

드론 Photogrammetry 기반 댐 시설물 안전점검 적용성 연구

박동순^{1*}, 유진일², 유호준³

A Research on Applicability of Drone Photogrammetry for Dam Safety Inspection

DongSoon Park^{1*}, Jin-Il Yu², Hojun You³

Abstract: Large dams, which are critical infrastructures for disaster prevention, are exposed to various risks such as aging, floods, and earthquakes. Better dam safety inspection and diagnosis using digital transformation technologies are needed. Traditional visual inspection methods by human inspectors have several limitations, including many inaccessible areas, danger of working at heights, and know-how based subjective inspections. In this study, drone photogrammetry was performed on two large dams to evaluate the applicability of digital data-based dam safety inspection and propose a data management methodology for continuous use. High-quality 3D digital models with GSD (ground sampling distance) within 2.5 cm/pixel were generated by flat double grid missions and manual photography methods, despite reservoir water surface and electromagnetic interferences, and severe altitude differences ranging from 42 m to 99.9 m of dam heights. Geometry profiles of the as-built conditions were easily extracted from the generated 3D mesh models, orthomosaic images, and digital surface models. The effectiveness of monitoring dam deformation by photogrammetry was confirmed. Cracks and deterioration of dam concrete structures, such as spillways and intake towers, were detected and visualized efficiently using the digital 3D models. This can be used for safe inspection of inaccessible areas and avoiding risky tasks at heights. Furthermore, a methodology for mapping the inspection result onto the 3D digital model and structuring a relational database for managing deterioration information history was proposed. As a result of measuring the labor and time required for safety inspection at the SYG Dam spillway, the drone photogrammetry method was found to have a 48% productivity improvement effect compared to the conventional manpower visual inspection method. The drone photogrammetry-based dam safety inspection is considered very effective in improving work productivity and data reliability.

Keywords: Drone, Dam safety, Safety inspection, Digital model, Photogrammetry

1. 서론

국가의 중대한 방재시설이자 수자원시설인 댐은 지속가능한 기반시설 관리 기본법과 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법에 따라 주기적인 안전점검과 진단을 수행해오고 있다. 하지만 안전점검과 진단을 위해 현재 수행하는 현장조사 방식은 육안점검 위주의 경험과 노하우 기반 외관조사로서 상당한 시간과 노동력, 비용이 수반된다. 또한 대체로 고저차가 심하고 상부 저수지와 양안부의 급경사지가 존재하기 때문에 고소시설, 수중부, 급경사 사면 등에 대한 작업 위험성과 점점 누락으로 인한 결과의 신뢰성 저하에 노출되어 있다(K-water Research Institute, 2019; 2021; 2022). 댐은 현재 우

리나라 전체 국가 인프라 중 노후화율이 가장 높은 시설물이다(Ministry of Environment, 2018; Yoon and Yoon, 2022).

댐은 노후화와 홍수, 시설물 열화 등이 원인이 되어 다양한 사고를 겪고 있다(McCann, 2018). 이러한 최근 사례로 2017년 2월, 미국 Oroville 댐 사고(Koskinas et al., 2019; Vahedifard et al., 2017), 2018년 7월, 라오스 댐 붕괴사고(Latrubesse et al., 2020), 2019년 1월, 브라질 테일링댐 붕괴 사고(Rose et al., 2023) 등이 있다. 국내 댐의 경우에도 붕괴를 비롯하여, 싱크홀, 사면 활동, 내부침식 등 다양한 사례가 보고되고 있다(Park and Oh, 2016; 2018).

이러한 배경으로 현재 환경부에서는 드론 및 로봇 활용 댐 안전점검, 디지털 트윈 댐 안전관리를 추진하고 있다(Ministry of Environment, 2021; Park 2021b). 드론 안전점검과 디지털 트윈 플랫폼 구축을 위해서는 필수적으로 드론 photogrammetry와 같은 ‘현실 모델링(Reality Modeling)’ 기술이 중요하다(Park, 2020; 2021a; 2022).

드론 photogrammetry 기술을 활용한 3D 디지털 모델의 연구는 최근 다양한 분야에서 기술의 유효성이 검증되고 있다. 일부 사례로서, Ko et al.(2021)은 드론과 photogrammetry로 자동

¹정희원, K-water연구원 수석 연구원, Stanford University Visiting Scholar, 교신저자

²정희원, 한국핵융합에너지연구원 연구원

³정희원, K-water연구원 선임연구원

*Corresponding author: fulgent@kwater.or.kr

K-water Research Institute, 125, Yuseong-dearo 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, 34045, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2023년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

화된 건물 외부 균열 검사 시스템을 제안하였다. Capolupo et al. (2015)은 환경 모니터링을 위해 드론과 사진측량 및 수문 모델을 사용하여 구리로 오염된 토양을 탐지하였다. Cavalagli et al. (2020)은 역사적인 석조 건축물의 구조적 손상을 평가하기 위해 드론 photogrammetry 조사의 정확성을 연구하였다. Habeenzu et al.(2020)는 드론 photogrammetry와 이미지 처리 기술을 사용하여 자동화된 교량 안전점검 방법을 제안하였다.

드론 기술을 댐의 점검에 활용한 연구 사례도 일부 보고되고 있다. 예를 들어, Henriques and Roque(2015)는 콘크리트 댐의 시각적 점검을 지원하기 위해 드론 사용을 검토했다. Khaloo et al.(2018)은 대규모 중력식 콘크리트댐의 조사를 위해 드론과 3D 컴퓨터 비전을 활용했다. Angeli et al.(2019)은 댐 현장점검을 위해 드론을 사용하여 댐 표면의 밀집한 3D 모델을 생성했다. Huang et al.(2020)은 댐 표면부 변형 모니터링 방법을 개발하였다. 최근 Yu et al.(2022)은 댐 시설물에 대해 이 기술을 적용하여 디지털 모델의 높은 신뢰성과 정량적인 성과도출이 가능한 것을 확인하였다. 국내 구조물 진단 및 유지관리 분야에 드론을 활용한 사례들도 보고되고 있다. 주로 드론의 고성능 카메라와 비전 기술을 활용하여, 기존의 육상 기반 진단 기술로는 접근이 어려웠던 구조물의 위험 요소를 빠르고 효율적으로 파악할 수 있는 방법을 제시하고 있다. 이러한 적용 사례로는, 암반사면의 절리 방향성 추정(Kim et al., 2023), 고속도로 교량 신축이음장치 유간 탐지(Yang et al., 2021; Jung et al., 2021), 터널 결함 탐지(Kim et al., 2021a), 콘크리트 균열 및 부식 탐지(Kim et al., 2021b), 철도 안전점검(Kim et al., 2021c), 항만시설물 안전점검(Min et al., 2021) 등이 있다. 그러나 종방향 선형이 긴 도로, 철도, 터널 등과 달리 고저차가 심하고 수면이 존재하는 대형 댐 시설물에 대한 국내 적용성 연구는 미흡한 실정이다.

종래의 타 산업 연구에서 접목한 드론 photogrammetry 기술의 유효성은 직접적으로 댐 시설물에 적합하다고 볼 수 없으며, 대규모 댐 시설물의 특성 상 상대적으로 큰 고저차, 저수지 수면의 영향으로 인한 빛 반사, 양안부 급경사지 및 식생의 존재로 인한 드론 임무비행의 제약, 수력발전시설물의 영향으로 인한 전자기적 간섭 현상 등 댐에 대해 기술의 적용성을 검증할만한 연구는 미진하였다. 또한 대부분의 댐 사례 연구는 국내 시설물안전법에 의거한 안전점검과 국내 댐들을 대상으로 일반화하여 적용하기에는 여러 제약사항이 있는 국부적인 기술들이며, 특히 생성되는 디지털 데이터의 구조화 및 이력관리 방안에 대해서는 연구가 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 2개 대형 댐에 대한 드론 photogrammetry 기반 3D 현실 모델링을 수행하고 댐 시설물의 안전점검에의 현장조사 적용성을 고찰하였다. Photogrammetry를 위한 임무비행 제약사항(저수지 및 급경사 사면 존재, 발전소 전자기장 간

섭, 높은 고저차)을 고려하였을 때, 실제 댐 환경에서 안전점검에 필요한 수준의 3D 모델링이 가능한지에 대해 검토하였다. 또한 종래의 인력 측량 방식으로 제약이 있었던 중횡단 선형 프로파일 분석의 적용성에 대해서도 분석하였다. 댐 콘크리트 시설물에 대한 3차원적 균열 및 손상 시각화를 위한 방법론적인 접근법을 제안하였다. 실제 댐 여수로 시설물에 대하여 종래의 인력 현장점검 방식과 드론 photogrammetry 방식의 생산성을 실측하고 비교하였다. 드론 photogrammetry 기반 댐 시설물 디지털 모델링 기술의 유효성과 함께 댐 안전점검에의 활용성을 종합적으로 제시하였다. 단 본 연구는 드론 photogrammetry 기술을 댐 시설물 현장 외관조사에 실무적이고 범용적인 안전점검 활용성 검토 및 제안에 초점을 맞추었으며, 따라서 현행 정밀안전진단 수준의 정밀한 결과 검출(예. 0.3 mm 폭 미세균열)은 추후 실용화 연구가 별도로 필요하다.

2. Photogrammetry 기반 댐 현실 모델링

2.1 연구 대상 댐

드론 photogrammetry 기술을 대형 댐에 적용하기 위해 2개 댐을 선정하였다. 댐의 수직 고저차는 100 m와 42 m이다. 댐의 형식은 중심코어형 락필댐이며, 댐의 일반적인 제원은 다음 Table 1과 같다.

2.2 Photogrammetry 현실 모델링

2.1.1 지상기준점 설치 및 측량

드론 Photogrammetry 과정에서 GCP (Ground Control Point; 지상기준점)의 위치 정합을 정확하게 수행하면 3D 모델의 정확성을 크게 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 댐에 대한 드론 임무비행 수행 전 GCP를 설치하였다. 특히 댐 시설물은 고저차와 식생의 영향으로 GCP의 설치 시 영상에서 식별이 가능한 곳을 선별하였으며, April Tags, Chili Tags 등을 활용하여 후처리 작업 시 영상 내의 GCP 중심점 위치를 자동으로 인식할 수 있도록 설치하였다(Fig. 1). GCP의 정확한 위치와 표고값을 측정하기 위해 VRS Network RTK (Virtual Reference Station Network Real Time Kinematic) 방식의 측량을 하였다. VRS Network RTK는 드론 측량에서 사용되는 위

Table 1 Dams used in the study

Structures	Height (m)	Length (m)	Storage capacity (million m ³)	Year of completion
JAR dam	99.9	562.6	250	1992
YCN dam	42	300	96.4	1980



Fig. 1 April Tag as a GCP with surveying

치 보정 기술 중 하나로, 지상 기준점(GNSS Station)의 위치 정보를 전송하는 VRS 서버를 사용하여 드론의 위치를 보정한다. 향후 후처리 과정에서 측량한 GCP의 좌표는 이미지의 각도와 위치를 사용하여 3D 모델을 정합하는 데에 사용되었다. 본 연구에서는 GCP의 좌표를 사용하여 3D 모델을 정합하기 위해 최소 제곱법을 사용하였다. 즉 GCP의 좌표와 드론 촬영 이미지의 각도와 위치를 최소 제곱법을 사용하여 최적화하여 3D 모델을 정합하였다.

2.1.2 드론 임무비행

연구 대상 2개 댐에 대한 photogrammetry 현실 모델링을 위해 드론 임무비행을 수행하였다. 사용된 드론은 Autel 사의 EVO 2 Pro와 DJI 사의 Mavic 2 Pro이다. 사진 이미지 촬영은 대부분의 더블 그리드(double grid) 자동 임무비행과 여수로 주변 경사면에 대한 수동 촬영을 적절히 섞어 수행하였다. 임무비행은 기상이나 시설물 특성에 따라 탄력적으로 적용하지만, 자동 및 수동 촬영을 위해 댐당 약 6 sortie가 소요되었다. 드론 비행에서 sortie는 드론이 이륙하여 착륙하기까지의 하나의 비행 과정을 의미하며, 통상적인 배터리 사용 시간으로 약 20분 미만에 해당한다.

적정 GSD (Ground Sampling Distance)를 확보할 수 있도록 그리드 임무비행에서는 중중복도 80%, 횡중복도 70%로 촬영하였으며, 비행고도와 짐벌각도 및 카메라 Parameter를 현장 상황에 맞게 적절히 설정하였다. 각 댐의 평균 GSD와 RMS 및 Ground Coverage는 다음 Table 2와 같다. 전반적으로 GSD 2.4 cm/pixel 이내의 고정밀도 촬영을 하였음을 알 수 있다.

Table 2 General drone mission flight quality

Dam	Number of images	Average GSD [cm/pixel]	RMS [pixels]	Ground Coverage [km ²]
JAR	1,961	1.83	0.55	0.549
YCN	1,812	2.39	0.71	0.422

RMS (Root Mean Square)는 사진을 정합한 후에 사진 간의 픽셀 오차를 평균제곱근으로 표현한 지표를 의미한다.

2.1.3 데이터 후처리

드론에 탑재된 카메라를 통해 수집된 영상과 영상 이미지들의 위치 및 자세 정보를 활용하여 photogrammetry 후처리 작업을 수행하였다. 후처리에 적용된 소프트웨어는 Bentley 사의 ContextCapture 이다.

후처리 결과의 공간 정확도는 각 GCP에 대한 수평과 수직 오차를 통해 평가할 수 있다. 본 연구에서 평균 최대 수평오차는 약 0.2 cm, 평균 최대 수직오차는 약 0.3 cm인 것으로 나타났다. GCP의 오차로 볼 때 드론 photogrammetry 적용 성과는 2개 댐에 대해 매우 양호한 것으로 판단된다.

사진이 촬영된 위치에 대한 X, Y, Z 방향의 평균 위치 불확도(position uncertainties)는 2개의 댐에 대하여 전부 1cm 미만이었다. 대체적으로 불확도의 크기가 비슷하게 나타난 것으로 보아 촬영된 사진의 위치정보는 안정적으로 수집된 것으로 판단된다.

2.2 현실 모델링 결과

드론 Photogrammetry 기술을 활용하여 3D 메쉬 모델, 정사 영상(orthomosaic image), 수치표면모델(DSM; Digital Surface Model)을 획득하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 구축된 3D 디지털 모델을 기반으로 생성된 JAR댐과 YCN댐의 3D 메쉬 모델이다. 생성된 댐체 정사영상과 수치표면모형의 평균 해상도는 약 1 cm/pixel로 확인되었으며, 이는 육안조사에 의한 안전점검에 비해 매우 신뢰할 수 있는 3차원 디지털 데이터를 제공할 수 있음을 알 수 있다. 생성된 3D 디지털 모델은 인력으로 접근이 어려운 곳을 포함하여 정확한 공간상의 수치정보를 제공하고, 텍스처를 입힌 모델의 경우 현장 상황을 그대로 반영한 정밀한 정보를 파악할 수 있으므로 댐의 안전점검에도 활용 가능하도록 양호한 품질 수준을 제공함을 확인하였다. GCP 측량을 병행하였기 때문에 특정 지점에서의 절대 좌표와 표고 정보의 직관적인 확인도 가능하였다. 또한 댐의 연직높이가 42 m, 99.9 m에 달함에도 불구하고 댐마루에서 드론 임무비행으로부터 얻은 3D 디지털 모델은 댐 하류부의 특성 파악에 큰 왜곡없이 데이터 취득이 가능함을 알 수 있었다.

연구 대상 댐들의 상이한 고저차와 식생 및 저수지 수면 분포, 양안부 급경사지의 존재 및 댐 하류 수력발전시설의 영향에도 불구하고, 전반적으로 상세한 안전점검이 가능한 수준의 3D 디지털 모델을 생성하였다. Fig. 3의 우측부는 YCN댐 직상류 측에 존재하는 모닝글로리형 여수로의 3D 디지털 모델을 보여준다. 일반적으로 인력의 접근이 어려운 댐 시설물이지만, 드론 photogrammetry 기술로 매우 효과적으로 디지털 모델을 구현함을 알 수 있다.



Fig. 2 3D Mesh Model of JAR Dam



Fig. 3 3D Mesh Model of YCN Dam

3. 댐 안전점검 적용성 연구

드론 photogrammetry로 구현한 2개 댐의 3D 디지털 모델의 품질은 양호하였으나, 이러한 성과물을 연구단계가 아닌 실무적으로 댐 안전점검에 활용할 수 있을지에 대해서는 별도의 고찰이 필요하다. 본 연구에서는 데이터 기반의 댐 안전점검을 추구하기 위한 방법론으로서 댐 변형 여부 진단을 위한 프로파일(profile) 분석과 콘크리트 시설물에 대한 균열 및 손상 분석 DB화 방법에 대해 적용성을 고찰하고 방법을 제안하였다.

3.1 Profile 분석

연구 대상 댐들에 대한 3D 디지털 모델을 GIS 프로그램을 사용하여 기하학적 변형 정보를 파악하였다. 현행 안전점검이나 진단에서는 필수적으로 명시되어 있지 않으나, 댐의 종단 및 횡단 선형은 시공 도면과의 비교를 통해 실제 축조된 양상을 확인할 수 있고, 댐의 침하나 수평변위 등 정기적인 드론 현실 모델링에 의해 변형 여부를 파악할 수 있어 유용하다.

JAR댐 및 YCN댐에 대한 드론 photogrammetry 기반 댐 마루 표고 종단 선형 프로파일과 댐 상하류 방향의 횡단 프로파

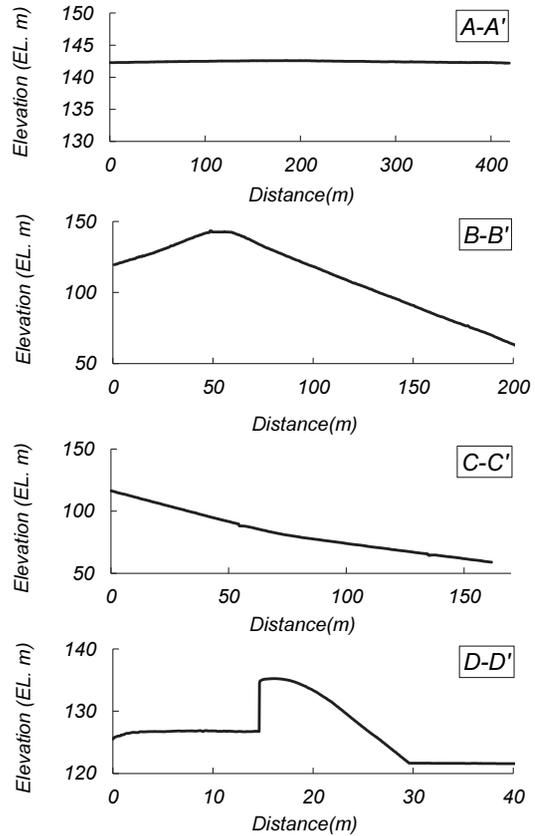
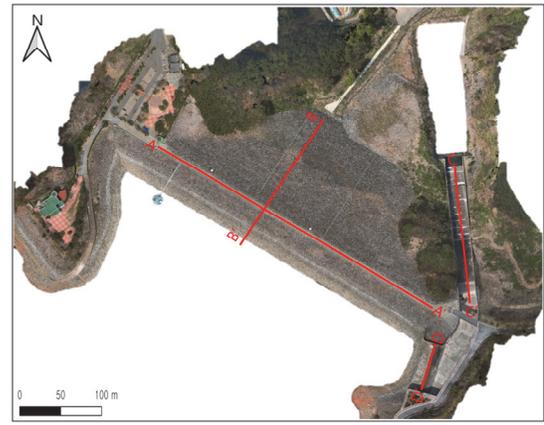


Fig. 4 Profile Analysis using Digital Surface Model of JAR Dam

일 등을 분석하였다. 기존 안전점검 체계에서는 파악되지 않는 방식이라는 점에서 차별성을 갖는다.

JAR 댐의 as-built 프로파일은 Fig. 4와 같다. 프로파일 분석을 실시하기 위해, A-A' 단면은 댐마루 표고의 종단 선형을 나타내며, DSM에서 추출된 단면의 표고는 평균 EL. 115.82m였다. 이는 고시된 댐마루 표고 값 EL. 115.0m와 거의 일치하는 값이다. 댐 상하류 방향 횡단 선형으로서 B-B' 단면의 분석결과 as-built 경사는 약 1:1.8임을 확인하였다. C-C' 단면은 여수로 바닥판 슬래브의 종단 선형 프로파일이며, 대체로 급격한 변형 없이 일정한 선형을 유지하고 있다.

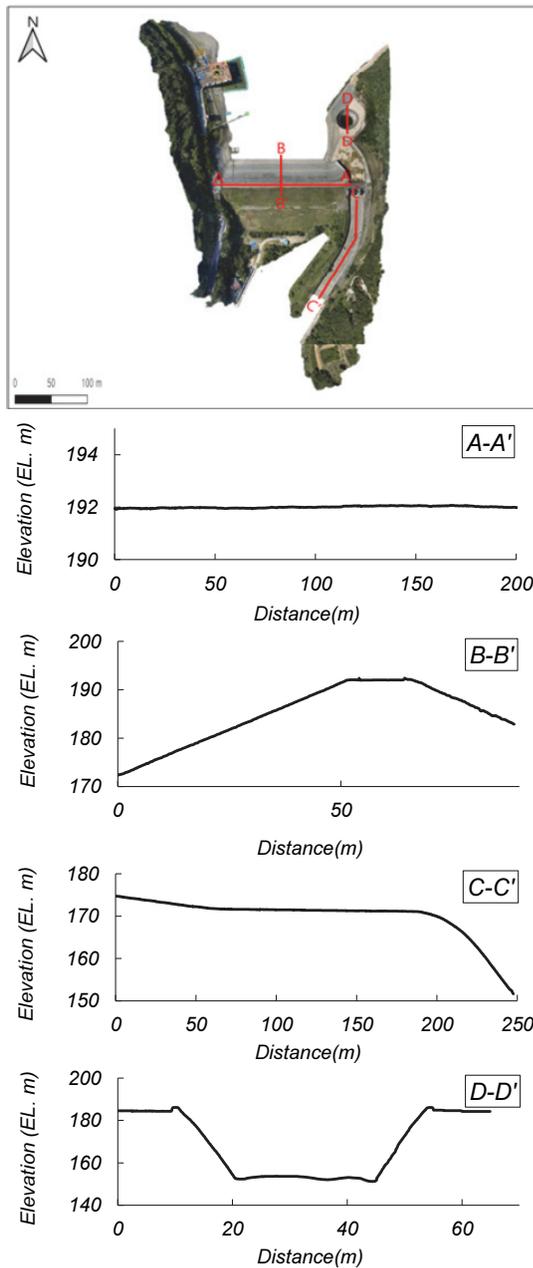


Fig. 5 Profile Analysis using Digital Surface Model of YCN Dam

YCN 댐의 프로파일 분석을 실시하기 위한 단면은 총 4개로, 댐 마루의 종단 선형 표고를 측정하기 위한 A-A' 단면과 댐과 여수로의 기하학적 상하류방향 선형을 확인하기 위한 B-B' 단면과 C-C' 단면, 그리고 인력접근이 극히 제한되는 모닝글로리형 보조여수로의 형상을 확인하기 위한 D-D' 단면으로 구분하였다(Fig. 5). 수치표면모형에서 추출된 A-A' 단면의 평균 표고는 WGS 1984 좌표계를 사용했을 때 약 EL. 162.54m였다. 이는 고시된 댐 제원의 댐마루 표고인 EL. 162m와 매우 유사한 수치임을 확인할 수 있었다. YCN 댐의 준공시 도면에는 댐 상류 사면 경사가 1:2.53으로 나타났는데, B-B'

Table 3 Damage information analysis results

Dam	Crack	Leakage	Damage	Exposure of Rebar
JAR	0	0	0	0
YCN	1 sites	6 sites	2 sites	0

단면의 분석결과 as-built 경사는 약 1:2.61로서 도면보다 다소 완만한 선형임을 확인하였다. C-C' 단면은 여수로 바닥판 슬래브의 종단 선형 프로파일이며, 대체로 급격한 변형 없이 일정한 선형을 유지하고 있다. D-D' 단면은 모닝글로리형 콘크리트 구조물 횡단 선형으로 실제 선형을 드론 photogrammetry로 양호하게 구현함을 확인할 수 있다. 여기서 모닝글로리 여수로의 위어정고는 약 EL. 156.67m로 나타났으며, 고시된 위어정고 156.8m와 비교했을 때 매우 유사한 수치임을 확인할 수 있었다.

향후 정기적인 드론 현실모델링이 수반된다면 드론 photogrammetry 기반의 댐 프로파일 분석은 현행 안전점검과 진단에서 중요한 관찰 항목인 댐체 변형 여부 파악이 가능함을 알 수 있었다. Photogrammetry 기술은 효과적으로 댐마루 표고 및 종단선형, 댐 상하류 방향 횡단 변형 모니터링, 댐 여수로 선형의 준공도면과의 비교분석 등에 유용하며, 접근 제약지역에서 인력조사의 한계를 극복하고, 댐의 안전점검에 효과적일 수 있음을 확인하였다.

3.2 균열 및 손상 분석

댐은 콘크리트 여수로와 수문, 취수구조물, 관리시설, 수력발전시설 등 다양한 콘크리트 구조물을 포함한다. 그러나 여수로 및 취수탑과 같은 구조물은 인력 접근에 의한 균열, 백태, 박리박락, 누수, 철근노출 등 손상을 파악하고 매핑하는 것이 용이하지 않다.

본 연구에서는 드론 photogrammetry 기술로 구현한 3D 디지털 모델을 활용하여 2개 댐의 손상정보를 검토하였다. 댐 손상검토는 크게 본댐과 여수로 2개로 구분하여 실시하였다. 앞서 기술한 바와 같이 본 논문의 목적상 드론 photogrammetry 기반 댐 안전점검의 실무활용적 측면에서의 적용성을 예비 검토하기 위하여, 검토기준은 댐마루 육안점검 시 식별가능한 수준의 길이 1m 이상 가시 균열 또는 누수와 약 0.25 m² 이상 파손(박리, 박락, 탈락), 철근노출 등 4가지 유형으로 구분하여 연구를 수행하였다. 결과는 Table 3과 같다. 전체적으로 인력 접근이 제한되는 댐 콘크리트 구조물에 대한 손상 정보를 효과적으로 검출 및 매핑할 수 있었다. 현재 AI를 활용한 균열 검출 연구가 활발하게 이루어지고 있으므로, 향후 주목할만한 검출율 및 재현율의 향상이 기대된다.

본 연구에서는 원거리 육안 식별이 어려운 미세 균열이나



Fig. 6 Detailed Damage Identification of YCN Dam Spillway

손상보다는 쉽게 식별이 가능한 주요 균열 및 손상에 집중하였음을 밝혀 둔다. 만약 높은 GSD의 드론 photogrammetry를 적용한다면 미세 균열이나 손상도 파악이 가능하다. 예를 들어 본 연구에서 사용한 4K 급 영상 촬영, 구조물로부터 5 m 이내 근접 호버링(hovering)과 자동초점 촬영이 가능한 드론의 경우, 현장 경험을 통해 GSD 5 mm/pixel 정도의 균열을 이미지 정보로부터 검출할 수 있었다.

Fig. 6은 YCN 댐의 여수로 손상 정보를 보여준다. 손상 부위 및 양상은 단순 이미지가 아닌, 텍스처를 입힌 디지털 공간 정보 데이터이기 때문에 균열과 누수 손상정보를 확대하였을 때 보다 상세히 식별이 가능하다. DSM에 위치정보와 표고정보가 포함되어 있으므로, 손상 부분의 길이와 면적, 체적 표현이 가능하다. 이와 같이 디지털 현실 모델링은 접근이 어려운 구조물의 손상 여부를 정밀하게 파악할 수 있으며, 따라서 댐의 안전점검 및 진단에 긍정적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 손상 정보 데이터 구조화 방안

댐의 안전점검 결과를 디지털 전환하기 위해서는 변형이나 손상 정보를 직관적으로 디지털화하고 데이터화하는 연구를 진행하였다. 또한 디지털 데이터는 추적 관리가 가능하게 해야 하므로 본 연구에서는 댐 콘크리트 시설물의 균열 및 손상 정보를 3차원 공간상에서 시각적으로 디지털 데이터화하고, 향후 이력 관리를 위한 관계형 데이터베이스 구조화를 시도하고 제안하고자 한다.

드론 photogrammetry의 최종결과물로 산출된 수치표면모형과 정사영상을 활용하여 주요 균열 등 콘크리트 손상정보를 디지털화하기 위해, 2개 댐의 외관조사망도를 디지털화(digitizing)하였다. 금번 연구에서는 콘크리트 구조물 표면의 시각적으로 인지가능한 주요 손상정보를 디지털화하는 것을 목표로 설정하였다. 미세균열이나 정밀안전점검 및 진단에서 목표로 하는 상태평가를 위한 상세 외관조사망도 작성은 photogrammetry 기술의 GSD와 관련하여 추후 확장적 연구가 필요하므로 본 연구에서는 시각적으로 확인가능한 균열 및

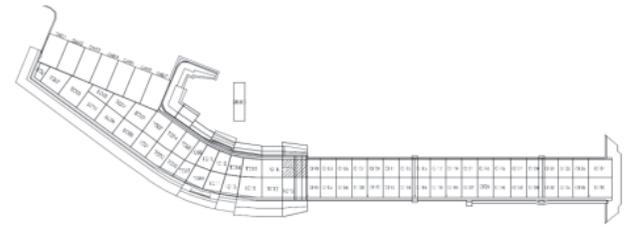


Fig. 7 Inspection Grid Map of JAR Dam Spillway



Fig. 8 3D Spatial Projection of Digitalized Deterioration Data for Dam Concrete Structures

손상에 대한 안전점검 결과를 가시화하였다. 시범적으로 여수로 바닥판 슬래브에 한정하여 디지털화를 진행하였다.

Fig. 7은 안전점검이나 진단에 사용하는 JAR 댐의 콘크리트 여수로 외관 조사망도를 3차원적으로 배치한 결과를 보여준다. 단회적으로 생성된 디지털 외관 조사망도 및 입면 정사영상은 향후 안전점검 시 영구적으로 활용가능하다. 경우에 따라 종래의 2D 외관 조사망도는 본 연구 대상 댐들에 대해 실제 축척과 스케일의 실물 구조물에 적용하였을 때 기하학적 왜곡이 발생하는 경우가 대부분임을 발견하였다. 따라서 신축이음부 및 시공이음부를 고려하여 종래의 조사망도를 금번의 디지털 현실 모델링 결과에 최대한 가깝게 투영하였다.

콘크리트 구조물 표면의 손상정보를 3차원 공간정보화하기 위해 Fig. 8과 같은 과정을 제안한다. 먼저 2차원 정사영상에서 균열, 백태, 박리박락, 누수, 철근노출 등 콘크리트 표면의 손상정보를 생성한다. 본 연구에서는 손상정보를 기수행된 정밀안전진단 보고서를 참조하여 작성하였다. 기하보정이 수행된 정사영상은 각 픽셀별로 위치정보를 포함하므로 생성

ID	Shape	DamageCode	Length	Zone	IsRepaired	RepairID
1	Polyline	000001	4.67	BL01	True	R0001
2	Polyline	000011	7.83	BL01	True	R0002
3	Polyline	000001	3.33	BL01	True	R0003
4	Polyline	000001	2.52	BL02	False	Null
5	Polyline	000001	1.1	BL02	True	R0004
6	Polyline	000101	0.3	BL02	True	R0005
...

DamageCode	Type	RepairID	Shape	Area	ProcessedDate
000001	Crack	R0001	Polyline	10.7	Oct 5, 2021
000010	Efflorescence	R0002	Polyline	49.8	Oct 5, 2021
000100	Leakage	R0003	Polyline	10.3	Oct 5, 2021
001000	Scaling/Spalling	R0004	Polyline	5.5	Oct 5, 2021
010000	Exposure of rebar	R0005	Polyline	3.2	Oct 5, 2021
100000	Cavity	R0006	Polyline	1.1	Oct 5, 2021
...

Fig. 9 Relational Database of Deterioration for Dam Concrete Structures

된 손상정보도 위치정보를 포함하는 2차원 공간정보가 된다. 최종적으로 2차원 손상정보를 수치표면모형에 투영하면 손상정보의 형태를 구성하는 각 점의 위치에 해당하는 표고를 알 수 있어 3차원 공간정보화가 가능하다.

콘크리트 구조물의 표면 손상정보의 속성(길이, 면적, 종류 등)을 부여하기 위해 Fig. 9와 같이 관계형 데이터베이스 구조를 고려하였다.

손상 코드의 경우, 복합적으로 나타날 수 있는 다양한 손상 종류가 있으므로 이를 체계적으로 분류하기 위해 이진화된 코드를 사용하여 관리할 수 있도록 하였다. 균열과 백태가 복합적으로 나타났을 경우 균열 코드에 해당하는 000001과 백태 코드에 해당하는 000010의 AND연산 결과인 000011의 코드로 나타낸다. 이를 10진수로 표현하면 균열 코드의 10진수에 해당하는 1과 백태 코드의 10진수의 해당하는 2의 합인 3과 같다. 이를 통해 복합적으로 나타나는 손상을 효과적으로 구분하여 관리할 수 있다. 또한 모든 손상정보는 별도의 보수보강여부와 보강정보를 참조할 수 있게 하여 그 정보를 확인할 수 있도록 하였다. 보강정보 표는 보강 형태를 폴리곤(Polygon)과 면적으로 나타내고, 처리된 일시로 구성된다. 모든 손상정보는 그 종류에 따라 구분하여 가시화 할 수 있으며, 각 손상에 대한 기하학적 크기(길이, 면적 등)를 산정할 수 있다. 또한, 손상의 통계를 외관조사망도 상의 구역이나 손상종류별로 정량화 할 수 있을 뿐만 아니라, 시간의 따른 변동 등 이력 관리가 가능하도록 제한한다.

Fig. 10은 photogrammetry로 식별가능한 균열 및 손상을 여수로 3D 디지털 모델상에 조사망도와 함께 매핑한 결과를 보여준다. 주요 손상정보는 대부분 지배적인 균열 보수보강 부위를 따라 분포하고 있음을 알 수 있다. 이렇게 디지털화된 모든 손상정보는 그 종류에 따라 구분하여 가시화 할 수 있고 각



Fig. 10 3D Digitalized Safety Inspection Map of JAR Dam Spillway

손상에 대한 기하학적 정보(길이, 면적, 부피 등)를 산정할 수 있다. 더하여 손상의 통계를 외관조사망도상의 구역이나 손상종류별로 정량화 할 수 있을 뿐 아니라, 시간에 따른 변동 등 이력 관리가 가능하다.

따라서 향후 인력접근이 제한되거나, 고소작업의 위험성을 동반하는 중대형 댐 시설물의 안전점검 및 진단 업무에 이러한 드론 photogrammetry 기반의 3D 디지털 손상 정보 시각화와 관계형 손상 정보 데이터베이스는 생산성과 데이터의 신뢰성 측면에서 유용할 것으로 판단된다.

4. 생산성 향상 효과 분석

드론 photogrammetry 기술에 의한 대형 댐 시설물의 안전점검(현장 외관조사)의 생산성을 기존 인력조사 위주 점검 대비 검토하기 위해 국내 최대 높이의 SYG댐 여수로를 대상으로 시간과 노동력을 실측하였다. 생산성의 측정 방법으로, 첫 번째로는 인력에 의한 안전점검, 두 번째로는 드론 photogrammetry에 의한 안전점검을 수행하였다. SYG댐 여수로는 연직 높이 115.5 m, 도수로 경사 1:1.7, 시설물 수평 길이 213 m의 거대한 구조물이다.

4.1 인력 안전점검 생산성 측정

기존의 안전점검 현장조사 방식은 주로 인력에 의한 접근 가능지역 육안점검 및 접근제한지역 안전장비 활용한 육안조사로 균열 등 손상부 종이야장에 매핑을 수행하고 실내에서 다시 CAD 상에 매핑 수작업 후 상태평가표와 사진대지, 수량산출 및 보수보강 물량 산출 등을 전부 수작업으로 수행하게 된다.

본 연구에서 인력 안전점검 현장조사는 기존의 정밀안전점검 수준의 외관 상태조사 방법을 추종하여 수행하였다. 외관조사 영역은 SYG댐의 댐체를 제외한 여수로만을 대상으로 하였다. 정밀안전점검에서 수행하는 반발경도시험과 철근탐사 등의 현장시험은 일부 영역에 대해서 수행하였다.

인력 현장조사를 위해 실제 출장 기록과 내업 기록을 정리하고 시간을 측정하였다. 기준이 되는 거리는 대전-춘천이며, 점검에 투입된 인력은 매회 3명 단위를 기본으로 하였다. 댐 여수로의 경사가 매우 가파르고 안전 문제의 위험이 있어서 로프 등 안전장구의 도움을 받아 최대한 면밀한 조사가 이루어졌다. 현장조사 결과는 내업을 통한 손상 부분 정리 및 캐드파일 작성, 그리고 보고서 작성까지 추가 작업일수가 소요되었다.

결과적으로 기존 인력에 의한 SYG댐 여수로의 정밀안전점검 수준 현장조사는 외업 28 인.일, 내업 34 인.일이 소요된 것으로 집계되었다.

4.2 드론 Photogrammetry 안전점검 생산성 측정

SYG댐 여수로에 대하여 드론 디지털 매핑 기술을 활용한 안전점검을 최초로 실증 수행하였다. 여수로는 평균 GSD 1.08 cm/pixel의 해상도로 드론 매핑하였다. 자동임무비행은 중복도 75%, 수평면에서 카메라 각도 70°로 수행하였으며, 수동임무비행을 겸하였다. 드론 매핑 안전점검을 수행한 외업과 내업에 대한 기록을 면밀히 정리하였으며, 그 결과 실제 여수로 시설물에 대한 드론 매핑 외업에는 12 인.일, 후처리를 포함한 내업에는 20 인.일이 소요된 것으로 집계되었다. 내업에 상대적으로 시간이 많이 소요된 것은 아직까지 자동 상태평가 또는 수량 검출 자동화, 자동 AutoCad 조사망도 작성 등의 기능은 수작업으로 진행되는 수준이기 때문이다. 하지만, 기존에 주관적인 종이야장을 디지털 수치정보화하는 지난한 과정은 3D 디지털 공간정보 모델을 활용한 정확한 수치 정량화로 데이터의 신뢰성이 획기적으로 개선될 수 있음을 확인하였다.

4.3 생산성 비교 분석

SYG댐 여수로 시설물에 대하여 인력 외관조사와 드론 photogrammetry 기반 조사의 생산성을 비교 분석하였다 (Table 4). 결과적으로 드론 photogrammetry 기술을 활용한

SYG댐 여수로 시설물 안전점검은 외업과 내업을 포함하여 생산성(투입 노동력 및 시간)을 인력 점검 대비 48% 개선한 것으로 나타났다.

여수로 시설물 현장조사 외업 기준으로 볼 때에는 인력 점검 대비 57%, 내업 기준으로는 41% 개선 효과가 있었다. 결론적으로 드론 디지털 매핑 기술을 활용한 시설물 안전점검은 혁신적인 생산성 향상 효과가 있음을 실증하였다. 단, 본 생산성 효과 분석은 SYG댐 여수로 안전점검이라는 단일 사례에 국한한 성과임을 밝혀둔다.

5. 결론

본 연구에서는 2개 대형 댐에 대하여 드론 photogrammetry 기반의 3D 현실 모델링을 수행하고, 실무적인 댐 시설물의 안전점검 활용성을 검토하고 방법론을 제안하였다. 실제 댐 환경에서 photogrammetry를 위한 임무비행 제약 사항을 고려할 때, 적절한 품질의 댐 3D 모델을 보장할 수 있는지를 조사하였다. 또한 기존의 인력 측량 방식에서 제약이 있던 중형단 선형 프로파일 분석의 적용 가능성에 대해서도 분석하였다. 댐 콘크리트 시설물의 3차원 균열 및 손상 시각화를 위한 방법론을 제안하였으며, 드론 photogrammetry를 기반 댐 현장조사의 생산성을 종래의 인력 점검의 경우와 정량적으로 비교하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

연구 대상 댐은 연직 높이 42 m, 99.9 m의 상당한 고저차와 댐 상류 저수지 수면의 존재, 댐 하류 수력발전시설의 전자기장 간섭, 양안부 급경사지 사면의 존재에도 불구하고 댐마루에서의 평면적인 더블그리드(double grid) 임무비행 및 일부 수동 촬영으로 평균 GSD 2.5 cm/pixel 이내의 양호한 해상도로 photogrammetry 3D 현실 모델링이 가능함을 확인하였다.

드론 photogrammetry에서 얻어진 3D 메쉬 모델, 정사영상, 수치표면모형(DSM)을 통해 인력 접근이 어려운 영역의 시설물(저수지 인근 댐 상류 사면, 여수로, 취수탑, 보조여수로 등)에 대한 고정밀 디지털 시각화와 사진측량이 가능하였고, 디지털 데이터를 통한 표고, 좌표, 길이, 면적, 부피 측정과 같은 데이터 정량화 작업이 가능하였다.

댐의 안전점검 적용성 연구를 위해, 2개 댐 본체에 대하여 댐마루 중단 선형, 댐 상하류 방향 횡단 선형 등을 3D 모델에

Table 4 Productivity comparison of safety inspection for SYG dam spillway (unit: man.day)

Inspection method	Labor and time (man.day)			Productivity improvement (%)		
	Field work	Office work	Total	Field work	Office work	Total
Human inspection	28	34	62	57	41	48
Drone photogrammetry inspection	12	20	32	-	-	-

서 추출하였으며, 이는 향후 변형 여부 검토 및 모니터링에 효과적일 것으로 나타났다.

또한 고소작업의 위험성과, 접근성이 제약되는 댐 콘크리트 시설물에 대하여 균열 및 손상부를 효과적으로 검출하고 매핑가능함을 확인하였다.

댐 시설물의 손상을 3D 디지털 모델 상에서 시각적으로 디지털화하는 외관조사망도 작성과 관계형 데이터베이스 구조화로 손상 정보를 이력 관리할 수 있는 기법을 제안하였다.

SYG댐 여수로를 대상으로 기존 인력 안전점검 방법과 드론 photogrammetry 기반 안전점검 방법을 적용하여 투입된 노동력과 시간을 실측한 결과, 드론 photogrammetry 기술에 의한 생산성 향상 효과가 48%로 측정되었다.

드론 photogrammetry 기반의 댐 안전점검 적용성은 매우 양호한 것으로 판단되었으며, 본 연구에 제시한 성과와 제안은 향후 댐 안전점검의 디지털화를 통해 생산성과 데이터 신뢰성 향상에 기여할 것으로 검토하였다.

다만 드론 photogrammetry 기술은 사진 촬영 시 움직임이 존재하는 수면이나 식생 부분에 대해서는 정확히 후처리되지 않으므로 모델 생성 시 유의할 필요가 있다. 향후 촬영 조건에 따라 성과물의 품질이 결정되므로 이와 관련된 촬영 조건에 대한 최적화 연구가 필요할 것이다. 또한 디지털 시각화는 시범적으로 여수로 바닥판 슬래브와 페이스 슬래브 등 평면적 구조물을 대상으로 진행하였으므로, 벽체와 같은 수직 구조물의 손상정보를 디지털화 할 수 있는 방안도 함께 연구할 필요가 있다.

감사의 글

드론 photogrammetry 기술의 댐 현장 적용과 3D 모델 후처리 작업은 저자 이외에 K-water 연구원 김태민, 이지은, 정동규, 안재찬 연구원의 참여로 이루어졌으며, 감사를 전합니다. 본 연구는 과학기술정보통신부 ICT융합산업혁신 개발 사업(과제번호 2021-0-00751, 0.5mm 급 이하 초정밀 가시·비가시 정보 표출을 위한 다차원 시각화 디지털 트윈 프레임워크 기술개발, 2021.04~2024.12)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Angeli, S., Lingua, A. M., Maschio, P., Piantelli, L., Dugone, D., and Giorgis, M. (2019), Dense 3D model generation of a dam surface using UAV for visual inspection. *Advances in Service and Industrial Robotics: Proceedings of the 27th International Conference on Robotics, Alpe-Adria Danube Region (RAAD 2018)*.
2. Capolupo, A., Pindozi, S., Okello, C., Fiorentino, N., and Boccia, L. (2015), Photogrammetry for environmental monitoring: The use of drones and hydrological models for detection of soil contaminated by copper, *Science of the Total Environment*, 514, 298-306.
3. Cavalagli, N., Gioffrè, M., Grassi, S., Gusella, V., Pepi, C., and Volpi, G. M. (2020), On the accuracy of UAV photogrammetric survey for the evaluation of historic masonry structural damages, *Procedia Structural Integrity*, 29, 165-174.
4. Habeenzu, H., McGetrick, P., Hester, D., Taylor, S., and Wong, L. (2020), Towards automated UAV assisted bridge inspections using photogrammetry and image processing techniques. *Civil Engineering Research in Ireland 2020, Bridges - Modelling & Monitoring 1*, August 27, 2020, Cork Institute of Technology.
5. Henriques, M. J., and Roque, D. (2015), Unmanned aerial vehicles (UAV) as a support to visual inspections of concrete dams, *The Second International Dam World Conference*.
6. Huang, T., Ke, F., and Xu, Z. (2023), A dam surface deformation monitoring method based on concentric circle center location algorithm, *Available at SSRN 4335581*, Elsevier, in preprint.
7. Jung, J. D., Lee, J. H., and Choi, J. W. (2021), Detection technology for gap of expansion joint in road bridges using drones, *Journal of the Korean Society of Structural Integrity and Maintenance*, 25(4), 435-444 (in Korean).
8. Khaloo, A., Lattanzi, D., Jachimowicz, A., and Devaney, C. (2018), Utilizing UAV and 3D computer vision for visual inspection of a large gravity dam. *Frontiers in Built Environment*, 4. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00031>.
9. Kim, H. K., Park, J. Y., Jung, J. D., Lee, J. H., and Choi, J. W. (2021a), Development of defect detection technology for tunnels using drones, *Journal of the Korean Society of Structural Integrity and Maintenance*, 25(4), 455-464 (in Korean).
10. Kim, I. B., Park, J. Y., Kim, T. H., Jung, J. D., Lee, J. H., and Choi, J. W. (2023), Development of measurement equipment for stability assessment of rock slopes using drones, *Journal of the Korean Society of Structural Integrity and Maintenance*, 27(1), 39-48 (in Korean).
11. Kim, J. Y., Park, J. Y., Jung, J. D., Lee, J. H., and Choi, J. W. (2021b), Development of crack and corrosion detection technology for concrete structures using drones, *Journal of the Korean Society of Structural Integrity and Maintenance*, 25(4), 445-454 (in Korean).
12. Kim, T. H., Park, J. Y., Jung, J. D., Lee, J. H., and Choi, J. W. (2021c), Development of safety inspection technology for railway facilities using drones, *Journal of the Korean Society of Structural Integrity and Maintenance*, 25(4), 465-474 (in Korean).
13. Ko, P., Prieto, S., and de Soto, B. G. (2021), ABECIS: An automated building exterior crack inspection system using UAVs, open-source deep learning and photogrammetry. *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, pp. 637-644, Dubai, UAE.
14. Koskinas, A., Tegos, A., Tsira, P., Dimitriadis, P., Iliopoulou, T., Papanicolaou, P., Koutsoyiannis, D., and Williamson, T. (2019), Insights into the Oroville dam 2017 Spillway incident, *Geosciences*, 9(1), 37.

15. K-water Research Institute, (2019), Preliminary Development of Next-Generation Intelligent Dam Safety Management Platform (iDSP) (I), 2019-WR-RR-381-1750, K-water (in Korean).
16. K-water Research Institute, (2021), Development of Digital Twin Visualization Framework for Addressing Ultra-precise Visible and Invisible Information(I), 2022-WR-RR-20-84, K-water (in Korean).
17. K-water Research Institute, (2022), Development of Digital Twin Visualization Framework for Addressing Ultra-precise Visible and Invisible Information(II), 2022-WR-RR-441-2221, K-water (in Korean).
18. Latrubesse, E. M., Park, E., Sieh, K., Dang, T., Lin, Y. N., Yun, S.-H. (2020), Dam failure and a catastrophic flood in the Mekong basin (Bolaven Plateau), Southern Laos, 2018, *Geomorphology*, 362, 107221.
19. McCann, M. (2018), Dam failures in the U.S., National performance of dams program, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Stanford University.
20. Min, J. Y., Park, J. Y., Jung, J. D., Lee, J. H., and Choi, J. W. (2021), Development of safety inspection technology for port facilities using drones, *Journal of the Korean Society of Structural Integrity and Maintenance*, 25(4), 475-484 (in Korean).
21. Ministry of Environment, (2018), The first step toward sustainable water management, Press Release (in Korean).
22. Ministry of Environment, (2021), Smart Dam Safety Management, Press Release (in Korean).
23. Park, D. S. (2021a) "Drone application for water infrastructure reality modeling." The 9th International Symposium on Environmental Hydraulics, July 19-21, 2021, Seoul, Korea, ISEH.
24. Park, D. S. (2021b), Toward digitalization of smart maintenance for water infrastructures, *KSCE Magazine*, 69(3), 20-36 (in Korean).
25. Park, D. S., and Oh, J. (2016), Potential hazard classification of aged cored fill dams, *Journal of Engineering Geology*, 26(2), 207-221 (in Korean).
26. Park, D. S., and Oh, J. (2018), Permeation grouting for remediation of dam cores, *Engineering Geology*, 233, 63-75.
27. Park, D. S. (2020), Dam Safety & Digital Transformation, *KSCE Magazine*, 68(9), 16-30 (in Korean).
28. Park, D. S. (2022), "Wise digital twin dam & river platform." *Weekly ICT Trends*, 2041, 2-14, 2022.04.13., IITP (in Korean).
29. Rose, R. L., Mugi, S. R., and Saleh, J. H. (2023), Accident investigation and lessons not learned: AcciMap analysis of successive tailings dam collapses in Brazil, *Reliability Engineering & System Safety*, 109308.
30. Vahedifard, F., AghaKouchak, A., Ragno, E., Shahrokhbadi, S., and Mallakpour, I. (2017), Lessons from the Oroville dam, *Science*, 355(6330), 1139-1140.
31. Yang, J. A., Kim, H. K., and Choi, J. W. (2021), Development and application of a specialized drone for inspection of highway bridges, *Journal of the Korean Society of Structural Integrity and Maintenance*, 25(6), 725-734 (in Korean).
32. Yoon, G. H., and Yoon, J. S. (2022), A study on the establishment smart dam safety management platform based on drones, *Journal of Korea institute for Structural Maintenance and Inspection Conference*, 26(2), 221-221 (in Korean).
33. Yu, J. I., Park, D. S., Lee, J. E., You, H. J., Kim, T. D., and Jeon, J. H. (2022), A study on the 3D reality modeling of dam using drone photogrammetry technology, *Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences Conference*, 78(1), 149-150 (in Korean).

Received : 05/09/2023
 Revised : 09/20/2023
 Accepted : 09/22/2023

요 지 : 국가의 중요 방재시설인 대형 댐 시설물은 노후화와 홍수, 지진 등의 위험으로 디지털 전환 기술을 적용한 보다 나은 댐 안전점검 및 진단이 필수적이다. 종래의 인력에 의한 육안 안전점검 방식은 인력 접근의 어려움과 고소작업의 위험성, 노하우 중심의 점검에서 오는 데이터의 신뢰성 등의 문제가 있었다. 본 연구에서는 2개 대규모 댐 시설물을 대상으로 드론 photogrammetry에 의한 디지털 데이터 기반 댐 안전점검의 적용성을 검토하고, 지속적 활용을 위한 데이터 관리 방법론을 제시하였다. 댐 높이 42 m 및 99.9 m의 댐들에 대해 수면 및 전자기장 간섭, 심한 고저차에도 불구하고 평면적 더블그리드 및 수동 촬영 방식으로 GSD 2.5 cm/pixel 이내의 양호한 3D 디지털 모델을 생성하였다. 생성된 3D 메쉬 모델, 정사영상, 수치표면모형으로 as-built 조건의 중단 및 횡단 선형을 손쉽게 추출하여 댐의 변형 모니터링에 효과적임을 확인하였다. 댐 여수로 등 콘크리트 시설물에 대한 디지털 3D 모델로부터 균열 및 손상부를 효과적으로 검출하고 시각화하였으며, 이는 고소작업의 위험성 및 접근 제약 시설의 안전점검에 활용가능하다. 또한 댐의 안전점검 시 외관 조사망도를 3D 디지털 모델 상에서 매핑하는 방법과 손상 정보 이력 관리를 위한 관계형 데이터베이스 구조화 방안을 제안하였다. SYG댐 여수로 안전점검에 대한 투입 노동력과 시간을 실측한 결과, 드론 photogrammetry 방법은 기존 인력 육안점검에 비해 48%의 생산성 향상 효과를 확인하였다. 드론 photogrammetry 기반 댐 안전점검 디지털 전환은 업무의 생산성과 데이터 신뢰성 향상에 매우 효과적인 것으로 판단된다.

핵심용어 : 드론, 댐 안전, 안전점검, 디지털 모델, Photogrammetry
