

AI 이미지모듈을 통한 외관조사망도 작성 및 치장 조적벽의 건전도 평가

Non-Structural Evaluation of Brick Walls Through AI Visual Inspection Network and Image Module



문 아 해*
Moon, Ahae



신 지 옥**
Shin, Jiuk



문 현 준***
Moon, Hyunjun



이 기 학****
Lee, Kihak

1. 이미지를 이용한 딥러닝 개요

인공지능 중심의 4차 산업혁명이라는 이름에 걸맞게 최근 여러 분야에서 딥러닝을 이용한 연구가 진행되고 있다. 딥러닝 분야에서 가장 많이 활용되는 기술은 컴퓨터비전(Computer vision)이다. 컴퓨터비전은 시각적 세계를 해석하고 이해하도록 컴퓨터를 학습시키는 인공지능 분야이다. 카메라와 동영상에서 디지털 이미지와 딥러닝 모델을 사용하여 객체를 정확하게 식별하고 분류하는 학습을 진행하고, 이를 통해 컴퓨터의 관찰 대상 “인지”가 가능한 원리이다.

오늘날 카메라가 내장된 모바일 기기의 등장으로 사진과 동영상은 현대인이 매일 생성하는 데이터가 되었으며, 그 양이 기하급수적으로 증가하고 있다. 이러한 데이터의 증가 및 CNN(Convolutional Neural Network)과 같은 다양한 컴퓨터비전 특화 알고리즘의 발달은 컴퓨터비전의 활발한 발전을 이끌어냈다.

컴퓨터 비전으로 인해 다양한 분야에서 운영 방식이 변화하고 있다. 제조업에서 도시계획까지 현실에 존재하는 사물에 대해 측정·분석하고 그 위에 수량화할 수 있는 데이터 파일을 만들 수 있게 한다. 비디오와 이미지 데이터를 활용하여 그 동안 측정이 불가능하다고 여겼던 것들을 가능하게 해준다. 특히 머신러닝의 발달은 컴퓨터비전의 활용도를 더욱 정확하고 독립적으로 만들어주었다. 비디오 및 카메라로 찍힌 이미지를 분석하는 기술은 이미 건축 및 건설 현장에도 자리를 잡고 있다.

건축·건설 현장에 컴퓨터비전을 적용하는 것은 안전성 개선, 비용 절감 및 효과적인 계획 결정으로 이

* 세종대학교 건축공학과, 석사과정
Dept. of Architecture, Sejong University
** 한국건설기술연구원 수석연구원, 공학박사
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology
*** 세종대학교 컴퓨터공학과 교수, 공학박사
Dept. of Computer Engineering, Sejong University
**** 세종대학교 건축공학과 교수, 공학박사
Dept. of Architecture, Sejong University

어져 생산성을 증대시킨다. 컴퓨터비전이 건설 현장에서 이용되고 있는 예로 적재되어 있는 건축 자재의 양 추적을 통해 수량 부족 시 미리 경고하는 시스템이 있다. 또한 건설 현장에서 수작업이 많은 공정의 비디오 모니터링을 통해 작업의 완료 추정치를 생성하고 예상 공정 일정과 일치 여부를 판단하는데 도움이 되고 있다.

최근에는 저비용 고품질의 영상 기기 개발과 더불어 컴퓨터비전 기술의 괄목할만한 진전으로 구조 건전성 모니터링 기술이 많은 주목을 받고 있다¹⁾. 비접촉, 장거리, 신속 정확, 저비용 등의 장점을 지닌 컴퓨터비전 기술은 센서를 부착하여 진행한 기존의 구조 건전성 모니터링 기술에 대한 보완책으로 적극 고려되고 있다²⁾. 로컬 수준에서 다루어지는 컴퓨터비전 기반의 구조 건전성 모니터링 예시로는 균열, 파열, 박리, 녹 및 느슨한 볼트 감지와 같은 응용 프로그램이 포함된다. 글로벌 수준의 응용 분야로는 변위 측정, 구조 거동 분석, 진동서비스 가능성, 모달 식별, 손상 감지, 케이블 장력 모니터링, 입출력 정보를 활용한 구조 식별 등이 포함된다.

영상 분류, 검출, 영상 분할, 광학 흐름, 시각 추적 등 컴퓨터비전의 주제는 로컬 수준 및 글로벌 수준의 구조 건전성 모니터링과 매우 유사하다. 균열, 파열, 부식, 박리, 보이드 등의 국부적 상태 판정을 위한 로컬 지표는 이미지 분류, 감지와 같은 컴퓨터 기술을 사용하여 구조물 표면의 시각적 이미지와 구조 요소 내부를 반영하는 적외선 이미지에서 추출이 가능하다. 또한 변위, 진동, 모달 매개변수, 케이블 힘, 곡률, 프로필 등의 글로벌 지표는 광학적 흐름과 시각적 추적을 통해 얻을 수 있으며, 오브젝트 디텍션 기술을 이용하여 교량 구조물에 대한 차량 분배, 건물 구조물에 대한 거주 점유율 등의 외부하중도 구할 수 있게 한다.

2. 조적조 건축물의 구조 건전성 모니터링

2.1 기존의 구조 건전성 판단

시설물의 재난 피해 예방을 위해 안전점검 및 정밀

안전진단 시행 시 건축 구조물에 발생하는 균열을 파악하는 과정은 필수적인 검사항목이다. 균열 조사는 검사자가 현장에서 균열을 관찰하여 수행하는 방식으로 이루어지는데, 검사자의 역량이나 주변 환경에 따라 매번 다른 결과가 도출되기 때문에 객관적 지표로는 타당하지 않다. 검사자가 수행하는 방식을 대체하기 위해 건축 구조물의 균열을 탐지하는 영상처리 기법이 많은 연구에서 제시되어 왔다^{3,4)}.

균열 탐지 기법에 대한 연구는 콘크리트 균열 인식 방안에 대한 연구가 대다수이다. 그러나 국내 중저층 건축물의 80% 이상이 조적조 건축물이며, 기존 치장 조적조를 이용한 건축물이 단독주택부터 고층공동주택까지 다양한 건물에 광범위하게 사용되는 현실을 고려할 때 조적조에 대한 균열 탐지 기법은 중요하게 고려될 필요가 있다. 본고에서는 이러한 추세에 따라 관련된 연구를 소개하고자 한다.

2.2 치장조적조 건축물의 구조 건전성 판단

2016년 경주 지진 및 2017년 포항 지진 발생 당시 구조물의 붕괴 사례는 많지 않았지만 치장조적조의 피해 사례는 매우 많았다. 특히 노후된 건물의 경우 지진이나 바람에 의한 외력이 없는 상태에서도 붕괴 사례가 증가하고 있으며, 인명사고로 이어지고 있다.

그러나 치장조적벽의 위험성 증가와 관계없이 기존 건물의 치장조적벽의 안전을 확보하기 위한 기술은 발전하지 못한 상황이다. 치장조적벽의 구조 건전성을 확인하기 위한 현장 조사에 활용할 수 있는 기준이나



〈Fig. 1〉 Failure of the masonry walls

지침이 없기 때문에 단편적인 조사만 이루어지고 있다. 또한 현장 조사를 통해 얻은 자료를 분류하고 등급을 매기는 체계적인 시스템이 없어 조사 결과를 임의로 평가하는 수준에 머물고 있다.

개정된 내진기준에서는 치장조적벽의 벽 연결 철물(Wall tie) 등을 다루고 있어 신축 건물의 시공에는 좋은 참고가 될 수 있으나, 기존 건물에 어떻게 보강할 것인지를 다루고 있는 국내 기준이나 지침은 없다.

벽 연결 철물과 함께 치장조적의 자중을 지지할 수 있는 구조물이 확실치 않아 침하를 일으키는 경우 온·습도 변화에 따른 치장조적조의 면내방향 거동에 의한 균열이 치장조적벽의 하자 사례로 보고되고 있다. 면외방향 거동을 방지하는 방법으로는 Wall tie가 유효하지만 면내방향의 거동을 방지하는 요령은 아직 국내 기준상 명확하지 않아 동일한 실패를 반복하고 있다.

2.3. 건축물의 균열 탐지 기법

Kim, Jeon & Lee(2008)에 의해 근대 조적 건축물의 결함 특성에 관한 연구가 진행된 바 있다. 해당 연구에 따르면 조적벽의 매입된 앵커 상태를 외부에서 확인할 수 없었으며, 시간의 경과에 따라 앵커에 녹이나 부식, 지지력 저하 등이 발생하고 벽돌의 강도가 저감되어 조적벽 전체에 수직 및 수평 균열이 발생함을 확인하였다⁵⁾. 현재까지 국내에서는 이러한 조적벽의 결함에 대해 전문가의 안전진단에 그 판단을 맡겼으나, 이에 대해 4차 기술 혁명에 따른 신기술 도입이 시급하다고 판단된다.

국내 손상 탐지 기법 중 3D 스캔과 영상 처리 기술 및 적외선 열화상 기법을 활용한 구조 결함 평가법을 비롯하여 3D 스캔을 통한 도면 및 데이터 처리에 대한 연구는 다수 진행되었지만 이를 활용한 조적벽 균열 탐사 및 보강에 대한 연구는 미미하다. 따라서 3D 스캔 기술과 영상 처리 기술을 도입하여 3D 형상 정보와 표면 영상데이터 획득하여 분석하고 구조해석을 실시할 필요가 있다.

3. 컴퓨터비전 기반의 조적조 건축물 균열 탐지 적용 방안

최근 국내에서는 열화상 기법을 활용한 콘크리트 균열에 대한 연구가 진행되었다. 적외선 열화상 기법을 이용하여 콘크리트의 균열부 온도 및 정상부 온도와 열 전달에 영향을 줄 수 있는 요인들을 파악하여 균열에 대한 DB를 생성하고, 이를 활용하여 균열의 깊이를 예측하는 알고리즘을 구축하는 연구가 진행되었다⁶⁾.

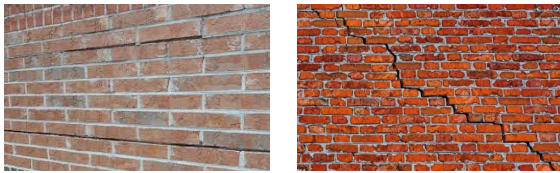
해외에서는 열화상 및 자외선을 이용한 카메라를 통한 이미지 추출 관련 연구가 국내에 비해 활성화되어 있으며^{7,8)}, 이를 활용한 머신러닝 알고리즘 개발이 진행되고 있다. 적외선 카메라를 통해 촬영한 이미지에 대한 노이즈를 제거하여 표면 결함을 탐지하는 기술을 통해 벽체 표면의 균열 탐사에 활용할 수 있도록 하였다⁹⁾.

건축물의 표면을 탐사하는 과정에서 드론을 활용하는 경우가 많다. 드론으로 정해진 규격의 벽체를 촬영한 후 하나의 벽체 이미지로 만들기 위해 이어붙이는 과정을 이미지 스티칭(Image stitching)이라 하며, <Fig. 2>는 브라운앤 로에 알고리즘(Brown-Lowe algorithms)을 이용하여 수행된 결과이다. 이 또한 건축물에 대한 컴퓨터비전의 활용가능성을 보여주고 있다.

치장조적조에서 외벽의 안전 여부를 진단하고 보강하는 기술은 내진성능 또는 내구성 확보 측면에서 중요하게 다루어져야 한다. 노후화 된 건물과 내구 연한을 넘어선 치장조적조는 다양한 문제를 일으키고 있다. 그러나 4차 산업혁명의 도래 후 이에 준하는 IT 기술을 접목하여 치장조적조의 균열에 대하여 단기간에 많은 정보를 신속하게 처리하려는 시도는 아직까지 없는 것으로 판단된다. 따라서 컴퓨터비전을 접목하여 치장조적조의 균열을 판단하는 기술에 대해 소개하고자 한다.



〈Fig. 2〉 Image stitching using Brown-Lowe algorithms



(a) Sliding failure (b) Diagonal failure

〈Fig. 3〉 Two types of failure of the masonry walls

3.1 치장조적조 균열 양상

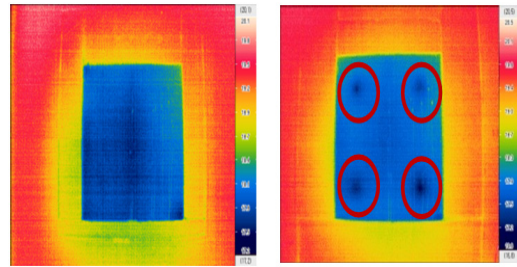
치장조적조의 균열은 구조적 결함, 설계적 결함, 시공적 결함의 이유로 나타난다. 각각의 결함은 외관상 균열의 형태로 이어진다.

건축 구조물의 내진 보강 및 설계에 있어서 수평내력과 연성능력은 구조 요소의 내진성능을 결정하는 가장 중요한 요인이다. 따라서 내진성능 향상은 구조 요소의 수평내력 증대와 연성능력 향상으로 정의할 수 있다. 조적벽체 역시 수평내력 증대와 연성능력 확보로 내진 보강이 가능하다. 비구조 요소로 사용되는 외벽 치장 벽체의 경우 구조 벽체와 치장 벽체 사이에 다양한 연결 철물을 이용하여 치장 벽체를 구조벽체에 지지하여 외력에 대한 안정성을 확보할 수 있다.

적절한 연결 철물 보강안을 도출해내는 딥러닝 프레임워크를 갖는 치장조적조 균열 탐지 기술을 나타내기 위해 균열 양상을 크게 3가지로 나누는 것이 딥러닝 분류 학습에 효율적이라고 보고된다. 이에 따라 치장조적조의 균열 양상을 수직 균열, 수평 균열, 대각 균열로 분류하였다.

3.2 열화상 모듈 기반 조적벽체의 탐사 및 이미지 데이터 분석

연결 철물의 탈락이 발생할 경우 치장조적벽체는



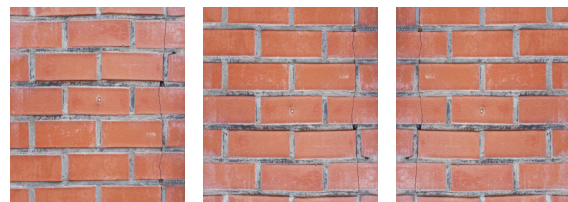
〈Fig. 4〉 Anchor identification by the presence or absence of thermal bridge phenomenon

```

datagen = ImageDataGenerator(
    horizontal_flip = True,
    vertical_flip = True,
    fill_mode = 'nearest')

path = 'C:\\Users\\Moon\\PycharmProjects\\Data_preprocessing\\origin_data\\03_diagonal'
image_list = os.listdir(path)
save_dir = 'C:\\Users\\Moon\\PycharmProjects\\Data_preprocessing\\aug_data\\03_diagonal'

augment_number=5 #number of augmented versions for each image
for f in image_list:
    image_filename = path + '\\' + f
    image = np.expand_dims(plt.imread(image_filename), 0)
    datagen.fit(image)
    for x, val in zip(datagen.flow(image, #input image
                               save_to_dir=save_dir, #augmented images will be saved here
                               save_prefix='dia', # the augmented image name will have prefix 'aug'
                               save_format='jpg', range(augment_number))):
        pass
    
```



(a) Original (b) Upside-down (c) Left-right reverse

〈Fig. 5〉 Image enhancement codes using ImageDataGenerator module in Keras

면의 거동을 하며, 이는 조적벽체의 배부름 현상과 심지어 탈락으로 나타난다. 배부름 현상은 육안으로는 판단이 가능하지만 수평으로 촬영된 조적 이미지 상으로는 판단이 불가능하다. 이에 조적벽체의 손상 유형 중 배부름 현상에 대한 판단을 위한 지표로 열화상 카메라를 이용하는 것이 적절하다고 판단하였다. 연구 결과에 따르면 연결 철물을 통해 R-Value가

30~40% 가량 증가한다. 따라서 열전도 현상이 앵커에서 발생하는 열교 현상을 “역이용”한 열화상 카메라를 활용하여 앵커 개수를 인식하는 방법을 고안하였다.

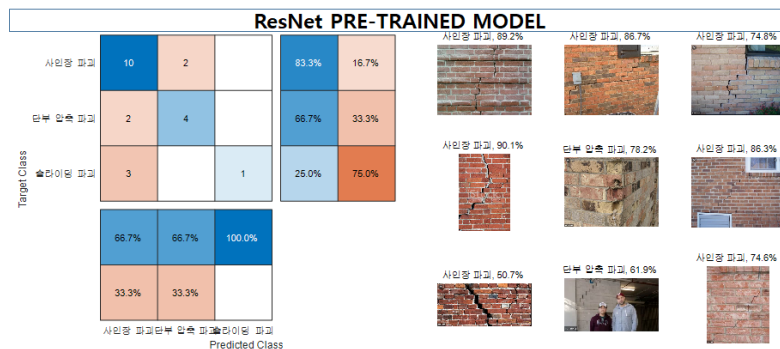
벽체 전체의 이미지 데이터를 확보하기 위해 드론을 활용하여 벽체와 3m 거리를 유지하고 지면으로부터 4m 떨어져 수평으로 이동하면서 일정한 속도로 촬영을 진행하였다. 연구에서 이용한 드론 기종은 DJI Phantom4로 최대 비행 시간이 30분이며, 4K 카메라 화질로 본 연구의 치장조적벽 이미지 데이터 확보에 적절하다고 판단하여 사용하였다. 치장조적 이미지 18장을 같은 규격으로 촬영한 후 이미지 스티칭(Image stitching)을 진행하였다. UAV와 열화상 모듈을 결합한 드론을 이용하여 안전하고 신속 정확한 조적벽 탐사를 실시하였고, 이를 바탕으로 현장 이미지 학습 데이터를 확보하였다. 확보된 이미지 학습 데이터를 활용하여 손상 유형 및 손상 수준에 대한 레이블링(Data labeling)을 실시하였다. 이를 통해 이미지

학습 데이터를 구축하였다.

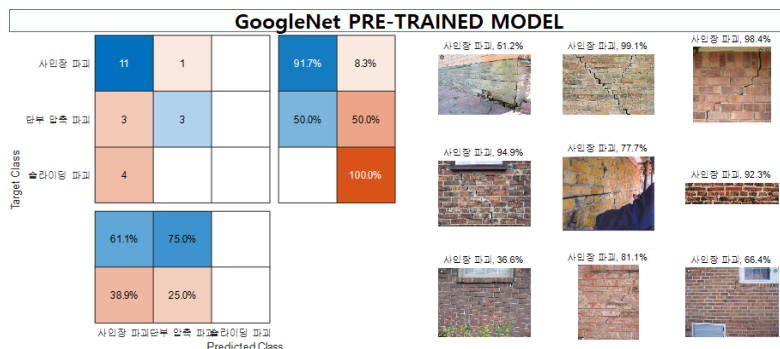
또한 현장 이미지 데이터를 수집하는데 한계가 있으므로 파이썬 딥러닝 라이브러리인 Keras에서 제공하는 ImageDataGenerator 모듈을 활용하여 작은 데이터 셋으로 이미지 분류 모델을 설계하는 방안을 활용하였다.

3.3 손상 유형 및 수준에 대한 데이터 레이블링 Pre-Test 결과

딥러닝 알고리즘으로 6.7%의 오차율을 기록한 GoogLeNet과 152개의 깊은 레이어 층을 가진 모델로 오차율 3.57%를 기록한 ResNet 모델을 사용하여 분류된 사진 파일을 통해 학습을 진행하였다. 실제 값이 알려져 있는 데이터 세트에 대한 분류기의 성능을 시각화 하기 위해 정오 분류표를 사용해 결과를 나타내었다. <Fig. 6>에서 목표 클래스는 이미지의 실측 레이블이고, 출력 클래스는 네트워크가 이미지에 할당한 레이블이다. 좌표축 레이블은 클래스 레이블, 즉 사진



(a) ResNet pre-trained model



(b) GoogLeNet pre-trained model

<Fig. 6> Results of pre-test using Matlab

장 파괴, 단부압축 파괴, 슬라이딩 파괴를 나타낸다.

ResNet을 활용한 Pre-trained model의 결과로 도출된 정오분류표를 살펴보면 사인장 파괴로 분류된 이미지의 68.7%가 실제로 사인장 파괴였으며, 단부 압축파괴로 분류된 이미지의 66.7%가 실제 단부압축 파괴 이미지로 판명되었다. 또한 슬라이딩 파괴로 분류된 이미지는 100% 슬라이딩 파괴임을 보여주었다.

GoogLeNet을 활용한 Pre-trained model의 결과로 도출된 정오분류표를 살펴보면 사인장 파괴로 분류된 이미지의 61.1%가 실제로 사인장 파괴였으며, 단부 압축파괴로 분류된 이미지의 75%가 실제 단부압축 파괴 이미지임을 보여주었다.

CNN 기반의 Pre-Test 결과에서 3개의 손상 유형에 대해 약 85%의 검증 정확도를 보였다. 위의 결과를 통해 인경신경망을 이용한 치장조적 균열 양상 판단은 알고리즘의 지속적 업데이트를 통해 실무 적용이 가능한 것으로 입증되었다.

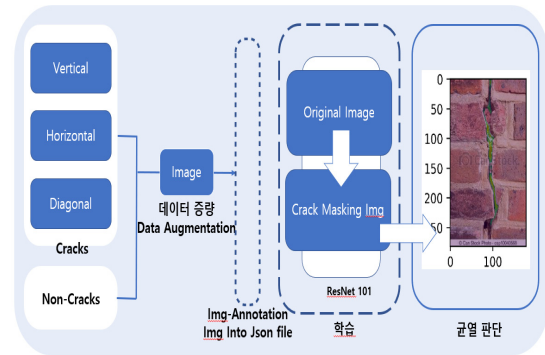
3.4 AI 기반의 대상 조적벽체에 대한 학습 데이터 구축 및 학습

이미지 학습 모델의 출력값을 데이터 학습 모델의 입력값으로 활용하는 방식으로 두 학습 모델을 결합한 딥러닝 모델을 구축하였다.

현장 치장조적 균열 탐사 과정은 드론을 수평방향으로 이동하며 정해진 규격으로 이미지를 촬영한다. 따라서 주어진 규격 이미지 내에서 균열의 여부를 판단하는 것이 중요하다. 최종 결과로 균열이 함께 표기된 이미지를 도출하는 것이 본 과정의 목표였으며, 이에 알맞은 이미지 데이터를 확보하는 것이 중요하였다.

이미지 데이터 학습은 조적 이미지 상에서 균열의 위치를 따로 표기하여 정답을 알려주는 지도학습(Supervised learning)을 이용하였다.

이미지 상 균열의 위치를 직접 표기하여 균열의 클래스(균열의 양상)를 정의하는 라벨링 작업인 이미지 어노테이션(Image annotation)을 실행한 후 Json 파일 형식으로 저장하였다. 이는 추후 균열 유형 분류 모델 학습 시 이용할 계획이다.



〈Fig. 7〉 Diagram of the flow of a deep learning framework for determining decorative masonry wall cracks

Pre-Test를 통해 성능이 좋은 것으로 판명된 ResNet 모델을 활용하여 학습을 진행하였다. ResNet 모델은 152개의 레이어로 구성된 매우 깊은 네트워크 모델로 잔차(Residual)를 최소화한다는 특징을 갖고 있다. 파이썬 딥러닝 프레임워크 중 하나인 파이토치(Pytorch) 라이브러리를 활용하여 모델의 이미지 학습을 진행하였으며, 학습을 마친 후 손실율(Loss rate)이 약 0.0684의 값으로 나왔다.

이번 학습은 조적 균열 이미지만을 사용하여 진행된 학습이 아니므로 추후 현장 균열 이미지 데이터를 추가하여 진행할 필요가 있다고 판단되었다. 학습이 끝난 후 현장 이미지로 평가를 진행하였을 때 균열이 뚜렷한 이미지는 균열 양상이 마스킹 이미지로 도출되었으나, 현장 사진 중 균열이 미세한 이미지는 균열 양상이 제대로 파악되지 않았다. 따라서 추후 꾸준한 현장 데이터 구축 및 학습으로 개선될 여지가 충분할 것으로 사료된다.

4. 결론

급속도로 기술이 변화하고 발전하는 오늘날 일상생활 속에서 컴퓨터비전 기술을 습득하는 것은 더 이상 선택이 아닌 필수가 되었다. 글로벌 리서치 기업인 Tractica의 리포트에 따르면 컴퓨터비전 시장은 2025년까지 26.2억 달러에 달할 것이라 예측하였다. 컴퓨터비전 프로세스가 여러 산업의 운영 방식 자체를 바꾸



〈Fig. 8〉 Masking of cracks using crack images

고 있다는 것은 의심할 여지가 없다. 컴퓨터비전 기술을 도입함으로써 인력과 다른 리소스를 더욱 스마트하게 배치할 수 있으며, 산업의 현장 상황 인식을 향상시키고 있다. 건설 산업에서도 컴퓨터비전 기술을 도입하여 장점을 적극 활용한다면 더 큰 시장 영역의 확보와 산업의 고도화를 가져오게 될 것이다.

근래에 건축물의 유지보수관리 및 안전관리에 컴퓨터비전을 적용하는 시도가 점점 늘어나고 있다. 이를 통해 구조물의 실시간 거동 분석이 가능해지고 있으며, 인력과 시간을 감축시킬 수 있게 되었다. 특히 구조물에 발생한 손상을 탐지하는 연구는 구조물 유지관리를 기존의 3D 업종에서 첨단 기술 집약적인 분야로 탈바꿈 하는 기틀을 마련해주고 있다.

5층 이하 중저층 건축물에 치장조적이 적용된 많은 노후 건축물의 안전성 판단을 위한 지표로 컴퓨터비전 기술을 활용하는 것은 치장벽돌의 안전 여부를 신속하게 확인하고 보강의 우선순위를 결정하는데 중요한 역할을 할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 학술기사는 국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술촉진연구(R&D)사업(1615011595)으로 지원되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Ahn, E., Kim, H., Gwon, S., Sim, S. H., Lee, K. M., & Shin, M., "Evaluation of Crack-Repairing Performance in Concrete Using Surface Waves", Journal of the Korean

Recycled Construction Resources Institute, Vol.5, No.4 pp.496~502, 2017, doi: 10.14190/JRCR.2017.5.4.496

2. Lee, C. H., & Moon, H., "Artificial Intelligence-based Inspection Case for Public Facilities", Vol.68, No.9, pp.48~56, 2020

3. Hassan, S. I., Dang, L. M., Min, K. B., Nam, J. Y., & Moon, H., "Damage Detection and Classification System for Sewer Inspection using Convolutional Neural Networks based on Deep Learning", Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol.22, No.3, pp.451~457, 2018, doi: 10.6109/jkiice.2018.22.3.451

4. Lee, B. Y., Kim, Y. Y., & Kim, J. K., "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, 2005, Retrieved from http://www.jkci.or.kr/AURIC_OPEN_temp/RDOC/kci01/kcit_200506_007.pdf

5. Kim, T. Y., Jeon, B. O., & Lee, M. K., "A Study on the Defect Characteristics of Masonry Building in Modern Age of Korea", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol.24, No.5, pp.117~124, 2008

6. Korea University. (2019). 15층 이상 고층건물의 깊이 50mm급 구조체 손상 평가를 위한 UAV 및 열화상 모듈 기반 SMART SKY EYE 기술 개발 최종보고서 (Report No. 18CTAP-C129787-02). Republic of Korea: Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, Retrieved from <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201900002051&dbt=TRKO&rn=>

7. Henriques, M. J., & Roque, D. (2015). Unmanned Aerial Vehicles (UAV) as a Support to Visual Inspections of Concrete Dams. Proceedings of the 2015 Second International

Dam World Conference, Portugal, pp.1~13,
Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/317620820_UNMANNED_AERIAL_VEHICLES_UAV_AS_A_SUPPORT_TO_VISUAL_INSPECTIONS_OF_CONCRETE_DAMS

8. Duque, L. (2017). UAV-Based Bridge Inspection and Computational Simulations (Master's Thesis). South Dakota State University, USA, Retrieved from <https://openprairie.sdstate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3199&context=etd>
9. Sham, J., Chen, N., & Long, L., "Surface crack detection by flash thermography on concrete surface", *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol.50, No.5, pp.240~243, doi: 10.1784/insi.2008.50.5.240