

## 적외선 이미지를 이용한 지하공동 평가

### Evaluation of Cavity Characterization Using Infrared Thermal Images

장 병 수 <sup>1</sup>	Jang, Byeong-Su	김 영 석 <sup>2</sup>	Kim, Young-Seok
김 세 원 <sup>3</sup>	Kim, Se-Won	최 현 준 <sup>4</sup>	Choi, Hyun-Jun
윤 형 구 <sup>5</sup>	Yoon, Hyung-Koo		

#### Abstract

Cavity causes settlement and its remediation after an accident results in significant time and economic losses. This study aims to experimentally evaluate the prospect of using infrared camera to detect and measure underground subsidence. Emissivity is necessary to detect the energy emitted from an object and accurately assess temperature using an infrared camera. The emissivity in laboratory tests is fixed to evaluate a reasonable distance between the infrared camera and the object, and temperature values are assessed at various distances. In field experiments, the cavity of the field experiment is simulated using a PVC pipe with a diameter of 5 cm, artificially buried at depths of 5 and 25 cm from the surface. The infrared camera measurements are taken from 4 PM to 3 PM of the next day (a total of 23 h). The analysis included the time-series temperature distribution and the cooling rate index assessment, which represents the temperature change rate per unit of time. The results showed that various temperature trends are observed depending on the location of the subsidence. This study demonstrates that the infrared camera can be used to assess the condition of the subsurface.

#### 요 지

지반의 공동은 지반 침하를 야기하고 사고 발생 후에는 이를 보수하기 위해서도 많은 시간적 및 경제적 손실이 발생한다. 본 연구에서는 적외선 카메라를 새로운 계측 수단으로 활용하여 지하 공동의 탐지 가능성을 실험적으로 평가하고자 하였다. 적외선 카메라로 정확한 온도를 평가하기 위해서는 물체에서 방출하는 에너지를 탐지해야 하며 이때 방사율 값이 필수적으로 이용된다. 현장 실험 시 적외선 카메라와 물체의 합리적인 거리를 평가하기 위하여 방사율을 고정하고 거리 변화에 따른 온도 값을 평가하였다. 이를 통해 현장 실험 조건을 구성하였다. 현장 실험의 동공은 5cm 직경의 PVC pipe 관으로 모사하였으며, 지표를 기준으로 5cm와 25cm에 인위적으로 매설하였다. 적외선 카메라는 오후 4시부터 다음날 오후 3시까지(총 23시간) 측정하였으며, 온도의 시계열 분포뿐만 아니라 단위 시간당 변화량인 cooling rate index 방법을 통해서도 분석하였다. 분석결과는 공동 위치에 따라 온도 변화 추세가 상이하게 나타났으며, 이를 통해 적외선 카메라로 지반 내부의 상태를 평가할 수 있는 가능성을 보여준다.

**Keywords :** Cavity, Emissivity, Infrared camera, Thermal conductivity

- 1 정희원, 대전대학교 재난안전공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Disaster Safety Engrg., Daejeon Univ.)
- 2 정희원, 한국건설기술연구원 북방인프라특화팀 선임연구위원 (Member, Senior Research Fellow, Northern Infrastructure Specialized Team, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
- 3 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 연구원 (Member, Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
- 4 정희원, 한국건설기술연구원 북방인프라특화팀 수석연구위원 (Member, Senior Researcher, Northern Infrastructure Specialized Team, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
- 5 정희원, 대전대학교 재난안전공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Disaster Safety Engrg., Daejeon Univ., Tel: +82-42-280-2570, Fax: +82-42-280-2576, hyungkoo@dju.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2023 by the Korean Geotechnical Society

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

도시 속 지반 침하는 노후화된 매설관과 매설관의 시공 불량 문제등으로 인해 발생하며, 인명피해가 발생할 가능성이 있어 사회적인 관심이 높다. Lee et al.(2016)와 Kwak et al.(2019)는 지하 공동 및 지반 침하가 발생하는 메커니즘을 노후 매설관의 특성과 연계하여 설명하였으며, 노후 매설관의 관리가 필요함을 보여줬다. Hong et al.(2015)과 Lee and Cho(2016)은 지반 침하 및 지반 함몰을 유발하는 지반의 이완 거동을 수치해석으로 고찰하였으며 지하공동 심도를 추정 할 수 있는 방법론도 제시하였다. 지하 공동을 조사하는 일반적인 방법은 지표 투과 레이더(Ground Penetration Rader: GPR)과 시추 조사를 이용하며 탄성과 탐사와 전기비저항 탐사와 같은 비파괴 탐사를 이용한 방법도 보조적인 수단으로 이용되고 있다. Kim(2017)은 도로 포장 두께를 고려하여 GPR의 주파수를 변화하면서 지하공동 여부를 평가하였으며, Go and Lee(2021)은 GPR 결과에 신호 특성 분석을 수행하여 지하공동에 적합한 주파수 대역을 제시하였다. 추가적으로 다른 비파괴 탐사방법을 적용한 사례는 매질의 특성에 따라 변화하는 탄성파의 전파 특성을 이용하여 지하공동 탐사의 적용성을 평가한 연구도 있다(Song et al., 2016). 하지만 해당 방법들은 운용중인 도로의 통제 및 차단이 필요하며 제안한 방법을 적용하기에는 많은 제약이 따른다. 또한 센서 설치 및 대형 장비 진입으로 공간 및 시간적인 한계도 있어 활용성 측면에서 새로운 방법의 제시가 필요하다.

이를 해결하고자 설치 및 작동 방법이 상대적으로 간단한 적외선 카메라를 이용하여 지하공동을 탐지하는 연구가 이루어지고 있다. Abdel(1970)은 선행적으로 적외선 카메라를 이용하여 공동 탐사에 대한 가능성을 시사하였고, 광범위한 지역의 탐사에 대한 시스템을 구축하고자 하였다. Cho et al.(2016)는 포장층 하부에 공기와 흙으로 충전된 인공 실험 모델을 모사하여 지하공동 유무에 따라 온도 차이가 발생하는 원인에 대한 메커니즘을 분석하였다. Du et al.(2017)는 비균열 아스팔트와 균열 아스팔트에서 적외선 온도 차이를 이용하여 지하 공동을 유추하였다. 최근에는 Kalhor et al.(2021)이 다양한 지하 공동을 조성한 후 적외선 온도 결과를 기반으로 지하공동 형태에 적합한 적외선 온도 분석 방법을 제시하였다. 또한, 적외선은 외부 열 환경에 영향을 받으며 절대 온도 값을 도출하기 위해서는 보정 입력 값

인 방사율 결정이 중요하다(Avdelidis and Moropoulou, 2003). 하지만, 방사율이 중요한 요소임에도 불구하고 기존 연구는 방사율 선정과 측정 거리에 따른 왜곡된 영향 정도를 정량적으로 평가한 결과가 미비한 실정이다. 따라서 해당 연구에서는 적외선을 이용한 지하공동 탐사시 방사율 선정과 측정 거리의 영향 정도를 정량적으로 평가하였으며 적정한 방사율과 측정거리를 제시하고자 하였다.

본 연구에서는 적외선과 방사율의 배경이론 및 이론적 개념을 소개하였고 거리에 따른 적외선 카메라의 온도 분포를 고찰할 수 있는 실내실험 개요에 대해서도 설명하였다. 동공의 위치에 따라 온도의 경향성을 확인할 수 있는 현장실험 방법 및 적외선 카메라 운영 방식도 소개하였으며, 단위 시간당 온도 변화율로 분석하는 방식을 통해 최종적으로 적외선 카메라의 활용 가능성을 제시하였다.

## 2. 배경이론

### 2.1 적외선

전자기파는 파장의 크기에 따라 Fig. 1과 같이 감마선(Gamma rays,  $10^{-5}$  nm~0.1nm), 엑스선(X-rays,  $10^{-4}$  nm~10nm), 자외선(Ultraviolet, 0.6nm~400nm), 가시광선(Visible light, 400nm~700nm), 적외선(Infrared, 700nm~1mm), 마이크로파(Micro wave, 1mm~10cm) 그리고 전파(Radio wave, 1mm~100km)으로 세분화되며, 파장이 커질수록

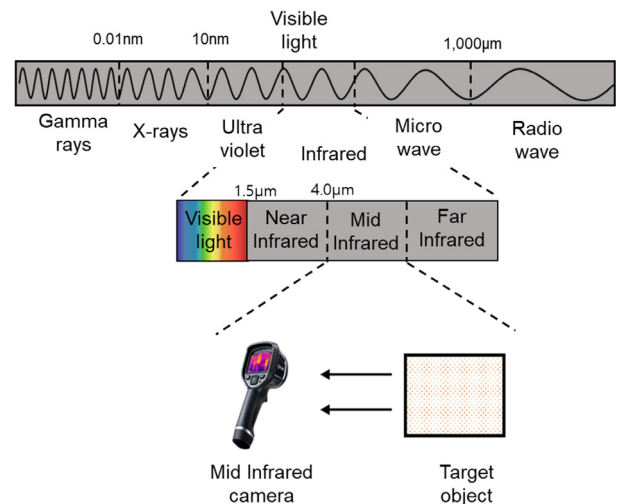


Fig. 1. Types of electromagnetic spectrum according to wavelength. The mid infrared range was applied in this study

주파수는 감소하는 특성을 보인다. 이중 적외선은 가시광선과 유사한 반사 및 굴절 등의 광학적 특성이 있지만 인간의 눈으로는 볼 수 없는 파장 대역을 보인다. 절대영도 이상의 온도를 갖는 물체는 표면에서 적외선을 방출하며 방출량은 해당 물체의 온도와 관계가 있어 이를 측정하면 물체의 온도를 유추할 수 있다. 적외선 카메라는 물체로부터 방출되는 열에너지를 측정하여 적외선의 파장이 포함된 양에 따라 물체의 온도를 RGB 기반의 색상으로 표현해주는 특성이 있다. 따라서 최근에는 열화상 카메라를 통해 대상 물체의 온도분포를 이해하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다(Sabato et al. 2022).

## 2.2 열전도도

열전도도는 두 물체가 접촉한 상태일 때 분자의 운동이 전달되어 열이 이동하는 현상으로 열전도도는 1m 거리를 가지고 있는 재료의 양쪽에 온도 차가 1°C일 때 1m<sup>2</sup>의 표면적을 통해 흐른 열량을 의미하며 단위는 W/mK이다(Liu, 1990). 이는 물체가 열을 얼마나 잘 전달하는가에 대한 물체의 고유한 척도이며 열전달은 물체의 면적이 넓을수록, 온도차가 클수록 잘 이뤄지며 물체의 두께가 두꺼울수록 열전도는 낮아진다. 따라서 높은 열전도도를 가진 물체는 열에너지의 전달이 우수하며, 수식 (1)과 같이 수학적으로 표현된다.

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

여기서 Q는 열에너지 [W], k는 열전도도[W/mK], A는 단면적 [m<sup>2</sup>], ΔT 물체간의 온도차 [K] 그리고 Δx는 두께 [m]를 의미한다.

## 2.3 방사율

방사율은 물체에서 에너지가 방사되는 비율을 의미하며, 적외선 카메라로 물체의 정확한 온도를 측정하기 위한 필수 상수 값이다. 여기서, 방사율(ε)은 수식 (2)와 같이 흑체에서 복사되는 에너지(W<sub>obj</sub>)와 물체에서 복사되는 에너지(W<sub>bb</sub>)의 비율로 정의된다.

$$\varepsilon = \frac{W_{obj}}{W_{bb}} \quad (2)$$

## 3. 실험 방법

해당 논문에서는 실내 및 현장실험을 진행하였으며, 실내실험에서는 적외선 카메라의 입력값인 방사율의 영향을 추정하고자 하였다. 현장실험은 인위적으로 조성한 지반 동공에 자연적인 태양의 열에너지를 활용하여 적외선으로 이상대를 찾을 수 있는지에 초점을 맞췄다. 실험방법의 자세한 설명은 다음과 같다.

### 3.1 실내실험: 콘크리트 방사율 측정

수식 (2)를 기반으로 방사율을 도출하기 위해선 무결점의 흑체 물질과 외부 영향 환경을 완벽히 통제해야 되는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 절대온도와 방사율 변화에 따른 적외선 온도를 비교하여 측정대상 물질인 콘크리트의 방사율을 측정하였다. Fig. 2는 실험적 방사율 도출을 위한 실험 방법이며 대기온도에 영향을 받지 않기 위해 일정한 온도인 31°C 유지하기 위해 열 램프를 사용하였다. 측정 방법은 콘크리트와 적외선 카메라의 거리를 2.5m로 고정하였으며 0.1~1까지 방사율을 변화하면서 진행했다. 방사율은 0.1~0.9 범위에서 0.1씩 변화시켰으며, 0.9~1 구간은 온도의 변화를 세밀하게 보기 위해 0.01씩 변화를 주었다. 참값을 나타내는 온도를 측정하기 위해 콘크리트 표면에 접촉식 온도 센서를 5개 지점에 부착하여 SEPRO(HT-9815)사의 접촉식 온도계로 표면온도를 측정하였다. 접촉식 온도와 방사율 증가에 따른 온도그래프가 중첩되는 구간을 통해 콘크리트의 방사율을 유추하였다.

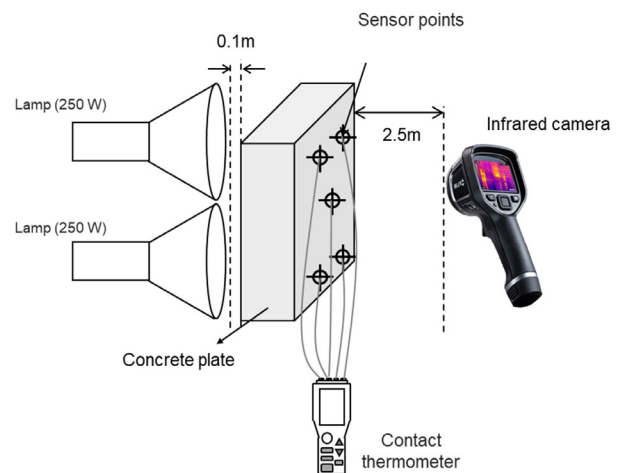


Fig. 2. Experimental conditions for obtaining emissivity through laboratory test

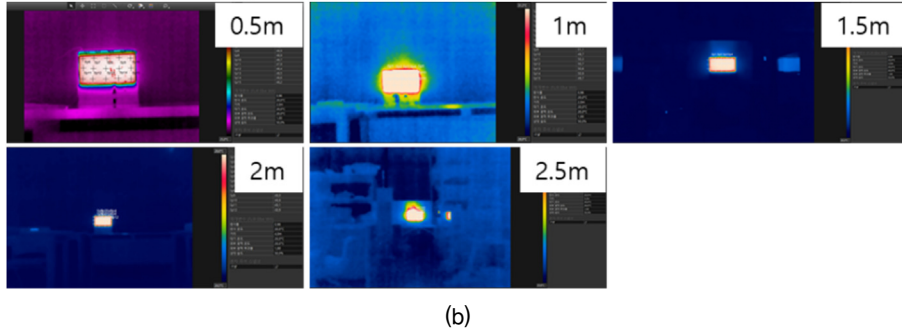
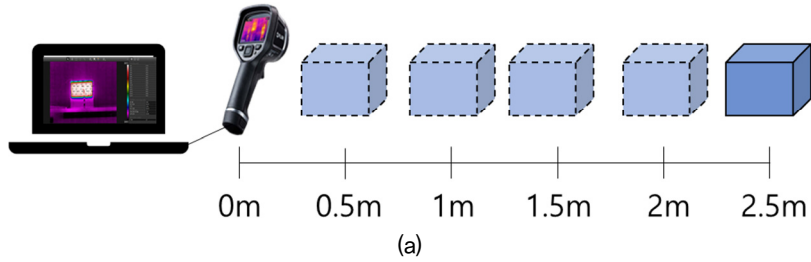


Fig. 3. Measurement of temperature change according to distance: (a) schematic drawing; (b) photograph according to distance

### 3.2 실내실험: 거리에 따른 온도 변화

열에너지는 물체에서 흡수, 투과, 반사되는 성질이 있어 적외선 카메라로 물체의 정확한 온도를 측정하기 위해서는 물체가 방사하는 에너지를 효율적으로 파악해야 한다. 이와 같은 특성을 물질의 방사율이라고 표현하며, 이를 도출하기 위해 Fig. 3과 같이 높이, 길이 그리고 폭이 각각 15cm, 30cm 그리고 20cm 인 플라스틱 토조로 실내실험을 진행하였다. 물 입자는 지반재료보다 균질성이 높고 각 입자의 전기전도도가 동일하여, 시료는 물을 사용하였으며 약 50°C 가열 후 시간 경과에 따른 온도 변화를 1분 간격으로 140분까지 관찰하였다. 적외선 카메라와 플라스틱 토조의 거리는 약 0.5m~2.5m를 0.5m 간격으로 조정하여 거리 변화에 따른 온도 변화를 측정하였다. 열화상 카메라는 FLIR사에서 제작된 E8-XT 모델을 활용하였으며 감도와 픽셀수는 각각 0.06°C와 43,200(240×180)이다. 적외선 카메라로 측정된 온도 값의 신뢰성은 방사율 실험과 동일하게 진행을 하였다.

### 3.3 현장실험: 공동 조사

현장 실험은 한국건설기술연구원 SOC 센터가 위치한 연천에서 진행되었으며 공동은 Fig. 4(a)에 나타낸 것과 같이 직경과 길이가 각각 15cm 및 50cm인 Poly Vinyl Chloride(PVC)를 사용하였다. PCV 관은 지표에

서 5cm와 25cm 깊이에 매설되었으며 설명을 용이하게 하기 위하여 각각을 Type 1과 Type 2로 라벨 하였다. PVC의 열전도도는(열전도도: 0.14 W/mK) 모래의 열전도도 값인 4.39~5.34 W/mK과 차이가 있어 열에너지의 흡수, 투과 및 반사 시 대비되는 조건을 고려하여 열적 특성의 관찰이 수월하도록 하였다. 상부에는 포장층을 모사하기 위해 두께 5cm의 콘크리트 블록(열전도도: 1.4~3.86 W/mK)을 설치하였으며, 포장층과 열화상 카메라 간의 거리는 1m로 고정하였다. 측정시간은 오후 4시부터 다음날 오후 3시까지 총 23시간 동안 지속하였으며, 대기 온도의 증가와 감소에 따라 콘크리트 포장층의 온도분포가 지반 공동에 따라 변화하는 특성을 관찰하였다. 적외선 카메라 및 노트북의 전원은 장기간 측정 시간을 고려해 충전식 배터리 보다 상시 전원 공급 장치를 이용하였다.

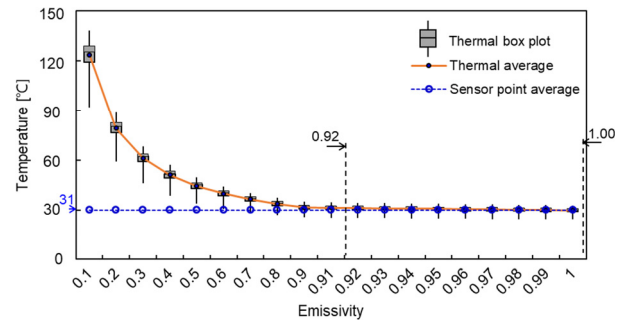


Fig. 4. Thermal box plot based on measured temperature with changing the emissivity

## 4. 실험 결과

### 4.1 콘크리트 방사율 측정

적외선 카메라로 측정된 콘크리트의 온도는 Fig. 5와 같으며 방사율 증가에 따른 적외선 온도 단면 데이터를 box plot으로 표시하였다. 방사율을 0.1~0.9까지 입력을 하였을 때 온도의 평균 값이 120°C에서 30°C로 점차 낮아지는 경향을 나타냈고, 방사율을 0.92~1로 입력했을 시에는 평균 온도가 31°C로 수렴하였다. 접촉식 온도와 적외선 평균 온도가 일치하는 방사율 구간은 0.92~1.00으로 나타났으며, Tran et al.(2017)에서 제시하는 콘크리트 방사율 0.92~0.95와 같은 방사율 구간을 보여 결과의 신뢰성을 확인하였다. 적외선 측정에서 입력값인 방사율이 중요한 변수임을 해당 실험 결과를 통해 확인하였으며 본 연구에서는 참고문헌과 실험 결과를 기반으로 중간 값인 0.95을 방사율로 입력값으로 적용하였다.

### 4.2 거리에 따른 에너지 변화 결과

적외선 카메라로 측정된 결과는 FILR tool 프로그램을 통해 이미지로 추출할 수 있으며 거리변화 및 시간경과에 따라 측정된 온도를 Fig. 6에 도시하였고 T는 적외선 카메라로 측정된 온도를 의미하며, t는 접촉식 온도계로 측정된 온도를 의미한다. 접촉식 온도계로 측정된 값도 Fig. 5에 함께 나타났으며, 적외선 이미지는 실선으로 접촉식 값은 점선으로 표시하였다. 측정된 온도의 초기값은 약 50°C를 보이며 이는 시료 조성 시 설정한 온도가 적절하게 반영된 것으로 보인다. 시간이 경과할수록 온도는 감소하는 경향을 보이며 시간이 140분 경과했을 때는 평균적으로 약 32°C를 보였다. 이와 같은 이유는 실험실의 온도가 상대적으로 낮은 23~25°C 이므로 열전도도 차이로 에너지 전달 현상이 발생한 것으로 사료된다. 거리를 변화시키면서 측정된 온도 값은 모두 유사한 거동을 보이며 각각 0.5m, 1m, 1.5m, 2m 그리고 2.5m에서 평균 온도차이는 0.57°C, 0.57°C, 1.17°C, 1.13°C 그리고 1.29°C의 차이가 발생했다.

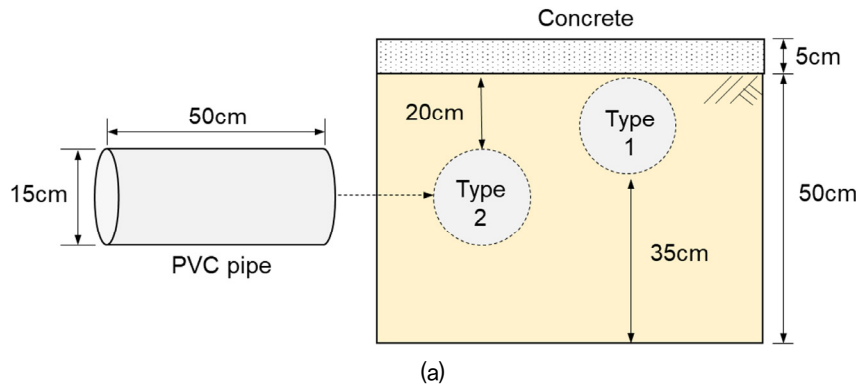


Fig. 5. Experimental conditions for obtaining thermal image: (a) schematic drawing of field test; (b) photograph of installed cavity

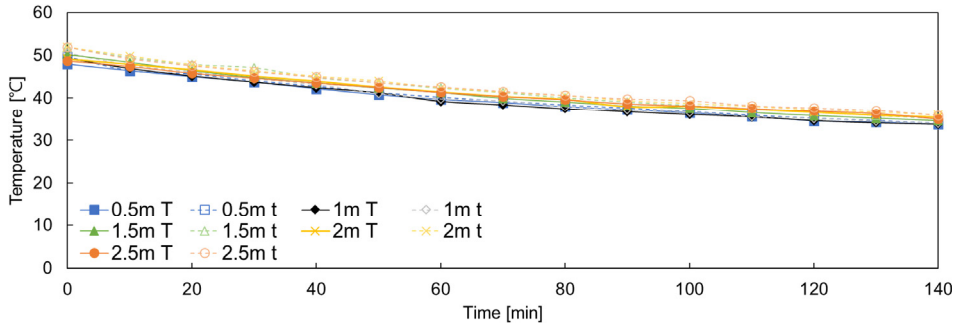


Fig. 6. Variations of temperature with distance change

### 4.3 공동조사 결과

적외선 카메라로 측정된 이미지는 Fig. 7과 같으며, 공동으로 인한 온도변화 특성을 상세하게 관찰하기 위하여 공동위치를 포함하는 약 25cm 크기의 정사각형으로 대상면적을 국한하였다. 대상면적은 100×100 픽셀 수를 가지고 있으며 1개의 픽셀이 2.5mm 크기를 가지고 있어 상세한 온도 변화 관찰이 가능하다. 해당 픽셀에서 측정된 온도 값은 평균하여 해당 조건의 단일한 값으로 이용하였으며, 시간에 따른 온도 변화는 Fig. 8에 도시하였다. Type 1과 Type 2의 최대 온도는 측정 직후 각각 44°C와 45°C로 나타났고, 최저 온도는 측정 후 각각 500, 700분 경과했을 때 17°C와 19°C로 나타났다. 최대온도가 나타난 시간대는 Type 1과 2 모두 동일하지만, 최저온도가 발현된 시점은 약 200분의 차이를 보인다. Type 1과 Type 2의 최저 온도는 각각 오전 01시와 오전 02시에 나타났고 픽셀 내부의 온도 범위는 Type 1과 2에서 각각 17~44°C 그리고 19~45°C로 다소 차이가 나타난 것을 알 수 있다. 또한 Type 1은 180분까지

Type 2와 동일하게 온도가 감소하지만 180~650분에서는 Type 1에서 측정된 온도가 상대적으로 낮게 측정되어 최대 6°C 차이를 보였다. 650~830분 사이에서는 Type 1의 온도가 Type 2 보다 높게 나타났지만 830분 이후부터는 유사한 거동을 보였다. 열적 변화 특성은 공극을 이루고 있는 기체와 액체의 차이로 Type에 따라 상이한 온도 분포 특성이 나타난 것으로 판단된다(Kim et al., 2015; Shin and Hong, 2022). Type 1과 2는 Fig. 5에 도시하였듯이 공동이 매설된 깊이의 차이가 있어 공기(0.097W/mK)와 흙(0.44W/mK)의 열전도도 차이로 인해 온도차이가 발생한 것 보인다. 온도 분포 결과 그래프는 공동의 위치에 따라 온도의 하강 및 상승이 시간 경과에 따라 차이가 있어 명확하게 공동의 위치를 알기는 어려우나 상대적인 위치는 예측이 가능하다고 판단된다.

### 5. 토 의

적외선 카메라를 활용하여 측정된 온도는 상대적인 온도 차이를 통해 대상 매질의 특성을 분석하였다. 하지만 해당 논문에서는 측정된 온도의 단위시간당 변화량을 통해 Type 1과 2의 차이를 고찰하였다. Pappalardo et al.(2016)가 제안한 Cooling Rate Index(CRI) 기법을 적용하였다. CRI 기법의 수학적 정의는 다음 수식과

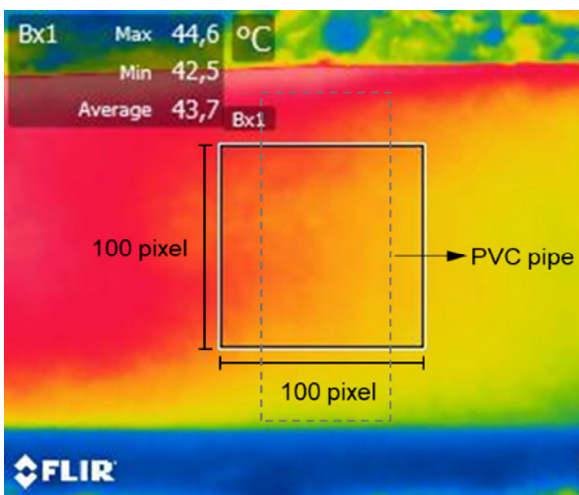


Fig. 7. Measured temperature image through FILR system

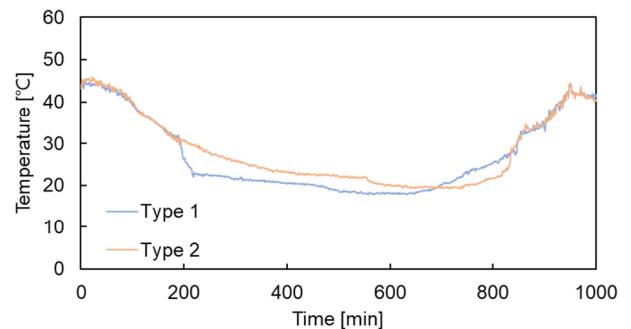


Fig. 8. Temperature distribution according to elapsed time

같으며 Fig. 7에서 시간에 따라 측정된 온도값의 기울기를 계산할 수 있다.

$$CRI = \Delta T / \Delta t \quad (3)$$

여기서  $\Delta t$ 는 시간 간격을 의미하며,  $\Delta T$ 는 시간간격에서 측정된 온도 차이를 보여준다. 측정된 온도를 단위시간당 변화율인 CRI로 산정하여 분석하는 연구는 다수 있지만, 단위시간을 합리적으로 결정하기 위한 제안은 각 연구마다 상이하다. 따라서 해당 연구에서는 단위시간을 1분과 15분으로 설정하였으며, 계산된 CRI는 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)는 단위시간이 각각 1분과 15분일때 계산한 CRI 값을 보여주며, Type 1과 2는 설정한 단위시간에 따라 CRI 값 분포특성에 차이가 있는 것으로 나타났다. 단위시간이 1분일 때 Type 1과 2의 초기값은 각각 0.7°C와 0.6°C로 나타났으며, 15분 간격으로 계산된 CRI의 초기값은 Type 1과 2에서 상대적으로 작은 0.1°C와 0.4°C의 값을 보였다. CRI 1분의 값은 약 140~150분까지 증가와 감소를 반복하다 일정한 범위로 수렴하나 15분의 CRI 값은 150분 이후에도 증가

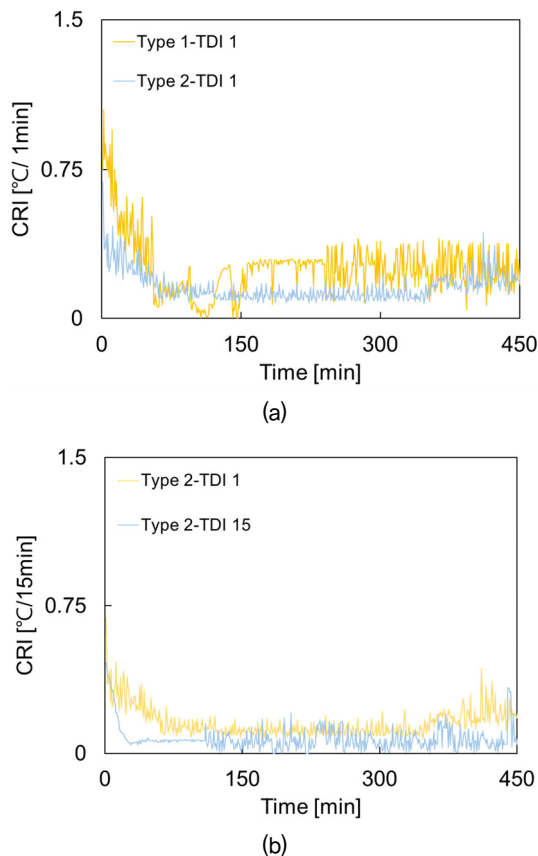


Fig. 9. Cooling rate index (CRI) results of types 1 and 2 with the time interval: (a) 1min; (b) 15min

와 감소하는 변화폭이 지속적으로 변경되는 것으로 나타났다. CRI 1분 값의 Type 1과 2를 비교하면 약 90~150분 구간을 제외하고는 Type 1의 CRI 값이 상대적으로 높게 나타나는 경향을 보여준다. 이와 같은 이유는 Fig. 7에서도 살펴보았듯이 Type 1의 온도 변화가 Type 2보다 훨씬 크다는 것을 의미하며 이를 통해 동공의 깊이를 정성적으로 예측할 수 있다. 하지만 15분의 CRI 값을 보면 Type 1과 2의 값 차이를 구별하기 어려울 정도로 거의 유사한 범위를 보여주는 한계를 보여준다. 이는 시간간격 설정에 따라 발생된 거동 차이로 판단되며, 다양한 데이터와 CRI 시간간격을 더욱 확장하여 합리적인 시간간격을 설정해야 함을 암시한다. 해당 논문에서는 CRI 계산시 1분 간격의 변화량이 공동위치 정보도 함께 제공할 수 있는 장점을 보여주었으며, 향후 다양한 시간대를 고려하여 공동의 다수 정보를 제공할 수 있는 시간 간격 및 해석 방안을 도출하기 위한 추가 연구가 필요하다.

## 6. 결론

본 연구에서는 적외선 활용 시 주요영향 인자인 방사율 설정과 측정거리에 대한 실험을 진행하여 측정값의 신뢰성을 증가시켰으며, 적외선 측정 시스템을 이용한 지하공동 평가 방법론을 제시하였다. 또한, 기존의 분석 방법인 상대적인 온도 변화를 통한 지하공동 평가 방법의 한계를 극복하기 위해 절대적 비교 개념의 온도 보정 방법인 CRI를 이용한 분석방법도 제시하였다.

- (1) 해당 연구에서는 적외선 카메라와 물체의 거리를 합리적으로 결정하기 위하여 측정거리 변화에 따른 적외선 온도 변화를 관찰하였다. 해당 결과 가장 정확한 적외선 온도 결과를 측정하기 위한 측정대상 물질과 적외선 카메라의 거리는 1m 이하로 나타났다. 방사율 측정 실험을 통하여 방사율 입력값이 중요 인자임을 확인하였으며 효율적으로 방사율을 측정하는 방법론을 제시하였다.
- (2) 현장에서 측정한 적외선 카메라의 온도 값은 동공 깊이에 따라 증가 및 감소하는 거동의 차이를 보였다. 지표면으로부터 5cm에 위치한 공동은 최대 온도에서 최저 온도로 냉각되는 시간이 약 500분이며, 깊이 25cm 공동은 약 200분의 냉각 소요 시간을 보였다. 또한 공동 깊이가 깊을수록 냉각 온도 변화가 완만한 것을 확인하였다. 공동 깊이에 따른 온도 거

동 특성이 다름을 확인하여 적외선을 이용한 공동 깊이 평가의 가능성을 확인하였다.

- (3) 측정된 값은 적외선 온도의 절대적 온도 비교를 위해 정량적 냉각 속도 지표인 CRI 값을 이용하였다. 냉각 속도지표 활용시 분해능 성능이 높은 시간 변위량을 선정하기 위해 시간 변위량은 1분과 15분으로 설정하였다. 해당 결과는 1분 시간 변위량에서 높은 분해능을 보여 공동 깊이 판단에 적합한 CRI 구간을 제시하였다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부의 한국연구재단(NRF-2020R1A2C2012113)과 국토교통부 국토 교통과학기술진흥원 북극권 자원에너지 개발 기초(선행)기술의 “북극권 에너지자원 플랫폼 계획 및 개념설계 선행기술 연구(과제번호: RS-2018-KA146546)사업의 지원으로 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. Abdel-Hardy, M. (1970, February), Subsurface drainage mapping by airborne infrared imagery techniques, In Proceedings of the Oklahoma Academy of Science, 10-18.
2. Avdelidis, N. P. and Moropoulou, A. (2003), Emissivity Considerations in Building Thermography, *Energy and Buildings*, Vol.35, No.7, pp.663-667.
3. Bae, Y. S., Kim, K. T., and Lee, S. Y. (2017), The Road Subsidence Status and Safety Improvement Plans, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.18, No.1, pp.545-552.
4. Cho, N. J., Cha, W., and Kim, H. K. (2016), Non-destructive Detection of Underground Cavities Using Thermal Images, *Electron. J. Geotech. Eng.*, Vol.21, No.16, pp.5465-5476.
5. Du, Y., Zhang, X., Li, F., and Sun, L. (2017), Detection of Crack Growth in Asphalt Pavement through Use of Infrared Imaging, *Transportation Research Record*, Vol.2645, No.1, pp.24-31.
6. Go, G. H. and Lee, S. J. (2021), A Study on Numerical Analysis for GPR Signal Characterization of Tunnel Lining Cavities, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.37, No.10, pp.65-76.
7. Hong, W. T., Kang, S., and Lee, J. S. (2015), Application of Ground Penetrating Radar for Estimation of Loose Layer, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.11, pp.41-48.
8. Janků, M., Cikrle, P., Grošek, J., Anton, O., and Stryk, J. (2019), Comparison of Infrared Thermography, Ground-penetrating Radar and Ultrasonic Pulse Echo for Detecting Delaminations in Concrete Bridges, *Construction and Building Materials*, 225, pp.1098-1111.
9. Kalhor, D., Ebrahimi, S., Tokime, R. B., Mamoudan, F. A., Bélanger, Y., Mercier, A., and Maldague, X. (2021), Cavity Detection in Steel-pipe Culverts Using Infrared Thermography, *Applied Sciences*, Vol.11, No.9, 4051.

10. Kwak, T. Y., Chung, C. K., Kim, J., Lee, M., and Woo, S. I. (2019), Experimental Assessment for the Effect of Burial Depth on the Formation of Underground Cavities and Ground Cave-ins by Damaged Sewer Pipes, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.11, pp.37-49.
11. Kim, C. R., Kim, J. H., Park, Y. S., Park, S. G., Yi, M. J., Son, J. S., ... and Jeong, J. M. (2005), Application of Geophysical Methods to Cavity Detection at the Ground Subsidence Area, In *Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference* (pp. 376-383), Korean Geotechnical Society.
12. Kim, H. S. and Kim, H. K. (2015), Application of Soil Surface Infrared Images for Geotechnical Non-destructive Testing Method, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.15, No.3, pp.249-254.
13. Kim, Y. T., Choi, J. Y., Kim, K. D., and Park, H. M. (2017), A Study on the Selection of GPR Type Suitable for Road Cavity Detection, *International Journal of Highway Engineering*, Vol.19, No.5, pp.69-75.
14. Kulkarni, N. N., Dabetwar, S., Benoit, J., Yu, T., and Sabato, A. (2022), Comparative Analysis of Infrared Thermography Processing Techniques for Roadways' Sub-pavement Voids Detection, *NDT & E International*, 129, 102652.
15. Lee, D. Y. and Cho, N. K. (2016), Understanding of Subsurface Cavity Mechanism due to the Deterioration of Buried Pipe, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.12, pp.33-43.
16. Liu, I. S. (1990), On Fourier's Law of Heat Conduction, *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 2, pp.301-305.
17. Pappalardo, G., Mineo, S., Zampelli, S. P., Cubito, A., and Calcaterra, D. (2016), InfraRed Thermography Proposed for the Estimation of the Cooling Rate Index in the Remote Survey of Rock Masses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 83, 182-196.
18. Sabato, A., Yu, T., Kulkarni, N. N., and Dabetwar, S. (2022), Detecting Subsurface Voids in Roadways Using UAS with Infrared Thermal Imaging (No. 22-025). Massachusetts. Dept. of Transportation. Office of Transportation Planning.
19. Shakmak, B. and Al-Habaibeh, A. (2015, November), Detection of water leakage in buried pipes using infrared technology; A comparative study of using high- and low-resolution infrared cameras for evaluating distant remote detection. In 2015 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT) (pp. 1-7). IEEE.
20. Shin, H. and Hong, S. S. (2022), Thermo-hydraulic Numerical Analysis for the Leakage of Buried District Heating Pipe, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.38, No.3, pp.17-26.
21. Song, S., Kim, H., Park, D., Kang, J., and Choi, C. (2016), Assessment of Impact-echo Method for Cavity Detection in Dorsal Side of Sewer Pipe, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.8, pp.5-14.
22. Tran, Q. H., Han, D., Kang, C., Haldar, A., and Huh, J. (2017), Effects of Ambient Temperature and Relative Humidity on Subsurface Defect Detection in Concrete Structures by Active Thermal Imaging, *Sensors*, Vol.17, No.8, 1718.

Received : July 7<sup>th</sup>, 2023

Revised : July 21<sup>st</sup>, 2023

Accepted : July 21<sup>st</sup>, 2023