

광섬유 센서와 분포형 온도 센싱 시스템을 이용한 실규모 제방 모니터링 실험

Large-scale Levee Monitoring Experiment Using Fiber-optic Sensor and Distributed Temperature Sensing System

안명희¹ · 배인혁² · 지윤^{3,4*} · 강준구³

¹한국건설기술연구원 국토보전연구본부 신진연구원, ²과학기술연합대학원대학교 건설환경공학 박사과정,

³한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구위원, ⁴과학기술연합대학원대학교 건설환경공학 부교수

Myeonghui Ahn¹, Inhyeok Bae², Un Ji^{3,4*} and Joongu Kang³

¹Budding Researcher, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

²Ph.D. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

³Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

⁴Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

Received 2 September 2020, revised 13 September 2020, accepted 14 September 2020, published online 30 September 2020

ABSTRACT: In this study, a temperature distribution sensing method using optical fiber was applied to a large-scale levee experiment, and the applicability of wide-area levee or embankment monitoring technology to observe the changes inside the levee was reviewed. The optical fiber was buried in a large-scale levee, and the temporal and spatial temperature changes were measured according to the water level changes in the reservoir. As the water level of the reservoir increased, the temperature of the embankment slope decreased, and as the infiltration progressed, a change in the spatial location of the temperature change was detected. The temperature change due to embankment infiltration varied depending on the time of the infiltration progress, and the change assumed to be the seepage line could be observed. This study has demonstrated that information about temperature changes inside the levee can be interpreted as the information on the locations that are judged to be relatively vulnerable, investigating the changes in the condition inside the levee.

KEYWORDS: Distributed temperature sensing, Fiber optic temperature sensing, Large-scale levee experiment, Levee monitoring technique

요 약: 본 연구에서는 광섬유를 활용한 온도분포 센싱 방법을 실규모 제방 실험에 적용하여, 제방의 사면과 제체 내부의 변화를 모니터링하는 광역형 제방 모니터링 기술의 적용성을 검토하였다. 실규모 제방에 광섬유를 매립하고 저류지의 수위 변화에 따른 제체 내부의 시간적, 공간적 온도 변화를 측정하였다. 저류지 수위가 증가함에 따라 제방 사면의 온도는 감소하였으며, 침투가 진행되면서는 온도 변화가 나타나는 공간적 위치의 변화가 감지되었다. 제방 침투로 인한 온도 변화는 침투 경과 시간에 따라 차이가 나타났고, 침윤선으로 추정되는 변화를 관찰할 수 있었다. 본 연구를 통해 제방 내부의 온도 변화에 대한 정보는 제방 내부의 상태 변화를 판단하고 상대적으로 취약하다고 판정되는 지점에 대한 정보로 해석될 수 있음을 증명하였다.

핵심어: 분포형 온도 센싱, 광섬유 온도 센싱, 실규모 제방 실험, 제방 모니터링 기법

*Corresponding author: jiun@kict.re.kr, ORCID 0000-0002-4925-5018

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 국내에서는 기후변화에 따른 이상기후 현상으로 인해 국지성 호우 및 돌발 홍수의 발생이 더욱 빈번해졌으며, 장기간 지속되는 호우와 폭우로 인해 많은 곳에서 제방 붕괴 피해가 발생하였다. 제방이 파괴되거나 붕괴되지 않은 제방에서도 장마와 홍수로 인해 쉽게 육안으로 판단하기 어려운 침투, 누수, 침하 등의 피해가 발생한다. 이렇게 육안으로 판단할 수 없는 제방 내부의 물리적 변화는 제방 붕괴의 위험성을 더욱 증가시킨다. 따라서 제방 내부의 상태를 파악하고 제방의 취약한 부분에 대한 정보를 제공할 수 있는 모니터링 기법이 필요하다. 이러한 관점에서 일반적인 광케이블 자체를 제방 모니터링을 위한 센서로 활용한다면 광섬유를 제방 내부에 포설하여 포설된 주변 전체 온도를 시간에 따라 대량으로 획득할 수 있다. 광섬유 자체를 온도 측정용 센서로 이용하는 모니터링 시스템의 경우 최소 매 1 m 간격으로 센싱이 가능하다는 점과 하나 또는 두개의 광섬유로 전체 센서를 연결할 수 있다는 특징을 갖고 있다 (Lee et al. 2010).

광섬유 센서 (Fiber-optic Sensor)는 1990년에 지반 수공학 분야에서 처음으로 활용되기 시작하였으며, 광섬유 센서의 기술이 발달하면서 수리구조물 모니터링에도 활용되고 있다. 최근에는 Schenato (2017)가 광섬유를 제방 실험에 적용하면서 다양한 데이터 분석 모델을 제시하였고, 광섬유로 센싱된 데이터의 처리 기법에 대한 연구를 수행하였다. 광섬유를 통해 획득되는 데이터의 용량은 매우 방대하기 때문에 센싱 기술뿐만 아니라 방대한 데이터를 효과적으로 분석하기 위한 기법과 시스템 개발도 중요하다. 특히, 광섬유를 이용한 온도 분포를 측정하는 시스템인 DTS (Distributed Temperature Sensing)는 Raman 산란광을 이용하여 온도 정보를 제공하는 시스템으로 주변 환경 변화를 감지하고 분석하는 측면에서 용이하다 (Kim et al. 2009). 또한, 광섬유 센서는 광범위한 영역을 효율적으로 모니터링하기에 적합하다는 특징이 있어 하천 제방 모니터링 연구에도 적극적으로 도입되고 있다. Habel and Krebber (2011)는 지오텍스타일 (geotextile)과 광섬유 센서를 함께 제방에 설치하여 제방의 누수 및 침하 등으로 인한 변형을 감지하는 연구를 수행한 바 있다. Pyayt et al. (2014)은 인공신경망 분석 기법을 광섬유 센싱을 활용한 제방 모

니터링 방법에 적용한 모델을 제시하였다. Sekula et al. (2018)은 실규모 제방 모형에 광섬유, 간극 수압계, 온도 센서, 피에조미터 등 다양한 계측 센서를 적용하여 제방 모니터링 시스템을 구축한 사례가 있다. Su et al. (2018)은 광섬유 센서에 열을 가열하여 주변 환경으로 인한 온도 변화를 구별하고, 중규모 제방 실험을 통해 제방 내부의 온도 변화를 모니터링한 바 있다. Ahn et al. (2019)은 광섬유와 분포형 온도 센싱 (DTS) 기법을 이용하여 중규모 제방의 붕괴 현상을 관찰하였으며, 시공간적 온도 변화를 기반으로 제방 내부의 이상현상을 분석한 바 있다.

광섬유 온도 센싱 기법은 광범위한 영역의 온도 데이터를 획득하여 비정상적인 수치가 발생하거나 한계 값을 초과한 위치와 시점에 대한 정보를 제공할 수 있으며, 이를 제방 안정성 평가 또는 보강 대책을 마련하기 위한 의사결정 자료로 활용할 수 있다. 광섬유 센서로 수집된 방대한 데이터의 분석을 통해 제방의 누수, 침투, 파이핑 등을 분석한다면 하천 제방 안정성 평가를 위한 모니터링 기법으로 광섬유 센싱을 적극 활용할 수 있다. 따라서 본 연구의 목적은 실규모 제방에 광섬유 센서를 매립하고 분포형 온도 센싱 시스템 (DTS)을 설치한 후 저류지 수위 변화에 따른 제체 내부의 온도 변화를 관측하여 저류로 인한 제방 내부 침투 현상을 모니터링하는 것이다. 수집된 제방 내부의 온도 분포 정보를 통해 제체에서 발생하는 누수 및 침투 현상을 분석하였고, 이를 통해 현장 규모의 제방 모니터링을 위한 광섬유 온도 센싱 기법의 적용성을 검토하였다.

2. 광섬유 온도 센싱의 기본원리 및 실규모 제방 실험 개요

2.1 광섬유 센서 계측의 원리

광섬유 센서의 기본 원리는 광섬유를 통해 지나가는 빛의 세기로 광섬유의 굴절률, 길이, 모드, 편광 상태의 변화를 이용하여 파측정량을 추정하는 것이다 (Lee et al. 2010). 광섬유 센서는 이용되는 효과에 따라 다양한 형태가 있으나 본 연구에서는 분포측정형 광섬유 센서를 활용하였다. 광섬유 센서가 측정할 수 있는 측정량은 전압, 전류, 온도, 압력, 스트레인, 회전률, 음향, 가스 농도 등이 있다 (Giallorenzi et al. 1982). 또한, 광섬유 센서는 센서부에서 전기를 사용하지 않으며 원격 측정

이 용이하다.

광섬유 케이블을 통해 아주 폭이 좁은 레이저와 신호를 보내면 케이블 안에서 산란 현상이 발생하고, 이 중 일부는 반사되며 광다이오드에 의하여 수신되는 진폭은 입사광의 진폭보다 작다. 만약 온도, 변형, 압력 등과 같은 광섬유 주변 환경이 변화하면 여러 종류의 산란 현상이 발생한다. 이 중에서 **Ranman** 산란은 온도 변화에 따라 파장 변위 폭이 크기 때문에 온도 분석 측면에서 파장 변위 폭을 분리하기 용이하며, 온도 측정 분해능 (angular resolution)을 높이는데 유리하다 (Lee et al. 2010). Brillouin 산란 또한 온도, 변형률, 압력과 같은 외부 영향에 따라 민감하게 반응한다 (Kim et al. 2009). 광케이블의 피복물질의 개발에 따라 광섬유 센서 케이블의 온도 감시 성능과 해상도가 높고 (0.01°C) 감지할 수 있는 온도 범위가 매우 넓다 (-150°C - 600°C).

2.2 실규모 제방 광섬유 센서 매립

본 연구에서는 광섬유 온도 센싱을 통한 실규모 제방 내부의 이상 현상 감지 모니터링 시스템의 개발과 그 적용성을 검토하기 위해 한국건설기술연구원 하천연구센터 내의 실규모 제방 실험장에서 실험을 수행하였다. 실규모 제방 실험장의 저류량은 약 4,389 m³이며, 제방의 총 길이는 10 m, 높이 3 m, 마루폭 2 m, 비탈경사 1:2 이다 (Fig. 1). 제방 성토 재료는 중앙입경 (D₅₀)이 1.1 mm이며, 최대건조밀도는 1.853 g/cm³, 최적함수비는 11.7%이다. 제방 내부의 온도 변화를 모니터링하기 위해 제방 일부 구간에 광섬유 케이블을 매립하였으며, 본 실험에서는 코어 직경 50 μm, 클래딩 125 μm인 OM2 (Optical Multimode 2) 광섬유 케이블을 사용하였다. 광섬유 케이블은 전송속도가 빠르고 높은 대역폭을 지원하며 외부 환경 변화에 매우 민감하다. 또한, 온도 변화에 매우 민감하므로 전체 길이의 광섬유 케이블

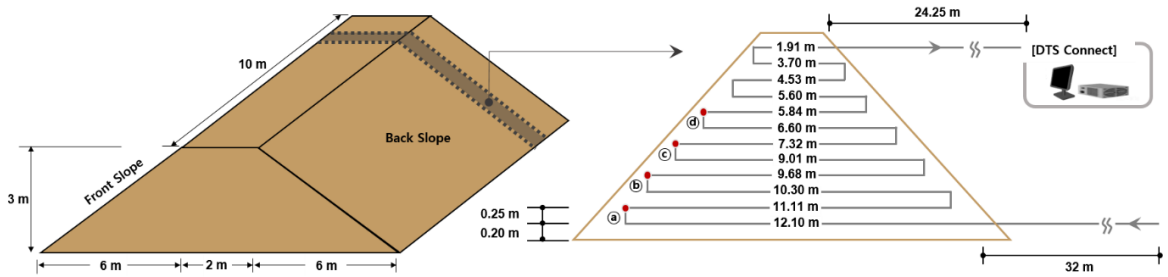


Fig. 1. Schematic diagrams of large-scale experimental levee and fiber optic sensors installation.

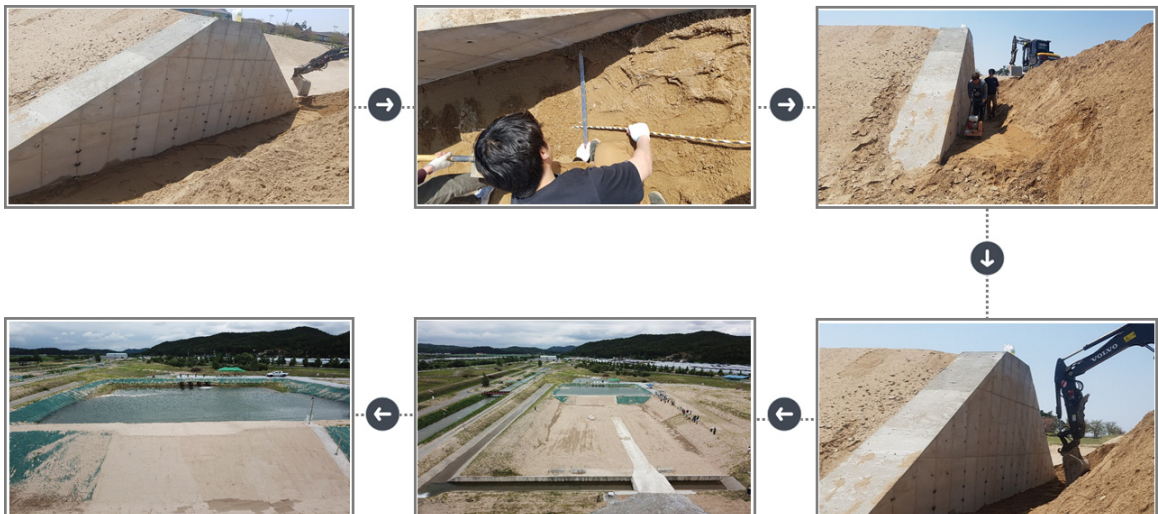


Fig. 2. Optic fiber cable installation sequence in the large-scale levee experiment.

을 일정한 온도 값으로 조절 가능한 히팅 케이블을 피복하여 실험을 진행하였다. 광섬유 케이블에 히팅 케이블을 피복할 경우, 광섬유 케이블에 일정한 온도를 가열하여 수위 변화에 따른 온도 변화를 식별할 수 있는 데이터를 획득할 수 있다. 즉, 물 이외의 온도에 대한 영향을 받지 않는 상태에서 수위 변화로 인한 제체 온도 분포의 변화를 파악할 수 있다. 실규모 제방 실험에서는 총 150 m의 히팅 케이블이 피복된 광섬유 케이블을 활용하여 실험을 수행하였다.

광섬유 케이블을 매립하는 과정에서 가장 중요한 것은 광섬유가 제방 내부의 어느 위치에 설치되고 있는지를 정확하게 현장에서 기록하는 것이다. 광섬유 케이블이 시작되는 위치부터 매립되는 길이, 제방의 높이와 사면으로부터 떨어진 거리를 정확하게 측정 및 기록하여 최종 매립도를 작성하였다 (Fig. 1).

실규모 제방 실험을 위한 광섬유 매립은 기초지반에서 수직방향으로 약 0.2 m 떨어진 위치에서는 12.10 m 길이의 광섬유를 매설하였고, 흙을 포설한 후 진동 롤러로 다짐을 수행하였다. 다짐 후 수직방향으로 0.25 m 올라간 층에 광섬유 케이블을 11.11 m 다시 설치하고 흙을 포설한 후 층 다짐을 반복하였다. 이러한 과정을 제방 상단까지 반복하여 광섬유 케이블을 제방에 설치하였고 제방 형상에 맞춰 총 12개 층, 87.7 m의 광섬유 케이블을 매립하였다 (Fig. 2). 또한, 광섬유 케이블로부터 안정적인 온도 센싱 결과를 획득하기 위해 시작과 끝 부분에 각각 32 m, 24.25 m의 여유 구간을 확보하였다. 제방 내부에 광섬유 케이블 매립을 완료한 후 분포형 온도 센싱 (DTS) 시스템과 연결하고, 저류지에 유량을 공급하여 수위를 상승시키면서 제방 내부의 온도를 모니터링하였다. 광섬유 케이블 1 m 길이 간격으로 6 초마다 제방 내부의 온도 정보가 기록되었다.

2.3 저류지 수위 변화 모니터링

저류지의 수위 변화를 모니터링하기 위해 압력식 수위계를 설치하여 10초 간격으로 수위 데이터를 측정하였다. 저류지에 유량을 공급하기 시작한 시점부터 1시간 35분이 경과되었을 때 저류지 수위는 최대 2.54 m가 되었다. 1시간 35분 이후에는 유량 공급을 중지하였으며, 이후 제방 침투로 인해 저류지 수위가 서서히 감소하였다.

제체 온도 변화 모니터링은 저류지에 유량이 공급되기 시작한 시점부터 약 5시간 동안 진행되었다. 저류지

수위가 변동되는 동안 제체 내부의 온도 변화는 광섬유 센서와 분포형 온도 모니터링 시스템으로 모니터링하였다. 저류지 수위가 최대가 된 이후 제체에 침투가 활발히 진행되면서 저류지 수위가 서서히 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 저류지에 유량공급이 중지된 최대 수위가 발생한 시점에서 1시간이 경과했을 때, 수위는 0.19 m 저하되었으며, 2시간 경과했을 때는 0.32 m 저하되었다. 3시간 경과했을 때는 최대 수위보다 0.39 m 저하되었다. 실험을 종료한 시점에서는 최대 수위 (2.54 m)보다 0.47 m 저하된 것으로 확인되었다. 광섬유 온도 센싱을 통해 획득한 제방 내부의 온도 자료와 저류지 수위 변화 자료를 활용하여 제방의 침투 여부 및 침윤선 등을 분석하였다.

3. 실규모 제방 실험 결과

3.1 수위 변화에 따른 지점별 온도 변화 분석

광섬유 분포형 온도 모니터링 시스템 (DTS)을 통해 획득한 온도 자료는 센싱과정에서 발생하는 랜덤 오차로 인해 변동성이 존재한다. 이러한 변동성을 줄이고 장시간의 데이터 변화 양상을 검토하기 위해서는 후처리 과정이 필요하다. 광섬유 온도 센싱 데이터와 같은 방대한 양의 데이터를 후처리하는 다양한 방법 중 본 연구에서는 Bac and Ji (2019) 연구에서 제시한 후처리 알고리즘을 적용하였다. 시간에 따른 온도 데이터에서 이상치를 제거하고 스무딩 처리하여 제방 높이 별 온도 변화를 분석하였다. 이 알고리즘은 Median Absolute Deviation 과 Modified z-scores를 이용하여 데이터의 이상치를 1차적으로 제거하고, Exponentially Weighted Moving Average를 통해 데이터를 필터링하는 방식이다.

Fig. 1의 광섬유 매립도에 표기된 저류지 사면과 가까운 센서 위치별 (a, b, c, d) 온도 변화를 시간에 따라 표기한 것이 Fig. 3이다. 저류지 수위가 상승함에 따라 제방 하단부터 온도가 저하되는 것을 확인할 수 있다. 제방 높이 0.45 m 위치에서 가장 빠르게 급격한 온도 변화가 나타났으며 (Fig. 3 (a)), 저류지에 유량 공급이 시작된 후 약 27°C 온도를 유지하다 상승한 후로부터 온도 저하가 발생했다. 저류지 수위를 2.54 m까지 상승시키고 제체에 침투가 발생한 후의 온도 변화를 관찰한 결과, 서서히 온도가 감소하면서 침투가 약 1시간 경과한 시점에는 온도가 19°C까지 저하된 것을 확인할 수 있다.

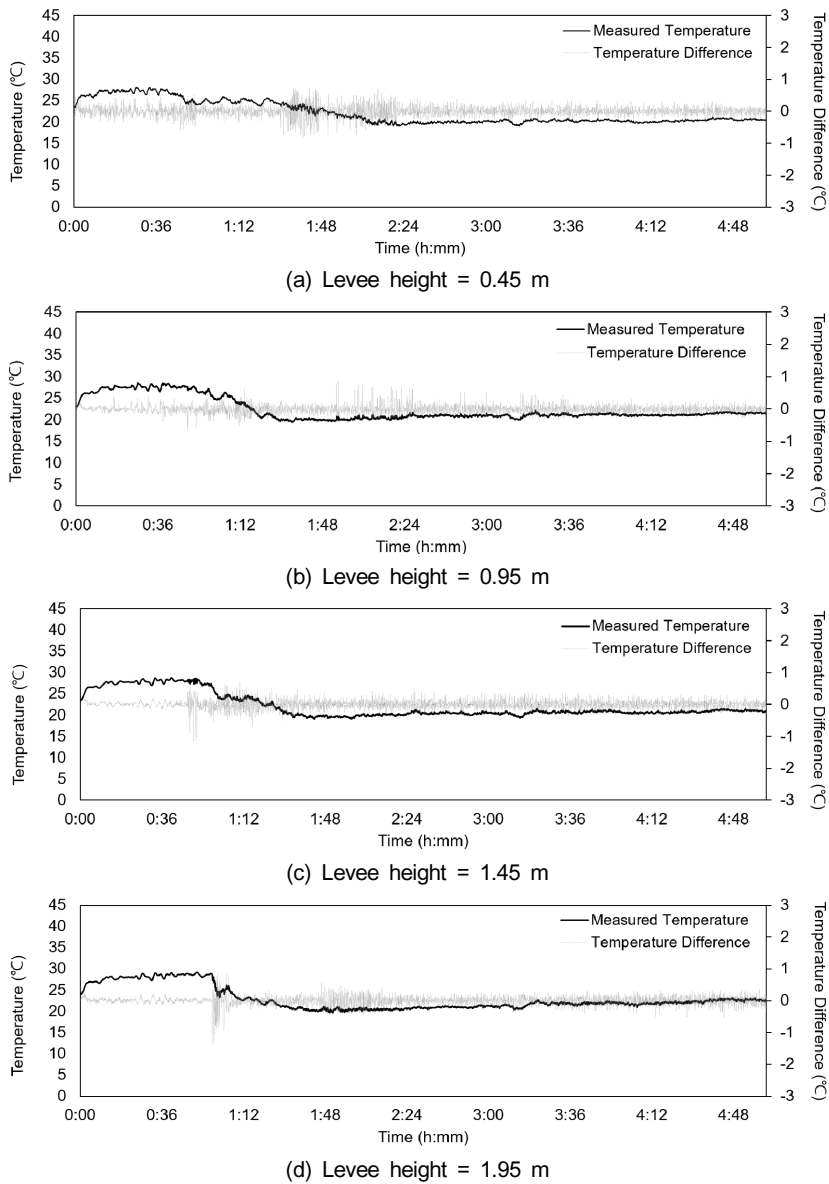


Fig. 3. Temperature variation and temperature difference of levee slope.

또한 Fig. 3에서는 6초 간격으로 측정되는 온도 값에 대해 바로 이전에 측정된 온도와의 차이를 각각 계산하여 도시(회색선)하였다. 양(+)의 값인 경우 현재 온도가 6초전 온도보다 상승했다는 의미이며 음(-)의 값인 경우 현재 온도가 6초전 모니터링 된 온도보다 하강했다는 의미이다. 이는 급격한 온도 변화가 발생하는 시점과 위치를 판별하기 위한 것이며, 그래프에서 확인할 수 있듯이 온도 변화가 발생하는 시간대에서 온도 차 또한 변동 폭이 큰 것으로 나타났다. 예를 들어, 제방 높이 0.45 m에서 관측된 자료에서 온도 차(Fig. 3 (a))의 표

준편차는 0.405°C 였으며, 표준편차 범위를 벗어나는 시점에서 온도 변화가 급격하게 나타났다.

제방 높이 0.95 m, 1.45 m 위치에서 센싱된 온도 자료는 비슷한 경향으로 변화하였으며, 제체 침투가 진행됨에 따라 초기 온도보다 각각 7°C , 8°C 저하되어 $19 - 20^{\circ}\text{C}$ 범위로 나타났다. 또한, 온도 차의 표준편차는 각각 0.409°C , 0.408°C 로 산정되었다. 제방 높이 1.95 m 위치에서는 1차적으로 저류지 수위 상승으로 인해 급격하게 온도가 저하되었으며, 짧은 순간에 4.9°C 의 온도 변화가 나타났다. 또한, 침투가 진행되면서 2차적으로

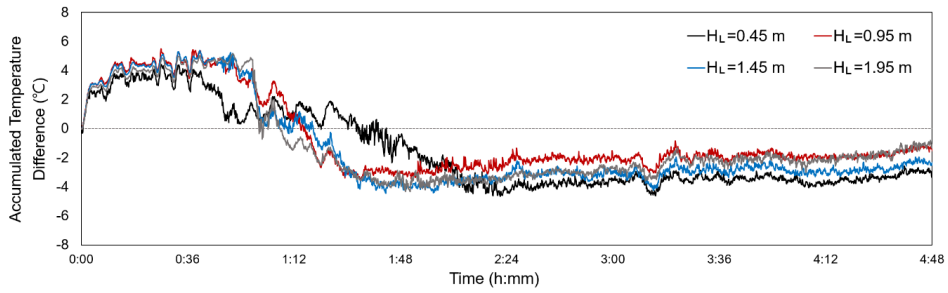
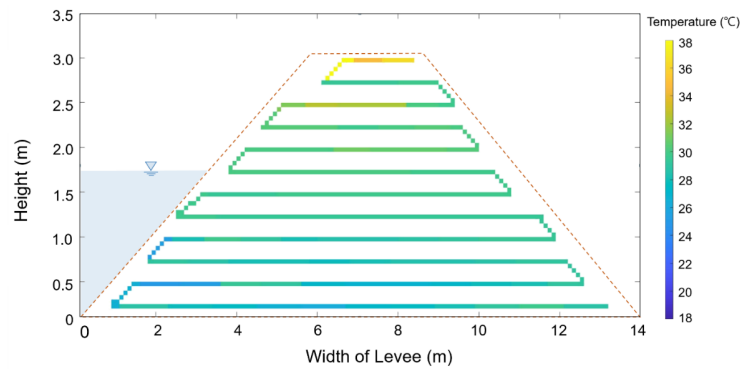
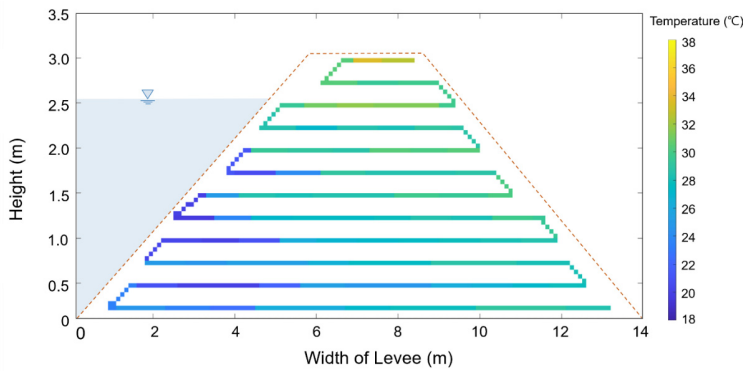


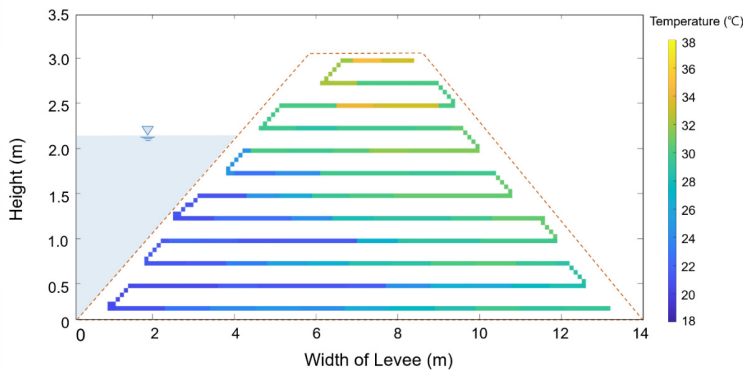
Fig. 4. Temporal changes in accumulated temperature differences at different locations.



(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)

Fig. 5. Cross-sectional distribution of temporal and spatial temperature changes in the experimental levee.

약 2.6°C가 저하되었고, 온도차의 표준편차는 0.408°C로 산정되었다. 전반적으로 저류지 수위 변화에 따른 제방 사면의 위치별 온도 변화는 광섬유 센싱을 통해 확인할 수 있었으며, 제방 내부 온도 데이터에서 온도차가 0.4°C 이상으로 발생한 시점에서 급격한 변화가 있는 것으로 해석된다.

본 연구에서는 이러한 온도 변화에 대한 보다 시각적인 추이를 확인하기 위해 Fig. 4와 같이 온도 차의 누적 그래프를 도시하였다. 누적 온도 차가 일정한 값에서 변동되는 경우 제체 내부에 이상 변화가 없는 상태이며 누적 온도 차가 급격히 변화하는 시점은 제체 내부에 변화가 발생하고 있다는 것을 나타낸다. 이력 온도 정보와 현 시점에 모니터링 되는 온도 값의 차이를 분석하여 제방 내부의 이상 변화를 감지하는 방법은 제방의 주변 환경과 물리적인 변수에 따라 온도 분포 특성이 다르게 나타나기 때문에 절대적인 임계값에 의존하기 보다는 누적 온도 차를 활용하거나 장기적인 모니터링을 통해 평균 값으로 정의되는 온도 값을 사용자가 설정한 후 분석할 필요가 있다.

3.2 제방 침투로 인한 제체 내부의 공간적 온도 변화 분석

광섬유 센서와 분포형 온도 센싱 시스템으로 관측한 실규모 제방 내에서의 온도 변화는 시간적, 공간적 분포 결과로 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 저류지에서 유량이 공급되어 수위가 최고가 된 후 제방으로 침투가 발생하는 동안의 제체 온도 변화를 평면적으로 관찰하기 위해 광섬유 케이블의 길이와 제방 위치에 대한 정보를 토대로 제방 단면에 대한 광섬유 온도 센싱 데이터를 도시하였다. 대표 시점은 실험이 시작된 후 약 35분 후 (Fig. 5 (a)), 실험 시작 후 유량공급이 중지되고 최고 수위가 발생한 시점인 1시간 35분 후 (Fig. 5 (b)) 그리고 4시간 35분 경과한 후 (Fig. 5 (c))이다.

실험이 시작되고 35분이 지난 시점에서 저류지 수위는 1.75 m였으며, 제체 내부의 온도 변화는 크게 나타나지 않았다 (Fig. 5 (a)). 그러나 저류지 수위가 상승하는 과정에서 저류지측 제방 하단의 온도가 제방 상단의 온도보다 상대적으로 낮은 것으로 확인할 수 있다. 최대 수위가 발생한 1시간 35분 시점에서 제체 온도 분포를 살펴보면 (Fig. 5 (b)), 저류지 사면 쪽의 온도 저하가 뚜렷하게 나타났으며 제방 저면에서는 제체 안쪽까지 온

도가 감소한 것을 확인할 수 있었다. 제체 내부의 온도 감소는 시간이 경과함에 따라 저류지에서 제내지 방향으로 서서히 진행되는 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 5 (c)). 이는 저류지에서 제내지 방향으로 침투가 진행되면서 나타난 현상임을 추정할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 광섬유 센서와 분포형 온도 모니터링 시스템 (DTS)을 실규모 실험 제방에 매설하여 저류지 수위 변화 및 침투로 인한 제체의 온도 변화를 모니터링 하였다. 광섬유 온도 센싱 정보를 기반으로 시간에 따른 지점별 온도 분포와 대표 시점에서의 공간적 제방 단면 온도 분포를 도시하여 제방 내부의 침투 상태를 관찰 하였다.

저류지 쪽 제방 사면과 가장 가까운 위치의 광섬유 센서는 제방 침투가 발생할 경우 가장 먼저 온도 변화가 발생하는 지점이기 때문에 실험 전체 시간에 대해 제방 높이에 따라 온도 변화를 분석하였으며, 그 결과 저류지 수위 상승 및 저하에 따라 온도 변화와 변동량 값에서의 급격한 변화를 감지할 수 있었다. 센싱 시간 차에 따른 온도 변동량의 누적 그래프를 통해 급격한 변화가 발생하는 시점을 보다 명확히 판단할 수 있었다. 이러한 급격한 온도 변화는 제방에 침투가 발생된 것으로 해석할 수 있다. 또한, 제방 단면의 온도 분포를 시각적으로 확인하여 침투가 진행된 정도와 침투가 발생하는 위치 정보를 파악할 수 있었으며, 단면 전체의 온도차를 통해 침투선의 변화를 관찰할 수 있었다. 따라서 광섬유 센서와 분포형 온도 모니터링 시스템을 활용하여 제체 내부의 시간적, 공간적 온도 분포를 모니터링함으로써 제체 내부의 침투 진행 여부 및 경로뿐만 아니라 제방의 취약 구간과 위치에 대한 정보까지 수집할 수 있다. 지속적인 온도분포 모니터링 자료 수집이 가능하다면 침투 진행에 따른 제방의 파이핑 현상까지도 사전에 감지하여 선제적인 보수 및 보강을 통해 제방 피해를 사전에 대비할 수 있다.

제방 이상 감지 및 안정성 평가 모니터링 기법으로 광섬유 센서와 분포형 온도 센싱 시스템을 활용하는 방법에 대한 적용성은 본 실험에서 수행한 실규모 제방 모니터링 실험을 통해 확인되었으며, 기존의 물리 탐사기법 기반의 국부적인 모니터링이 아닌 광역형 모

니터링 기법으로 하천 제방 모니터링에 매우 효과적인 것으로 판단된다. 광섬유 센싱 모니터링 기법의 실질적인 실용성을 높이기 위해서는 방대하게 기록되는 데이터를 실시간으로 빠르게 분석하여 이상 감지의 효율성을 극대화하는 것이 가장 필요하며, 이를 위해서는 적절한 비용과 노력으로 데이터 필터링 및 후처리가 가능하도록 하는 시스템의 개발과 개선이 뒷받침되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (20AWMP-C140166-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, M., Ko, D., Ji, U., and Kang, J. 2019. Experimental study on levee monitoring system for abnormality detection using fiber optic temperature sensing. *Ecology and Resilient Infrastructure* 6(2): 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* 11(5): 951.
- Giallorenzi, T., Bucaro, J., Dandridge, A., Sigel, G., Cole, J., Rashleigh, S., and Priest, R. 1982. Optical fiber sensor technology. *IEEE Journal of Quantum Electronics* 18(4): 626-665.
- Habel, W.R. and Krebber, K. 2011. Fiber-optic sensor applications in civil and geotechnical engineering. *Photonic Sensors* 1(3): 268-280.
- 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. *The Journal of Engineering Geology* 19(1): 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* 15(12): 209-216.
- Pyayt, A.L., Kozionov, A.P., Mokhov, I.I., Lang, B., Meijer, R.J., Krzhizhanovskaya, V.V., and Slood, P. 2014. Time-frequency methods for structural health monitoring. *Sensors* 14(3): 5147-5173.
- Schenato, L. 2017. A review of distributed fibre optic sensors for geo-hydrological applications. *Applied Sciences* 7(9): 896.
- Sekula, K., Połec, M., and Borecka, A. 2018. Innovative solutions in monitoring systems in flood protection. In, *E3S Web of Conferences* (Vol. 30, p. 01005). EDP Sciences.
- 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.