한국지반공학회논문집 제40권 1호 2024년 2월 pp. 15 ~ 28
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.40, No.1, February 2024 pp. 15 ~ 28

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
https://doi.org/10.7843/kgs.2024.40.1.15

터널 구조물 안전점검을 위한 이미지 데이터 취득 및 데이터 구조화 방법

Image-Data-Acquisition and Data-Structuring Methods for Tunnel Structure Safety Inspection

성 현 석[1] Sung, Hyun-Suk
고 준 섭[2] Koh, Joon-Sub

Abstract

This paper proposes a method to acquire image data inside tunnel structures and a method to structure the acquired image data. By improving the conditions by which image data are acquired inside the tunnel structure, high-quality image data can be obtained from area type tunnel scanning. To improve the data acquisition conditions, a longitudinal rail of the tunnel can be installed on the tunnel ceiling, and image data of the entire tunnel structure can be acquired by moving the installed rail. This study identified 0.5 mm cracked simulation lines under a distance condition of 20 m at resolutions of 3,840 × 2,160 and 720 × 480 pixels. In addition, the proposed image-data-structuring method could acquire image data in image tile units. Here, the image data of the tunnel can be structured by substituting the application factors (resolution of the acquired image and the tunnel size) into a relationship equation. In an experiment, the image data of a tunnel with a length of 1,000 m and a width of 20 m were obtained with a minimum overlap rate of 0.02% to 8.36% depending on resolution and precision, and the size of the local coordinate system was found to be (14 × 15) to (36 × 34) pixels.

요 지

본 연구에서는 터널 구조물 내부 이미지 데이터를 취득하는 방법과 이미지 데이터의 구조화를 위한 방법을 제안하였다. 터널 구조물 내부 이미지 데이터 취득 조건을 개선함으로써 AREA TYPE의 터널 스캐닝에서 고화질의 이미지 데이터를 얻을 수 있다. 데이터 취득 조건을 개선하기 위해 터널 상부에 터널의 길이 방향 레일을 설치하고 설치된 레일을 이동하며 터널 구조물 전체의 이미지 데이터를 취득할 수 있도록 설계하였다. 본 연구는 거리 20m, 해상도 3840×2160 및 해상도 720×480의 조건에서 0.5mm 균열 모사선을 식별하였다. 또한 취득된 이미지 데이터를 이미지 타일 단위로 관리하기 위한 이미지 데이터 구조화 방법을 제안하였다. 터널의 이미지 데이터 구조화를 위해 적용인자(취득 이미지의 해상도와 터널의 크기)를 관계식에 대입하여 터널의 이미지 데이터를 구조화할 수 있다. 실험을 통해 터널 길이 1,000m, 폭 20m 터널의 이미지 데이터는 해상도와 정밀도에 따라 최소중첩률 0.02%에서 8.36% 구해지며 로컬좌표계의 크기는 (14×15)에서 (36×34)로 나타났다.

Keywords : AI/ML, Crack detection, Deep learning, Image processing, Tunnel data structuring

1 정회원, ㈜에프엠케이 구조물스캐닝연구부 대표 (Member, CEO, Dept. of Structural Scanning Research, FMK INC.)
2 정회원, ㈜에프엠케이 생산/개발부 차장 (Member, Dept. of Deputy Head, Dept. of Production and Development, FMK INC., Tel: +82-54-458-2195, Fax: +82-54-458-4843, great9069@naver.com, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2024 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.

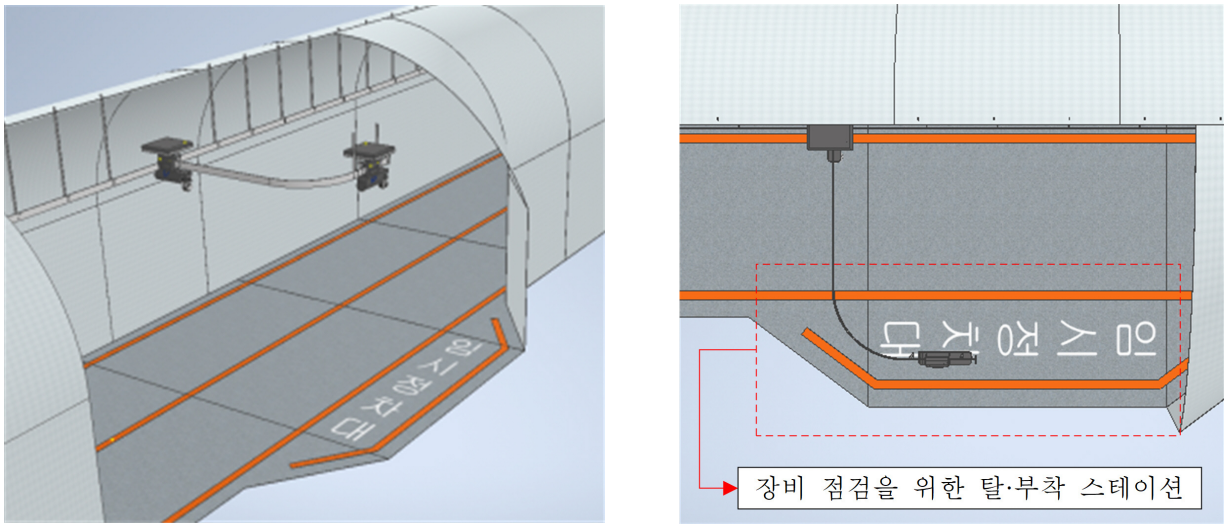
1. 서 론

터널은 고속도로, 고속철도와 지하철의 주요 시설물로서 누수, 동결융해 및 철근 부식 등의 손상에 따른 노후화로 터널에 균열, 박리, 박락 및 재료분리 등의 손상이 발생한다. 일반적으로, 터널 안전 점검 시 차량 또는 열차의 통행을 일시적으로 차단하고 트럭과 같은 차량에 장비를 장착하여 터널을 스캔하거나(Lee et al., 2019) 사람이 육안으로 점검을 시행한다. 기존의 방법으로 터널의 이미지 데이터를 취득할 때의 문제점은 차량의 주행속도에 따라 해상도 및 데이터의 품질이 저하된다. 따라서 미세한 균열 및 위험인자를 검출하지 못하거나, 이미지 번짐으로 균열 및 위험인자 크기를 정확하게 계측하지 못할 수 있다. 또한 기존의 이미지 데이터 취득 방식은 터널의 위치에 기반하지 않아 안전 점검 회차별 데이터 비교에 있어서 정확한 교차 비교가 어렵다.

따라서, 기존의 안전 점검 시 발생할 수 있는 문제점을 개선할 뿐만 아니라 최근 장거리 터널의 시공 증가에 따라 영상장비 및 영상처리를 이용한 터널 안전 점검에 관한 연구가 증가하고 있다. 영상장비 및 영상처리를 기반한 터널 안전 점검 연구로는 Lee et al.(2005)은 약 2m 거리에서 70mm인 렌즈를 이용하여 약 0.2mm 균열을 측정하였고, Lee et al.(2012)은 20m 거리에서 초점거리 600mm 망원렌즈를 사용하여 0.2mm 균열폭을 측정하였다. 또한, Seo et al.(2020)는 HQ 라즈베리파이 카메라 모듈과 초점거리 12mm의 C-type 렌즈를 조합하여 3m 거리에서 0.3mm 폭의 균열을 측정하였다.

본 연구에서는 터널 상부에 레일을 설치하여 터널 구조물 안전 점검 장치를 설치하고 운행하며, 영상장비 및 영상처리를 이용한 터널 구조물 안전 점검 장치를 통해 터널 내부 전체의 이미지 데이터를 취득하는 방법을 제안한다(Fig. 1). 취득 데이터의 관리는 로컬좌표계를 이용하여 데이터를 구조화함으로써 이미지 타일 단위의 데이터 관리가 가능하다. 이미지 타일 단위의 관리체계를 통해 터널 구조물의 전체 점검과 부분 점검이 상시적으로 이루질 수 있으며, 터널의 정확한 위치에 취득 이미지 데이터를 시간별로 누적시킴으로써 균열 및 위험인자의 감시/추적이 가능하다. 따라서 터널 구조물의 상시적인 안전 점검이 이루어지고 안전 공백을 줄이는 결과를 얻을 수 있다.

따라서, 본 연구에서 터널 구조물 안전점검 장치의 25배율 4K 카메라를 이용하여 10m, 20m 거리에서 1mm, 0.5mm 균열폭을 특정할 수 있을 때, 카메라가 취득할 수 있는 면적의 크기를 측정하였다. 이를 이용하여 터널 전체의 이미지 데이터를 체계적으로 취득하고 관리하기 위해 터널 구조물 내부 벽면을 2차원 좌표계로 구조화하고자 한다. 제안한 터널 이미지 데이터 취득 방법은 터널 구조물 내부 벽면의 로컬좌표계에 맞추어 이미지 타일을 생성하고 이를 데이터베이스로 구축하여 터널 구조물의 이미지 데이터를 이미지 타일 단위로 관리할 수 있다.



(a) (b)

Fig. 1. Tunnel structure investigation device (TSI-T001)

2. 본 론

2.1 터널스캐너를 활용한 터널 점검기술 개발 동향

a) Laser Type

레이저 빔을 대상에 고속으로 주사하고 반사되는 광선의 양을 고속 광센서로 검출하는 방법으로 대상의 외관을 조사할 수 있다. 그러나 외관 조사를 위한 장비의 검사 속도가 5km/h로 느리며, 정속으로 주행해야만 정확한 외관 조사를 진행할 수 있어서 적용할 수 있는 대상이 제한적이다. 레이저 빔의 간섭률이 높아 오차율도 높다는 단점이 있다. 또한, 검출해 내는 균열 폭의 검출 성능은 1.0mm이기 때문에 0.1mm의 균열까지 점검 대상으로 제시하는 현재의 터널 안전 점검 기준에는 해당 방식은 적합하지 못하다(Table 1). 레이저 방식을 이용한 터널 스캐너에는 일본의 Tunnel Catcher, 스위스의 TS360 및 프랑스의 ATLAS-70 등이 있다(Jee et al., 2004; Bae et al., 2021).

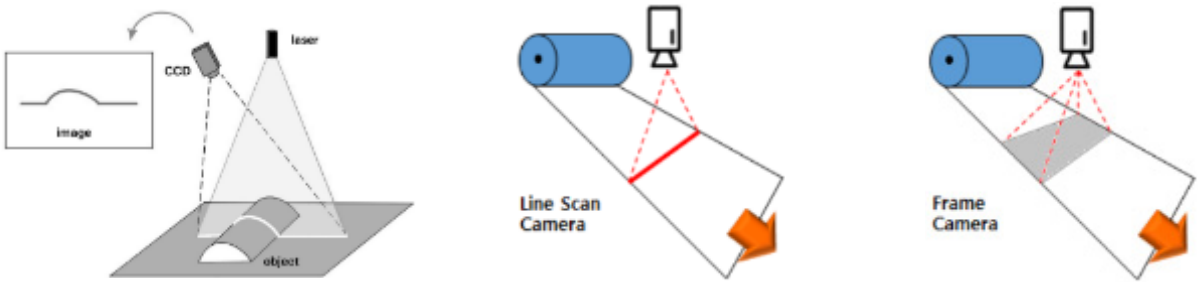
b) Line Type

Line Type 방식은 고해상도의 CCD 라인센서 카메라가 부착된 터널 스캐너가 터널을 주행하며 터널 외관을 스캔하여 고해상도의 터널 외관 영상을 촬영한다. 하지만 레이저 방식과 같이 정속으로 주행해야만 정확한 외관 조사를 진행할 수 있다는 단점이 존재하며, 카메라의 해상도가 4K를 넘지 못하여 1 pixel의 크기가 0.1mm보다 커지게 되며, 결과적으로는 0.1mm의 미세균열을 검출하지 못하여 Table 1에 제시된 국내 균열 평가 등급 기준을 만족하는 터널 점검을 수행할 수 없다. Line Type 방식을 이용한 터널 스캐너에는 일본 영단 지하철의 Tunnel Inspection System, 일본 JR동해의 Tunnelas 등이 있다(Jee et al., 2004; Kim et al., 2018; Bae et al., 2021).

c) Area Type

Line Type에서는 데이터 전송이 선으로 된다면 Area Type은 면으로 데이터를 전송하는 것이 가장 큰 차이점이다. 기존보다 빠른 속도로 장비를 주행할 수 있으며, 최적의 조건에서는 0.1mm의 균열 폭도 검출이 가능하다. 하지만 여전히 거리에 따른 보정 오차한계가 존재한다는 단점이 있으며, 장비의 주행속도에 따라 결과물의 품질에도 차이가 발생하는 단점이 있다. 최근 터널 점검 및 진단에 활용되는 터널 스캐너들은 대부분 Area Type으로 국내에서는 KMTL, SQ엔지니어링, 딥인스펙션, 아워브레인 등 다양한 업체들이 Area Type 방식이 적용된 터널 스캐너를 보유하고 있으며, 실제 현장에서 운용되고 있다(Jee et al., 2004; Kim et al., 2018; Bae et al., 2021).

터널 구조물을 조사하는 것에 있어서 0.1mm 균열의 식별 가능 여부가 중요한 성능지표이며, 속도향상에 대한 요구가 있다. 하지만 속도향상과 정밀도 향상은 반비



(a) Laser type (b) Line type (c) Area type

Fig. 2. Example of scanning method (Fontana et al., 2003; Lee et al., 2020)

Table 1. Tunnel crack grade classification standards (Korea Infrastructure Safety Corporation, 2019)

Category \ Criterion		a	b	c	d	e
Concrete lining	Concrete	< 0.1mm	0.1mm ≤ < 0.3mm	0.3mm ≤ < 1.0mm	1.0mm ≤ < 3.0mm	3.0mm ≤
	Reinforced Concrete	< 0.1mm	0.1mm ≤ < 0.3mm	0.3mm ≤ < 0.5mm	0.5mm ≤ < 1.0mm	1.0mm ≤

례한다.

고화질의 이미지 데이터를 취득하기 위해서는 고정된 상태에서 안정적으로 이미지 데이터를 취득해야 한다. 하지만 교통을 통제하고 장시간 점검 및 조사를 하기 위해서는 직접적인 조사비용 증가뿐만 아니라 사회적 비용이 발생한다.

2.2 터널 구조물 이미지 데이터 취득 방법

운영 중인 터널 내에서 터널 벽면의 이미지 데이터를 취득하기 위해서는 교통의 흐름에 방해를 최소화하여야 한다. Fig. 3(a)와 같이 기존의 터널 구조물 안전 점검을 위해서는 차량의 통행을 통제하며, 터널 구조물의 고화질 이미지 데이터를 취득하기 위해서는 정속주행 및 서행해야 한다. 따라서 본 연구에서는 터널 내부의 이미지 데이터를 취득하기 위해 터널 구조물의 중앙 상부에 레일과 안전 점검 장치를 설치하고 운용하는 방법을 제안하였다(Fig. 1).

교통의 흐름에 방해 없이 고화질 이미지 데이터를 취득하기 위해서, Fig. 4(a)와 같이 터널 상부 중앙에 레일과 터널 구조물 안전점검 장치를 설치한다. 터널 구조물 안점점검 장치는 터널의 횡단면 360°를 분할하여 이미지 데이터를 취득하고 종방향으로 이동하며 터널 구조물 전체에 대한 데이터를 취득한다. Fig. 4(b)는 터널 벽면의 이미지 데이터를 수집하고, 터널의 3D 형상 데이터를 취득하기 위한 데이터 취득 모듈이다. Fig. 4(c)는 터널 구조물 안전 점검 장치의 운행과 터널 내부 상황을 관찰하기 위한 카메라 모듈이다.

Fig. 5는 Fig. 4(b)로 취득된 균열 모사 템플릿 이미지 데이터이다. Fig. 5(a)는 10m 거리에서 균열 모사 템플릿을 촬영한 이미지로 1mm 균열 모사선을 식별하고 있다. Fig. 5(b)는 10m 거리에서 균열 모사 템플릿을 촬영한 이미지로 0.5mm 균열 모사선을 식별하고 있다. Fig. 5(c)는 20m 거리에서 균열 모사 템플릿을 촬영한 이미지로 1mm 균열 모사선을 식별하고 있다. Fig. 5(d)는 20m 거리에서 균열 모사 템플릿을 촬영한 이미지로 0.5mm 균열 모사선을 식별하고 있다.

2.3 터널 구조물 이미지 데이터 구조화

터널 구조물의 고화질 이미지 데이터를 취득하는 방식과 함께 데이터 관리를 위한 구조화 방법을 제안한다. 터널 구조물 내부 전체의 이미지를 Area Type으로 취득한다.

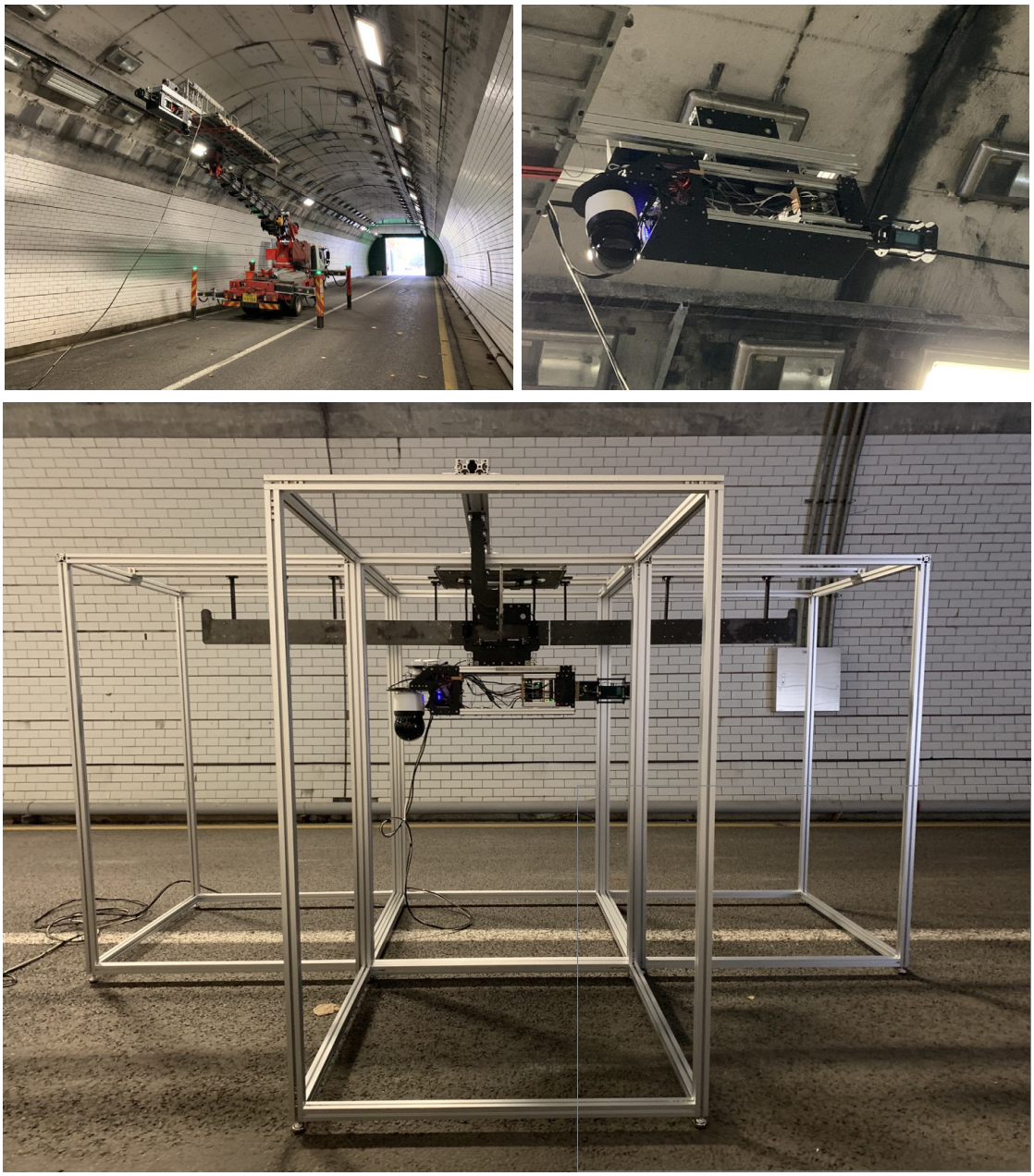
본 연구에서는 터널의 내부 벽면을 2차원 격자로 분할하고 로컬좌표계로 사용하며 생성된 분할 격자를 통해 터널의 실제 위치와 취득 이미지 간의 맵핑을 통해 데이터의 관리가 이루어지도록 한다. 로컬좌표계의 1개의 격자 안에는 고화질의 이미지가 한 개 존재하며, 이 이미지 데이터는 다시 AI/ML에 사용되기 위한 2차원 격자로 분할되고, 서브 좌표계로서 상세한 위치 데이터를 갖도록 한다.

터널 구조물은 좌우, 상하로 휘어 있다. 따라서 데이터 취득 단면(터널의 횡단면) 사이에 촬영 각도에 따라 중첩되는 부분 또는 이미지 취득이 누락 되는 부분이 발생할 수 있다. 또한 터널 벽면의 곡면에 따른 왜곡을 보정하는 과정에서도 이미지의 변형이 발생한다. 따라서 이미지의 중첩 정도를 조절하여 이미지를 취득해야 한다.

중첩된 부분이 클수록 누락되는 부분 없이 터널 전체

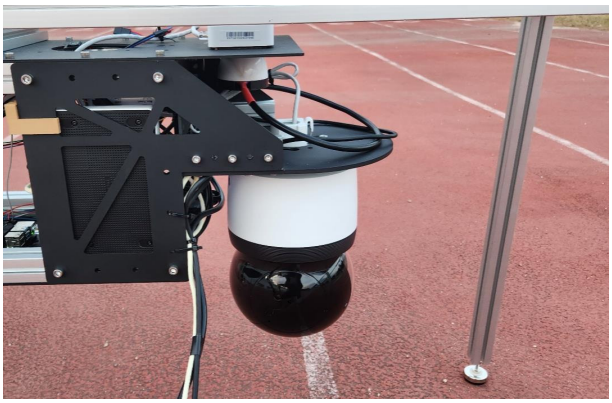
(a) Tunnel structure safety inspection image (existing method)

Fig. 3. Tunnel structure safety inspection image



(a) Tunnel structures investigation device (TSI-T001)

(b) Data acquisition module



(c) Monitoring camera module

Fig. 4. Tunnel structure investigation device (TSI-T001)

(a) Distance 10m, detect line width 1mm

(b) Distance 10m, detect line width 0.5mm

(c) Distance 20m, detect line width 1mm

(d) Distance 20m, detect line width 0.5mm

Fig. 5. Crack simulation line identification image data

Table 2. Experimental parameters

	Width	Height	Unit
Resolution	M	N	pixel
Detect area (width/height)	H	V	mm
AI/ML resolution	m	n	227 pixel
Local coordinate	X	Y	Integer
Sub coordinate	x	y	Integer
Overlapping rate	w	d	%
*Overlapping rate 0% – 50%			
Tunnel length/diameter	L (length)	D (diameter)	mm
Data structure	(X, Y) Array		

의 이미지 데이터를 취득할 수 있지만, 데이터의 처리량이 증가하고, 데이터의 접근 효율이 낮아진다. 따라서 취득된 이미지 데이터는 로컬좌표계의 격자에 맞추어 중복 부분을 없애고 이미지 타일로써 데이터베이스를 구축한다. 로컬좌표계의 크기를 결정하기 위해 본 연구에서는 해상도에 따른 취득이 가능한 최대면적과 이미지 중첩률을 적용하여 상관 관계식을 도출하였다.

$$Xmin = \left\lceil \frac{L}{H} \right\rceil \tag{1}$$

$$Ymin = \left\lceil \frac{\pi * D}{V} \right\rceil \tag{2}$$

Equation 1. Minimum coordinates X, Y values at minimum overlap ratio

$$w = 1 - \frac{L}{Xmin * H} \tag{3}$$

$$d = 1 - \frac{\pi * D}{Ymin * V} \tag{4}$$

Equation 2. Minimum overlap rate

$$Xa = \left\lceil \frac{L}{H(1-w)} \right\rceil \tag{5}$$

$$Ya = \left\lceil \frac{\pi * D}{V(1-d)} \right\rceil \tag{6}$$

Equation 3. Overlapping ratio applied X, Y values

$$x\,min = \left\lceil \frac{M}{m} \right\rceil \tag{7}$$

$$y\,min = \left\lceil \frac{N}{n} \right\rceil \tag{8}$$

Equation 4. Subcoordinate x, y values

Equation 1은 터널의 크기와 해상도에 따른 터널 구조물 내부 벽면의 최소 로컬좌표계를 계산한다. Equation 2는 최초 계산된 로컬좌표계에서 얻어지는 이미지들의 최소 중첩률을 계산한다. 데이터 누락이 없도록 최초 로컬좌표계를 얻을 때 발생하는 초기 중첩률을 계산할 수 있다. Equation 3은 터널의 이미지 데이터를 안정적으로 얻기 위해 조사자가 설정하는 중첩률을 적용했을 때의 로컬좌표계를 계산할 수 있다. Equation 4는 취득된 각각의 이미지 데이터를 AI/ML이 요구하는 이미지의 크기로 분할하여 서브 좌표계를 계산한다. 본 관계식을 통해 조사자가 해상도, 중첩률을 설정하여 로컬좌표계와 서브 좌표계를 구성하고 두 좌표계를 사용하여 터널의 이미지 데이터를 구조화할 수 있다.

3. 실 험

본 연구의 목적은 해상도에 따른 데이터의 취득이 가능한 최대면적을 산출하여 터널 구조물 내부의 좌표계를 구성하는 것이다. 그리고 터널의 크기가 다양하다는 점을 감안하여 거리를 확보할 수 있는 넓은 공간에서 실험을 진행하였다(터널방재인증센터의 실험용 터널에서는 2차로 폭의 터널(약 10m)에 크기가 제한됨).

이미지 데이터 취득에 있어서 조명 조건은 자연광 조건으로 고정하였다. 조명 조건은 균열 인식률 및 취득 이미지 데이터의 품질 개선을 위한 실험에서 조작변인으로 적용할 계획이다.

이미지 데이터 취득에 있어서 균열의 표현은 Seo et al.(2021)의 실험 방법과 같이 AutoCAD를 이용하여 균열 모사선 템플릿을 제작하였다. 전체 크기 2000mm × 900mm의 템플릿에 수평, 수직 및 대각의 패턴을 0.5mm, 1mm 두께의 선으로 각각 배치하여 균열을 모사하였다.

실험은 균열 모사선 템플릿을 10m, 20m 거리에 배치하여 해상도 3840×2160 및 해상도 720×480에서 각각 0.5mm, 1mm 균열 모사선이 식별될 때의 이미지를 취득하였다. 취득된 이미지에서 템플릿의 크기에 해당하는 픽셀의 크기로부터 취득이 가능한 최대면적을 산출하였다.

Fig. 6은 해상도 3840×2160에서 Fig. 7은 해상도 720×480에서 각각 거리 10m와 20m일 때 1mm와 0.5mm의 균열 모사선이 식별될 때의 이미지 데이터를 취득한 것이다. 이 결과는 해상도 3840×2160에서 1mm의 균열 모사선을 식별할 때 데이터를 취득할 수 있는 면적의 크기는 가로 크기 6,967mm에서 12,238mm, 세로 크기 3,919mm에서 6,883mm로 측정되었고, 0.5mm의 균열 모사선을 식별할 때 데이터를 취득할 수 있는 면적의 크기는 가로 크기 5,500mm에서 7,476mm, 세로 크기 3,094mm에서 4,205mm로 측정되었다. 720×480에서는 1mm의 균열 모사선을 식별할 때 데이터를 취득할 수 있는 면적의 크기가 가로 크기 5,579mm에서 7,473mm, 세로 크기 3,719mm에서 4,982mm로 측정되었고, 0.5mm의 균열 모사선을 식별할 때 데이터를 취득할 수 있는 면적의 크기는 가로 크기 4,201mm에서 5,713mm, 세로 크기 2,801mm에서 3,809mm로 측정되었다.

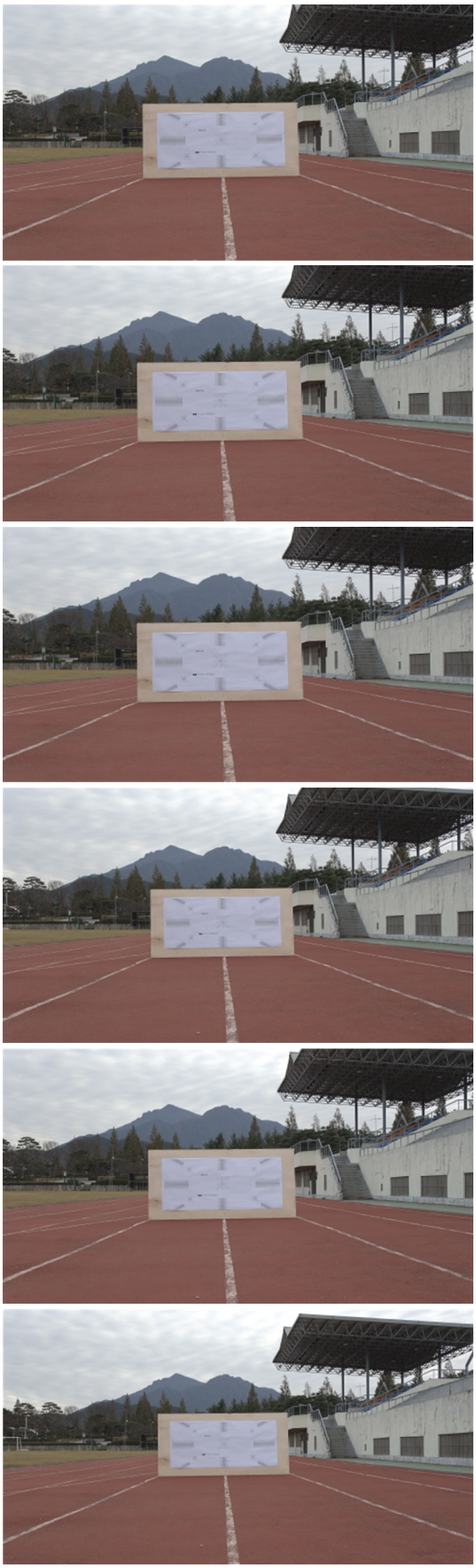
Table 3은 해상도 3840×2160에서 균열 모사선의 폭별로 각각의 해상도 및 거리에서의 실제 취득 면적을 측정하여 평균하였다. 해상도 3840×2160, 10m 거리에서

Table 3. Crack simulation template data acquisition results at resolution 3840×2160

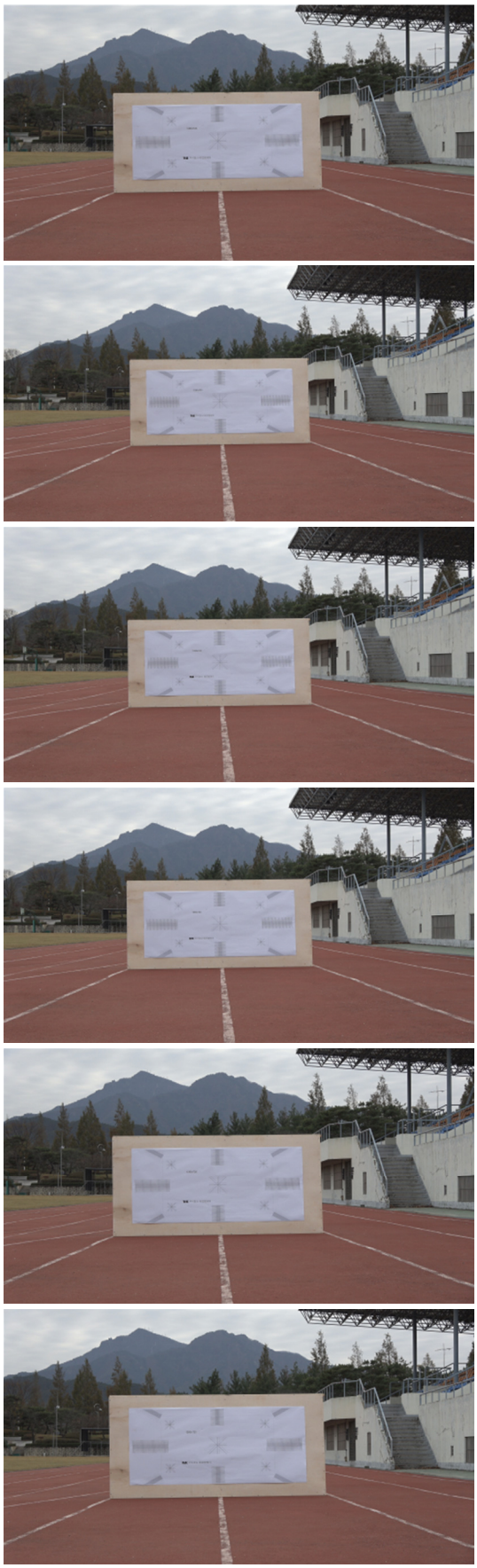
Resolution 3840×2160	Distance (m)	Detect line width (mm)	Average detect width (mm)	Average detect height (mm)
(a)	10	1	7,658.65	4,307.99
(b)	10	0.5	5,883.48	3,309.46
(c)	20	1	10,912.81	6,138.46
(d)	20	0.5	6,390.90	3,594.88

Table 4. Crack simulation template data acquisition results at resolution 720×480

Resolution 720×480	Distance (m)	Detect line width (mm)	Average detect width (mm)	Average detect height (mm)
(a)	10	1	6,039.45	4,026.30
(b)	10	0.5	3,998.52	2,665.68
(c)	20	1	7,315.39	4,876.93
(d)	20	0.5	5,364.21	3,576.14

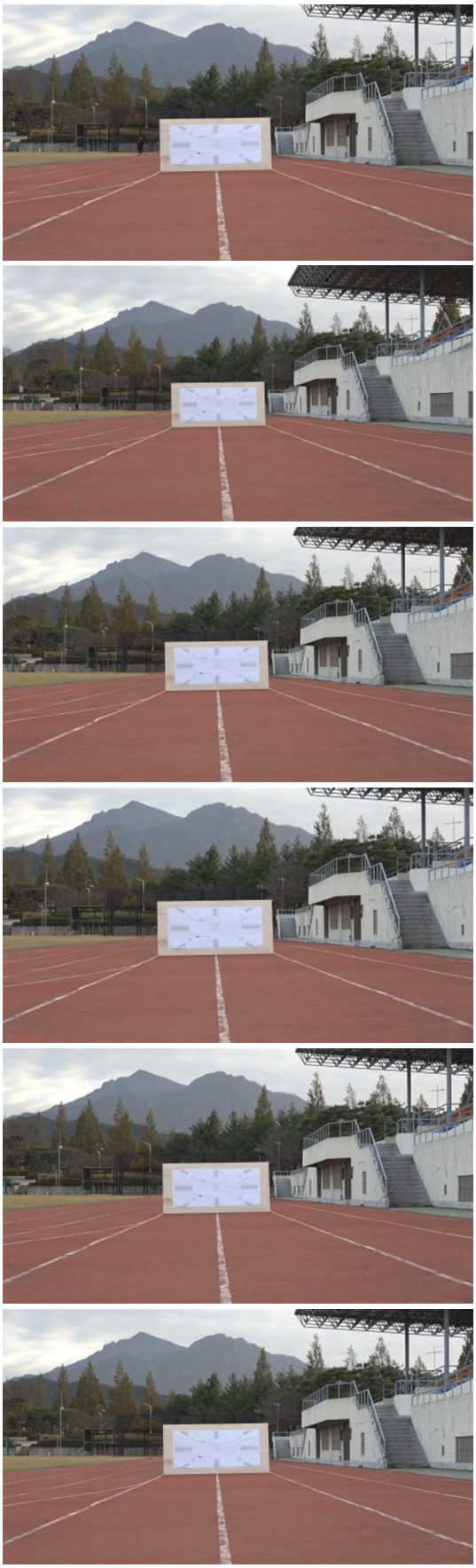


(a) Distance 10m, detect line width 1mm

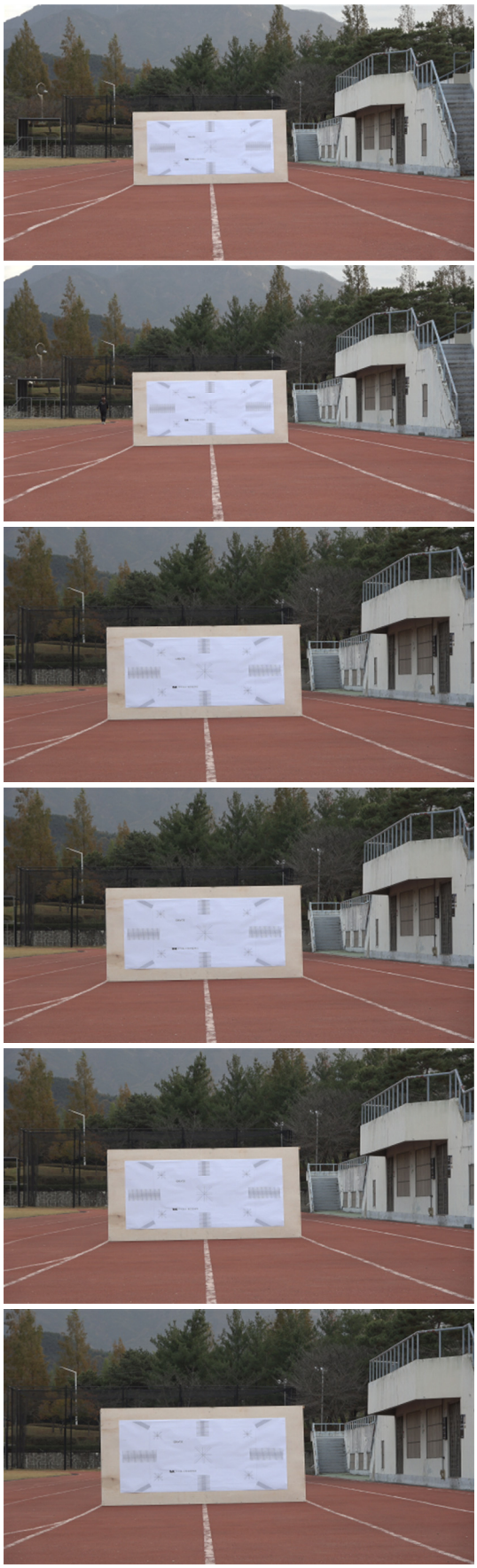


(b) Distance 10m, detect line width 0.5mm

Fig. 6. Crack simulation template data acquisition results at resolution 3840×2160

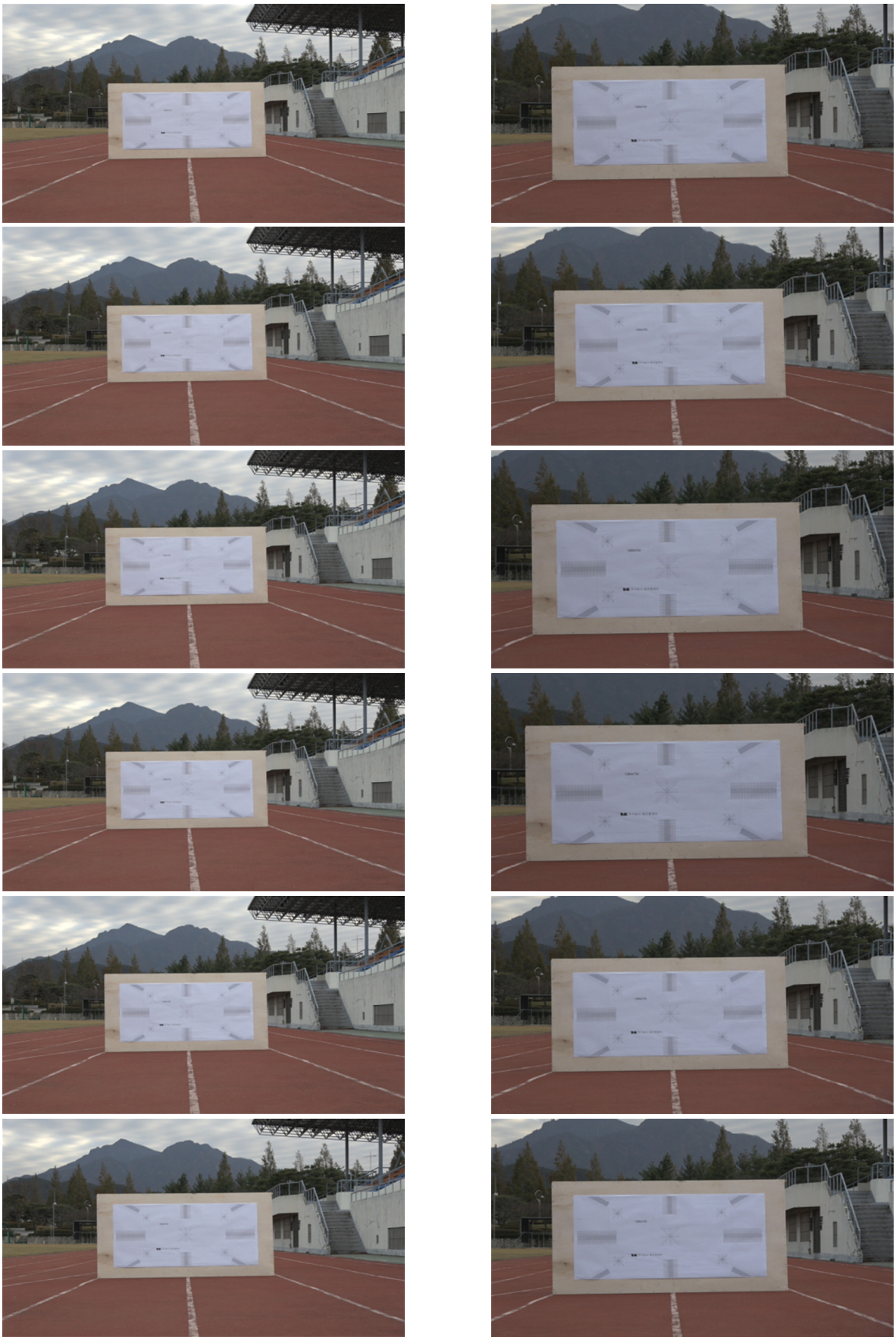


(c) Distance 20m, detect line width 1mm



(d) Distance 20m, detect line width 0.5mm

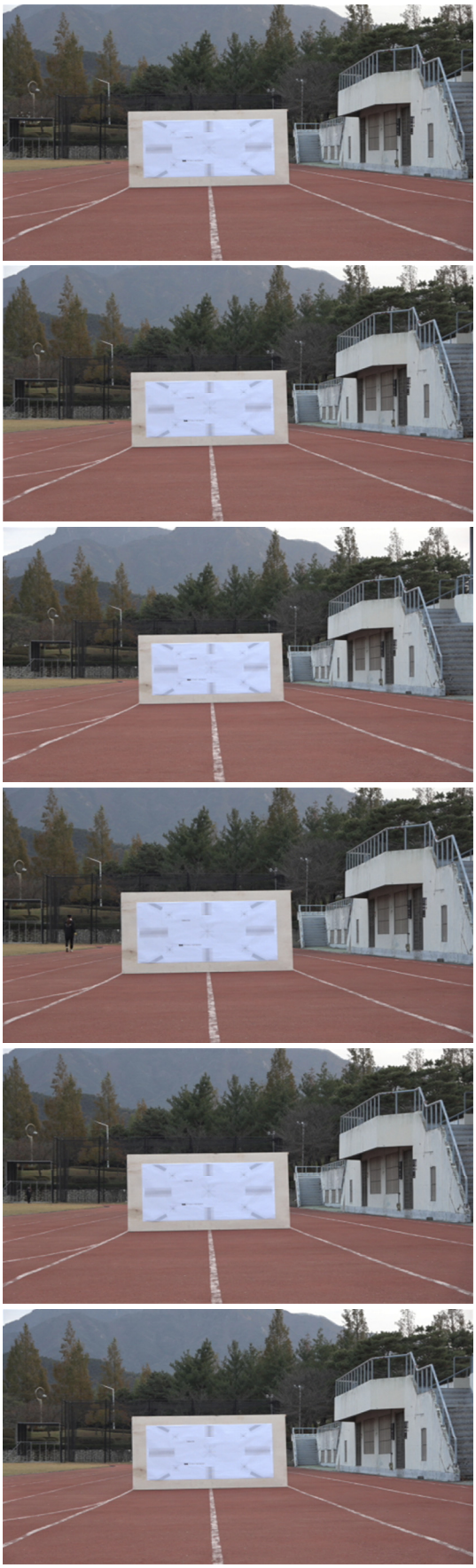
Fig. 6. Crack simulation template data acquisition results at resolution 3840×2160 (continued)



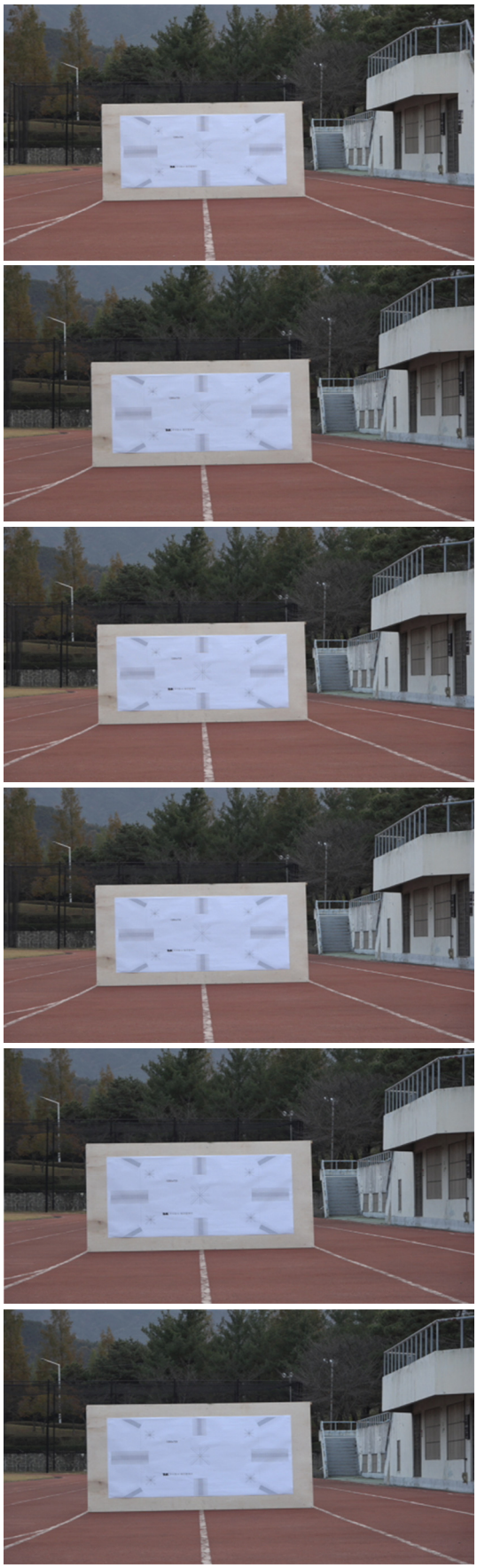
(a) Distance 10m, detect line width 1mm

(b) Distance 10m, detect line width 0.5mm

Fig. 7. Crack simulation template data acquisition results at resolution 720×480



(c) Distance 20m, detect line width 1mm



(d) Distance 20m, detect line width 0.5mm

Fig. 7. Crack simulation template data acquisition results at resolution 720×480 (continued)

1mm의 균열을 식별하기 위해서는 가로 크기 약 7,600mm, 세로 크기 4,300mm 범위의 데이터를 한 번에 취득할 수 있으며, 20m 거리에서는 가로 크기 약 10,900mm, 세로 크기 6,100mm 범위의 데이터를 한 번에 취득할 수 있다. 또한 해상도 3840×2160, 10m 거리에서 0.5mm의 균열을 식별하기 위해서는 가로 크기 약 5,800mm, 세로 크기 3,300mm 범위의 데이터를 한 번에 취득할 수 있으며, 20m 거리에서는 가로 크기 약 6,300mm, 세로 크기 3,500mm 범위의 데이터를 한 번에 취득할 수 있다.

Table 4는 해상도 720×480에서 균열 모사선 폭별로 각각의 해상도 및 거리에서의 실제 취득 면적을 측정하여 평균하였다. 해상도 720×480, 10m 거리에서 1mm의 균열을 식별하기 위해서는 가로 크기 약 6,000mm, 세로 크기 4,000mm 범위의 데이터를 한 번에 취득할 수 있으며, 20m 거리에서는 가로 크기 약 7,300mm, 세로 크기 4,800mm 범위의 데이터를 한 번에 취득할 수 있다. 또한 해상도 720×480, 10m 거리에서 0.5mm의 균열을 식별하기 위해서는 가로 크기 약 3,900mm, 세로 크기 2,600mm 범위의 데이터를 한 번에 취득할 수 있으며, 20m 거리에서는 가로 크기 약 5,300mm, 세로 크기 3,500mm 범위의 데이터를 한 번에 취득할 수 있다. 식별하고자 하는 균열이 작아질수록 한 번에 취득할 수 있는 이미지 데이터의 범위가 작아진다. 따라서 관리할 이미지 데이터의 규모 및 개수가 많아짐을 알 수 있다.

또한, Table 5는 실험을 통해 산출된 값을 이용하여 터널 길이 1,000m, 폭 20m일때의 최소 중첩률, 데이터 구조 및 원본 이미지의 수와 데이터의 크기를 산출하였다.

실험을 통해 터널 길이 1,000m, 폭 20m 터널의 이미지 데이터는 해상도와 정밀도에 따라 최소 중첩률 0.02%에서 8.36%로 구해지며 로컬좌표계의 크기는 (14×15)에서 (36×34)로 나타났다.

구성되는 원본 이미지의 수는 최소 1,012장에서 최대 6,024장이며, 데이터의 크기는 최소 733.18MB에서 최대 32,838.33MB로 나타났다.

터널의 크기와 균열 측정 기준에 따라서 터널 전체에 대한 데이터를 취득하기 위한 해상도와 중첩률을 설정하면 필요한 로컬좌표계를 Equation 3의 계산식을 통해 생성할 수 있다. 또한 사용되는 AL/ML 엔진의 처리 해상도를 이용하여 Equation 4를 통해 서브 좌표계를 설정할 수 있다. 생성된 좌표계를 기준으로 이미지 데이터를 생성, 처리, 관리할 수 있으며 이를 이용하여 균열 및 위험인자가 포함된 이미지의 위치를 정확하게 특정할 수 있다.

고해상도와 정밀도를 높임에 따라 로컬좌표계 구성이 커지고 이미지의 수가 늘어나며 데이터의 크기도 증가한다. 하지만 이는 최초 조사 시 발생하는 데이터의 양이다. 이후 데이터의 수집은 이미지 타일별 이력관리를 통해 변동사항이 있는 부분만 누적하여 관리되며, 나머지 부분은 최신파일로 교체하여 효율적인 데이터 관리가 이루어질 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 터널 구조물 내부의 이미지를 취득하는 방법과 이미지 데이터의 구조화를 위한 방법을 제안하였다. AI/ML을 이용한 이미지 프로세싱 기술의 발달에 따라 정밀한 이미지 데이터 취득이 중요하다. 데이터 취득 조건을 개선하기 위해 터널 상부에 터널의 길이 방향으로 레일을 설치하고 설치된 레일을 이동하며 터

Table 5. Data structure and data size calculation by resolution

Resolution	Dist. (m)	Detect line width (mm)	Overlapping rate (%)		Data structure (0×0)		Number of images (ea)	Data volume (MB)
			w	d	Local coordinate	Sub coordinate		
3840×2160	10	1	6.73	0.82	(19×21)	(17×10)	1,965	19,977.50
3840×2160	10	0.5	0.02	0.13	(25×28)	(17×10)	3,230	32,838.33
3840×2160	20	1	8.36	6.99	(14×15)	(4×3)	1,012	10,288.67
3840×2160	20	0.5	2.20	2.95	(23×25)	(4×3)	2,826	28,731.00
720×480	10	1	2.60	2.52	(24×23)	(17×10)	2,656	1,093.39
720×480	10	0.5	3.81	1.84	(36×34)	(17×10)	6,024	2,479.88
720×480	20	1	2.36	0.95	(20×19)	(4×3)	1,781	733.18
720×480	20	0.5	1.88	2.44	(27×26)	(4×3)	3,366	1,385.67

널 구조물 전체의 이미지 데이터를 취득할 수 있도록 설계하였다.

해상도 3840×2160 및 해상도 720×480, 거리 10m와 20m의 조건에서 1mm와 0.5mm의 균열 모사선이 식별될 때 이미지 데이터를 취득하였다. Equation 1-4의 계산식을 통해 Table 5에서 터널 길이 1,000m, 폭 20m 터널의 이미지 데이터는 해상도와 정밀도에 따라 최소 중첩률 0.02%에서 8.36% 구해지며 로컬좌표계의 크기는 (14×15)에서 (36×34), 서브 좌표계의 크기는 (4×3)에서 (17×10)으로 나타났다. 터널의 크기, 균열 측정 기준, 취득 이미지의 해상도, 중첩률, AI/ML 엔진의 처리 해상도와 같이 조사자의 설정에 따라 터널 전체의 데이터 구조를 설계할 수 있다.

본 연구의 이미지 데이터 취득 방법과 구조화 방법은 이동속도에 따른 화질 저하 문제 및 교통의 흐름을 방해하는 문제를 개선할 수 있고, 균열 및 위험인자의 정확한 위치를 파악하고, 터널 구조물의 안전점검 데이터를 효과적으로 관리할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 중소벤처기업부의 [산학연 collabo R&D 사업]의 지원에 의한 연구임[RS-2023-00224905].

참고문헌 (References)

1. American National Standards Institute (2020), Standardization Roadmap For Unmanned Aircraft Systems, Version 2.0. U.S.
2. Seo, S., Ohn, S-Y., Kim, D-H., Kwak, K., and Chung, M. (2020), “A Study on Development of Portable Concrete Crack Measurement Device Using Image Processing Technique and Laser Sensors”, *Journal of Geosynthetics Society*, Vol.19, No.4, pp.41-50.
3. Bae, S.H., Ham, S.W., Lee, H.P., and Kim, D.G. (2022), “Deep Learning based Crack Detection from Tunnel Cement Concrete Lining”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol.24, No.6, pp.583-598.
4. Bae, S.J., Jung, W., Chanmrith, S., Kim, C.J., Kim, Y.M., Hong, S.H., Kim, J.G., and Kim, J.Y. (2021), “Performance Evaluation Method of Tunnel Scanner for Lining Crack Detection”, *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol.17, No.1, pp.39-52.
5. Cho, S.H., Ga, C., and Yu, K.Y. (2013), “Improvement of Partial Update for the Web Map Tile Service”, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol.31, No.5, pp.365-373.
6. Fontana, R., Gambino, M., Greco, M., Pampaloni, E., Pezzati, L., and Scopigno, R. (2003), “High-resolution 3D Digital Models of Artworks”, *The international Society for Optical Engineering*, SPIE October 2003. DOI:10.1117/12.501248.
7. Ham, S.W., Bae, S.H, Kim, H.Y., Lee, H.P., and Kim, D.G. (2021), “Training a Semantic Segmentation Model for Cracks in the Concrete Lining of Tunnel”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol.23, No.6, pp.549-558.
8. Ham, S.W., Bae, S.H, Lee, H.P., and Kim, D.G. (2022), “An Evaluation Methodology for Cement Concrete Lining Crack Segmentation Deep Learning Model”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol.24, No.6, pp.513-524.
9. Jee, K. H., Chung, J. M., Hong, S. J., and Kim, S. U. (2004), “A Study of Quality Improvement of the Exterior Inspection Using Tunnel Scanning System”, *Journal of thr Korean Society for Railway*, October 2004, pp.24-29.
10. Kim, A.R., Kim, D.Y., Byun, Y.S., and Lee, S.-W. (2018), “Crack Detection of Concrete Structure Using Deep Learning and Image”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.12, pp. 145–154.
11. Kim, B.H., Cho, S.J., Chae, H.J., Kim, H.K., and Kang, J.H. (2021), “Development of Crack Detection System for Highway Tunnels using Imaging Device and Deep Learning”, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.25, No.4, pp.65-74.
12. Kim, H., Cho, L., and Kim, K.S. (2019), “Rock Classification Prediction in Tunnel Excavation Using CNN”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.9, pp.37-45.
13. Kim, H.H. and Lim, H.D., (2016), “A Basic Study on the Prediction of Collapse of Tunnels Using Artificial Neural Network”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.32, No.2, pp.5-17.
14. Kim, I. and Lee, C. (2018), “Development of Video Shooting System and Technique Enabling Detection of Micro Cracks in the Tunnel Lining while Driving”, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.18, No.5, pp.217-229.
15. Kim, S.J., Kang, Y.J., Choi, I.Y., Hong, K.M., and Ryu, W.J. (2015), “Study on Improvement of Measurement Precision in Digital Image Correlation Measurement Method by Using Subpixel Algorithms”, *Journal Korean Soc*. Precis. Eng., Vol.32, No.12, pp.1039-1047.
16. Lee, B. Y., Kim, Y. Y., and Kim, J. K. (2005), “Development of Image Processing for Concrete Surface Cracks by Employing Enhanced Binarization and Shape Analysis Technique”, *Journal of the Korea Concrete Institute,* Vol.17, No.3, pp.361-368.
17. Lee, G.P., Lim, H.J., and Kim, J.H. (2020), “Availability Evaluation of Automatic Inspection Equipment Using Line Scan Camera for Concrete Lining”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol.22, No.6, pp.643-653.
18. Lee, H. B., Kim, J. W., and Jang, I. Y. (2012), “Development of Automatic Crack Detection System for Concrete Structure Using Image Processing Method”, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.16, No.1, pp.64-77.
19. Lee, H.B., Moon, J.H., and chung, T.Y. (2011), “An Image-Based Remote Snow Height Measurement System using a USN” IEMEK *Journal of Embedded Systems and Applications*, Vol.6, No.2, pp. 76-85.
20. Lee, S.H., Shin, K.J., Kim, H.J., Kim, S.Y., Yoo, C.H., and Eom S. G. (2019), Introduction of Tunnel Crack Measurement Technology Using Image Scanning, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol.31, No.6, pp.42-48.

21. New Energy and Industrial Technology (2018), Guidelines for Evaluating the Performance of Unmanned Aerial Vehicles for Bridge Inspection Ver.1.0. Japan.
22. Oh, j.S. (2013), "Design of a Smart Phone App for Measuring Object Size in a Picture Image", *Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, Vol.13, No.5, pp.135-142.
23. Seo, S.H., Kim, D.H., and Chung, M.K. (2021), "A Study on Applicability of Smartphone Camera and Lens for Concrete Crack Measurement Using Image Processing Techniques", *Journal Korean Geosynthetics Society*, Vol.20, No.4, pp.63-71.
24. Sim, S.B., Choi, S.I., Kong, S.M., and Lee, S.W. (2020), "Adversarial Learning for Underground Structure Concrete Crack Detection based on Semi-supervised Semantic Segmentation", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol.22, No.5, pp. 515-528.
25. Yun, D.Y. and Moon, M.K. (2021), "Development of Kid Height Measurement Application based on Image using Computer Vision", *Journal of the KIECS.*, Vol.16, No.1, pp.117-124.

Received : November 29th, 2023
Revised : January 6th, 2024
Accepted : January 31st, 2024