

드론과 이미지 분석기법을 활용한 구조물 외관점검 기술 연구

Study on Structure Visual Inspection Technology using Drones and Image Analysis Techniques

김종우¹

정영우²

임홍철^{3*}

Kim, Jong-Woo¹

Jung, Young-Woo²

Rhim, Hong-Chul^{3*}

Institute of Technology, Judico, Suzi-Gu, Yongin-si, 16871, Korea ¹

Institute of Technology, Judico, Seocho-Gu, Seoul, 06680, Korea ²

Department of Architectural Engineering, Yonsei University, Seodaemun-Gu, Seoul, 03722 Korea ³

Abstract

The study is about the efficient alternative to concrete surface in the field of visual inspection technology for deteriorated infrastructure. By combining industrial drones and deep learning based image analysis techniques with traditional visual inspection and research, we tried to reduce manpowers, time requirements and costs, and to overcome the height and dome structures. On board device mounted on drones is consisting of a high resolution camera for detecting cracks of more than 0.3 mm, a lidar sensor and a embeded image processor module. It was mounted on an industrial drones, took sample images of damage from the site specimen through automatic flight navigation. In addition, the damage parts of the site specimen was used to measure not only the width and length of cracks but white rust also, and tried up compare them with the final image analysis detected results. Using the image analysis techniques, the damages of 54ea sample images were analyzed by the segmentation - feature extraction - decision making process, and extracted the analysis parameters using supervised mode of the deep learning platform. The image analysis of newly added non-supervised 60ea image samples was performed based on the extracted parameters. The result presented in 90.5 % of the damage detection rate.

Keywords : visual inspection, drone, automatic flight navigation, deep learning image analysis, morphology method

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 사회 기반 구조물의 노후화로 인하여 안전 점검 및 유지관리에 대한 관심이 급증하고 있다. 특히 콘크리트 구조물의 경우, 구조적, 환경적 열화를 억제하기 위하여 허용균열폭과 같은 관리 기준을 통해 보수를 필요로 하는 균열폭을 제한하고 있다. 이러한 사회 기반 구조물의 수명관리와 안전

성 확보를 위해서는 균열폭과 같은 외관 안전 점검을 보다 효과적으로 수행하여 적시적소에 유지보수를 수행하는 것이 중요하다. 그러나 기존의 구조물 외관점검 기술은 대부분 인력에 의존하고 있으며, 고소지역 및 돔 상부 등의 구조물의 경우 접근이 어렵고 근거리 검사가 불가능하여 육안 점검은 한계점이 존재한다. 따라서 보다 효과적으로 구조물의 외관점검을 수행할 수 있는 신기술 개발의 필요성이 대두되고 있으며, 이에 대한 대안으로 드론과 이미지 분석 기법을 활용한 점검 기술을 검토할 수 있다.

최근 5년간 사회적 관심으로 인하여 드론 산업 세계시장 규모는 연평균 8% 이상의 성장률을 보이고 있으며, 2013년 66억 달러(7조원)에서 2022년 114억 달러(13조원)으로 성장할 것으로 전망되고 있다[1]. 군사, 소방, 점검, 촬영 등

Received : July 17, 2017

Revision received : August 10, 2017

Accepted : November 22, 2017

* Corresponding author : Rhim, Hong-Chul

[Tel: 82-31-778-8610, E-mail: jwkim@judico.co.kr]

©2017 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

여러 가지 산업 요구에 맞춰 다양한 융합 기술을 제공하고 있으며, 특히 드론을 활용한 안전 점검 기술은 기존 인력의 한계에서 벗어나 접근이 어려워 육안점검이 불가능한 구조물의 안전점검을 누구나 보다 쉽고 효과적으로 수행할 수 있는 가장 효율적인 대안으로 대두되고 있다[2].

이러한 드론을 활용한 점검 기술에서는 단순히 점검 부위를 촬영하는 것에서 그치지 않고 수집된 이미지를 활용하여 손상 여부를 자동으로 검출해내는 이미지 분석 기법을 사용하게 된다. 이미지 분석 기법을 활용한 기술은 자동차 분야의 차선이탈경보 시스템이나 재난관제 분야의 실시간 재난 영상 전송 시스템 등 우리 사회 주변에서도 흔히 접할 수 있는 솔루션이다.

본 연구에서는 드론과 이미지 분석기법을 활용하여 기존 구조물 외관 안전 점검이 지니는 인력적, 접근적 한계를 극복하고자 하였다. 따라서 기존 점검 및 조사에 소요되는 막대한 인력과 시간, 비용을 절감하고, 접근이 어려워 육안 점검을 수행할 수 없는 구조물의 외관점검을 효과적으로 수행할 수 있도록 함에 그 목적이 있다.

1.2 기존 연구에 대한 고찰

드론과 이미지 분석기법을 활용한 외관 점검 기술의 기존 연구 사례를 살펴보면 다음과 같다.

Lovelace[3]은 드론을 교량의 상태 검사에 활용하는 아이디어를 실제로 구현하여 적용하였다. 적외선 카메라를 탑재체로 채용하여 교량의 결함을 비디오, 정지 영상, 확대 사진 등의 교량 결함 이미지를 확보하였으며, 이를 육안 검사와 동일한 수준으로 식별하였다. Chan[4]은 교량 구조물의 열화 검사에 드론을 활용하였으며, 공중 기반 이미지를 수집을 통해 열화 메커니즘 및 패턴을 식별 할 수 있는 BIS(bridge information systems)를 구축하였다.

Lu[5]은 전력선 검사를 위한 새로운 방법으로 드론 기반의 검사를 제안하였다. 카메라, 적외선 열화상 카메라 및 자외선 열화상 카메라와 같은 탑재 장비의 자동 추적 및 사진 촬영 기능으로 UAV 기반 검사에 적합한 전력선 검사 시스템을 구축하고 자동 추적 알고리즘을 제안하였다. 이 자동 추적 알고리즘에는 3개의 좌표계 (측지 좌표계, 지구 중심 직각 좌표계 및 NEU 좌표계)의 좌표 변환과 원호 길이를 코드 길이로 처리하는 구형 근사법을 적용하였다. 이 알고리즘을 통해 UAV의 실시간 캡처 GPS 데이터를 이용, 항공 카메라의 촬영 각도를 자동으로 수정하여 검사 중 전원선을 추적하

고 촬영할 수 있다.

Siegel[6]는 항공기 표면의 원격 육안 검사 시스템을 개발했다. 리벳의 균열을 검출하기 위해 제한된 알고리즘은 리벳 가장자리에서 균열이 전파 될 때의 이미지 변화를 감지하는 구조로 되어있다. 다중 스케일 엣지 검출 기법을 활용하여 작은 스케일에서 작은 결함의 엣지부터 큰 스케일의 큰 결함의 엣지를 분석함으로써 엣지의 전파 깊이를 정의하였다. 신경망 분류기법에 기반한 다른 특징들을 사용하여 균열은 스크래치와 같은 다른 결함들로부터 분류하였다.

Nieniewski[7]은 페라이트에서 균열을 감지 할 수 있는 자동 검사 시스템을 개발했다. 탑햇(top-hat) 변환[8]에 기반한 형태 검출 기법을 활용, 불규칙한 밝기 변화를 감지하여 균열 검출을 유도하였다. 이 연구는 균열 추출에 사용된 다른 엣지 검출 연산자와는 달리 페라이트의 배경 노이즈가 존재함에도 불구하고 이를 극복하여 검출율을 높일 수 있는 방법을 제안하였다. Moselhi[9]는 하수관의 결함을 자동으로 탐지하고 분류하기 위해 이미지 분석 기술과 신경망 분류 기법을 사용하였다.

1.3 연구의 방법 및 범위

점검용으로 드론을 활용하기 위해서는 우선적으로 인력에 의한 매뉴얼 비행이 아닌 자율비행이 가능해야 하며, 기존 드론 비행체와 컨트롤러 간의 송수신 거리 제약, GPS에 의존한 위치의 부정확성, 또한 고화질영상의 전송한계 등의 자율점검 한계를 극복할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 정확하고 안정적인 자율비행 점검을 위하여 드론의 비행 경로를 설정하는 웨이포인트 방식의 비행제어 프로그램을 개발하여 기존 드론 기술의 한계를 극복하고자 하였다. 또한 비행체 자체에 탑재되는 자율비행 컨트롤 보드를 개발하여 비행체와 조종 장치 간 송수신 문제를 해결하고 소형 컴퓨터를 드론 내부에 장착하여 고화질영상 송수신 및 저장 등의 문제를 해결하고자 하였다.

기존 이미지분석을 활용한 점검 기술은 Lee[10]의 연구에서처럼 주로 균열의 존재 유무와 폭을 측정하는 것이었으나, 본 연구에서는 선형 손상인 균열 뿐만 아니라 면적형 손상인 백태 등과 같은 다양한 손상 타입을 딥러닝 기반의 지도학습을 통해 분류할 수 있는 프로그램을 개발하고, 이를 통해 단순한 육안점검이 아닌 손상 종류, 정량적인 손상량을 관리자에게 제공하는 기술을 개발하고자 하였다.

드론 비행 제어의 기준이 되는 GPS는 3개의 인공위성이

보내는 전파를 받아 삼변 측량법으로 지구상 위치를 계산한다. 위성의 위치에 따라 3-10m 정도 오차가 날 수 있고, 이 기준 정보에 따라 비행 제어를 수행해도 기체에 따라 1-4m의 오차가 추가로 발생될 것으로 예상하였다. 따라서 본 연구에서는 드론 운영의 기술 목표에서 리턴투홈(return to home) 오차를 최소 합산 오차인 4m 이내로 설정하였다. 또한 구조물의 이미지 촬영 섹션 크기를 최소 140cm으로 예상하였으며, 부분 이미지 획득시 촬영 지점의 기준이 되는 웨이포인트(way-point) 오차를 중첩 촬영 후 누락 부분이 없도록 그 절반인 70cm 이내로 설정하였다. 이미지 분석 기술에서는 보수 점검의 기준이 되는 균열폭 0.3mm 이상 감지와 이미지 분석 손상 검출율 80% 이상을 목표로 하였다.

2. 외관점검 기술

2.1 산업용 드론 운용 기법

2.1.1 산업용 드론 적합성 검토

무인비행기라고도 불리는 드론은 형태, 크기 등 다양하게 분류되지만, 구조물 점검에서 가장 중요한 요구성능은 비행 안정성이며 이러한 안정성을 위해 중요한 역할을 하는 비행 형태는 고정익과 회전익으로 분류된다. 고정익 형태의 드론은 연료 소모량이 작고 장기체공이 가능하며, 자체 진동이 회전익보다 작아 항공촬영을 대체하기 위한 이미지나 영상 획득 시 유리한 측면이 있는 것으로 나타났다. 회전익 형태의 드론은 자체 진동은 고정익 형태보다 크지만 좁은 공간에서도 수직 이착륙이 가능하고 구조물 계측 시 근접한 거리에서 이미지나 영상을 획득할 수 있어 보다 정확한 이미지획득을 통한 손상을 검출할 수 있다는 큰 이점을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 구조물 계측을 위해서는 짐벌(gimbal)과 영상수집모듈의 장착이 용이한 회전익 형태의 드론을 적용하는 것이 유리할 것으로 판단되었다. 회전익 형태의 드론은 프로펠러의 수에 따라 분류할 수 있는데 프로펠러의 수가 4개인 쿼드콥터(quadcopter), 6개인 헥사콥터(hexacopter), 8개인 옥타콥터(octocopter)에 대한 비행성능을 검토한 결과는 아래 Table 1과 같다.

프로펠러의 수가 동일하더라도 드론의 크기에 따라 유효탑재하중, 비행시간과 풍속저항 성능에 차이가 나타났다. 먼저 풍속 저항의 경우, 쿼드콥터는 2-4.6m/s, 헥사콥터는 4.9-8m/s, 옥타콥터는 6.8-6.9m/s에서 안정성(stability)

Table 1. Performance analysis of various UAV models

Model	Propellers	Payload	Flight time	Wind resistance
[Name]	[No.]	[Kg]	[min]	[m/sec]
D company P model	4	0.27	25	2
I company D model	4	0.425	10-13	2.4
D company I model	4	3.0	15	4.5
D company M model 1	4	3.0	22	4.6
H company A model	6	2.0	25	4.9
P company M1 model	8	10-15	15	6.8
D company S model	8	6-11	15	6.9
D company M2 model	6	6	16	8

및 호버링(hovering) 성능을 발휘하는 것으로 확인되었다. 만일 드론을 활용하여 구조물 외관점검을 활용한다면, 고소 지역 검사와 같이 위치적 제약을 극복하는 것이 가장 주요한 활용 요소로 판단하였으며, 그럴 경우 풍속 저항도가 높은 것을 최우선 성능 항목으로 고려하였다.

비행 시간의 경우, 구조물 외관의 이미지 획득 시 유효 회수를 줄일 수 있도록 가능한 한 비행시간이 긴 것이 유리하다. 드론의 비행 시간은 배터리(battery) 용량에 따라 차이는 있지만 대부분 가벼울수록 비행시간이 긴 것으로 확인되었다. 그러나 기체의 중량이 가벼워 비행시간이 긴 드론은 유효탑재하중(payload)이 작아서 기본 탑재된 카메라 및 센서 외에 추가적인 충돌방지 센서나 영상수집모듈의 장착 후 비행은 불가능한 것으로 확인되었다.

본 연구에서는 풍속 저항도가 높고, 적절한 유효탑재하중을 가지고 비행시간이 긴 드론을 선정하는 것이 필요하였으며, 개발이 완료되었을 때 예상 탑재 하중을 5kg 이상, 비행 시간은 15분 이상으로 설정하여 검토한 결과, 본 연구에서 진행하고자 하는 구조물의 외관조사를 위한 산업용 드론은 D사의 M2모델로 선정하는 것이 가장 적합할 것으로 판단되었다.

2.1.2 자동비행항법을 위한 정밀 위치 추정 기술

기존 드론에 탑재되어 있는 GPS의 성능을 평가한 결과, 대부분 1주파 단일 GPS를 적용하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 구조물의 외관점검을 위한 자동 비행항법에 적용할 경우, 위성신호 수신율이 낮아 충돌 가능성 및 낙하 사고 위험성이 높아져 이에 대한 개선이 필요하였다.

따라서 본 연구에서는 자동비행항법 기술개발을 위해 Figure 1과 같이 비행 기체에 위성 수신율을 향상시킬 수 있는 실시간 이동측위(RTK, real time kinematic)와 이를



Figure 1. Configuration of prototype industrial drone

제어할 수 있는 탑재체를 채용하여 드론의 정밀 위치를 추정할 수 있도록 개선시켰다. 실시간 이동측위는 정밀한 위치정보를 가지고 있는 기준국의 반송파 위상에 대한 보정치를 이용하여 이동국에서 실시간으로 측위결과를 얻는 일련의 측량 과정으로, 드론에 이동국 GPS를 설치하고 지상 기준국의 정보를 전송하여 센티미터 단위의 정확도를 얻을 수 있다. 이 때 보정 방식은 지상에 GPS를 설치하고 이 보정 정보를 이동국으로 전송하는 지상국에 의한 방식을 사용하였으며, 정확도 면에서는 기선거리가 짧은 지상국 방식이 유리한 것으로 판단되어 이 방식을 적용하였다.

2.1.3 자동비행항법을 위한 비행 제어 기술

비행 컨트롤러(flight controller)는 드론을 공중에서 안정적으로 비행할 수 있게 해주는 제어장치로, 자이로, 가속도계, GPS 등 센서 정보를 결합하여 속도 제어부에 신호를 주어 드론을 제어한다. 여기에 사용자가 미션을 올려 수동 조작 없이 원하는 임무를 수행할 수 있게 하는 기술을 자동비행항법 기술이라 하며, 내비게이션 유도 제어 분야가 접합된 기술이다. 드론의 자동비행항법(automatic flight navigation)은 대부분 경로지점설정 방법을 적용하고 있으며, 이는 원격 제어(remote control)로 연결된 영상패드(imaging display)에서 드론이 비행하고자 하는 경로를 지도상에 기록(recording)한 후 자동비행하는 방법이다. 일반적인 경로지점설정 방법은 주로 인력으로 접근이 힘든 광범위한 곳이나 3차원 지형정보 측량 등에 적용하기 위한 비행에는 적합하지만, 구조물 계측에서는 비행경로에 대한 비행안정성 및 정확도가 낮아 직접 적용이



Figure 2. Configuration of onboard devices

불가능할 것으로 판단되었다. 따라서 절대적 위치를 표시하는 경위도 좌표계를 활용한 경로지점설정 방법을 적용하여 드론의 자동비행항법 기술의 적용성을 검토하였다.

시중에 비행 컨트롤러 명칭으로 나와 있는 보드 및 모듈들은 대부분 자동비행항법 기술을 지원하고 있으나 본 연구에서의 목적과 사용성에 적합한 보드의 안정성, 지원하는 기체의 범위, 사용할 수 있는 센서의 종류, 커스터마이징(customizing) 가능성 등을 고려하여 비행 컨트롤러를 선정해야 한다. 따라서 본 연구에서는 arducopter.org 에서 관리하는 APM 비행 컨트롤러 소프트웨어를 사용하였으며, 하드웨어 보드는 픽사 보드를 적용하였다.

2.1.4 자동 촬영 및 이미지 수집 기술

탑재체는 목표 달성을 위하여 별도로 제작된 시제품 타입으로 자동비행항법 미션 수행을 위하여 드론 기체의 비행 제어와 고해상도 카메라의 초점 및 촬영 제어를 동기화하여 수행하는 역할을 하도록 개발하였다. 본 탑재체는 Figure 2 및 Table 2와 같이 고해상도 영상 획득을 위하여 산업용 카메라와 초점 제어를 위한 라이더 센서, 필요시 주요 손상 모니터링 부위에 대한 정밀 진단이 가능하도록 열화상 카메라를 장착하였으며, 자동비행항법 미션 수행과 이미지 획득 제어를 수행할 수 있는 이미지 프로세서를 탑재하였다.

Table 2. Specifications of onboard devices

No.	Description
(a) Industrial High Resolution Camera	- 29MP, 5.5 μ m pixel pitch - Automatic Focus Control via LiDAR Detection
(b) LiDAR sensor	- 85m Range, 48deg FOV
(c) Image Processor Module Embedded Platform	- GPU 1TPlops - CPU 64bit ARM A57 - Memory 4GB LPDDR4, 25.6Gb/s - 250GB SSD Storage - Wireless Live Video Transmission
(d) Industrial thermal infrared cameras	- 640 x 512 Sensitive Thermal Imaging

본 연구에서는 탑재체에 고해상도 산업용 카메라를 탑재하였으며, 약 29MP의 6,600×4,400의 고해상도로 5.5 μ m 픽셀 피치를 지니고 있다. 이것이 EF 50mm 렌즈와 조합되면 약 4m의 이격거리에서 촬영 시 이상적인 유효 가로 시야각은 약 52deg으로 계산되었다. 여기에 렌즈 왜곡과 사진 오버랩 등을 고려한다면 유효 시야각은 약 26deg로 줄어들어, 실제 유효 촬영 면적은 약 1,800mm×1,200mm로 예상하였다. 따라서 이 경우, 유효 픽셀 당 0.07mm의 균열까지 식별이 가능하므로 연구에서 목표로 하고 있는 균열 감지성능인 0.3mm를 만족할 수 있는 것으로 평가되었다.

또한 촬영 트리거를 물리식 버튼이 아닌 전자식 트리거 방식을 적용함으로써 정확한 초점의 안정적인 피사체 형상을 얻을 수 있으며, 85m 라이다(lidar) 센서를 장착하여 피사체와의 거리를 측정하여 데이터베이스 구축이 가능하도록 하였다. 측정된 거리 정보는 실시간으로 산업용 카메라의 초점 제어에 활용하였다. 이미지 프로세서로는 N사의 J모형을 사용하여 이미지와 비행 데이터를 실시간 동기화하여 제어가 가능하도록 하였으며, 획득 이미지 저장 용량을 고려하여 250GB의 SSD 디스크를 장착하였다. 무선 라이브 영상 전송이 가능한 무제한 회전 3축 짐벌을 활용하여 원격지에서 실시간 비행 영상 및 촬영면에 대한 확인 가능하며, 촬영 후 획득 대용량 이미지 전송은 이더넷으로 빠른 송신을 할 수 있다.



Figure 3. Image analysis procedure

2.2 이미지 분석 기법

기존 룰 기반의 이미지 분석 기법의 경우, 콘크리트 구조물 외관 손상에서 균열, 백태, 박리박락 등의 손상을 검출해 내기 위해서는 손상의 유형에 따라 각각 다른 파라미터로 다른 절차의 프로세싱을 수행해야 하는 단점이 있다. 또한 같은 유형의 손상이라 하더라도 조도, 초점 거리 등의 주변 촬영 환경의 영향이나 촬영 품질에 따라서 검출 결과가 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자 구조물의 손상 검출을 위한 모폴로지 기법을 개선하고, 딥러닝 기반의 플랫폼을 적용하여 손상 유형에 따른 지도 학습을 수행함으로써 손상 검출 결과를 효과적으로 개선하고자 하였다.

이미지 분석기법은 손상 검출 기법과 검출을 위한 특징점을 학습하는 기법으로 구분할 수 있다. 먼저 구조물 외관 손상을 검출하기 위하여 필터링을 통한 사전처리, 패턴인식, 이미지 중첩 인식 및 형상검지, 조합 등과 같은 다수의 효과적인 이미지 프로세싱 기술 및 패턴인식 기법들이 고려되었다. 이러한 기법들은 촬영된 이미지의 품질이 떨어지거나 특정 요소를 추출하기 위한 이미지 보정이 필요한 경우에 효과적으로 적용이 가능하다. 본 연구에서 손상 자동 검출을 위하여 수행된 이미지 분석기법의 절차는 Figure 3과 같다.

2.2.1 사전처리작업(pre-processing)

손상검출을 위한 이미지 분석에 앞서 취득된 영상을 연산하기 원활한 형태로 처리하기 위해 이미지의 사전 처리 작업을 실시하였다. 사전처리작업에는 인접영역과의 픽셀 명도를 평균처리하는 평균필터(mean filter)[11]와 평균필터로 인해 저하된 이미지의 선명도를 보상[12]하고 이미지의 노이즈를 감소시킬 목적으로 미디언필터(median filter)[13]를 적용하였다.

사전처리작업이 완료된 이미지에 대해서는 손상과 유사한 형상 패턴을 이미지에서 추출하기 위한 패턴인식(pattern recognition) 작업이 수행된다. 패턴인식작업에는 손상검출을 위해 손상유사형상을 1차적으로 원본에서 분할하는 분리(segmentation)기법, 분리된 형상 중 손상으로 인식될 수 있는 중요 특징들을 추출하는 특징점 추출(feature

extraction)기법, 그리고 추출된 특징점들을 상호비교 및 구분하는 손상 판정(decision making)기법을 적용하였다 [14].

2.2.2 분리작업(segmentation)

분리 작업은 이미지 내에서 손상으로 인식될 수 있는 임의의 패턴을 분리하는 일련의 작업으로 손상 외의 불필요한 데이터들을 구분함으로써 분석 효율을 증가시키는 것을 목적으로 수행된다. 본 연구에서는 기존 연구를 바탕으로 구조물의 비선형적인 손상을 검지하는데 효과적으로 적용할 수 있는 모폴로지 기법을 적용하였다.

본 연구에서는 콘크리트 내에서 다양한 방향성을 갖는 손상의 검출성능을 향상시키기 위하여 방향성이 고려하였으며, Salembier[15]이 제안한 형태학적 연산기법의 기존 식을 식(1)과 같이 수정하여 적용 하였다.

$$T = \max[(I \circ S_{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ}) \cdot S_{0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ}, I] - I \quad (1)$$

여기서, I 는 흑백이미지, S 는 연산에 포함된 주위화소에 대한 구성요소(structuring element), \circ 는 형태학적 열기(opening), \cdot 는 형태학적 닫기(closing) 연산자이며, 이진화된 출력이미지인 T 에는 손상부로 검지된 영역을 분리하여 흑색으로 표출하기 위해 Otsu[16]의 임계값 설정기법을 적용하였다. 이러한 비선형 필터를 이용하여 손상을 윤곽선으로 인식하여 처리하는 제한적인 윤곽검지기법과는 달리 콘크리트 내 손상 전체를 직접적으로 추출할 수 있다 [17,18]. 균열과 같은 특정 형태를 추출하기 위한 필터 설계를 위해서는 목적에 부합되는 구성요소의 크기와 형태가 적절히 선정되어야 한다. 본 연구에서는 선형식의 1차원 구성요소를 사용하여 수직방향 손상을 분리하고 픽셀 내에서 구성요소의 길이가 이미지 내에서 검은색으로 표출되는 분리 영역의 두께를 초과하는 경우 이를 전술한 식(1)에 의해 손상으로 분리하는 연산을 적용하였다. 적용된 선형 구조요소는 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 의 방향에 대해 정의되었으며, 손상 추출을 위한 적절한 구조요소의 크기는 다음 식 (2)을 이용하여 결정하였다.

$$S = \left[\frac{FL}{WD} \times \frac{SR}{SS} \times CS \right] \quad (2)$$

여기서, S 는 구성요소의 크기(pixel), WD 는 카메라와 대상과의 거리(mm), FL 은 카메라의 초점거리(mm), SS 는 카메라 센서사이즈(mm), SR 은 카메라 센서 해상도(pixel)이고, CS 는 손상의 크기(mm)이다. 카메라 센서 사이즈는 촬영에 사용된 카메라 정보를 통해 획득할 수 있으며, 카메라 센서 해상도는 이미지 크기를 통하여 산정할 수 있다. 또한 초점거리는 교환이미지 파일형식(exif)의 이미지를 통해 산정한다.

2.2.3 특징점 추출작업(feature extraction)

손상 패턴을 분리한 후, 분리된 패턴을 임의의 특성과 값으로 정의된 특징(feature)에 배열하며, 여기서의 특징은 특정 패턴을 인식할 수 있는 패턴별 중요 특성들이 포함되어 있어야 한다. 본 연구에서는 손상을 검출하는 목적에 부합하는 손상 형상 패턴의 차별적인 특징들을 도출하기 위해서 29개의 특징에 대한 분석을 진행하였다. 손상 분석에 적합한 11개의 특징을 선택한 후, 최종적으로 95%의 유의수준으로 Fisher의 선형 판별식[19]을 적용하여 손상을 추출하기 위한 다음 5개 특징값 추출방법을 적용하였다.

- ① 이심률(eccentricity): 분리된 영역과 동일한 2차모멘트를 갖는 타원의 이심률
- ② ①의 타원 면적으로 나눈 분리된 영역의 면적
- ③ 고형성(solidity): 컨벡스 헐(convex hull)에 대한 분리 영역 비율
- ④ 수직-수평 픽셀 좌표간 상관계수의 절대값
- ⑤ 조밀도 : 분리된 영역의 구형도로 분리된 면적과 둘레간의 제곱근 비율)

2.2.4 분류 작업(Classification)

본 연구에서는 분리된 특징에서 손상을 분류하기 위한 분류기(classifier)의 학습 및 평가를 위해 1,910개의 비손상에 대한 특징 벡터와 3,961개의 손상에 대한 특징 벡터로 구성된 특징 집합을 구성하였다. 구성된 특징 집합에서 약 60%의 특징 집합은 분류기의 학습에 사용되었고, 나머지 특징 벡터들은 손상 분류 성능 평가 실험에 사용되었다. 이러한 실험은 손상 형상, 길이, 폭 등과 같은 콘크리트에서의 다양한 손상 특성이 반영된 막대한 손상 관련 데이터베이스가 존재할 경우 효과적인 학습 및 평가가 가능하다. 그러나, 학습 및 평가를 위한 데이터베이스가 불충분한 관계로 확보

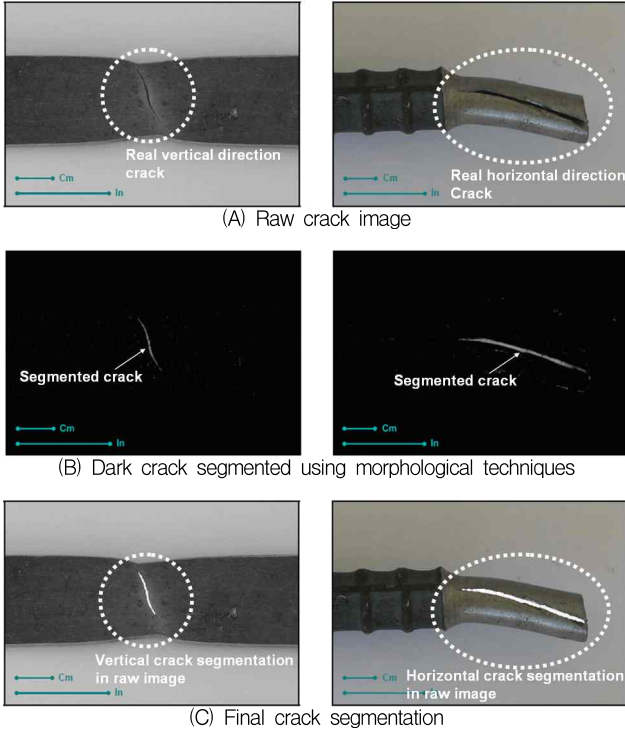


Figure 4. Crack segmentation using morphological techniques

되어 있는 실제 손상을 수동으로 분리하고 이를 이용하여 임의로 다시 손상을 생성시켜 이를 학습시키는 알고리즘을 개발하여 적용하였다.

이 과정에서 비손상 특징 벡터는 실제 확보된 이미지 내에서 분리되었으며, 본 연구의 손상 분류 알고리즘에는 3차 다항식 커널(kernel)을 사용한 서포트 벡터 머신(support vector machine)과 은닉계층에서의 10개의 뉴런(neuron)과 2개의 출력 뉴런을 갖는 3층 피드포워드(feed forward), 즉 3계층 앞먹임 최근접 이웃 분류기(nearest neighbor)를 사용하였다. 이상의 모폴로지 기법을 통해 수직 및 수평 손상을 분리하는 과정을 도시하면 Figure 4와 같다. Figure 4(A)는 원본 손상 이미지이며, 이를 식(2)를 포함한 모폴로지 기법을 통해 검은색 손상을 이미지 상에서 분리한 결과는 Figure 4(B)와 같고, 후처리작업을 거쳐 최종적으로 손상을 분리한 이미지는 Figure 4(C)와 같다. 여기서 수평 및 수평방향손상의 분리를 위해 1×5 와 5×1 구조요소가 각각 사용되었다.

2.2.5 지도학습작업(supervised learning)

지도학습을 위하여 손상이 검출된 샘플 이미지의 손상 부위의 특징점 크기를 조절하여 마킹하고 이로부터 패턴별 추

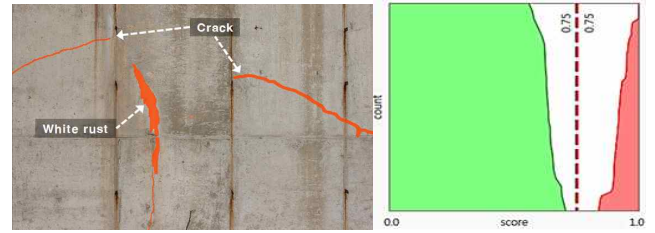


Figure 5. Mark damaged area for supervised learning

Figure 6. learning parameter extraction

출된 특징을 플랫폼에 학습시킨다. 이때 손상 타입, 이미지의 품질과 촬영 환경 등으로부터 추출된 특징값은 크게 영향을 받아 같은 손상 타입이라고 해도 카메라의 성능과 주변 환경에 따라 전혀 다른 물리적 경계값을 지닐 수 있다[20]. 따라서 기존 물기반의 이미지 분석이 아닌 딥러닝 기반의 플랫폼을 이용하여 여러 타입의 손상이 검출된 다수의 샘플 이미지를 Figure 5와 같이 각각 손상 부위에 대한 지도학습을 수행시켰다. 그리하여 찾고자 하는 손상에 대한 특징값이 임의의 손상을 검출해 낼 수 있는 충분한 데이터로 활용할 수 있도록 하였다. 이를 토대로 아래와 같이 5개의 지도 학습을 위한 주요 파라미터를 추출하였으며, 손상 이미지 판단 경계값 파라미터의 추출 그래프 예시는 아래 Figure 6과 같다.

- ① 특징점 크기(feature size/color): 손상 검출을 수행할 최소의 이미지 크기와 이진화할 색상 타입.
- ② 학습횟수(count epochs): 지도학습을 수행하여 훈련하는 횟수.
- ③ 명도와 대비(luminance/contrast): 분석을 수행할 각각의 이미지들에 대하여 명도와 대비 변화값.
- ④ 조밀도(sampling density): 분리된 영역의 구형도로 분리된 면적과 둘레간의 제곱근 비율.
- ⑤ 경계값(threshold): 손상이 없는 양품 이미지와 손상이 존재하는 불량 이미지를 구분하기 위한 경계값으로 1에 가까울수록 불량 확률이 높은 것으로 판단[21].

전술한 손상 검출 과정을 거쳐 최종적으로 이미지 상 손상을 생성하기 위하여 상이한 스케일의 구조요소를 사용한 손상 검출 분석 과정이 반복된다. 이러한 과정을 통하여 생성된 손상도는 선형 손상인 균열이나 면적형 손상인 백태 등의 특징에 따라 상이한 여러 스케일의 구조요소를 사용하

게 되며, 이는 검출된 손상들을 조합한 하나의 결과이다. 본 연구에서 적용한 손상도 생성방법은 다음과 같은 식(3)으로 표현가능하다.

$$J^m(u,v) = \begin{cases} 1 & \exists k \in [S_{\min}, m]; C^k(u,v) = 1 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

J^m 은 스케일 m 의 구성요소에 대한 손상도, S_{\min} 은 구성요소의 최소 크기, C^k 는 k 를 구성요소로 사용하여 생성된 이진법 손상이미지이다. 또한 u 와 v 는 손상도 이미지의 픽셀좌표이다. 본 연구에서는 $\lceil n_{\min} \rceil + 2$ 로부터 $\lceil n_{\max} \rceil + 10$ 까지의 구성요소들이 손상도를 생성하기 위해 사용하였으며, 여기서 $\lceil \cdot \rceil$ 는 올림함수(ceiling function)이고 n_{\min} 과 n_{\max} 는 각각 관심영역의 최대, 최소 손상 크기에 대응하는 구성요소이다. 이러한 손상도는 손상 폭의 정량화 뿐 아니라 위치 파악에도 사용되며, 이상의 기법을 통해 손상이 발생한 콘크리트 실험체에 대하여 손상도를 생성한 예는 Figure 7과 같다.

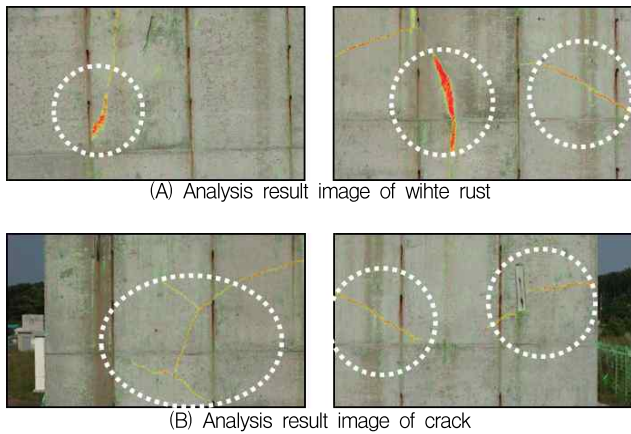


Figure 7. Example result of damage image applying the technique

3. 현장 시험

3.1 시험 방법

드론의 자동비행항법과 이미지 분석 소프트웨어의 성능 확인을 위하여 2017년 05월 30일 한국건설생활환경시험연구원 옥외실증시험센터에 있는 콘크리트 시편을 대상으로 현장 시험을 수행하였다. 시험 시 한국건설생활환경시험연구원 생활제품사업본부 레저스포츠팀의 입회 하에 공인 성

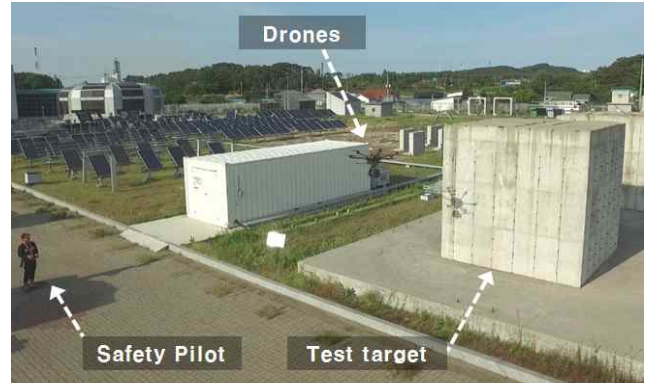


Figure 8. Field test photo

적서 발급을 위한 성능 평가로 진행되었으며, 현장 시험 전경은 Figure 8과 같다.

3.1.1 시험 절차

촬영 시편의 크기와 탑재체가 4m의 이격거리에서 촬영 시 유효 면적을 고려하여 섹션별 촬영 시나리오를 만들고, 시편으로부터 4m 이격된 지점의 GPS 좌표값을 드론 내 실시간이동 측위로 수신하여 자동비행항법 시 촬영 지점을 드론 탑재체에 시나리오별 미션을 업로드하였다. 시험 시 사전 입력된 미션에 따라 자동비행항법으로 대상 시편을 촬영하도록 설정하였고, 미션이 완료된 후 다시 이륙 지점으로 회귀할 수 있도록 하였다. 안전 파일럿(safety pilot)은 위급 시에만 수동 비행을 하는 파일럿으로, 드론 파손 등의 사태에 대비하여 시험 수행을 보조 하였다.

3.1.2 촬영 시나리오

촬영 대상 콘크리트 시편의 촬영 접근이 용이하고 주변 구조물과 충돌 위험이 가장 적은 B-E면에 대하여 시험 촬영이 진행되었다. 시편은 한 면이 W4,000×D4,000mm의 크기의 정육면체로, 한 면을 4행 3열의 크기로 나누어 총 12개의 섹션(W1,333×D1,000mm)으로 구분하였다. 촬영 시에는 이미지 사이 사이를 중첩시켜서 한 면에 총 20개의 촬영 이미지(W1,800×D1,200mm) 획득을 목표로 하였으며, 이를 도식화하면 Figure 9 및 10과 같다.

각 섹션은 Figure 11과 같이 시편 종류, 촬영 면, 행과 열에 따라 섹션을 라벨화하였다. 드론에서 촬영된 이미지와 육안조사망도 또한 부여된 섹션 라벨에 따라 구분하여 작성하였고, 시편의 촬영 이미지를 구분하기 위하여 촬영 중심점에 소형 접착 테이프를 붙여 마킹하였다.

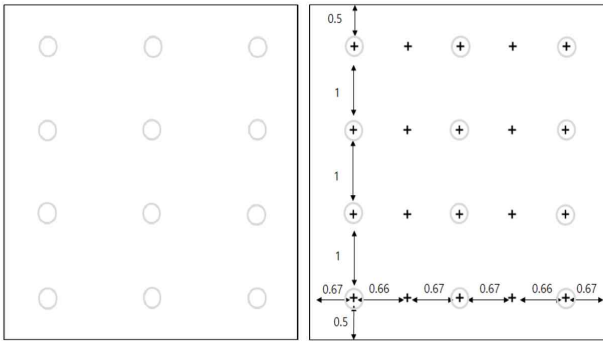


Figure 9. Marking of the center of the photo shoot

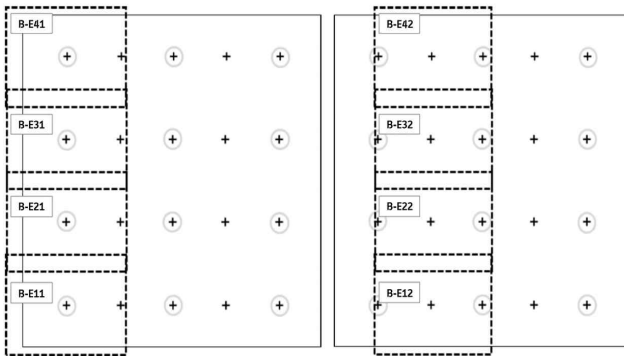


Figure 10. Section label of photo shoot

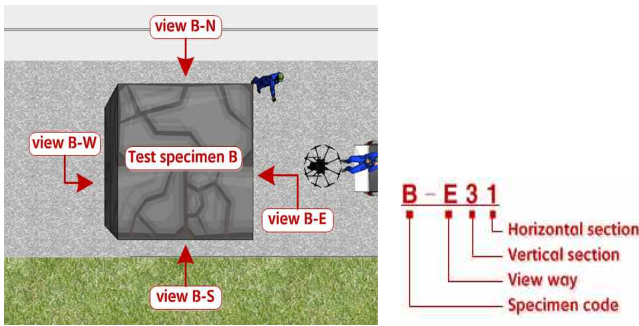


Figure 11. Section labeling of test specimen

시편 B-E면의 손상을 정량적으로 표기하기 위하여 기존 점검 방식과 동일한 육안조사를 수행하였다. 먼저 촬영 대상 시편에 대하여 손상의 폭과 길이를 균열경을 이용하여 육안으로 측정하고 이를 토대로 Figure 12와 같이 손상 육안조사망도를 작성하였다. 육안조사망도에서는 작성된 색션별 손상 포인트를 영문 A-Z로 표시하였으며, 각 손상 지점의 종류와 유형을 정리하면 아래 Table 3과 같다. 이를 이미지 분석 소프트웨어의 지도학습과 손상 검출율에 대한 기준값으로 사용하였다.

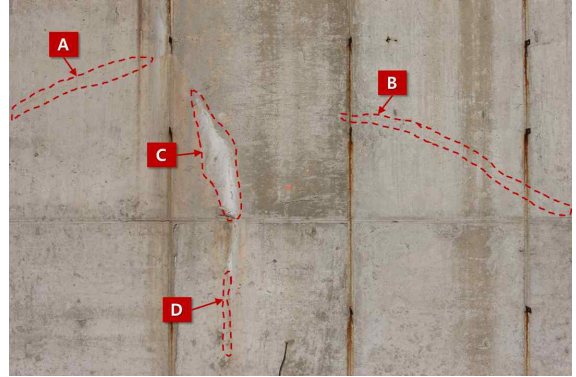


Figure 12. Damage points of visual inspection drawing (section B-E32)

Table 3. Visual inspection results

Section [code]	Point [A-Z]	Type [note]	Width [mm]	length [mm]
B-E12	A	Crack	0.2	530
B-E12	B	Crack	0.2	530
B-E12	C	Crack	0.2	245
B-E22	A	Crack	0.3	360
B-E22	B	White rust	-	-
B-E31	A	Crack	1.2	970
B-E31	B	Crack	0.5	880
B-E31	C	Crack	0.3	500
B-E32	A	Crack	0.3	190
B-E32	B	Crack	0.5	500
B-E32	C	White rust	-	-
B-E32	D	Crack	0.3	100
B-E33	A	Crack	0.5	1000
B-E33	B	Crack	0.4	460
B-E33	C	Crack	0.1	190
B-E41	A	Crack	1.2	800
B-E41	B	Crack	0.5	880
B-E41	C	White rust	-	-
B-E42	A	Crack	1.0	800
B-E42	B	White rust	-	-
B-E42	C	Crack	0.3	190

3.1.3 평가 방법

현장 시험은 리턴투홈 오차 평가 → 웨이포인트 오차 평가 → 균열폭 검출 여부 → 이미지 분석 손상 검출율 평가 순으로 진행되었다. 드론 운용 성능 평가 항목의 경우, 시험 현장에서 실제 운용을 통해 확인하였으며, 균열폭 검출 여부와 이미지 분석 손상 검출율에 대하여는 향후 실내에 구비된 이미지 분석 서버에서 소프트웨어를 구동시켜 이미지 분석 성능 평가 항목을 확인하였다. 각 성과 항목에 대한 평가 방법은 아래와 같다.

- ① 리턴투홈 오차: 이륙 위치 표시, 드론의 신호 송수신 거리 한계 밖으로 강제 이탈 후 제자리 복귀 위치 측정, 이륙 위치와의 거리를 현장에서 측정
- ② 웨이포인트 오차: 촬영 이미지 확인을 통하여 이륙 중심점과의 거리를 현장에서 측정
- ③ 이미지 분석 손상 검출율: 개발된 영상 분석 프로그램 기반의 손상탐지기법과 육안관측에 의해 관측된 손상 계측데이터의 개수를 이용하여 검출율 비교

$$D = \frac{C_i}{C_v} \times 100 \text{ ----- (4)}$$

여기서, D 은 손상 검출율, C_i 는 이미지 분석 결과 검출된 손상 개수, C_v 는 육안조사망도에 기록된 손상 개수이다. 사전 조사된 육안조사망도의 결과를 토대로 이미지 분석 소프트웨어의 지도학습을 수행하고, 학습을 수행하지 않은 임의의 이미지를 대상으로 분석을 수행하였을 때 검출된 손상 개수와 비교하고자 하였다.

3.2 드론 운용 결과

현장 공인 성능 평가는 현장 운영 중인 풍속계로 측정된 풍속은 최소 1.6m/s에서 최대 5.7m/s로 다소 강한 바닷바람이 불고, 기상청에서 관측된 서산 지역 일사량은 1.36MJ/m²에서 2.08MJ/m²인 맑은 날에 진행하였다. 예비 시험 1차와 본 시험 1차에 걸쳐 진행되었다.

3.2.1 리턴투홈 오차

드론의 이륙 전 위치를 붉은색으로, 다시 제자리 복귀하여 착륙한 지점을 파란색으로 표기하였다. 두 지점 중심 사이 거리를 줄자로 측정한 결과, Figure 13과 같이 리턴투홈 오차는 약 60cm으로 목표치인 4m에 비해 양호한 결과를 나타내었다.

3.2.2 웨이포인트 오차

바닥면에 촬영 지점을 붉은색으로 표기한 뒤, 자율 비행미션을 수행하여 이미지를 획득하였다. 현장 성능 평가 시 획득한 이미지의 중심과 촬영 지점 표기 중심의 거리를 측정한 결과, Figure 14와 같이 웨이포인트 오차는 약 10.5cm로 목표치인 70cm에 비해 양호한 결과를 나타내었다.

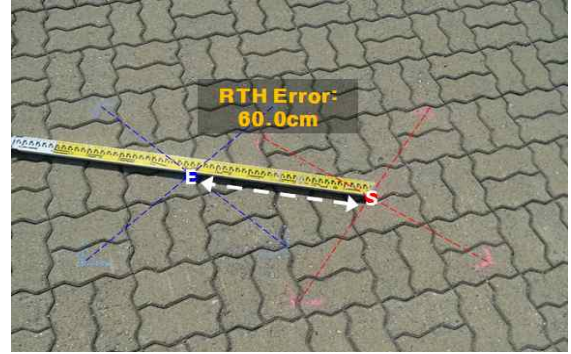


Figure 13. RTH Error result

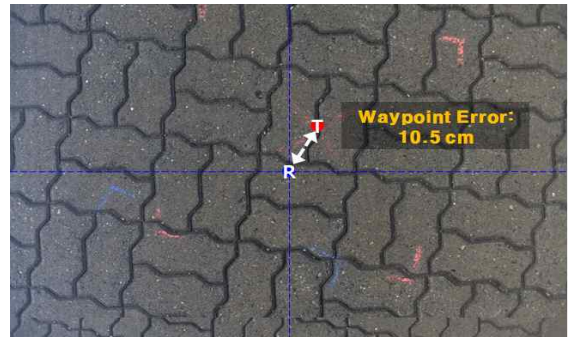


Figure 14. Waypoint Error result

3.3 이미지 분석 결과

분할된 색션 라벨을 이용하여 촬영된 이미지 샘플의 손상 부위를 육안외관조사망도에서 조사된 손상과 매칭시키고, 54장의 손상 이미지를 이미지 분석 소프트웨어에 지도학습 수행하였다. 또한 검출 오류를 낮추기 위하여 손상이 없는 샘플 이미지 26장을 건전한 표면의 이미지를 추가하여 총 80장의 이미지를 지도 학습에 활용하였다. 이를 기준 값으로 추출된 이미지 분석 소프트웨어 파라미터는 아래 Table 4와 같다.

Table 4. Image analysis software parameter input value

Feature size/color	Count Epochs	Luminance/Contrast	Sampling Density	Threshold
40 / 1	120	10% / 0%	3	[0.748, 0.752]

이미지 분석 소프트웨어에서 지도학습을 수행하지 않은 임의의 이미지 샘플 60장을 신규로 추가하여 프로세싱을 수행하였으며, 이를 토대로 이미지 분석 결과의 균열폭 감지 여부와 손상 검출율을 비교하였다. 이미지 분석 소프트웨어에서 지도학습을 수행하거나 비지도학습 후 프로세싱된 이미지 수량은 Table 5와 같다.

Table 5. Image No. categorized according to learning

Classification		Sample No.	Ratio
Total		140	100.0%
Total		80	57.1%
Supervised learning	No damage	26	18.6%
	Damaged	54	38.6%
Total		60	42.9%
Non-supervised learning	No damage	25	17.9%
	Damaged	35	25.0%

프로세싱 결과를 확인하기 위하여 원본 이미지와 스펙트럼 결과 이미지, 그리고 이 두 이미지를 오버랩한 이미지를 확인 할 수 있도록 리포트를 작성하였으며, 대표적인 이미지로 섹션 라벨 'B-E31'의 원본 이미지는 Figure 15와, 육안 조사 망도 이미지는 Figure 16과 같다. 이미지 분석 결과, 검사 스펙트럼 결과는 Figure 17과 이를 오버랩하여 손상 부위를 표시하면 Figure 18과 같다. 검출된 손상도가 높을수록 붉은색으로, 손상도가 낮을수록 연두색으로 표시되게 하여 향후 손상 갯수를 카운팅하기 쉽도록 하였다. 프로세싱 후 오버랩 이미지를 토대로 지도학습을 수행하지 않은 이미지 샘플 60장에 대하여 손상이 검출되지 않은 이미지는 25장, 손상이 검출된 이미지는 총 35장이었으며, 이 중 손상의 유형에 따라 검출 갯수를 카운팅하였다.



Figure 15. Original image

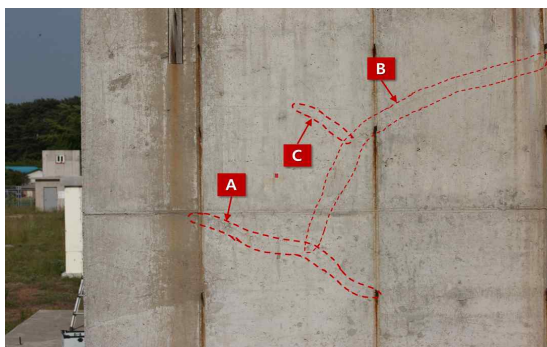


Figure 16. Visual inspection drawing

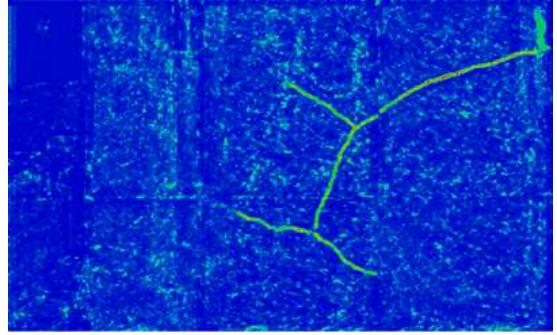


Figure 17. Inspection spectrum



Figure 18. Overlap result

지도학습을 수행하지 않은 임의의 이미지 60장에 대하여 육안조사망도에서 표시된 균열과 백태 등의 손상은 총 105개로 나타났다. 검출된 손상의 갯수를 육안외관조사망도에서 표시한 손상 개수와 비교하여 검출율을 계산하였으며, 그 결과는 Table 6과 같다. 백태와 균열을 모두 포함한 전체 손상 검출율은 90.5%로 나타났다. 이를 손상 종류에 따라 분류해보면 아래의 Table 7과 같다. 0.3mm 이상 균열의 경우 손상 검출율은 100%로 높게 나타났지만, 0.3mm 이하 균열의 손상 검출율과 백태의 손상 검출율은 각각 75.0%로 다소 낮게 나타났다.

Table 6. Image analysis software detection results

Type		Damage	Detection
All	Total	105	95
White rust	Total	20	15
	Total	85	80
Crack	width < 0.2mm	20	15
	0.2 ≤ width < 0.3mm	25	25
	0.3 ≤ width < 0.4mm	5	5
	0.4 ≤ width < 0.5mm	20	20
	0.5 ≤ width	15	15

Table 7. Image analysis software detection results summary

	Damage No.	Detection	Detection ratio
Total	105	95	90.5%
width < 0.3mm	45	40	75.0%
0.3mm ≤ width	40	40	100.0%
White rust	20	15	75.0%

4. 결 론

본 연구의 결론을 요약하여 정리하면 다음과 같다.

구조물의 외관 손상을 자동으로 검지하기 위하여 산업용 드론과 이미지 분석 기법을 적용하여 구조물 외관 손상 자동 검출 시스템을 구축하였으며, 본 연구에서 구축한 시스템에서는 드론의 비행 제어 기술과 실시간이동측위를 활용한 정밀 위치 추정 기술, 카메라 자동 촬영 및 이미지 수집 기술을 도입하여 외관 검사용 자동 비행 방법의 완성도를 높이고, 모폴로지 기반의 손상 검출 이미지 분석 기술을 딥 러닝 플랫폼의 지도학습을 활용하여 손상 검출율을 높이고자 하였다.

구조물 외관 손상 자동 검출 시스템의 현장 적용성 및 성능 평가를 위하여 콘크리트 시편의 현장 시험 촬영 및 획득 이미지를 활용한 성능 시험을 수행하였으며, 드론의 운용 성능은 리턴투홈 오차는 60.0cm, 웨이포인트 오차는 10.5cm로 양호한 성능을 확인하였고, 지도학습을 수행하지 않은 60장의 이미지 분석 결과 손상 검출율 90.5%라는 우수한 결과를 확인하였다.

그러나 본 연구에서는 박리박락이나 누수, 부식 유형 등의 손상 샘플 이미지 획득에 실패하여 수행 결과가 모든 유형의 손상 검출을 대표하기에는 한계점이 존재한다. 향후 다양한 유형의 손상 이미지 샘플을 획득하여 분석을 수행할 필요가 있으며, 정확하고 정량적인 균열폭 및 백태, 박리박락 등의 다양한 형태의 면적형 손상을 이미지 분석 기법으로 검출하기 위해서는 보다 많은 실험적, 이론적 연구가 필요하다. 촬영 구조물의 주요 손상 형태와 배경 조건에 따라 카테고리별 지도학습 라이브러리가 많이 쌓인다면 별도의 지도학습 없이도 손상 검출율을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 균열 손상의 경우, 만일 0.3mm 이내의 균열폭 검출이 필요하다면, 검출 목표 균열폭에 따라 줌렌즈와 해상도 더 높은 카메라 사용 등 이미지 촬영 장비의 성능을 보다 향상시키는 방안을 고려할 수 있다. 그러나 이는 드론의 유효 탑재 하중과 비행 시간에 영향을 줄 수 있으며, 따라서 촬영 횟수와 섹션

분할 사이즈와 연관이 있으므로 보다 신중한 접근이 필요할 것으로 판단된다.

요 약

이 연구는 사회 기반 구조물의 노후화에 대한 안전점검 기술 분야에서 구조물 외관점검 기술의 효율적 대안에 관한 연구이다. 기존 육안점검 및 조사를 대신하여 산업용 드론과 딥 러닝 기반의 이미지 분석 기법을 접목함으로써 막대한 인력과 시간 소요 및 비용을 절감하고 높은 구역 및 돔 구조물의 접근 한계를 극복하고자 하였다. 구조물의 0.3mm 이상의 균열 손상을 검지할 수 있는 고 해상도 카메라와 라이다 센서, 임베디드 이미지 프로세서 모듈로 구성된 탑재체를 제작하여 산업용 드론에 탑재하였다. 이를 현장 시험에 적용하여 자동비행방법을 통해 시편의 손상 이미지를 촬영하였다. 또한 균열경을 이용하여 기존 육안 점검 방법으로 백태, 박리박락과 같은 면적형 손상과 선형 손상인 균열의 폭과 길이를 측정하여 최종 이미지 분석 검출 결과와 비교하고자 하였다. 촬영된 이미지 중 80장의 샘플을 골라 이미지 분석 기법을 적용하여 사전처리작업(pre-processing)-분리작업(segmentation)-특징점 추출작업(feature extraction)-분류 작업(Classification)-지도 학습작업(supervised learning) 등의 과정을 거쳐 손상을 분리하고, 이를 딥러닝 기반 플랫폼으로 지도학습하여 분석 파라미터를 추출하였다. 지도학습을 수행하지 않은 임의의 이미지 샘플 60장을 신규로 추가하여 추출된 파라미터를 기반으로 이미지 분석을 수행한 결과, 손상 검출율의 90.5%로 나타났다.

키워드 : 구조물 외관 검사, 드론, 자동비행방법, 딥러닝 이미지 분석, 모폴로지 기법

Acknowledgement

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20151520101090).

References

1. Jung HJ, Current status and global forecast of commercial

-
- drones market, Korea aerospace research institute, Daejeon (Korea): Future strategy head office of KARI, 2016 Jul 5–10 p. Report No.: Aviation Issue No.7.
2. Lee GJ, Epartment of mechanical and aerospace engineering, Seoul national university aerospace vehicle design laboratory, Seoul(Korea): gongsang; 2017, 52 p. Korean,
 3. Lovelace B, Unmanned aerial vehicle bridge inspection demonstrati on project, Minnesota(USA): Minnesota department of transportation(USA); 2015 Jul, 214 p. Report No.: 2015–40,
 4. Chan B, Towards UAV–based bridge inspection systems: a review and an application perspective, *Structural monitoring and maintenance*, 2015 Feb 3;2(3): 283–300.
 5. Lu M, Research on auto–tracking algorithm for power line inspection based on unmanned aerial vehicle, *Power and energy engineering conference(APPEEC)*; 2012 Mar 27–29; Shanghai, China, Shanghai(China): Power and energy engineering IEEE org; 2012 p. 1–2.
 6. Siegel M, Remote enhanced visual inspection of aircraft by a mobile robot, 1998 IEEE workshop on emerging technologies; 1998 May 15–16; Minnesota, USA, Minnesota (USA): The robotics institute school of computer science carnegie mellon university; 1998, p. 10–1.
 7. Nieniewski M, Morphological detection and feature–based classification of cracked regions in ferrites, *Machine graphics & vision*, 1999 Jan;8(4):699–712.
 8. Salembier P, Comparison of some morphological segmentation algorithms based on contrast enhancement, – application to automatic defect detection, In: *European signal processing conference*; 1990 Sep 18–21; Barcelona, Spain, Barcelona (Spain): Elsevier; 1990, p. 833–6.
 9. Moselhi O, Shehab E, Prediction of sewer pipe main condition using the linear regression approach, *Journal of geoscience and environment protection*, 2016 May 19;4(5):97–104.
 10. Lee HB, Development of automatic crack detection system for concrete structure using image processing method, *Journal of the korea institute for structural maintenance inspection*, 2012 Jan;16(1):64–77.
 11. Gonzalez RC, Wintz P, *Digital image processing*, 2nd ed, Boston: Addison–Wesley; 1987, 793 p.
 12. Pratt WK, *Digital image processing*, 3rd ed, New York: Wiley; 2001, 793 p.
 13. Gonzalez RC, Woods RE, Eddins SL, *Digital image processing using MATLAB*, 2nd ed, New York: McGraw hill; 2011, 738 p.
 14. Brown LG, A Survey of image Registration Techniques, *ACM computing surveys*, 1992 Dec;24(4):325–76.
 15. Salembier P, Comparison of some morphological segmentation algorithms based on contrast enhancement, – application to automatic defect detection, In: *European signal processing conference*; 1990 Sep 18–21; Barcelona, Spain, Barcelona (Spain): Elsevier; 1990, p. 833–6.
 16. Nobuyuki O, A threshold selection method from gray–level histograms, *IEEE Transactions on systems man and cybernetics*, 1979 Jan;9(1):62–6.
 17. Sinha SK, Fieguth PW, Morphological segmentation and classification of underground pipe images, *Machine vision and applications*, 2006 Apr;17(1):21–31.
 18. Zitova B, Flusser J, *Image registration methods: a survey*, *Image and vision computing*, 2003 Oct;21(11):977–1000.
 19. Welling M, *Fisher linear discriminant analysis*, University of toronto, Toronto: Department of computer science; 2005, 5 p.
 20. Harris C, Stephens M, A combined corner and edge detector, In: *Alvey vision conference*; 1988 Sep 1–2; Manchester, UK, Romsey (UK): The Plessey Company pic; 1988, p. 147–52.
 21. Ho SK, White RM, Lucas J, A vision system for automated crack detection in welds, *measurement science and technology*, 1990 Mar;1(3):287–94.