

시설물 안전점검에 있어서 무인비행장치의 활용방안 연구

A Study on Utilization of Unmanned Aerial Vehicles in Facility Safety Inspection

이석배* · 박경수** · 김태훈*** · 이다혜****

Lee, Suk Bae · Park, Kyung Soo · Kim, Tae Hoon · Lee, Da Hye

요약

본 논문은 안전점검을 받아야 하는 시설물의 수가 급증하고 있는 상태에서 대안으로 대두된 무인비행장치의 안전점검 활용성을 검증하고자 한 연구로서, 안동댐을 테스트베드로 하여 무인비행장치 촬영 및 데이터 처리를 수행하고 그 결과를 정리하고 분석하였다. 연구결과 댐과 같은 시설물의 안전점검에 있어서 무인비행장치를 활용하기 위한 비행 및 촬영방법을 정립하였으며, 아울러 시설물 표면에 나타난 균열폭을 감지하기 위하여 실내실험을 통하여 탐지가능한 GSD를 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구를 통하여 댐과 같이 규모가 큰 시설물도 무인비행장치를 활용한 안전점검이 가능하다는 것을 확인할 수 있었으며, 본 연구의 결과를 활용한다면 보다 효율적으로 시설물 안전점검이 가능할 것으로 기대된다.

주요어 : 시설물 안전점검, 무인비행장치, 균열, 정사영상, 3D 모델

ABSTRACT

This paper is a study to verify the usability of the UAV(Unmanned Aerial Vehicle), which has emerged as an alternative in a situation where the number of facilities requiring safety inspection is rapidly increasing. For the study, Andong Dam was chosen as a test bed, so UAV photogrammetry and data processing was performed and the results were summarized and analyzed. As a result of the study, flight and filming methods were established to utilize UAVs in the safety inspection of facilities such as dams. And detectable GSD was confirmed through indoor experiments to detect crack widths on the surface of facilities. Therefore, through this study, it was confirmed that even large-scale facilities such as dams can be inspected using UAVs. If the results of this study are used, it is expected that more efficient facility safety inspections will be possible.

Keywords : Facility Safety Inspection, UAV, Crack, Orthoimage, 3D Model

* 주저자·교신저자, 정회원·경상국립대학교 건설시스템공학과 교수(E-mail: sukbaelee@gnu.ac.kr)

** 국토안전관리원 경영관리실 과장(E-mail: kspark@kalis.or.kr)

*** 정회원·공간정보품질관리원 품질연구실 실장(E-mail: thkim@siqms.or.kr)

**** (주)니어스랩 파일럿팅 과장(E-mail: dahye.lee@nearthlab.com)

1. 서 론

드론(Drone)이라고 불리는 무인비행장치(Unmanned Aerial Vehicle)는 Eisenbeiß(2009)가 그의 박사학위 논문에서 UAV Photogrammetry의 기본이론을 정립한 이후로 기존의 유인항공사진측량을 대체할 수 있는 기술로 각광받으면서 지도제작 분야를 중심으로 그 활용 가능 분야를 넓혀 왔다. CBIInsights(2020)에서는 전쟁활용에서부터 기상예보에 이르기까지 UAV가 모든 것을 바꿀 것이라는 주제 아래 드론이 사회에 영향을 미칠 38가지 방법을 구체적으로 제시하기도 하였다. Alison(2021) 등은 UAV가 다른 기술들과 협력하면서 국경순찰, 수색 및 구조, 통신중계, 접근이 어려운 지역의 지도제작을 이루어 내고 있으며 관심 있는 공통의 주제로서 실시간 내비게이션을 위한 컴퓨터비전, 분산제어를 위한 네트워크 컴퓨팅 및 통신전략, 충돌방지 및 편대비행을 위한 기술적 개선 등을 들고 있다. Shi와 Masoud(2018)은 건설분야에서의 UAV시스템의 적용방안을 체계적으로 조사하여 제시한 바 있으며, Calin 등(2020)은 한 발 더 나아가 건설 디지털트윈의 의미를 정립하고 향후 미래 연구방향을 제시한 바 있다.

우리나라 또한 드론이 미래의 성장동력이 될 것이라는 인식아래 국토교통부(2018)에서는 2018년 드론을 8대 혁신성장동력으로 지정하였으며, 2019년에는 「드론의 활용의 촉진 및 기반조성에 관한 법률」을 제정하여 제도적인 지원 정책을 펼쳐왔다. 2022년에는 BIM 도입으로 건설산업을 디지털화하여 스마트건설을 추진하는 계획을 발표함으로써(국토교통부, 2022) 무인비행장치측량의 중요성은 더욱 높아졌다고 할 수 있다. 이와 함께 국토지리정보원에서는 「무인비행장치측량 작업규정」을 제정 및 개정(2020)하였고, 건설기술연구원(2020)에서는 「무인비행장치측량 표준품셈」을 신설한 바 있다. 또 국토안전관리원에서는 「드론을 활용한 시설물 안전점검 매뉴얼 및 표준품셈(안) 개발」 연구를 진행하여 성과를 도출하기도 하였다.

무인비행장치를 활용하고 발전시키려는 학술분야에서의 연구 또한 활발하게 진행되어 왔다. 우선 지적분야에서의 UAV 활용연구를 살펴보면 오이균(2016)은 드론영상기반 지적조사 연구를 수행하였고, 홍성인(2017)은 UAV를 이용한 지적측량 방안을 제시한 바 있다. 박종현 등(2018)은 무인항공측량시스템을 활용한 지적재조사 방안을 연구하였고, 고정현(2019)은 지적측량업무 방식을 개선하기 위하여 「지적업무처리규정」의 개정 필요성을 주장한 바 있다. 또 건설분야를 살펴보면 이석배 등(2021)은 고속도로 건설현장에서 드론 활용을 위한 표준공종을 개발한 바 있고, 이석배 등(2022)은 드론을 활용하여 교량 안전점검을 위한 표준 절차를 정립하기도 하였다.

무인비행장치를 시설물 안전점검에 활용하려는 해외 연구 또한 활발하다. Hallermann과 Morgenthal(2014)은 규모가 큰 교량을 시각적으로 검사하기 위하여 UAV를 이용하는 전략을 발표하였고, Seo 등(2018)은 드론을 활용하여 목재 거더교에 대한 점검결과를 바탕으로 5단계 교량검사 방법론을 발표하였으며, Chen 등(2019)는 교량에 대한 3D 모델을 구축하여 교량을 검사하는 성과를 발표하였다. 또 Han 등(2021)은 인공지능 딥 러닝 기법(deep learning method)을 이용하여 UAV 영상에서 나타나는 변화를 자동으로 탐지해내는 기법을 발표한 바 있고, Elena 등(2017)은 드론측량으로 만들어진 DEM 모델의 정확도 분석을 수행한 바 있다.

본 연구는 이러한 배경하에서 시설물 안전점검에 무인비행장치를 활용하고자 한 연구이다. 연구를 위하여 안전점검을 주기적으로 실시하여야 하는 대형시설물인 안동댐을 테스트 베드(test bed)로 선정하여 무인비행장치 촬영과 데이터 처리, 결과분석을 수행하였다. 본 연구에서는 댐 시설물에 있어서 무인비행장치 활용이 활성화 될 수 있도록 안전점검의 비행 및 촬영방법을 정립하고자 하였다. 또한 무인비행장치 정사영상으로 식별 가능한 균열폭의 한계를 알아보하고자 실내에서 수직

눈금과 사선눈금을 고도별로 촬영한 영상을 활용하여 식별가능한 균열폭을 GSD에 따라 검증하였다. 따라서 무인비행장치 활용 안전점검에 있어서 이러한 내용들이 정립된다면 무인비행장치를 활용한 탠 시설물의 안전점검이 더욱 활성화 될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 시설물 안전점검과 무인비행장치

2.1 시설물 안전점검 현황

우리나라는 일정 규모 이상의 시설물을 안전하게 유지관리 하기 위하여 「시설물의 안전 및 유지관리에 의한 특별법」(법률 제17551호)에 따라 안전점검을 받도록 규정하고 있으며, 안전점검의 절차와 방법은 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 등에 관한 지침」(국토교통부 고시 제2022-539호) 등에서 규정하고 있다. 그런데 국토안전관리원 시설안전 통계연보에 따르면 이 법의 적용을 받아 안전점검을 실시하여야 하는 1·2종 시설물의 경우 <표 1>에서 보는 것과 같이 2018년 1종 시설물 9,732개, 2종 시설물 83,347개로 합계 93,079개였으나, 2019년부터는 3종 시설물이 추가되어 안전점검 대상 시설물의 총계가 147,651개, 2020년에 153,561개, 2021년에는 159,847개로 증가하고 있다. 증가율로 따지면 <표 2>에서 보는 것과 같이 1종 시설물은 연평균 4.7%, 2종 시설물은 연평균 5.8%, 3종 시설물은 연평균 35.4%로 전체 평균 증가율은 23.9%에 이르고 있다. 이는 「시설물의 안전 및 유지관리에 의한 특별법」 개정으로 안전관리가 강화됨으로써 2019년 3종 시설물의 추가됨으로써 급격하게 늘어난 수치이기는 하나, 1종·2종·3종시설물에 대하여 <표 2>에서 나타난 순수 연평균 증가율만을 적용하여 안전점검 대상 시설물이 어떻게 증가하는지를 예측해보면 <표 3>과 같다. <표 3>에서 보는 것과 같이 2031년에는 1종 시설물 17,572개, 2종 시설물 171,139개, 3종 시설

물 69,698개로 합계 258,409개로 증가할 것이며, 2041년에는 1종 시설물 27,816개, 2종 시설물 300,750개, 3종 시설물 94,582개로 합계 423,148개로 증가할 것으로 예측된다.

따라서 이렇게 증가하는 시설물의 수를 현재의 안전점검 방식으로 수용해 내기에는 어려움이 예상되므로 안전점검 방식의 변화가 필요하다.

<표 1> 연도별 안전점검 대상 시설물의 수 (개)

구 분	2018	2019	2020	2021
총 계	93,079	147,651	153,561	159,847
1종 시설물	9,732	10,240	10,618	11,101
2종 시설물	83,347	89,037	93,118	97,385
3종 시설물	-	48,374	49,825	51,361

<표 2> 안전점검 대상 시설물의 증가율 (%)

구 분	2019 -2018	2020 -2019	2021 -2020	평균
총 계	58.6	4.0	4.1	23.9
1종 시설물	5.2	3.7	4.5	4.7
2종 시설물	6.8	4.6	4.6	5.8
3종 시설물	100	2.9	3.1	35.4

<표 3> 안전점검 대상 시설물의 증가예측 (개)

구 분	2021	2031	2041	증가율
총 계	159,847	258,409	423,148	-
1종 시설물	11,101	17,572	27,816	4.7%
2종 시설물	97,385	171,139	300,750	5.8%
3종 시설물	51,361	69,698	94,582	3.1%

2.2 안전점검 분야에 무인비행장치의 활용 필요성

시설물의 안전점검은 시설물의 기능적 결함과 위험 요인을 발견하고, 적절한 보수·보강 방법 및 대책방안 등을 결정·수립하여 시설물의 안전을 확보하는 것이 목적이며, 안전점검에서는 시설물

의 상태를 평가하고 외관조사망도를 작성하게 된다. 상태평가는 재료시험 및 외관조사를 반영하여 시설물의 각 부재로부터 발견된 상태변화(결합, 손상, 열화)를 근거로 하여 상태평가 기준에 따라 실시하며, 정기점검에서는 기본시설물 또는 주요부재 종류별로 평가하는 것을 원칙으로 한다. 또 정밀점검에서는 기본시설물 또는 주요부재에 대하여 점검하고, 외관조사망도를 작성하여 상세하게 상태평가를 실시하며, 외관조사망도를 작성하지 않은 부위는 이전 보고서에 수록된 상태평가 결과를 참조하여 시설물 전체에 대한 상태평가 결과를 결정하게 된다.(국토안전관리원, 2021)

그러나 지금까지 수행하여 왔던 안전점검 상태평가 방식이 육안점검에 의존하여 왔으며, 이러한 평가방법은 점검기술자의 경험과 지식에 따라 서로 다른 평가결과가 도출될 수 있는 가능성을 내포하고 있다. 또 육안점검에 의하여 안전점검·안전진단을 수행할 경우 교량이나 댐과 같은 대형 시설물의 경우 접근이 어려운 부재가 발생하게 되고 이에 대한 직관적인 평가가 어렵게 된다. 또 굴절사다리차 등을 동원할 경우 상당한 대기시간이나 비용이 발생하게 된다. 또 인력에 의한 외관조사에 의존하게 되면 시설물을 로프 등을 타고 접근하게 되는 경우도 발생하여 점검기술자의 안전이 우려되는 상황도 종종 발생하게 된다. 따라서 시설물 안전점검에 있어서 다음과 같은 상태평가 방식의 개선이 필요하다.

첫째, 기존의 인력 검사에 의존하는 유지관리 방식에서 장비 중심의 객관적인 계측 데이터베이스 유지관리 방식으로 전환될 필요가 있다.

둘째, 기존의 점검기술자 주관에 의존하던 방식에서 객관적 시각적 데이터를 확보할 수 있는 기술로의 전환이 필요하다.

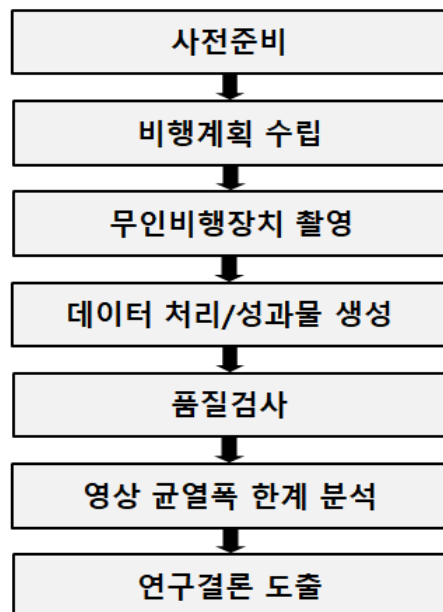
셋째, 기존의 안전이 우려되는 인력 검사 방식에서 안전이 확보되는 방식으로 개선될 필요가 있으며, 점검·진단 대상시설물의 수량과 구조형식이 다양화됨에 따라 기존 평가시간이 많이 소요되던 인력검사 방식에서 구조물 외관상태를 신속하게

점검하고 진단하는 기술로의 개선이 필요하다.

따라서 시설물 안전점검의 구조물 외관상태 평가에 있어서 무인비행장치 측량방식은 영상에 기반한 객관적인 계측데이터를 확보하고 점검기술자의 안전을 확보하면서 작업을 신속하게 진행할 수 있는 대안이 될 것이다. 본 연구에서는 시설물 안전점검에 무인비행장치의 활용 가능성을 검증하고 활성화할 목적으로 안동댐을 대상으로 하여 무인비행장치에 의한 안전점검을 수행하고 그 결과를 정리·분석하였다.

3. 무인비행장치를 활용한 시설물 안전점검 실험

안동댐은 높이 83m, 길이 612m로 저수용량이 1,248,000,000m³의 중앙차수벽형 사력댐이며 양수 겸용 발전소를 갖추고 있는 댐이다. 본 연구에서는 무인비행장치를 활용하여 시설물 안전점검을 실증하고자 대형시설물인 안동댐을 테스트베드로 선정하여 [그림 1]과 같이 연구를 진행하였다.



(그림 1) 연구 흐름도

[그림 1]에서 보는 것과 같이 사전준비 단계에서는 안동댐 시설물에 대한 정보를 수집하고 촬영허가 및 비행허가를 취득하였으며, 비행계획 수립 단계에서는 현장을 답사하여 비행 장애요소 및 시계를 확인하고 세부시설물별로 촬영계획을 수립하였다.

무인비행장치 촬영 단계는 2,000만 화소의 DJI H20 카메라를 탑재한 DJI M300 드론과 3,600만 화소의 소니 A7R 카메라를 탑재한 Intel Falcon 8+를 이용하여 수행하였다.

	DJI M300	Intel Falcon 8+
드론		
	DJI H20	소니 A7R
RGB 센서		

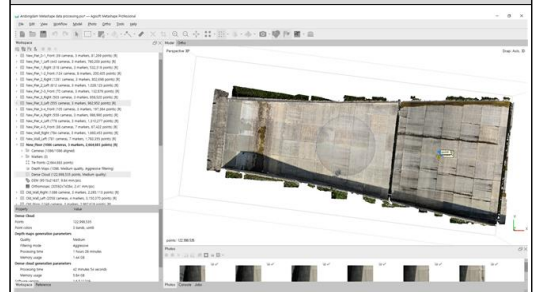
(그림 2) 촬영에 사용된 드론과 카메라

안동댐은 매우 크고 방대한 댐이기 때문에 구역수로, 신여수로, 취수탑, 필댐, 조정지댐의 5개 분야로 나누어 무인비행장치 촬영과 데이터 처리를 진행하였다.

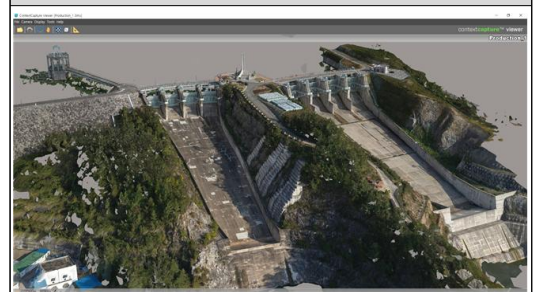
데이터 처리에 있어서 [그림 3]과 같이 세가지 소프트웨어를 사용하였는데, 사진의 명암 차이를 동일한 노출로 보정하기 위하여 Lightroom 소프트웨어를 사용하였고, 원본 사진 데이터 처리를 위하여 Metashape 소프트웨어를 사용하였으며, 3차원 모델을 만들기 위하여 Context Capture 소프트웨어를 사용하였다.



a. Lightroom에 의한 노출 보정 작업



b. Metashape에 의한 여수로 Dense Point Cloud 작업



c. Context Capture에 의한 안동댐 3D Model

(그림 3) 데이터처리에 사용된 소프트웨어

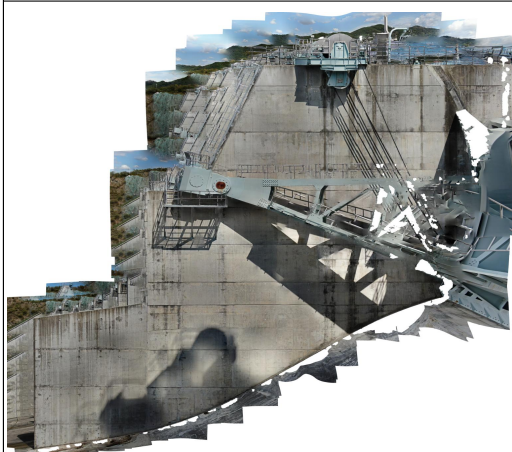
4. 무인비행장치 안전점검 결과분석

4.1 균열분석 대상지의 데이터 처리

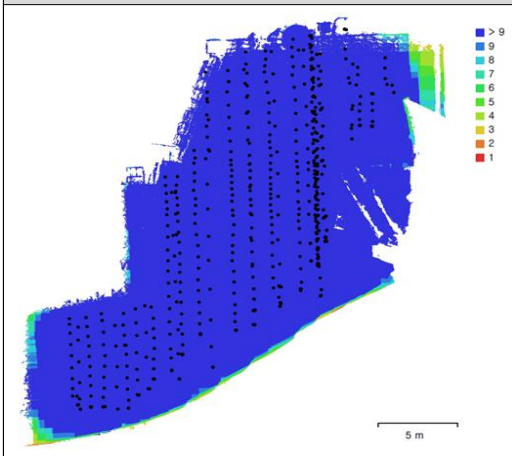
영상에 나타난 균열분석을 위하여 대상지로 잡은 곳은 콘크리트의 상태가 잘 나타난 안동댐 본체 Pier 4의 우측면이다. [그림 4]는 균열분석 대상지로 선정된 위치(a)와 정사영상 처리결과(b) 그리고 Metashape 레포트 파일에 표시된 카메라 위치와 중복도(c)를 보여주고 있다.



a. 균열분석 대상지(댐본체 Pier4. 우측면)



b. 안동댐 Pier 4. 우측면 정사영상



c. Metashape에 의한 영상처리
(카메라 위치와 영상중복)

<표 4>는 안동댐 Pier 4. 우측면에 대한 무인비행장치 촬영 데이터 처리결과를 보여주고 있다. 촬영거리를 8.32m로 유지하여 전체 면적 402m²에 대하여 영상 558장을 취득하였으며 GSD는 0.976 mm/pixel를 얻을 수 있었다. 이와 같이 시설물 안전 점검에 있어서 GSD가 sub-mm 단위의 영상을 얻어야 하는데, 이를 위해서는 매우 세심한 촬영방법을 필요로 하게 된다. 따라서 균열분석을 위한 촬영방법과 촬영시 유의점을 4.3절에 정리하였다.

<표 4> 안동댐 Pier 4. 우측면 데이터 처리결과

Number of images	558	Camera station	557
Flying altitude	8.32 m	Tie points	986,990
Ground resolution	0.976mm/pix	Projections	4,146,870
Coverage area	402 m ²	Reprojection error	0.832 pix

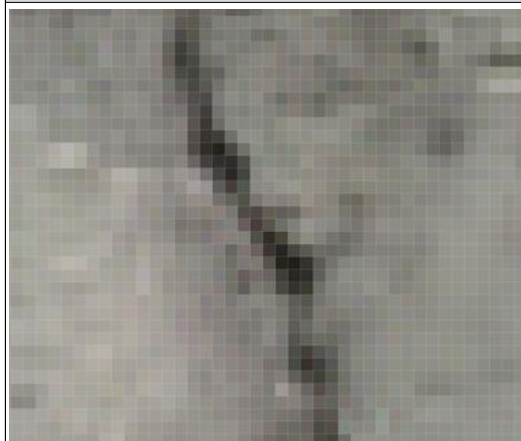
4.2 영상에 나타난 균열 분석

[그림 5] a는 Pier 4. 우측면에 나타난 균열을 영상에서 검출한 것이고 b.는 그 균열 부분을 확대한 것이다. 사진 픽셀은 500 pixel×500pixel이며, GSD를 고려하였을 때 실제 사진의 공간상의 영역은 488mm×488mm이다. 확대 사진상에 나타난 균열은 가장 넓은 폭이 4 pixel을 차지하고 있고 가장 얇은 폭이 1 pixel을 차지하고 있어 이를 실제 거리로 환산하면 3.904mm~0.976mm에 이르고 있음을 알 수 있다.

(그림 4) 균열분석 대상지와 정사영상



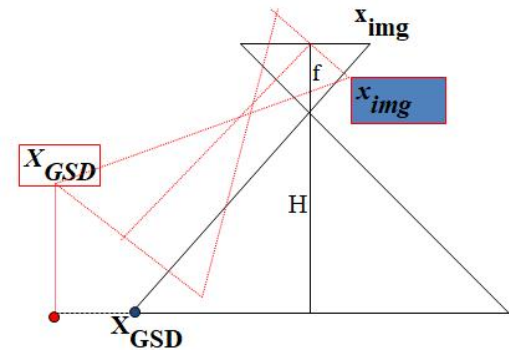
a. Pier4. 우측면 균열의 검출



b. 균열부 확대 영상

(그림 5) 균열분석 대상지와 정사영상

무인비행장치를 활용한 안전점검에 있어서 지상해상도가 되는 GSD를 계획하는 일은 매우 중요하다. 왜냐하면 점검자가 알아내고자 하는 균열의 폭 등에 맞추어 GSD를 계획하여야 하기 때문이다. [그림 6]은 무인비행장치 촬영에 있어서 사진상의 한 픽셀과 지상의 GSD와의 관계를 보여주고 있으며, GSD를 계획하고자 할 때에는 식 (1)을 이용하게 된다.



(그림 6) 사진상의 한 픽셀(ximg)과 지상의 GSD(XGSD)와의 관계

$$H : f = X_{GSD} : x_{img} \quad (1)$$

$$H = \frac{f \times X_{GSD}}{x_{img}}$$

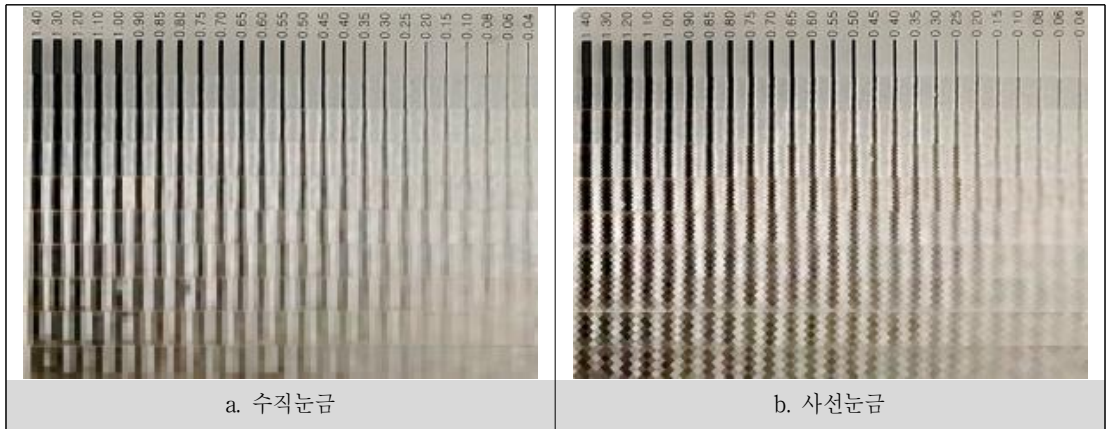
위 식 (1)에서 H 는 촬영거리 또는 촬영고도를 의미하며 f 는 카메라의 초점거리를 말한다. x_{img} 는 사진상의 한 픽셀의 크기이며 X_{GSD} 는 사진 한 픽셀에 찍히는 촬영대상물의 지상 크기, 즉 GSD를 의미한다. 따라서 촬영카메라가 결정되면 f 와 x_{img} 는 결정되게 되므로 H 를 조정하여 X_{GSD} 를 결정하게 된다.

시설물 안전 점검을 위해서는 안전도에 대한 기준등급을 측정하기 위해서는 0.1mm, 0.3mm, 0.5mm 수준의 균열의 탐지 수준을 평가하여야 한다. 그러나 감지할 수 있는 균열폭은 [그림 5]에서 보는 것과 같이 영상의 해상도인 GSD에 따라 달라지게 된다. 따라서 GSD에 따라 달라지는 식별 가능한 균열폭을 알아보기 위하여 안동댐 현장에서 촬영거리(H)를 다르게 하면서 촬영을 실시하였으나 바람 등 기상장애, 충돌에 의한 기체과손 염려와 수동비행의 어려움 등으로 인하여 다양한 GSD에 따라 촬영거리를 다르게 유지하면서 촬영을 진행하기가 거의 불가능하였다. 따라서 이를 실내실험으로 전환하여 식 (1)에 따라 균열폭 식별 실험을 진행하게 되었다. 먼저 [그림 7]과 같이 선의 두께를 0.06mm에서부터 1.40mm에 이르기까지 폭을 다르게

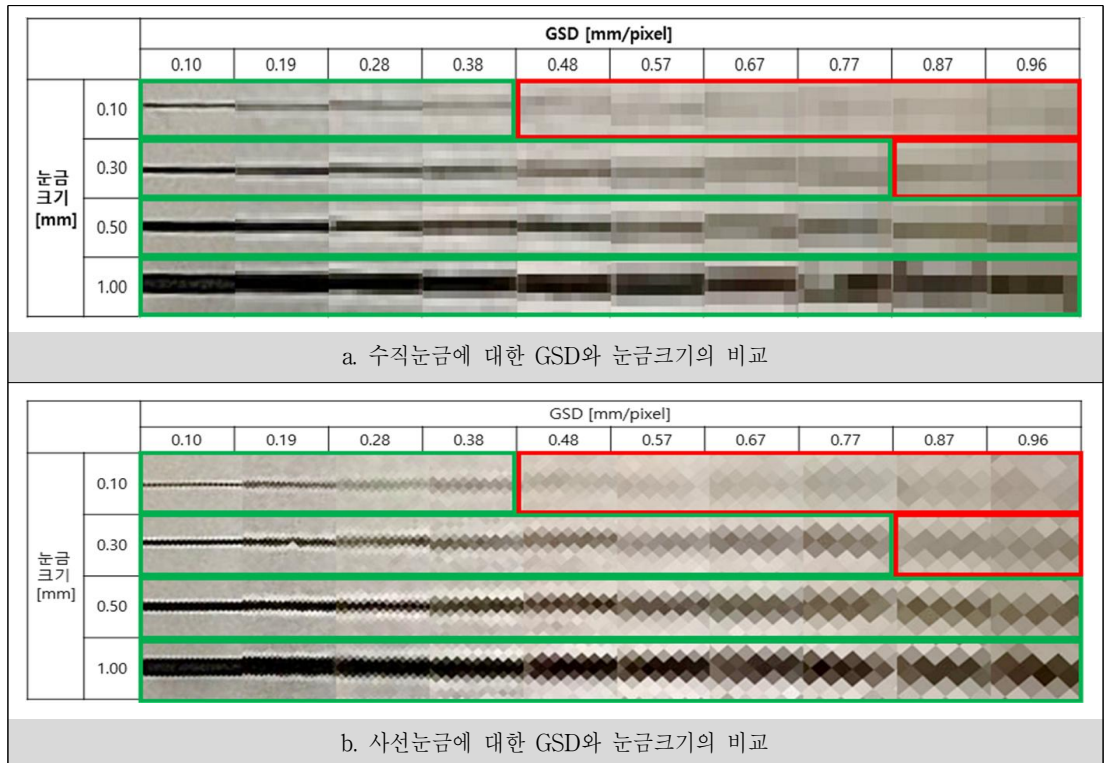
그은 수직눈금(a)과 사선눈금(b)을 표시하고 이를 GSD가 다르게 촬영거리 H 를 조정하여 촬영하였으며 그 결과를 [그림 8]에 정리하였다.

[그림 8]에서 보는 것과 같이 수직눈금은 각 픽셀이 서로 나란하게 붙어서 직사각형을 이루는 형

태의 눈금이고 사선눈금은 각 픽셀이 마름모꼴로 서로 연결되어 위아래가 뽀족한 형태를 나타내고 있는 눈금이다. 수직눈금과 사선눈금의 두 가지 형태로 실험을 진행한 것은 시설물의 표면에서 발생하는 균열이 각 픽셀이 맞닿은 방향으로도 발생



(그림 7) 실험에 사용한 수직눈금(위)과 사선눈금(아래)



(그림 8) 영상 GSD에 따른 균열폭 식별 비교

할 수 있고, 또 각 픽셀의 대각선 방향으로도 발생할 수 있으므로 두 가지 가능성을 모두 고려한 것으로 [그림 8]의 a와 b, 두 가지 결과로부터 다음과 같은 내용을 정리할 수 있었다.

첫째, 0.1mm 눈금은 0.38mm/pixel 미만에서 탐지 가능하다. 단, 근접촬영에 따라 비행안전거리 유지가 어렵고 촬영 사진수가 급격히 증가함에 따라 경제성이 대폭 낮아지는 문제가 발생한다.

둘째, 0.3mm 눈금은 0.77mm/pixel 미만에서 탐지 가능하며 적절한 비행 안전거리 유지가 필요하다.

셋째, 0.5mm 눈금은 0.96mm/pixel 미만에서 탐지 가능하다.

그런데 이 식별실험은 실내에서의 영상 촬영을 통하여 이루어졌으므로 실외 시설물에 대한 추가적인 검증이 필요할 것으로 판단된다.

4.3 댐 시설물 안전점검을 위한 무인비행장치 촬영방법 정립

본 연구에서는 시설물 안전점검에 무인비행장치의 활용성을 검증하고자, 안동댐을 테스트베드로 선정하고 무인비행장치를 활용하여 시설물 안전점검을 수행하였으며, 방대한 양의 영상 데이터를 취득하고 처리하는 과정에서 다음과 같은 촬영 기준 및 비행방법을 정리할 수 있었다.

첫째, 댐은 무인비행장치에 의한 안전점검 외관 상태 평가가 가능하나, 많은 시설물로 구성되어 있기 때문에 댐의 종류와 형식에 따라 여수로, 취수탑, 필댐, 조정지댐 등 주요 부분별로 나누어 촬영을 실시하여야 한다.

둘째, 수문 사이의 피어를 촬영할 때에는 GNSS 신호가 잡히지 않는 음영지역이 발생하기 때문에 RTK 기능을 가진 무인비행장치를 활용하여 별도의 GNSS 기준국을 세워주고 충돌방지 센서에 의지하여 세심하게 촬영하여야 한다.

셋째, 안동댐의 경우 본댐과 조정지댐 여수로의 상류 부분에서의 정면 부분은 곡선으로 되어 있어 정사영상 제작시 왜곡이 발생할 수 있으므로 촬영

중복도를 높여 주어야 하며 이중비행을 실시하는 등 특별한 주의를 기울여야 한다.

넷째, 본댐 수문 하류쪽 Pier에서 균열검출을 위하여 sub-mm GSD를 확보하기 위하여는 7m 이내의 촬영이 필요하다. Pier 4에서는 6.5~7m 거리에서 촬영을 실시하여 GSD 0.9mm/pixel를 얻을 수 있었다.

다섯째, Pier 촬영시 무인비행장치 비행은 시계 확보를 위하여 상하로 이동하며 촬영하는 것이 효율적이며, 촬영시 중복도는 횡중복도 80%, 종중복도 75% 이상으로 촬영한다. 또 계단이 있는 부분은 드론이 근접하였을 때 충돌 위험과 자기장 센서의 예러 발생 가능성이 높기 때문에 드론을 정지한 상태에서 짐벌(gimbal)의 피치(pitch)와 요(yaw) 각도를 5°~10°사이에서 촬영하여야 한다.

여섯째, 여수로 바닥은 경사져 있기 때문에 RGB센서에 달린 거리측정 센서로 대상물과의 거리를 동일하게 유지하기 위해 무인비행장치의 고도를 바꿔가면서 촬영하여야 한다. 면적 대비 소요시간과 배터리 효율을 고려한다면 촬영거리 12m에서 14m 사이에서 촬영하여야 하며, 물 반사가 있는 지역은 중복도를 약 5% 높여 촬영하여야 한다. 평면 부분인 Pier와 마찬가지로 횡중복도 80% 종중복도 75%로 그리드 비행한다.

일곱째, 벽체는 대상물과 수평한 각도로 촬영하되 여수로 바닥에서부터 4m 사이를 촬영할 시에는 드론의 짐벌 각도를 조절하여 촬영한다. 하방 센서 데이터를 활용하며 횡중복도 80% 종중복도 75%로 그리드 비행한다.

여덟째, 취수탑 또한 대상물과 수평한 각도로 촬영하되 수면과 맞닿아 있는 부분부터 4m 사이를 촬영할 시에는 드론의 짐벌 각도를 조절하여 촬영한다.

5. 결 론

본 논문은 시설물 안전점검에 있어서 무인비행

장치 활용성을 검증하기 위한 연구로, 안동댐을 테스트베드로 구축하고 댐을 구성하는 각 부분별로 무인비행장치 촬영과 데이터 처리를 통하여 정사영상과 3D 모델을 구축하여 시설물 외관상태 평가를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 안전점검을 의무적으로 받아야 하는 대상물이 2021년 159,847개에서 2031년 258,409개, 2041년 423,148개로 큰 폭으로 증가할 것이 예상되므로 이에 대한 대책이 필요하며 본 연구를 통하여 무인비행장치 활용 안전점검이 그 대안이 될 수 있음을 검증하였다.

둘째, 콘크리트 표면에 나타난 균열폭 식별 실험을 통하여 영상에 나타난 0.1mm 균열은 GSD 0.38mm/pixel 미만에서 탐지 가능하며, 0.3mm 균열은 GSD 0.77mm/pixel 미만에서 탐지 가능하고, 0.5mm 균열은 GSD 0.96mm/pixel 미만에서 탐지 가능하다는 것을 알 수 있었다. 그러나 0.1mm 균열감지를 위해서 무인비행장치 촬영이 초근접 상태에서 이루어져야 하며 안전성과 경제성의 문제가 제기되었으므로 별도의 안전대책과경제성 검토가 필요하다. 아울러 이 식별실험은 실내 영상 촬영을 통하여 이루어졌으며 실외 시설물에서의 추가적인 검증이 필요하다.

셋째, 댐 시설물 안전점검을 위한 무인비행장치 촬영거리와 중복도, 비행방법 및 유의점 등을 본 댐, 여수로, 취수탑 등 부재별로 정리할 수 있었으며, 이는 앞으로 무인비행장치를 활용한 댐 시설물 안전점검에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

시설물 안전점검의 외관조사 상태평가는 일차적으로 육안에 의존하는 되므로, 본 연구에서 진행한 콘크리트 구조물의 균열폭 식별실험은 육안을 기준으로 촬영 영상을 확대하여 판별한 것이다. 따라서 개인적인 편차가 있을 수 있으므로 향후 여러 가지 수학적 필터링(filtering) 적용하는 방법을 연구한다면 개인적 편차가 적은 선명한 균열폭을 식별해 낼 수 있을 것으로 기대된다. 아울러 라이다(LiDAR) 센서의 활용이 증가하고 있으므로

균열폭 검출에 있어서 드론 RGB센서와 라이다센서 결과를 결합한다면 더욱 효율성 있는 안전점검이 가능할 것으로 판단되며 이를 추후 과제로 남겨두고자 한다.

〈참고문헌〉

1. 고정현, "UAV를 활용한 지적측량 업무방식 개선에 관한 연구", 「지적과 국토정보」, 제49권, 제2호, 2019.
2. 국토교통부, 스마트건설기술 로드맵(안), 2018.
3. 국토교통부, 드론의 활용의 촉진 및 기반조성에 관한 법률», 법률 제16420호, 2019.
4. 국토교통부 건설기술연구원, 「2020 건설공사 표준품셈」, 2020.
5. 국토교통부, 스마트건설 활성화 방안, 2022.
6. 국토안전관리원, 「드론을 활용한 시설물 안전점검 매뉴얼 및 표준품셈(안) 개발 연구」, 2021.
7. 국토지리정보원 무인비행장치 측량 작업규정», 국토지리정보원 고시 제2020-5670호, 2020.
8. 박종현·홍성언, "무인항공측량시스템을 이용한 직접측량 방식의 지적재조사 대상 토지 추출 연구", 「한국지적학회지」, 제34권, 제2호, 2018, p.65
9. 오이균, "보급형 드론(UAV; Unmanned Aerial Vehicle) 영상기반 지적조사 비교 연구", 한국지적학회지 제32권, 제3호, 2016, p.75
10. 이석배, 정민, 어수창, 김종전, "고속도로 건설 현장에서 드론 활용을 위한 표준공종 개발", 「KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research Vol. 41, No. 4, 2021, p.461.
11. 이석배, 이기홍, 최현민, 임치성, "드론 활용교량 안전점검을 위한 표준절차 정립", 「KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research」, Vol. 42, No. 2, 2022, p.281.
12. 홍성언, "UAV를 이용한 지적측량 방안에 관한

- 연구”, 「차세대융합기술학회논문지 제1권, 제1호, 2017, p.45.
13. Allison R., Macro Z., Adam H., Raja S. and Hedrick J.K., “An Overview of Emerging Results in Cooperative UAV Control”. *43rd IEEE Conference on Decision and Control, Atlantis*, Paradise Island, Bahamas, 2004.
 14. Calin B., Annie G., Sylvain K. and Yacine R., “Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research”. *Automation in Construction*, Vol. 114, 2020.
 15. Chen S., Laefor, D. F., ASCE M., Mangina E., Zolanvari S. M. I. and Byrne J., UAV Bridge Inspection through Evaluated 3D Reconstruction, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 24, No. 4, 2019.
 16. Cbinsights. 38 Ways Drones Will Impact Society: From Fighting War To Forecasting Weather, UAVs Change Everything, 2020.
 17. Elena R., Giulia B., Sara V. and Piergiorgio M. “Accuracy Analysis of a Dam Model from Drone Surveys”, *Sensors* 2017, 17(8), p.1.
 18. H. Eisenbeiß: UAV Photogrammetry, DISS ETH NO. 18515, *Ph.D. Dissertation*, University of Technology, Dresden, Germany, 2009.
 19. Hallermann N. and Morgenthal G., “Visual inspection strategies for large bridges using Unmanned Aerial Vehicles (UAV)”, *Conference IABMAS 2014*, Shanghai.
 20. Han D., Lee S. B., Song M. and Cho J. S. Change Detection in Unmanned Aerial Vehicle Images for Progress Monitoring of Road Construction, *Buildings* 11, 150, 2021. p.1.
 21. Seo J., Duque L. and Wacker J. (2018) Drone-enabled bridge inspection methodology and application, *Automation in Construction*, Vol. 94, p. 112.
 22. Zhou S., and Gheisari M. “Unmanned aerial system applications in construction: a systematic review”. *Construction Innovation*, Vol.18 No.4, 2018, p.453.

(접수일 2022.11.10., 심사일 2022.11.18., 심사완료일 2022.11.29.)