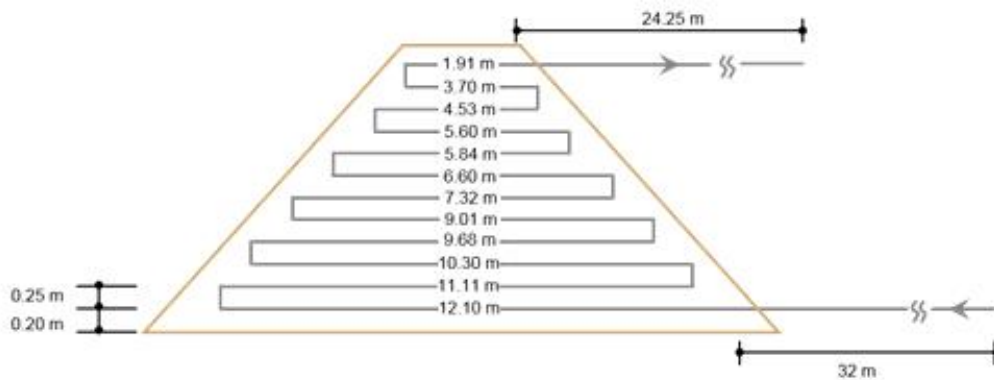
(2) 광섬유 센서 설치 방법

제방 규모에 맞춰 광섬유 케이블 매립(안)을 설계한 후 제방을 축조하면서 동시에 광섬유 케이블을 설치 및 매립하도록 한다. 이 과정에서 가장 중요한 것은 광섬유 케이블이 제방의 어느 위치에 설치되었는지 현장에서 스케치를 하면서 매립이 진행되어야 하는 점이다. 실제 현장에서 광섬유 매립(안)의 정확한 수치에 맞춰서 광섬유 케이블을 설치하는 것은 현실적으로 어려우므로 설치하는 과정에서 광섬유의 길이와 설치된 제방의 위치를 현장에서 스케치하는 작업이 필요하다. 이를 통해 제방 내부의 광섬유 케이블을 매립한 정확한 위치 정보를 확보하고 이상 현상이 발생한 구간을 명확하게 판단할 수 있다. 그림 2.2.2는 광섬유 케이블 매립계획(안)과 현장에서 스케치한 매립도(도)의 예시이며, 매립계획(안)에 맞춰 설치 및 매립하지만 0.3~0.5 m 범위의 차이가 발생되고 이러한 차이가 누적 되면서 큰 차이가 발생하게 된다. 따라서, 현장에서는 광섬유 매립과 동시에 스케치가 함께 진행되어야 하며, 제방에 매립된 광섬유의 정확한 정보를 기반으로 모니터링에 활용해야한다. 이와 더불어, 광섬유 센서로부터 안정적인 온도 센싱 결과를 얻기 위해서는 광섬유 케이블의 시작과 끝 부분에 안정 구간을 확보해야한다. 광섬유 케이블의 초기 광접속 구간에서는 불안정한 데이터가

취득 될 수 있으므로 최소 20 m 이상의 안정 거리 확보가 필요하다. 제방에 광섬유 케이블 매립이 완료된 후 케이블을 광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템(DTS)과 연결하여 제방 내부의 온도를 측정할 수 있다.



(a) 광섬유 케이블 매립계획(안)



(b) 제방에 매립된 광섬유 케이블 실제 매립도

그림 2.2.2 광섬유 센서 설치 매립 계획(안) 및 매립도

다. 제방 내부의 온도 측정

광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템은 제조사 및 모델에 따라 성능에 차이가 있으며, 본 가이드 라인에서는 Yokogawa사 DTSX3000를 활용한 온도 측정 방법을 서술한다. Yokogawa사 DTSX3000은 $-200\sim 600^{\circ}\text{C}$ 범위의 온도 측정이 가능하며, 최대 50 km/ch 측정 거리의 온도를 측정할 수 있다. 온도 분해능은 측정 거리에 따라 차이가 있으며, 10 km거리 측정 시 0.03°C 이고, 16 km 거리 측정 시 0.06°C , 30 km 이상의 거리 측정 시 0.2°C 이다. 또한, 공간 분해능(Spatial Resolution)은 1~2 m이며, 소비 전력은 16 W이다.

제방 내부에 설치한 광섬유 센서로 온도를 측정하기 위해 광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템(DTS)과 연결하고 이를 PC와 연결하여 데이터 모니터링을 위한 설정을 수행한다(그림 2.2.3).



그림 2.2.3. 광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템(DTS) 연결 및 설치

다음으로 DTSX3000 프로그램을 실행하여 DTS Model 및 Operation Mode를 설정한다(그림 2.2.4). 그리고 광섬유 센서와 DTS 연결 여부를 확인하고, Optical Switch 및 Channel을 선택한다(그림 2.2.5). Optical Switch 및 Channel은 DTS 사양에 따라 차이가 있다. 광 스위치 및 채널을 선택하고 측정 간격 및 광 센서 길이 범위, 측정 시간 등을 설정한 후 온도 측정을 시작한다(그림 2.2.6). 측정되는 온도 자료는 그림 2.2.7과 같이 설정하여 모니터링 할 수 있다. 측정된 온도 자료는 연결된 PC에 자동 저장되며, 원자료를 사용자 목적에 따라 파일 형태를 변환하여 사용할 수 있다. 온도 측정 결과에는 측정 시간, 광섬유 길이, 온도 정보를 포함하고 있다.

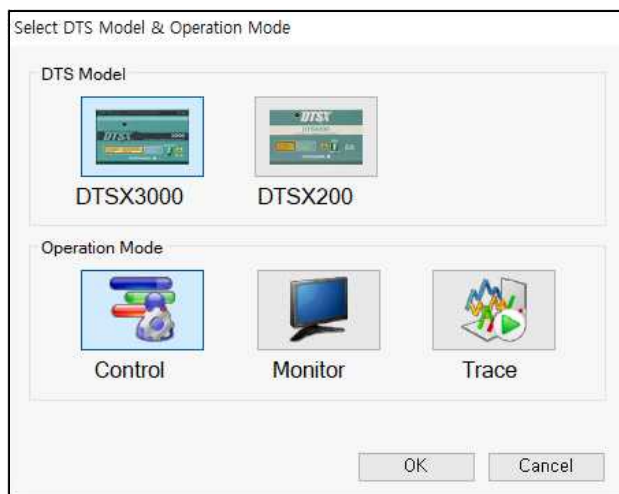


그림 2.2.4 DTS Model 및 Mode 설정

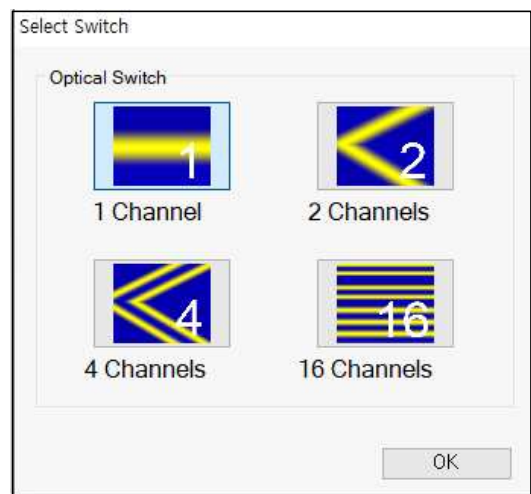


그림 2.2.5 DTS channel 설정

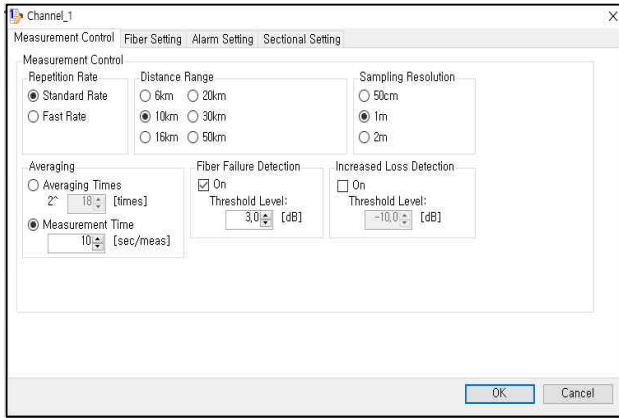


그림 2.26 DTS 온도 측정 설정

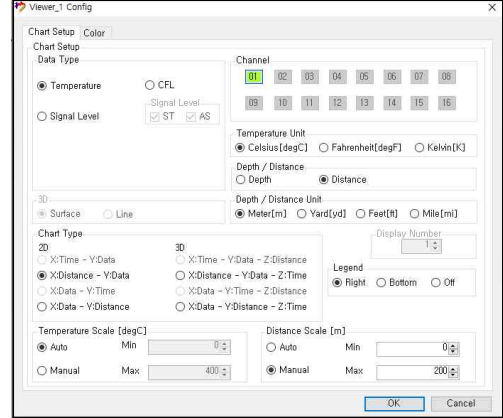


그림 2.27 DTS 온도 측정 그래프 설정

라. 제체 온도 변화 분석 및 모니터링

광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템(DTS)를 이용하여 획득한 제체의 온도 자료는 센싱 과정에서 발생하는 랜덤 오차로 인해 변동성이 다소 존재한다. 따라서 이러한 변동성을 줄이고 장시간의 데이터의 변화 양상을 검토하기 위해서는 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 t 에 대한 온도 자료를 x_t 로 표현할 때 지수가중이동평균법으로 스무딩한 결과(S_t)는 식(2.5)과 식(2.6)으로 정리할 수 있다(Brown, 1963).

$$S_t = ax_t + (1 - a) \cdot S_{t-1}(x) \quad (2.5)$$

$$S_o = x_0 \quad (2.6)$$

여기서, a 는 스무딩 계수, S_0 는 초기 측정 값을 스무딩 처리한 값, x_0 는 초기 측정값이다.

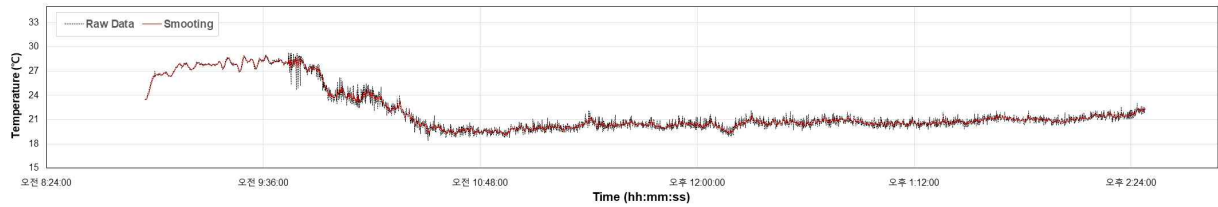


그림 2.2.8 제체 온도 측정 결과 및 후처리 결과

이상치 제거 및 스무딩 후처리된 온도 자료는 그림 2.2.8에 나타난 바와 같다. 시간에 따른 온도 변화를 통해 제체에서 온도 저하가 급격하게 발생한 시점을 확인할 수 있으며, 제방 내부의 취약한 구간을 예측할 수 있다. 또한, 수위 자료와 함께 해석하여 제외지 수위에 따른 온도 변화 경향을 관찰할 수도 있다. 제방 내부의 온도 변화가 발생할 경우 제방의 안정성을 여부를 판단하기 위해 현재 온도와 이전의 온도 차를 계산하여 온도 변화가 급격한 시점을 판단할 수 있다. 그림 2.2.9에 회색 실선은 온도 차를 계산한 그래프이며, 그래프에서 온도 차가 크게 나타난 시점에서는 제체 내부에 침투가 발생하여 온도 변화가 발생한 것으로 해석할 수 있다. 제방 지점별 온도 변화를 자료에서 제방 내부에 이상이 있는 구간을 선별하고, 선별된 지점을 포함한 제방 단면의 온도 변화를 관찰하기 위해 제방 횡단면 온도 분포를 그림 2.2.10와 같이 확인할 수 있다.

제외지 사면에서 제체로 침투가 발생하여 제방 내부의 온도 감소가 나타났으며, 어느 정도 침투가 진행되었는지 판단할 수 있다. 또한, 광섬유 온도 센싱 데이터로 제체에 침투가 발생하는 시점과 어느 정도 침투가 진행되는지를 예측할 수 있다. 제방 내부에 매립한 광섬유로부터 센싱된 온도 정보를 통해 제방의 시간적, 공간적 온도 변화의 관찰이 가능하며, 이를 통해 제방 내부의 온도 변화가 확연하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 광섬유 온도 센싱을 통해 제방 내부의 상태를 간접적으로 판단할 수 있다. 이러한 결과는 제방 제외지의 수위를 예측할 수 있는 정보로 활용될 수 있으며, 제방의 취약한 부분을 파악하고 제방 붕괴를 예방하고 사전에 대책을 수립할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있다고 판단된다.

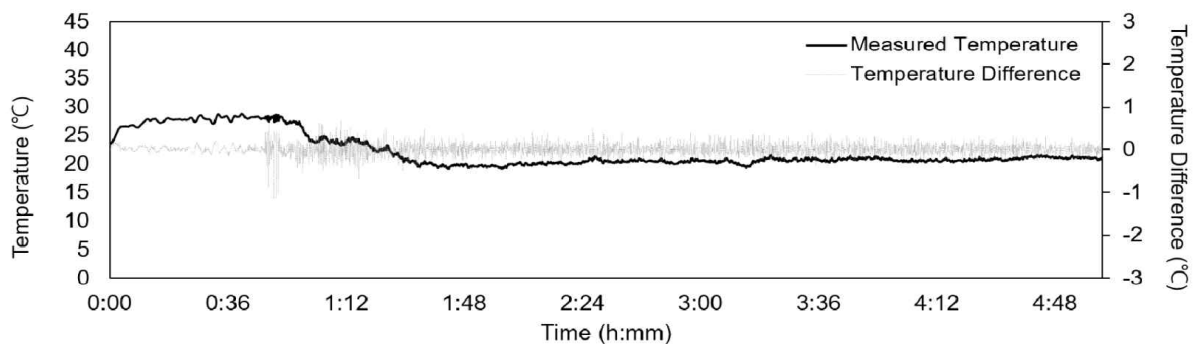


그림 2.2.9 실규모 제방 내부의 온도 변화 및 온도차 그래프(Ahn et al., 2020)

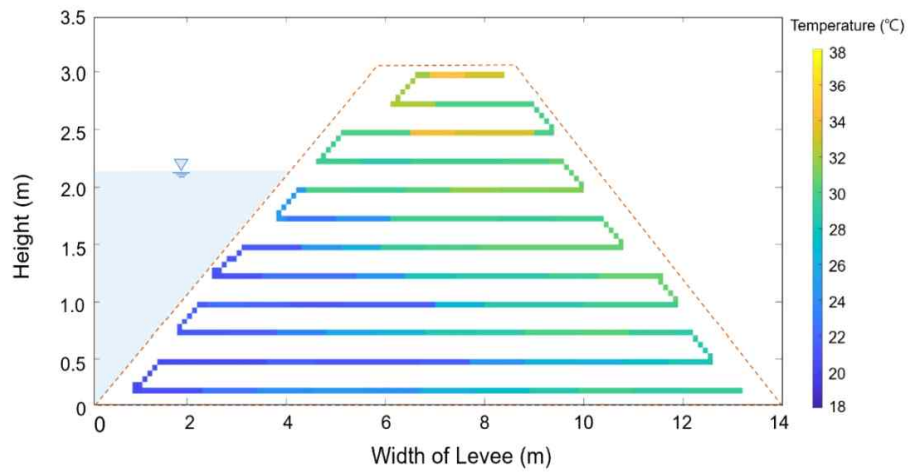


그림 2.2.10 침투 경과 시간에 따른 제방 내부의 온도 분포(Ahn et al., 2020)

3. UAV 기반 ORS를 활용한 제방내진 점검 및 모니터링

가. 모니터링 기법의 개요

제방의 안전율을 감소시키는 원인 중 하나는 제방 균열의 확장이며, 균열을 탐지하기 위한 현장조사는 환경조건에 따라 어려움이 있다. 제방의 균열이 발생한 부분에 접근이 어렵거나 혹은 직접 측정의 위험성이 존재할 경우에 현장조사에 한계점이 존재한다. 이러한 한계점을 첨단 기술 개발에 맞춰 보완하고 개선하기 위해 광학원격탐사를 통해 광범위한 지역의 제방 균열 탐지 모니터링 방법을 개발하였다. 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. 초분광 영상을 활용하여 균열(cracked area)과 비균열 영역(uncracked area)에 대한 조도별 반사율 특성을 비교하고 균열 영역의 고유정보를 확인할 수 있다. 이에 따라, UAV 기반 초분광 영상을 활용한 제방 균열 탐지 및 모니터링에 대한 기술을 제시하고자 한다.

나. UAV 기반 ORS 이미지 센싱 장치 구축

본 가이드라인에서는 Aibotix X6 V2의 UAV 기반의 ORS 제방 모니터링 기법을 제시하고 있으며, Aibotix X6 V2의 2축 짐벌 한계점을 보완하기 위해 UAV에 초분광 센서를 장착하고 3축 적용을 통해 안정적인 자료 획득을 위한 인터페이스를 설계하였다(그림 2.3.1). 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.

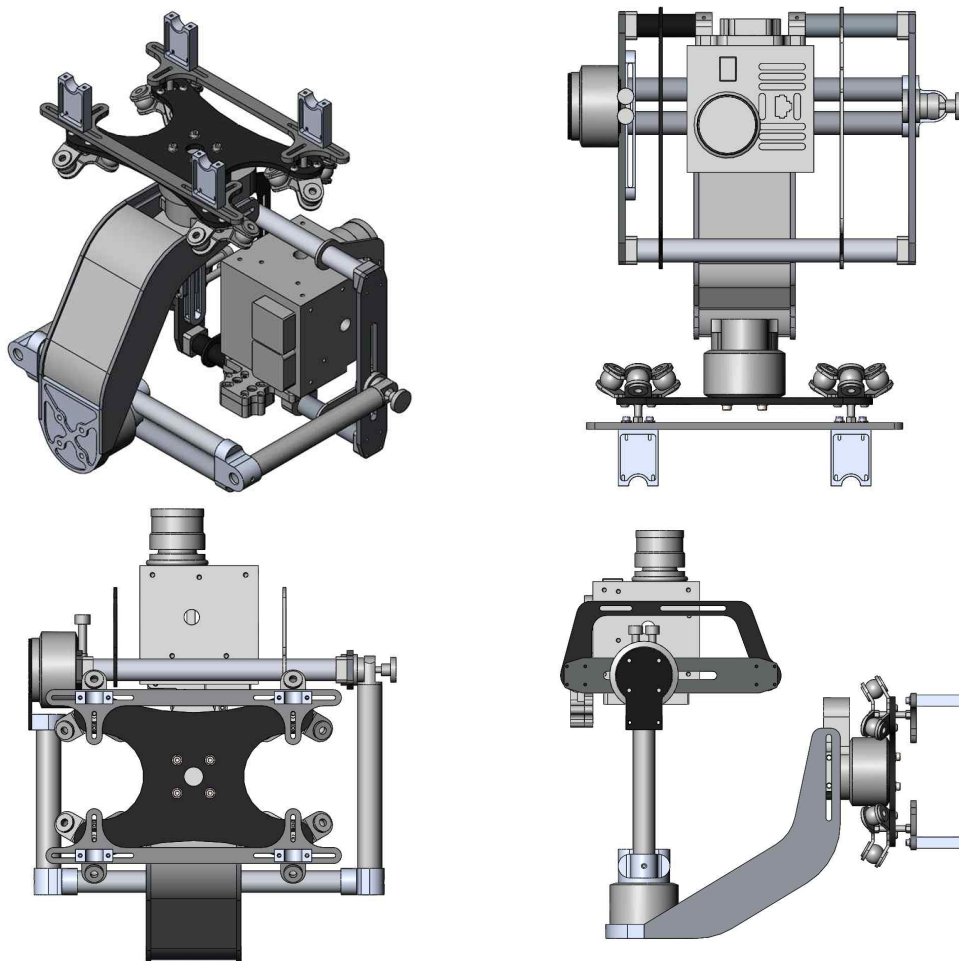


그림 2.3.1 UAV 부착용 3축 짐벌 설계도면

표 2.3.1 3축 인터페이스의 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 짐벌의 모터의 힘과 제어값 최적화 - 외부전원을 사용가능 방식 - 미세 제어값 조종 및 수정 방식

다. 광학원격탐사(ORS) 기반의 광역형 제방 모니터링

본 가이드라인에서 제시된 ORS 기반 광역형 영상 획득 시스템은 초분광 영상을 이용하여 조사 대상에 대해 영상 획득을 수행한다. 영상 획득 시스템을 통해 구축된 분광지수 등을 적용한 제방 구성 요소 분석은 보다 객관적이고 안정적인 자료 획득을 가능하게 한다. 초분광 센서는 Nano-Hyperspec(Headwall)으로 Aibot X6 V2 드론(Aibotix)에 장착되었으며, 0.026 m 공간 해상도의 270개 밴드(400~1000 nm) 초분광 영상 획득이 가능하다. 또한, 영상 전처리를 위해 방사보정 및 기하보정이 필요하며 영상의 각 화소별 반사도 값을 산정하여 영상 분석을 수행한다. 영상 분석은 ENVI(Harris Geospatial Solutions사의 ENVI 버전 5.5) 프로그램을 활용하여 균열 여부에 대한 정량적인 분석을 수행한다. 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 2.3.2는 UAV를 활용한 제방 ORS 영상 획득 시스템의 구성 및 과정을 나타낸다.

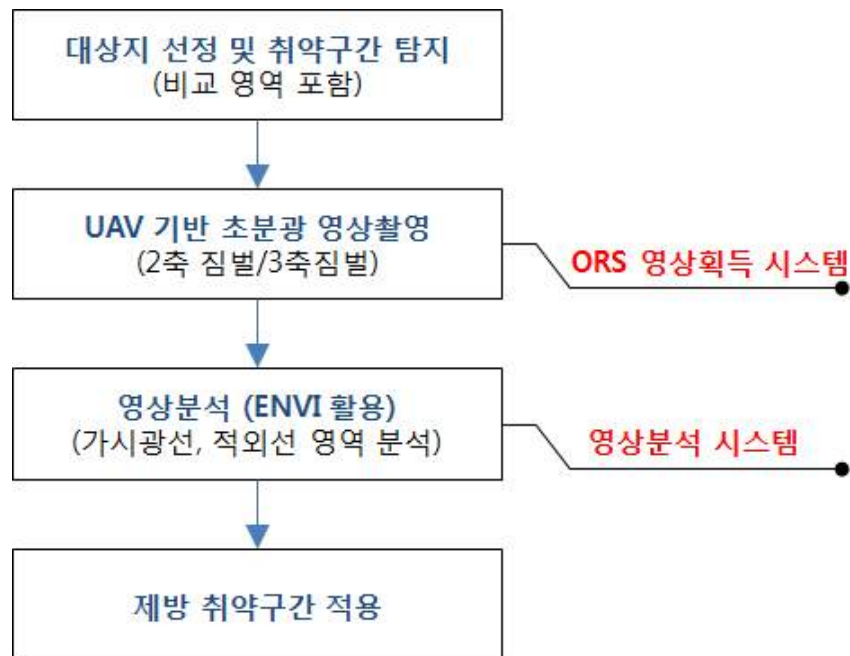


그림 2.3.2 UAV를 활용한 제방 ORS 영상 획득 시스템의 구성 및 취약구간 분석 과정

(1) 제방 모니터링 대상지역 선정 및 영상획득

제방의 안정성 진단 및 평가가 필요한 대상지역 선정은 제2장 제방의 내진점검 및 모니터링에 제시된 절차에 따라 결정한다. 대상지역 선정 후 광학원격탐사를 활용한 제방 표면 모니터링을 실시한다. 본 가이드라인에서는 미국 Headwall에서 개발한 초소형 초분광센서 Nano-Hyperspec으로

촬영된 영상 자료를 기반으로 설명한다(그림 2.3.2)

표 2.3.2 드론과 센서의 제원

이미지	센서의 제원	
	파장 범위	400-1000 nm
	공간 밴드	640
	스펙트럼 밴드	272
	스캔 모드	Push-broom
	렌즈	17mm, FOV15.9°
	출력	16 bit

(2) 영상전처리

영상이 지니고 있는 화소별 고유값을 분석에 활용하기 위해서는 방사보정 및 기하보정을 수행하여야 한다. 영상전처리는 SpectralView(Headwall Photonics Inc., U.S.) 프로그램을 활용할 수 있으며, 기기적인 방사보정은 센서와 함께 제공되는 노출시간에 따른 복사보정 파일과 현장에서 수집한 Dark Reference 파일을 기반으로 원 영상을 각 화소별 복사휘도(Radiance) 값으로 변환한다. 영상의 기하학적 왜곡은 센서에 부착되어 있는 GPS/IMU를 통해 촬영 시 획득한 자료를 통해 보정할 수 있다. 또한, 하천공간특성에 따른 영상분류와 더불어 각 인자의 분광반사특성을 분석하며 반사율은 현장에서 취득한 표준백색판(White Reference)의 값을 기준으로 전체 영상의 각 화소별 반사도 값을 산정하는 방식을 적용한다.

(다) 차원축소 및 영상분류

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.

초분광 자료를 활용한 영상분류는 공간을 정해진 등급으로 분류(Classification)하는 것을 넘어 특정 대상을 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.

라. 제방 표면 안정성 점검 및 평가

초분광 영상 자료를 이용하여 조도에 따른 제방의 균열 여부를 판단하기 위해 영상분석 프로그램을 이용하여 최대강도값(PDA, peak data value)을 산정하고, 백색판(white reference)을 기준으로 각 영역에 대한 반사율을 보정한다. 반사율은 99% 이상의 반사특성을 갖는 백색판을 이용하여 태양복사에너지의 변화에서 발생할 수 있는 오차를 최소화하고 반사율로 변환시킨다. 영상분석을 통해 산정되는 강도값(data value)은 분광복사량 (radiance) 값을 의미한다. 그림 2.3.3은 파장에 따른 강도값이며, 제방 표면 균열 여부에 따라 강도값의 차이가 나타난다. 또한, 균열 여부에 따라 최대강도에 따라 조도 값을 분석하여 비교한다(그림 2.3.4).

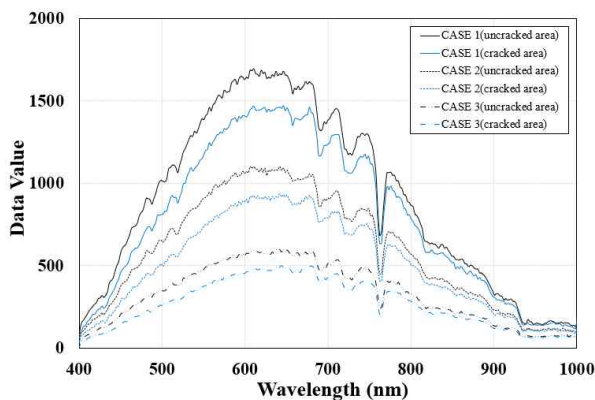


그림 2.3.3 비균열과 균열 영역의 파장에 따른 강도값 비교

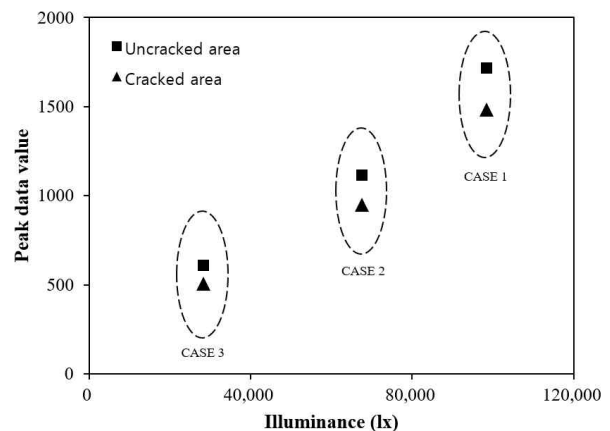


그림 2.3.4 균열 여부에 따른 최대강도와 조도 비교

분광 영상의 반사율 분석하면 비균열 영역과 균열 영역에서 차이가 나타나며, 반사율은 가시광선 파장 영역인 400 nm ~ 700 nm 까지는 증가하고 근적외선 영역에서는 일정수준을 유지하다가 다시 증가한다. 가시광선과 근적외선으로 파장 영역을 나누고 가시광선은 청색광, 녹색광, 적색광으로 다시 구분하여 각 영역에 대한 고유정보를 비교한다. 가시광선의 경우 각 파장별(청색, 녹색, 적색광) 45개, 근적외선의 경우 134개의 분석 데이터(반사율 계산 데이터)를 활용하여 통계분석을 실시한다. 표 2.3.4는 분광 영상에서 활용할 수 있는 정보를 기반으로 통계 분석한 결과를 예시로 제시하였다.

표 2.3.3 분광 분석의 통계 결과(예시)

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

제3장

하천 제방의 내진점검 및 모니터링 활용 프로그램

1. 제방 내부에 설치된 광섬유 온도 센싱 데이터 후처리 프로그램

가. 프로그램의 개요

본 프로그램은 제방 내부에 매립된 광섬유 케이블로부터 수집되는 분포형 온도 데이터를 일괄적으로 후처리하여 제체 내부의 시간에 따른 온도 변화 및 제방 횡단면에 대한 2차원 온도 변화 그래프를 도출할 수 있다. 광섬유 케이블 내 지점 별 시간에 따른 온도 변화의 원 데이터와 지수가중이동 평균법을 통해 후처리 된 데이터를 확인할 수 있다. 또한, 시간에 따른 온도 데이터 분석 결과를 통해 온도 변화의 폭과 경향을 분석할 수 있는 특징이 있다. 광섬유 온도 센싱을 통해 획득된 데이터를 이용하여 제방의 각 지점에서 시간에 따라 변화되는 온도의 크기를 그래프로 시각화하여 제체 내 이상 현상에 대한 참고자료로 쓰일 수 있다.

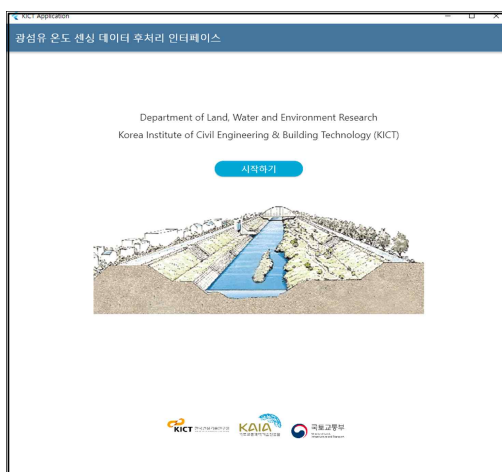


그림 3.1.1 광섬유 온도 센싱 데이터 후처리 프로그램의 실행 화면



그림 3.1.2 온도 데이터의 선택 화면 및 입력 자료의 구축

나. 광섬유 온도 센싱 데이터 구축

제방 내부에 매립된 광섬유 케이블을 광 접속을 통해 광섬유 분포형 온도 센싱 시스템(DTS)과 연결하여 광섬유 센서로부터 제방 내부의 온도 정보를 생성할 수 있도록 한다. 광섬유 온도 센싱 데이터에는 측정 시간, 광섬유 길이, 온도 정보가 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 형식은 .xlsx, .csv로 생성하여 인터페이스에 입력 자료로 활용하며, 온도 정보 데이터는 그림 3.1.3에 나타난 바와 같은 형식으로 구축한다.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	시작/종료	0.77	1.78	2.79	3.81	4.82	5.83	6.85	7.86	8.87	9.88	10.9	11.91	12.92	13.94	14.95	15.96	16.97	17.99	19	20.01	21.02	22.04	23.05	24.06	25.08
2	85649	2854	2854	2851	29	2807	3058	3114	3114	3359	3327	3711	3207	3128	3169	3234	3327	3224	3205	305	2617	2607	2927	2923	2907	3007
3	85655	2954	2954	2855	2889	2813	3125	3122	3122	3444	3379	3228	3251	3145	3195	3279	3366	3197	3053	2662	2721	3025	292	303	2963	
4	85701	2873	2873	2883	2802	2874	3132	3061	3146	3424	3393	3246	3165	3184	3144	3217	3382	322	3362	3124	2637	2637	298	2978	2979	2993
5	85707	2879	2879	2801	2974	2876	3128	3113	3122	3423	3394	3181	3201	3114	318	3194	3359	3221	3385	3053	2637	2634	2967	293	2932	3016
6	85719	2787	2787	2806	2922	2828	3134	3175	3148	3421	3409	3251	3204	3121	3118	3202	3362	3206	3366	3046	272	2708	3047	2964	3014	299
7	85719	2927	2927	2822	2956	2824	3177	3161	3164	339	3292	3269	3257	3078	3194	3311	3376	3311	3442	2951	2708	2706	3042	2986	306	3031
8	85725	2866	2866	2797	2927	2771	3142	3184	32	3455	3427	3293	3214	3208	3169	3163	336	326	3342	3176	2727	2749	2981	3043	3039	3028
9	85731	2816	2816	286	2827	2775	3181	3132	3069	3418	331	3332	326	3284	3255	3254	3407	3274	3405	3198	2749	2749	2955	304	3034	3036
10	85731	2851	2851	2787	2873	2789	3279	323	3215	3446	3356	3331	3279	3252	3251	3249	3467	3334	341	3187	2773	2751	3079	301	3118	3009
11	85737	2886	2886	2767	2917	2841	3241	3223	3277	3525	3492	339	3269	3276	3237	3223	3476	3311	3386	3196	2827	2769	3049	2995	3118	3054
12	85743	2824	2824	2801	2904	2818	3296	3226	3196	3421	3335	3337	3279	3262	3275	3258	3407	3381	3516	3264	2745	2744	3123	3055	3157	3124
13	85748	2847	2848	2842	2834	2842	3251	3206	3216	3491	343	3409	3327	3237	3242	3248	3467	3463	3597	3185	2844	2834	3117	3056	3178	3139
14	85758	2819	2819	2837	2869	2807	3314	3242	3212	3479	3422	3365	33	3263	3269	3262	3454	3397	3536	332	2862	2811	3101	3107	3171	3139
15	85802	2857	2857	2848	2907	2829	3329	3245	3213	3512	3443	3367	3311	3259	326	3248	3511	3414	3509	3361	2884	2861	2868	3221	3198	3196
16	85808	2913	2913	2868	2876	2885	3312	3257	3243	352	3439	3454	3355	333	328	3289	3533	3512	3543	3259	2869	2868	3167	3149	3249	3196
17	85814	2908	2915	2925	29	2883	3342	3289	3214	3538	3464	3405	3346	3298	3286	3272	3523	3501	3639	3219	2827	2893	3156	3146	3282	321
18	85820	2908	2908	2838	2888	2857	3397	3296	3258	3539	3504	3462	3363	3323	3284	3299	3592	3411	3602	3443	2825	2826	2909	309	3316	3224
19	85826	2871	287	299	292	2911	3382	3281	325	3516	3476	3448	3377	3344	3314	3309	3548	3523	3597	3266	2892	2849	3214	3127	3339	3271
20	85832	2892	2892	2828	2946	2884	3413	3305	3234	3621	3588	3535	3431	3378	3324	3295	3559	362	3712	3405	2952	2887	2887	3374	3339	3317
21	85838	2943	2942	2875	2856	2886	3417	3329	3306	3597	3543	3517	3419	3371	3321	3317	367	3452	3618	3406	2993	2912	3244	3257	3404	3327
22	85844	303	303	291	2893	2857	3423	332	327	3609	3591	3511	3444	3361	3399	3238	3618	3533	3587	3413	2954	2936	325	3286	3391	3379
23	85850	3063	3063	2852	2889	2876	3417	3364	3344	3637	3611															
24	85856	3037	3037	2919	2851	2872	3368	3445	3345	3637	3581															
25	85902	2924	2924	2948	2849	2907	3495	3384	3287	3633	3606															
26	85908	2939	2939	2938	2935	2936	3495	3397	3308	3642	3608	3633	3468	3398	3369	3388	3779	3593	3786	3557	3024	3044	3378	3293	3477	3435
27	85914	2981	2981	2898	2942	2872	3572	3441	3343	3713	365	3684	3453	3282	3274	3311	3692	3618	3718	3593	3058	3054	3029	3469	3582	3415
28	85920	3051	3051	2977	2874	2883	3514	3408	3329	3693	3685	3701	3554	3254	3292	3341	3747	3786	3764	3499	3228	2958	3334	3346	3555	3471
29	85926	3101	3101	298	2864	2934	3366	3608	339	3672	3634	3699	3505	336	3356	3573	3744	3671	3718	3626	3077	3046	2962	3447	3562	3506
30	85932	3068	3068	2968	2918	2913	3567	3477	3401	3728	3723	3665	3647	3491	3415	3431	3763	3626	3811	3582	3176	3023	304	3044	3565	3561
31	85938	3018	3017	2939	2914	2947	3391	3579	3408	3732	3743	3728	3613	3398	341	3681	3755	3684	3754	3594	3149	3058	3058	3467	3614	356
32	85944	3086	3086	2968	2946	2921	358	3468	3409	3735	3711	3673	3513	3397	3399	3398	3786	37	3881	368	3148	3064	3088	3558	3551	3527
33	85950	3044	304	2945	2892	2934	3482	3574	3396	3752	3759	3725	3455	3411	3447	3461	3758	3674	3765	3685	3246	3096	3122	361	3667	352
34	85956	3072	3072	2981	2947	2979	3488	3581	3435	3748	3695	3726	3582	3442	3469	3469	3783	3668	3849	3704	3258	3133	3168	3576	3637	3475
35	90002	3016	3016	2873	2916	2928	3497	367	342	3825	3796	3836	3553	3465	3423	3446	3871	3751	3754	3772	3186	3155	317	3476	3627	3553
36	90008	2989	2989	2983	2864	2879	353	3698	3567	3796	3804	3828	3803	3496	3455	3488	3868	3738	3846	368						
37	90014	3136	3136	2883	2921	2925	3601	3622	3451	3787	3803	3867	3571	3476	3472	3472	3882	3761	3814	3777	3286	3077	3067	3563	3684	3575
38	90020	3045	3045	2898	285	2942	3456	3538	3442	3819	3818	3848	3682	3449	3483	3464	3901	3791	3832	3783	3259	3109	3129	3645	3778	3591
39	90026	3073	3073	2917	2879	2907	3589	3588	3476	3874	3869	3914	3873	3842	3446	3462	3866	3766	3915	3743	3237	303	3029	3636	3824	3638
40	90032	304	304	2985	2906	2929	3483	3662	3509	3819	3813	3907	3813	3884	3484	3514	3903	3804	3864	3771	3352	3134	3182	3662	379	3564
41	90038	3049	3049	287	2895	2919	3559	3682	3484	3877	3862	3849	3616	3518	3507	3507	3897	3859	3926	3811	3304	3104	311	3667	3614	3635
42	90044	2959	2959	2903	2907	2935	3587	3678	3512	3842	3848	3886	3625	3454	3442	3442	3873	3805	3846	3889	319	3091	3093	3695	3793	3566
43	90050	3063	3063	2944	2925	2947	3609	3698	3581	3929	3899	3904	3831	3843	349	3918	3715	3862	381	3291	3088	3086	3687	3815	3624	
44	90056	2968	2968	2942	2815	2853	3646	3711	3631	3891	3875	3864	3714	3449	3451	3451	39	383	3872	3836	3299	3078	3131	3626	3839	3568
45	90102	3055	3054	2926	2787	283	3586	371	3168	3785	3827	3816	3707	3416	3422	3417	3906	3804	3882	3865	3254	3059	3059	3654	3878	3603
46	90108	3028	3028	294	2942	2962	3753	3558	3581	3898	3879	3884	3592	345	3451	3451	3876	3849	3912	3942	3288	3167	3166	3724	3888	3616
47	90114	3045	3045	2899	2937	2921	3604	3642	3528	3902	3886	3926	3669	3475	3484	3484	3916	386	3944	3961	3218	3172	3172	3658	3907	3659
48	90120	3049	3049	2892	2924	2945	3583	3526	3468	3852	389	38	359	3505	357	3477	3878	3817	3951	3815	332	3087	3087	3663	389	35

그림 3.1.3 프로그램 입력 자료 구성의 예(xlsx 형식)

다. 광섬유 센서를 통해 수집된 온도 데이터의 입력

- (1) 프로그램 실행 화면(그림 3.1.1)에서 '시작하기'를 눌러 자료 입력 및 세팅 화면(그림 3.1.2)을 실행한다.
- (2) 좌측 상단의 '파일선택' 버튼을 통해 파일(xlsx 또는 csv 형식)을 선택하여 입력 자료를 로드한다. 이 때 입력 자료는 광섬유 분포형 온도 센싱 시스템(DTS)과 연결된 광섬유 센서로부터 수집되는 제방 내부의 온도 정보이며 데이터이며 측정 시간에 따른 광섬유 위치(길이) 별 온도 정보로 구성된다(그림 3.1.3 참조).

KICT Application

← 광섬유 온도 센싱 데이터 후처리 인터페이스

파일선택 D:\01 연구과제\03 (R&D) ORS\03 3차년도\16 SW등록(제방에 설치된 광섬유 온도 센싱 데이터 후처리 프로그램)\광섬유_데이터(20190711).xlsx 다음

그래프시작좌표(x) 13.0 그래프시작좌표(y) 0.2 스무딩계수(k) 0.3

① 광섬유케이블 인입거리(m) 39.0 광섬유케이블 종료거리(m) 118.0 레이어 높이(m) 0.25

② 제방높이(m) 3.0 제방폭(m) 14.0 사면경사(V:H) 2 마루폭(m) 2.0 제방길이(m) 8.0

111.17 ~ 115.22

③ ☒ ☐ ☐ ☒ ☐

그림 3.1.4 광섬유 온도 센싱 데이터 입력

라. 제방 및 광섬유 케이블 매립 정보의 입력

- (1) 안정적인 광섬유 데이터의 수집을 위해 제방 외부에 설치된 광섬유 케이블의 초기 인입 거리에 대한 정보를 그림 3.1.4의 ①에 있는 ‘광섬유케이블 인입거리(m)’에 입력한다.
- (2) 케이블의 시작점부터 제방의 마루 영역까지 매립이 완료된 제방 내부의 케이블 마지막 지점까지의 거리를 그림 3.1.4의 ①에 있는 ‘광섬유케이블 종료거리(m)’에 입력한다.
- (3) 매립된 광섬유의 층간 거리(레이어 간격) 정보를 그림 3.1.4의 ①에 있는 ‘레이어 높이(m)’ 칸에 입력한다.
- (4) 제방의 높이, 폭, 사면경사, 마루폭, 길이 정보를 그림 3.1.4의 ②에 입력한다(제방의 폭은 제방의 바닥 폭을 의미하며 각각의 입력 정보는 소수점 한자리까지 입력).
- (5) 광섬유 케이블이 제방 내에서 꺾이는 지점(각 층별 레이어의 종료 지점)의 위치(길이 값)을 ③의 체크박스를 이용하여 입력한다.

그림 3.1.5 광섬유 위치 정보 및 스무딩계수 입력

마. 데이터 후처리를 위한 입력 변수

- (1) 제방 내 매립된 첫 번째 광섬유 측정 지점의 위치를 X, Y 좌표로 그림 3.1.5의 ④에 입력한다(X 좌표는 사용자가 표현하고자 하는 제방의 방향을 고려하여 결정됨).
- (2) 지수가중이동평균법(EWMA) 기반 스무딩 처리의 수준 결정을 위한 스무딩계수(α)를 그림 3.1.5의 ⑤에 입력한다.
- (3) 스무딩 계수(α)는 사용자가 원하는 스무딩 처리의 수준에 따라 0~1 범위에서 결정되며, 0에 가까울수록 높은 수준의 스무딩 처리되고, 1에 가까울수록 원 자료의 형태를 유지한다. 이때 스무딩 계수가 과도하게 작을 경우(0.1 미만) 데이터의 지연 현상(lagging)이 발생할 수 있다.

바. 광섬유 케이블 내 지점별 그래프의 출력

- (1) 스무딩계수까지 입력을 마친 후 그림 3.1.5의 ⑥ 버튼을 통해 그림 3.1.6과 같이 광섬유 케이블의 지점별 시간에 따른 온도 변화 그래프 및 스무딩 처리가 완료된 데이터를 확인할 수 있다.
- (2) 그림 3.1.5의 ⑦ 버튼을 통해 그림 3.1.7과 같이 광섬유 케이블의 지점별 시간에 따른 온도 차 그래프의 검토가 가능하다.

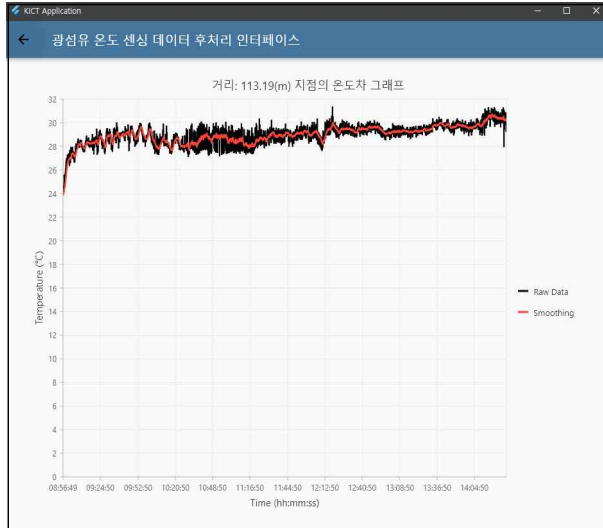


그림 3.1.6 스무딩계수가 0.1로 적용된 시간에 따른 온도 변화 후처리 결과의 예

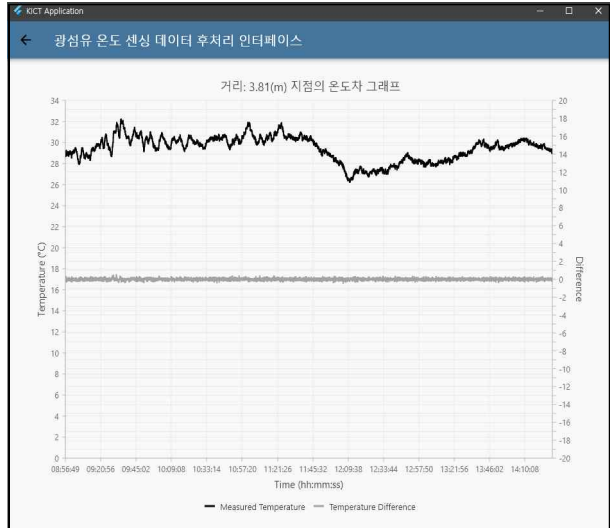


그림 3.1.7 제방 내부의 온도 변화 및 온도차 결과의 예

사. 제방 내 2차원 온도 데이터의 출력

- (1) 각 지점별 온도 그래프를 검토한 후 우측 상단의 '다음' 버튼을 클릭하면 제방의 횡단면 온도 분포 그래프를 확인한다.
- (2) 그래프 상단에 빨간색 스크롤을 좌우로 움직이면 시간 경과에 따른 온도 분포를 확인할 수 있다(그림 3.1.8과 그림 3.1.9).

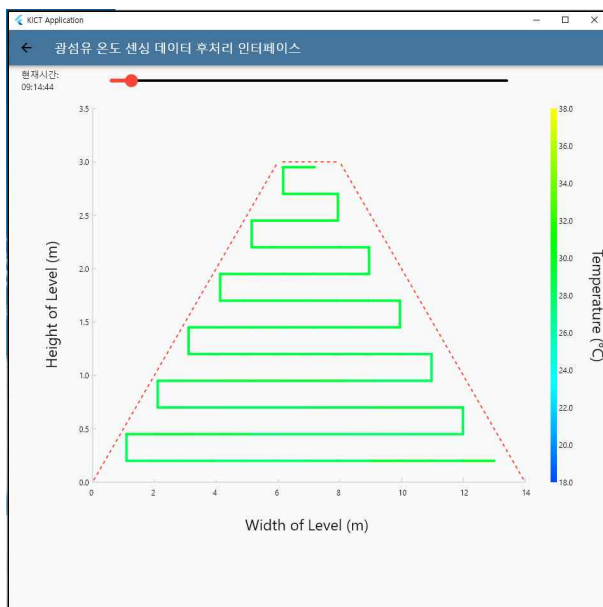


그림 3.1.8 제방 단면의 온도 분포(침투 전)

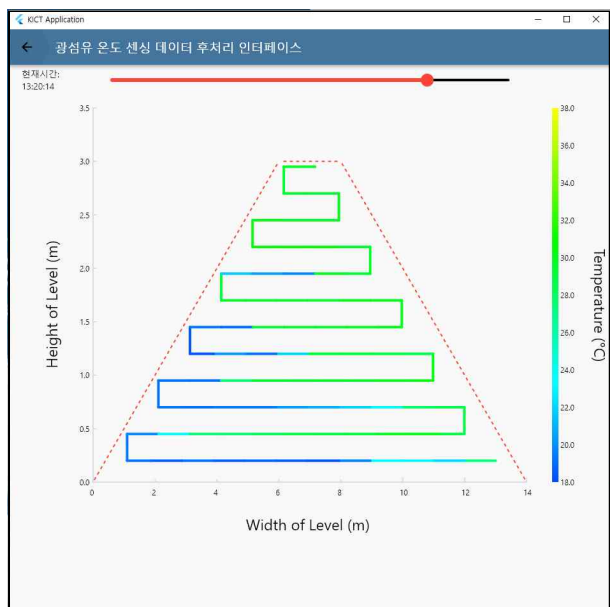


그림 3.1.9 제방 단면의 온도 분포(침투 진행)

아. 제방 내부의 이상현상 감지 모니터링

- (1) 제방 내부의 온도 정보를 기반으로 제체의 이상현상 감지의 모니터링을 위해 그림 3.1.10의 ⑧ 버튼을 클릭한다.
- (2) 모니터링 아이콘을 클릭하면 그림 3.1.11에 나타난 바와 같이 온도 차의 95%의 신뢰구간에 대해 빨간색 실선으로 나타난다.
- (3) 급격한 온도 변화로 인해 신뢰구간을 초과하는 데이터가 발생할 경우 그림 3.1.12와 같이 데이터가 빨간색으로 나타나 관리자가 이상현상을 감지할 수 있도록 한다.

그림 3.1.10 제방 내부의 온도 정보를 기반으로 이상현상 모니터링 실행

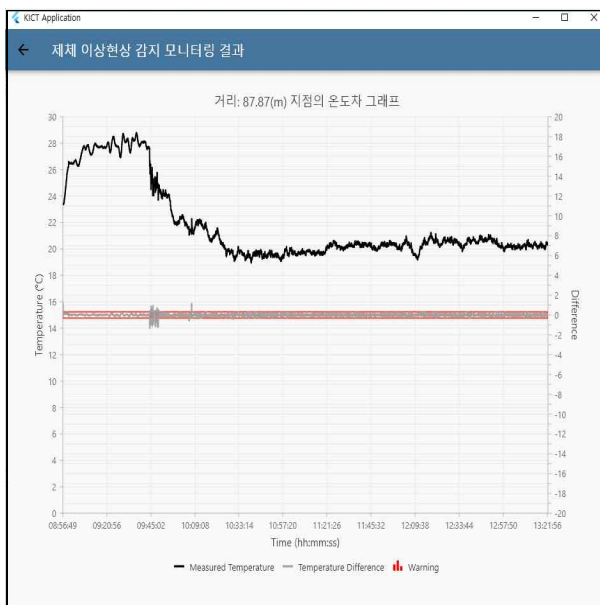


그림 3.1.11 제방 내부의 온도차를 이용한 이상현상 모니터링의 예

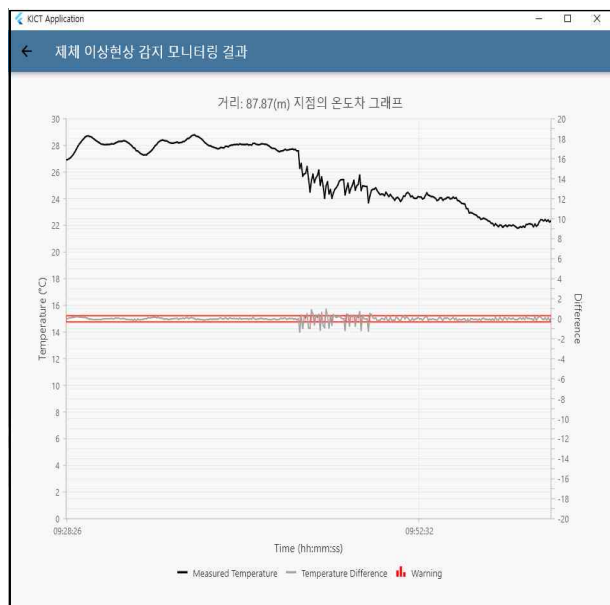


그림 3.1.12 신뢰구간을 초과하는 구간의 이상현상 감지 예

2. 제방 균열 평가 프로그램

가. 프로그램의 개요

첫 번째 프로그램은 알고리즘 및 관계식을 활용하여 제방 균열 평가를 위한 프로그램이다. 프로그램은 측정된 조도와 최대강도 데이터를 입력값으로 하여 제방 균열 평가하고 계산을 일괄적으로 처리한다. 프로그램 명칭은 제방 균열 평가 프로그램으로써 코드명은 bankcrack_classifier이며 프로그래밍 언어는 Python 3, Tkinter, 지원환경은 Windows, Linux, MacOS이다. 구체적인 프로그램의 구성은 그림 3.2.1과 같다. 프로그램의 특징은 측정된 데이터를 바탕으로 균열 여부를 판별할 수 있는 프로그램으로써 측정 지점마다 별도의 조도와 최대강도 데이터가 주어졌을때, 해당 데이터에 대한 균열 여부를 판별할 수 있다. 주요기능은 제방 균열 여부 판단, 데이터 입력 및 판단을 출력하기 위한 GUI 인터페이스를 제공한다.



그림 3.2.1 제방 균열 평가 프로그램의 구성

두 번째 프로그램은 제방 취약구간 탐지를 위한 수심예측계산 자동화 프로그램이다. 프로그램은 초분광 카메라를 통해 측정된 데이터를 입력값으로 하여 제방 취약구간을 예측하고 계산을 일괄적으로 처리한다. 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 3.2.2와 같다. 프로그램의 특징은 초분광 센서 데이터 계산을 일괄처리할 수 있는 프로그램으로써 측정 지점마다 별도의 초분광 데이터 파일이 주어졌을 때, 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 3.2.2 수심예측계산 자동화 프로그램의 구성

나. 초분광 영상 데이터 획득

- (1) 하천 제방 붕괴 위험도가 높은 구간 또는 지자체 점검이 요구되는 구간에 대해 촬영 위치를 선정한다.
- (2) 초분광 센서는 Nano-Hyperspec(Headwall)으로 Aibot X6 V2 드론(Aibotix)과 3축 짐벌에 장착하고, 노트북에서 초분광 영상 촬영을 위한 설정 소프트웨어인 HyperSpec III를 실행한다.
- (3) 초분광센서의 정확한 데이터취득을 위한 Hyper SpecIII 소프트웨어에서 Capture 설정 중 Exposure 및 Frame Period 설정/ 메뉴바 중 Live Video 창에서 Fov calculator 설정 중 Speed to Frame Rate 값으로 Exposure 및 Frame Period 값을 동일하게 설정한다 (그림 3.2.3~3.2.4 참조).
- (4) 초분광 영상촬영 환경조건 설정하기 위해 표 3.2.1~3.2.2와 같이 Hyper SpecIII, Aipro flight(드론), 촬영시간 및 환경조건을 설정한다.



그림 3.2.3 Fov Calculator 설정창에서 Speed to frame rate 값으로 설정

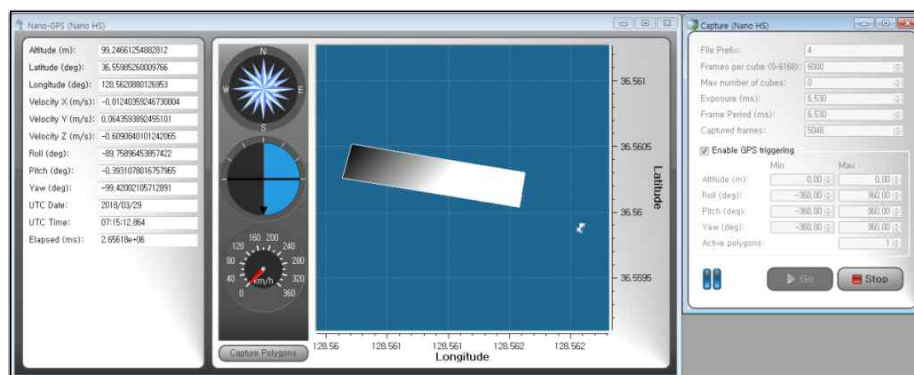


그림 3.2.4 Capture 설정창에서 Exposure값과 Frame period값을 Speed to Frame Rater값으로 동일하게 설정

표 3.2.1 Hyper SpecIII 및 Aipro flight(드론) 설정

Speed to Frame Rate Speed	Frme per Cube & Save frame	Exposure	Frame period	drone Speed & Altitude	Pix4d Altitude
4.000	5000/5048	6.530	6.530	4(m/sec)/60m	40m/60m

표 3.2.2 촬영시간 및 환경조건

촬영 시작시간	촬영시간	촬영 중 최대풍속	바람방향	날씨
시작시간 기록	5분 이내	5 m/s 이내	방향 기록	날씨 기록

- (5) 초분광 영상 촬영 전 촬영 위치에 표준백색판(White Reference)을 설치하고 Flight Plane 고도 및 속도 비행경로 지정 후 촬영을 진행한다(그림 3.2.5 참조). 또한 촬영 진행 시 조도(illumination)를 측정 및 기록한다.
- (6) 0.026 m 공간해상도의 270개 밴드(400~1000 nm) 초분광 영상 데이터를 획득한다(그림 3.2.6 참조).



그림 3.2.5 Flight Plane 고도 및 속도 비행경로 지정



그림 3.2.6 초분광 영상 획득

다. 초분광 영상 데이터 분석

- (1) 영상이 지니고 있는 화소별 고유값을 분석에 활용하기 위해서는 방사보정 및 기하보정을 수행하여야 한다. 영상전처리를 위해 SpectralView(Headwall Photonics Inc., U.S.) 소프트웨어를 활용한다.
- (2) 기기적인 방사보정은 센서와 함께 제공되는 노출시간에 따른 복사보정 파일과 현장에서 수집한 Dark Reference 파일을 기반으로 원 영상을 각 화소별 복사휘도(Radiance) 값으로 변환한다.
- (3) 영상의 기하학적 왜곡은 센서에 부착되어 있는 GPS/IMU를 통해 촬영 시 획득한 자료를 통해 보정한다.
- (4) 획득한 초분광 영상 데이터에 대해 SpectralView를 활용하여 최대강도를 도출한다.

라. 제방 균열 평가 프로그램 설치 및 실행

- (1) 원하는 위치에 bankcrack_classifier.zip 파일을 압축 해제한다.
- (2) 압축 해제된 폴더로 이동하여 main.exe 를 더블클릭하여 실행한다. 이때, 실행파일과 data 폴더는 반드시 같은 위치에 있어야 한다.

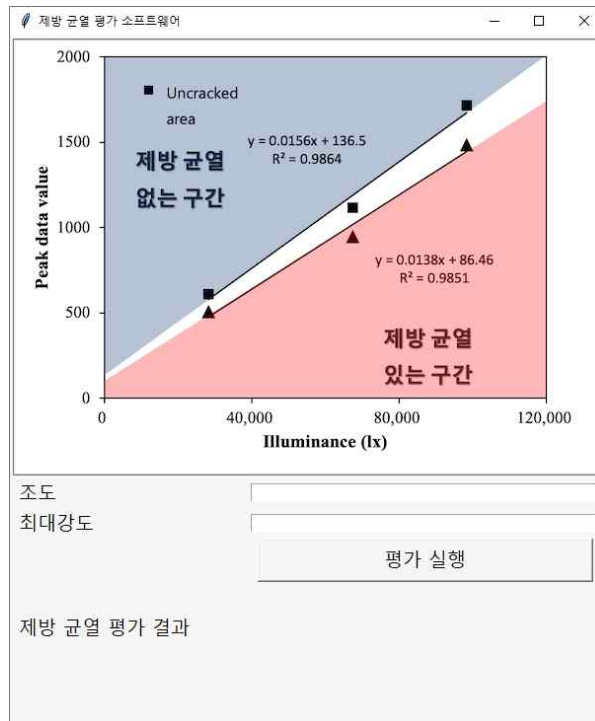


그림 3.2.7 제방 균열 평가 소프트웨어 실행 화면

- (3) 균열 여부를 평가하고자 하는 제방에서 측정된 조도와 최대강도를 입력한다.
- (4) 평가 실행 버튼을 누른다.
- (5) 평가 결과가 결과 항목에 표시된다.
 - * 판별 결과는 '제방 균열 있음', '제방 균열 없음', '제방 균열 없음 (경계 구간)' 중 한가지로 계산된다.
 - * 입력 값은 정수형 혹은 실수형으로 입력되어야 한다. 입력 값이 바르지 않을 경우 '평가 불가 (잘못된 입력값)' 메시지가 출력된다.

조도 80000
 최대강도 1500
 평가 실행
 제방 균열 평가 결과 제방 균열 없음

(a) 제방 균열 없음

조도 80000
 최대강도 800
 평가 실행
 제방 균열 평가 결과 제방 균열 있음

(a) 제방 균열 있음

그림 3.2.8 제방 균열 프로그램 결과 화면

마. 수심예측계산 자동화 프로그램 설치 및 실행

- 1) 원하는 위치에 depth-hyperspectral.zip 파일을 압축 해제한다.
- 2) 압출 해제된 폴더 depth-hyperspectral/dist/ 폴더로 들어가 depth-hyperspectral.exe 실행 파일을 더블클릭하여 실행한다.

Water depth calculator

초분광 데이터 디렉토리 Browse

결과 저장 디렉토리 Browse

수심 예측 수식

계산

그림 3.2.9 제방 취약구간 탐지를 위한 수심예측계산 자동화 프로그램 실행 화면

- 3) 실행 창이 활성화되면 수심 계산을 위한 데이터가 저장된 폴더 경로와 계산 결과를 저장할 경로를 지정해준다.
 - * 별도로 지정하지 않는다면 dist/input/ 과 dist/output/ 를 각각 입력과 출력을 위한 경로로 사용한다.
 - * 압축을 풀면 100개의 예제 파일이 dist/input/ 폴더 내에 포함되어 있으며 해당 파일을 계산하고자 하는 파일로 교체하여 사용할 수 있다.
- 4) 수심 예측 수식을 입력한다.
 - * 기본적으로 input 폴더 내 100개의 초분광 데이터를 통해 얻어진 예측 수식이 입력되어 있

으므로 별도로 수식을 입력하지 않는다면 해당 수식을 사용하여 계산한다.

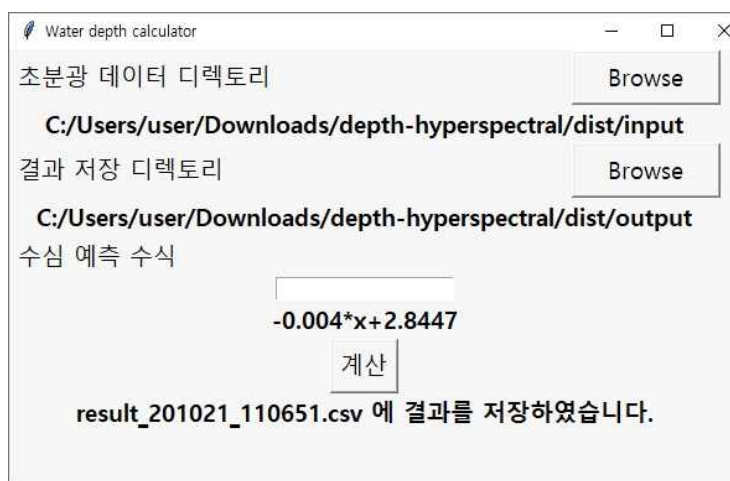
* 수식을 변경하려면 $\langle a \rangle * x + \langle b \rangle$ 의 형식으로 텍스트 창에 입력한다. $\langle a \rangle$ 와 $\langle b \rangle$ 는 실수형의 숫자로 입력되어야 한다. 수식은 1차 다항식만 지원한다.

* 수식이 제대로 입력되면 텍스트 창 아래에 수식이 변경되는 것을 확인할 수 있다.

5) 계산 버튼을 누른다.

* 설정에 문제가 없다면 계산된 결과가 output 폴더에 .csv 파일로 저장되며, 저장된 파일명을 실행 창에서 확인할 수 있다.

* 결과 파일을 엑셀이나, 텍스트 에디터 프로그램을 통해 확인 가능하다.



(a) input 및 output 경로 지정

	A	B	C
1	depth'	data'	file_name'
2	1.7087	284	59.txt
3	1.6887	289	58.txt
4	1.5767	317	44.txt
5	1.4927	338	56.txt
6	1.4927	338	60.txt
7	1.4887	339	57.txt
8	1.4687	344	45.txt
9	1.4047	360	48.txt
10	1.3967	362	51.txt
11	1.3687	369	47.txt
12	1.3607	371	46.txt
13	1.3127	383	50.txt
14	1.2767	392	52.txt
15	1.2727	393	42.txt
16	1.2607	396	43.txt
17	1.2527	398	54.txt
18	1.2247	405	41.txt
19	1.1967	412	37.txt
20	1.1967	412	39.txt
21	1.1967	412	79.txt
22	1.1607	421	40.txt
23	1.1567	422	38.txt

(b) 프로그램 결과자료 화면

그림 3.2.10 수심예측계산 자동화 프로그램 결과 화면

제4장

결론 및 제언

본 가이드라인에서 제시하는 광학원격탐사(ORS)와 광섬유 센싱을 통한 제방 내진점검 및 모니터링 기술은 지진으로 인한 하천 제방의 피해와 이로 인한 인명재산 피해를 최소화하는데 목적이 있다. 지진으로 인한 제방 피해 현장의 내진점검 및 모니터링을 수행하고 하천 제방의 내진 성능 및 안정성을 평가하는데 도움을 주고자 한다. 하천 제방의 내진점검 방법을 체계적으로 설명하였으며, 광섬유 센서를 활용한 제방 제체 상태 모니터링 방법 및 UAV 기반 광학원격탐사(ORS) 활용 제방 모니터링 방법에 대해 쉽게 이해할 수 있도록 설명하였다. 또한, 광섬유 센싱을 통해 획득된 제방 내부의 온도 자료 후처리 프로그램인 '제방에 설치된 광섬유 온도 센싱 데이터 후처리 프로그램'의 활용 매뉴얼을 제시하였고, 초분광 영상자료를 기반으로 제방의 균열 여부 및 수심예측을 분석할 수 있는 '제방 균열 평가 프로그램'과 '제방 취약구간 탐지를 위한 수심예측계산 자동화 프로그램'의 활용 매뉴얼을 제시하였다.

본 가이드라인은 하천 제방의 안정성을 진단하고 평가하는데 필요한 기초자료를 구축할 수 있는 정보를 제공하며, 제방 내진점검 및 모니터링 기술을 체계화할 수 있는 발판을 마련하였다. 이와 같은 가이드라인의 지속적 개발을 통해 국내 실정에 적합한 하천 제방의 내진점검 및 내진 성능 평가 기법을 구체화하고 합리적으로 적용할 수 있는 실용안이 마련될 것으로 기대된다.

참고문헌

국토교통부(2018), 하천설계기준.

일본 국토교통성(2016), 하천구조물의 내진성능 조사 지침.

일본 국토교통성(2016), 하천 제방의 내진점검 매뉴얼.

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.

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.

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

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

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.

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

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.