Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 24, No. 1 pp. 9-18, 2023

https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.1.9
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

실측기반 노후저수지의 퇴사량 산정 연구

원창희, 윤현철*, 김미정, 김원범, 양우현
국립재난안전연구원 방재연구실 국가통합가뭄센터

Study on the Calculation of Sediment of Aging Reservoirs Based on Measurement

Chang-Hee Won, Hyeon-Cheol Yoon*, Mi-Jung Kim, Won-Beom Kim, Woo-Hyun Yang
National Integrated Drought Center, Disaster Prevention Research Division,
National Disaster Management Research Institute

요 약 저수지는 우리나라 농업용수의 약 60% 이상을 공급하는 중요한 수리시설물이며, 가뭄에 효율적으로 대비하기 위해서는 저수지의 퇴적토 준설을 통한 저수량 확보가 필수적이다. 본 연구에서는 노후저수지 5개소를 대상으로 무인드론(UAV)과 무인보트(USV)를 활용하여 측량과 저수량을 분석하였으며, 실무에서 활용중인 범용토양손실공식(RUSLE) 모형을 활용한 연평균 퇴사량 추정치와 비교·분석하였다. 분석 결과 송종저수지는 $657.2m^3$의 차이를 보이며, 와우, 도찬, 가학, 파산저수지는 각각 $1{,}107.5m^3$, $313.9m^3$, $129.5m^3$, $554.0m^3$의 연평균 퇴사량 차이가 발생하는 것으로 분석되었다. 연구 결과 5개 저수지 모두 실측 결과에 비해 RUSLE 모형 결과가 낮게 추정되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 저수지 준설을 위한 퇴적량 산정 시 RUSLE 모형을 활용할 경우 실제 퇴적량에 비해 과소 산정될 수 있다.

Abstract Reservoirs are important facilities that supply more than about 60% of agricultural water in Korea. Securing water storage by dredging is required to prepare for drought efficiently. In the present study, the average annual sediment was estimated by the RUSLE model, and reservoir storage was measured by UAV and USV. The results were compared and analyzed for 5 old reservoirs. The difference between estimated and measured storage was $657.2m^3$ in SongJong reservoir, and the differences for Wow, DoChan, GaHak, and PaSan reservoirs were $1{,}107.5m^3$, $313.9m^3$, $129.5m^3$, and $554.0m^3$, respectively. The result shows that the RUSLE model tends to underestimate sediment compared to the measured storage in the 5 reservoirs. Therefore, if the RUSLE model is used to calculate the sediment for dredging a reservoir, the result may be underestimated compared to the actual sediment.

Keywords : UAV, USV, Ageing Reservoir, Storage Capacity, RUSLE

1. 서론

최근 이상기후의 영향으로 인한 가뭄피해가 전세계적으로 빈번히 발생하고 있으며, 하천과 댐 수위 저하로 고대 유적까지 발견되는 등 언론매체를 통해 지속적으로 가뭄의 심각성이 제기되고 있다. 우리나라의 2022년 5개월(1.1.~5.31.) 누적 강수량(제주 제외)은 전국 평균 160.7mm(평년대비 51.4%)로 1973년 기상관측 이래 최저 2위를 기록하였다[1]. 이로 인해 운문댐과 평림댐, 주암·수어댐은 각각 5월 27일, 8월 21일, 8월 30일부터

본 논문은 행정안전부 국립재난안전연구원의 지원("빅데이터·AI 기반 가뭄 전주기 예측기술 개발", NDMI-주요-2023-01-01)에 의해 수행되었습니다.
*Corresponding Author : Hyeon-Cheol Yoon(National Disaster Management Research Institute)
email: hcyoon82@korea.kr
Received November 9, 2022 Revised December 21, 2022
Accepted January 6, 2023 Published January 31, 2023

가뭄 '심각' 단계에 진입하는 등 가뭄 재난 상황에 직접적으로 영향을 받고 있다. 우리나라의 최근 3년(2018~2020) 동안 농업용수 부족으로 논 물마름과 밭 시듦은 각각 5,376ha, 20,505ha의 면적에서 가뭄피해가 발생하였다. 그리고 생활용수 부족으로 상수도 보급지역과 미보급지역의 피해인구는 각각 105,017명, 27,419명 발생하였다[2]. 이처럼 우리나라는 가뭄으로 인한 피해가 매년 반복적으로 발생하고 있으며, 미국 캘리포니아 가뭄, 호주 밀레니엄 가뭄과 같은 해외 사례처럼 그동안 경험하지 못한 메가가뭄 발생에 대비해야 하는 상황이다. 이러한 가뭄상황에 효과적으로 대비·대응하는 방법은 댐과 저수지 등의 신규 개발을 통한 물그릇을 추가로 확보하는 것이다. 그러나 댐과 저수지 건설은 막대한 예산이 투입되며, 관리인력의 부족과 환경 문제를 유발하는 등의 단점이 있어 신규 개발에 한계가 있다. 따라서 가뭄상황에 대비하여 댐과 저수지를 보다 효율적으로 사용하기 위해서는 퇴적 토사 준설 등 현재 운영중인 시설물에 대한 지속적인 관리가 필수적이라고 할 수 있다.

우리나라의 댐과 저수지는 각각 34개소, 17,106개소이다. 댐은 한국수자원공사에서 다목적댐 20개소, 용수댐 14개소, 저수지는 한국농어촌공사에서 3,421개소를 각각 관리·운영중으로, 지역별 지사와 상주인력을 통해 체계적으로 관리되고 있다. 그러나 지자체에서 관리중인 저수지 13,685개소 중 1970년 이전에 준공되어 내용연수가 50년 이상 경과된 저수지는 12,097개소로, 지자체 관리 저수지의 약 88.4%가 준공 후 50년 이상 경과된 노후저수지이다. 또한 영천시와 의성군에서 관리중인 저수지는 각각 891개소, 642개소로 담당자 1~2명이 관리하는 저수지의 개소수 과다와 예산 부족 등의 이유로 대부분 준공 당시의 제원정보만 관리되고 있는 실정이다[3, 4]. 이러한 노후 저수지는 태풍과 집중호우 등 강우 유출로 발생한 퇴적 토사의 영향으로 제원정보 대비 담수량이 부족하므로, 퇴사량 산정을 통한 지속적인 관리가 필수적이다.

저수지 관리를 위한 퇴사량 산정 방법으로는 크게 4가지로 구분할 수 있다. 첫 번째로 싱글빔, 멀티빔 등의 음향측심기가 장착된 보트를 이용한 측량 결과를 활용한다. 두 번째로 저수지 상류의 유입부로부터 유사량 측정을 통해 산정된 퇴적량을 활용한다. 세 번째로 과거 저수지 측량 결과를 활용하여 개발된 경험공식을 저수지 유역에 적용한다. 마지막으로 자연재해저감종합계획, 사전재해영향평가 등 실무에서 활용중인 RUSLE 모형(수정범용토양손실공식)을 활용하여 산정된 토사유출량을 적용하는 방법이다. 여기서 두 번째 유사량 측정 방법은 실제 퇴적 데이터를 관측함에 따라 정확도 측면에서 유리할 수 있으나, 약 17,000개소 저수지별 유입지점이 다양하며, 모든 지점에 유사량 관측 시스템을 설치·운영하기에는 비용적 측면에서 한계가 있다. 또한 세 번째 경험공식을 활용하는 방법은 대부분 1980~1990년대 저수지 측량 결과를 바탕으로 개발되었으며, Won et al.(2020)의 선행연구에서 무인보트를 이용한 저수지 측량 결과와 경험공식과의 비교·분석을 통해 30~40년 전에 개발된 과거 경험공식으로 퇴사량 산정 시 실측 데이터와 오차가 크게 발생할 수 있음을 제시하였다[5]. 따라서 본 연구에서는 저수지 퇴사량 산정을 위한 다양한 방법 중 유·무인 보트를 이용한 측량 결과를 활용하는 방법과 RUSLE 모형을 활용한 토사유출량을 산정하는 방법과 관련된 선행연구를 살펴보았다.

국내 선행연구에서 Kim(2020)은 풍양저수지를 대상으로 다중빔 음향측심기를 활용하여 3차원 수심측량 후 제원정보의 유효저수량과 실측된 유효저수량 차이 비교·분석을 통해 수십년간 퇴적을 통한 유효저수량 감소를 확인하였다[6]. Won et al.(2020)은 자동항법 기능과 싱글빔이 탑재된 무인수심측량기를 활용하여 저수지 수심측량 간격(10m, 20m, 30m)에 따른 저수량을 분석을 통해 10m 이내의 간격으로 수심측량을 수행해야 저수량 분석의 정확도가 향상 될 수 있음을 제안하였다[7]. Roh(2020)는 음향측심기를 활용한 수심측량 결과를 4가지 보간 방법에 적용하여 각각 저수량을 산정하고, 보간 방법에 대한 정확도 검증을 위해 저수지 방류 후 무인드론을 활용한 지형 자료와 비교·분석하였다. 음향측심기로부터 확보한 수심측량 데이터의 보간 방법 중 Kriging 기법이 약 97%의 높은 정확도를 확보할 수 있음을 확인하였다[8]. Lee(2021)은 춘천시 탄부저수지를 대상으로 드론과 멀티빔 음향측심기가 탑재된 무인보트를 활용하여 저수량을 산정하고, 싱글빔 무인보트로 측량한 결과와 비교·분석하였다. 싱글빔 측량결과와 비교하여 멀티빔으로 측량 시 약 36.8천m^3의 저수량 차이가 발생하였으며, 이를 통해 면으로 데이터를 취득할 수 있는 멀티빔 음향측심기의 관측방식이 정확한 측량 결과를 제시할 수 있음을 제시하였다[9]. Park et al.(2013)은 GIS 기반 수정 범용토양손실공식(RUSLE)을 이용하여 저수지 토사유실을 분석하고, 준설량을 산정하여 저수지의 실제 준설량과 비교·분석하였으며[10], Jee et al.(2017)은 강원도 소재 사방댐 50개소를 대상으로 실측 토사유출량과 RUSLE 모형을 활 용하여 산정된 토사유출량을 비교·분

석하였다[11]. Kim et al.(2022)은 태풍이나 집중호우로부터 토석류 피해 발생지역에 대해 RUSLE, NILIM, Marchi의 경험공식을 각각 적용하여 토사유출량을 산정하고, 지상 LiDAR를 활용한 현장측량 결과와 비교·분석하여 국내에 적용하기에 적합한 경험공식을 제시하였다[12]. 국외에서 Erena et al.(2019)는 무인드론과 싱글빔이 장착된 무인보트를 활용하여 저수지 퇴적량을 산정하였으며, 스페인 남동부에 위치한 SRB(Segura River Basin) 저수지의 저장용량이 연간 0.33%씩 감소함을 확인하였다[13]. Rangel et al.(2019)는 하천과 댐, 저수지 등의 모니터링을 위해 무인드론과 무인보트를 활용한 GIS 통합 지도 생성을 통해 현재의 상태를 확인하고, 관리하기 위한 다목적 환경 도구를 개발하였으며[14], Hu et al.(2018)은 Wohushan 저수지 유역을 대상으로 RUSLE 모형을 활용하여 토양 침식에 대해 분석하였다. 토지 이용에 따른 침식량 산정 결과 건조한 땅과 농경지에서 많은 침식이 발생하였으며, 8°~25°의 경사도에서 토양 침식율이 가장 높음을 제시하였다[15].

선행연구 사례와 같이 과학기술의 발달로 무인드론(UAV, Unmanned Aerial Vehicle) 및 자동항법 기능이 탑재된 무인보트(USV, Unmanned Surface Vehicle)를 이용한 저수지 측량과 RUSLE 모형을 활용한 저수지 유역의 퇴사량을 예측하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 UAV와 USV를 활용한 정밀측량 결과와 자연재해저감종합계획, 사전재해영향평가 등 실무에서 활용중인 RUSLE 모형의 결과를 직접적으로 비교하는 연구사례는 부족한 실정이다. 또한 선행연구인 Park et al.(2013)에서는 저수지의 준설이력을 바탕으로 RUSLE 모형을 활용한 퇴적량과 비교·분석하였으나[10], 정밀 측량을 통한 준설량 산정 결과가 아닌 토사 준설이력을 활용하였기 때문에 실제 퇴적량에 비해 과소·과대 산정될 수 있으며, 정밀 측량 결과를 활용한 본 연구와는 차별성이 있다.

따라서 본 연구에서는 지자체 노후 저수지를 대상으로 무인드론(UAV) 및 자동항법 기능이 탑재된 무인보트(USV)를 활용한 정밀측량 결과와 범용토양손실공식인 RUSLE 모형을 활용하여 추정된 토사량을 비교·분석하였다. 이를 통해 RUSLE 모형을 저수지 유역에 직접적으로 적용할 수 있는지 검토하였으며, 향후 국내 저수지 유역에 적합한 퇴사량 산정 경험식 개발을 위한 기초연구로 활용하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 대상지역

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 전라남도 소재 저수지 5개소(해남군 송종, 장성군 와우, 신안군 도찬, 고흥군 가학, 강진군 파산)를 연구 대상지역으로 선정하였다. 지자체 관리 저수지의 대부분은 관리인력과 예산 부족 등의 사유로 준공 당시의 제원정보를 현재까지 사용중으로, 본 연구에서는 준공당시의 제원정보와 측량 성과와의 비교·분석을 통해 연간 퇴사량을 산정하였다. 저수지 정밀측량 결과로 산정된 연간 퇴사량은 RUSLE 모형을 통해 추정된 토사유출량과 비교·분석하였다.

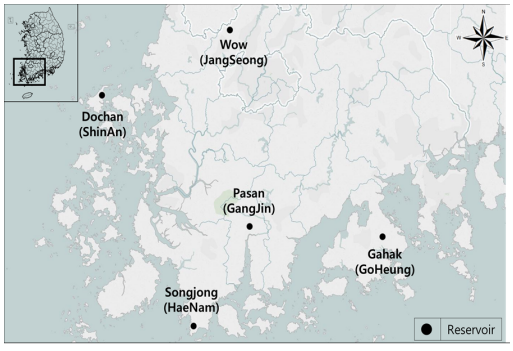


Fig. 1. Study Area

2.2 무인드론과 무인보트를 활용한 퇴사량 산정 방법

본 연구에서는 노후 저수지의 퇴사량 산정을 위해 Fig. 2와 같이 무인드론(UAV)을 활용한 항공측량과 무인보트(USV)를 활용한 수심측량으로 각각 구분하여 수행하였다.

항공측량은 비행 준비, 항공측량, 데이터 추출, 데이터 후처리, 저수지 외곽 경계 추출로 구분된다. 비행 준비 단계에서는 항공안전법에 따라 초경량비행장치 비행승인과 항공촬영을 필수적으로 승인받아야 한다. 항공측량은 현장촬영 사진의 정사영상 결합을 위해 GCP(Ground Control Point, 지상기준점) 측량과 자동항법 기능을 활용한 항공촬영을 각각 수행하였다. 항공측량 결과는 데이터 추출 후 3Dsurvey 프로그램을 활용한 후처리를 진행하며, 포인트클라우드와 정사영상 등의 생성을 통해 최종적으로 저수지의 외곽 경계를 추출하였다. 이러한 항공측량을 통한 저수지 외곽 경계 추출 방식은 기존의 방식인 저수지 절벽 구간을 사람이 직접 GPS를 이용하여 측량하는 것보다 안전하며, 측량 소요시간이 절약되

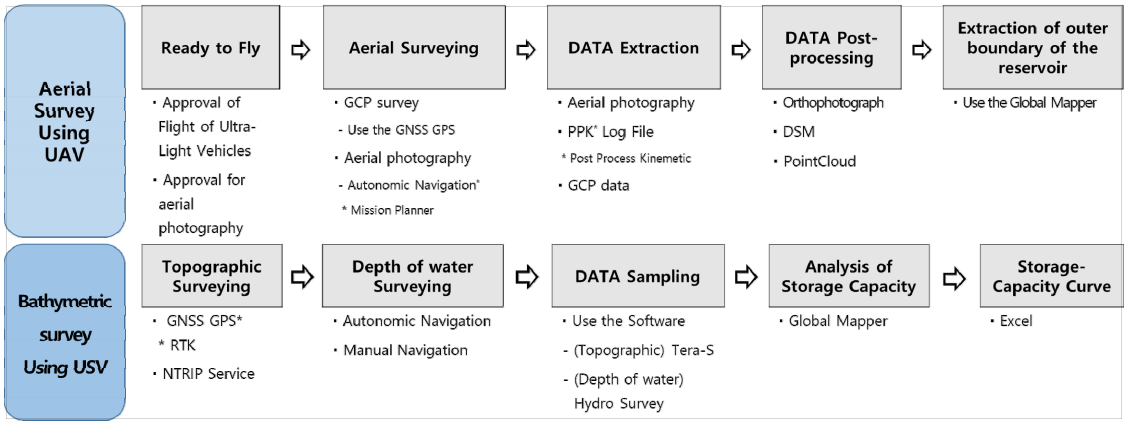
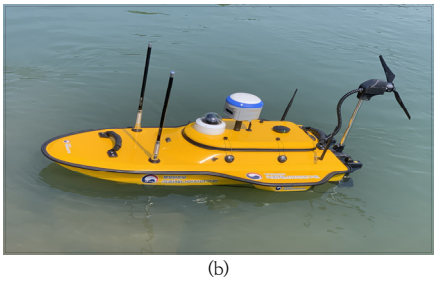


Fig. 2. Survey Process of Ageing Reservoir

는 장점이 있다. 수심측량은 현재 수위와 여수로에 대한 지형측량과 무인보트를 활용한 수심측량으로 진행된다. 여기서 여수로 지형측량은 저수지의 만수위 기준 총 저수량을 분석하기 위해 수행되며, 수심측량은 구글맵 기반의 자동항법 기능을 활용하여 저수지별 10m 이내의 균일한 측량 간격을 갖는 정밀 측량을 수행하였다. 항공측량과 수심측량 결과는 Global Mapper 프로그램을 활용하여 데이터 추출 및 저수량 분석을 통해 수위-저수량 곡선식을 개발하고, 저수지 제원정보와 비교·분석하여 연간 퇴사량을 산정하였다. 본 연구에 사용된 무인드론과 무인보트는 Fig. 3과 같으며, 제원정보는 각각 Table 1, Table 2와 같다.

(a)



(b)

Fig. 3. UAV(a) and USV(b)

Table 1. UAV specifications

Component	Classification	Specifications
UAV	Size	1.68m x 1.52m x 0.76m
	Operating	35Minutes(Maximum)
	Weight	9.1kg(with battery)
	Maximum speed	18m/s
	Maximum altitude	2,000m
	GPS accuracy	x, y: within 1cm, z: within 2cm
Camera	Resolution	42 million pixels

Table 2. USV specifications

Component	Classification	Specifications
Boat	Size	1.1m x 0.42m x 0.25m
	Battery	30,000mAh lithium battery
	Weight	Less than 5kg (without battery)
	Material	FRP + carbon
	Operation speed	5kn(2.6m/s)
	Maximum speed	9kn(4.63m/s)
	System operation	Autonomic Navigation / Manual remote controller
Single beam	Depth use area	minimum 30cm ~ Maximum200m
	Precision	±0.01 m + 0.1% x D (D=Depth)
	Resolution	0.01m
GPS	Precision	±8mm +1ppm RMS (Horizontal)
		±15mm +1ppm RMS (Vertical)

2.3 RUSLE 모형을 활용한 퇴사량 산정

우리나라 재난관리의 주요 쟁점은 자연재해로부터 국민의 생명과 재산을 보호하기 위한 저감대책을 마련하고 실행하는 것이라고 할 수 있다. 현재 자연재해대책법에 따라 시행중인 자연재해저감종합계획과 재해영향평가는 이러한 정책 방향에 부합한 결과물이라고 할 수 있다. 자연재해저감종합계획 세부수립기준(행정안전부 고시 제2019-85호)[16]과 재해영향평가 등의 협의 실무지침(행정안전부 고시 제2021-1호)[17]에 따르면 미국에서 개발된 범용토양손실공식인 RUSLE 모형을 활용한 토사유출량 산정을 통해 토사재해 발생가능성을 검토해야 한다고 명기되어 있다. 따라서 본 연구에서는 RUSLE 모형을 통해 추정된 중량단위 토양침식량을 유사전달률과 단위중량을 고려하여 토사유출량을 산정하고, 저수지 현장측량 결과와 비교·분석하였다. RUSLE 경험식은 다음 Eq. (1)과 같다.

$$A = R \times K \times LS \times VM \quad (1)$$

Where, A denotes soil erosion per unit area (tonnes/ha), R denotes rainfall-runoff erosivity factor($10^7 J/ha{\cdot}mm/hr$), K denotes soil erodibility factor(tonnes/ha/R), LS denotes slope length and slope steepness factor(dimensionless), VM denotes erosion-control factor(dimensionless)

2.3.1 강우침식인자(R)

강우침식인자는 강우의 운동에너지에 의한 토양침식량의 정도를 나타내는 인자로써 저수지 유역 적용을 위해 단일호우사상이 아닌 연평균 강우침식인자를 적용하였다[17]. 연평균 강우침식인자 적용을 위해 표토의 침식현황 조사에 관한 고시(환경부고시 제2019-140호) 별표1의 표토의 침식량 산정 방법에서 제시하는 국내 158개 지점에 대한 연간강우인자를 적용하였다[18].

2.3.2 토양침식인자(K)

토양침식인자 산정을 위해서는 저수지 유역의 토양통에 대한 정보가 필요하며, 국립농업과학원에서 제공받은 1:25000 정밀토양도 자료를 활용하였다. 연구대상 저수지 5개소 중 전라남도 해남군에 위치한 송종저수지에 대한 토양통은 Fig. 4와 같다.

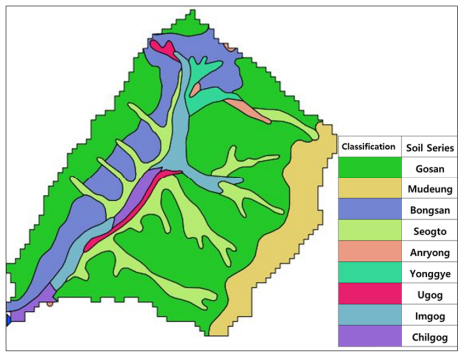


Fig. 4. Soil series(ex. Songjong reservoir)

송종저수지의 토양통은 고산통, 무등통, 봉산통 등 9가지로 분류된다. 각각의 토양통별 면적을 고려한 토양침식인자(K) 산정은 다음 Eq. (2)와 같으며, 표토의 침식 현황 조사에 관한 고시(환경부고시 제2019-140호) 별표1의 표토의 침식량 산정 방법에서 제시하는 국내 대표 토양통에 대한 K값을 적용하였다[18].

$$K = \frac{\sum (K_1 a_1 + K_2 a_2 + \cdots K_n a_n)}{A} \quad (2)$$

Where, $K_1, K_2, \cdots K_n$ denotes soil erodibility factor by soil series, $a_1, a_2, \cdots a_n$ denotes area by soil series(ha), A denotes basin area of the reservoir(ha)

2.3.3 지형인자(LS)

강우는 하류 방향으로 강우 유출과 함께 토양침식을 유발하며, 저수지 유역의 길이와 경사의 영향을 받는다. 이러한 저수지 유역 특성을 고려한 토양침식량 산정을 위해 Eq. (3)과 같은 무차원 사면길이인자(L)와 무차원 경사인자(S)를 각각 고려해야 한다.

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^m, \quad m = \frac{\beta}{1+\beta}$$
$$\beta = \frac{11.16 \sin\theta}{3(\sin\theta)^{0.8} + 0.56} \quad (3)$$
$$S = 10.8 \sin\theta + 0.03, \ \sin\theta < 0.09$$
$$= 16.8 \sin\theta - 0.50, \ \sin\theta \geq 0.09$$

Where, λ denotes horizontal projection of the slope length(m), m denotes exponent of slope length, β denotes rate of erosion, θ denotes downhill slope angle($^\circ$)

2.3.4 토양침식조절인자(VM)

토양침식조절인자는 토양피복인자(C)와 토양보존대책인자(P)의 곱에 대응하는 무차원인자이며, 저수지 유역의 토지이용현황별 면적을 고려한 산정방법은 다음 Eq. (4)와 같다. 저수지 유역의 토지이용현황은 Fig. 5와 같이 환경공간정보서비스 홈페이지에서 제공하는 중분류 자료를 활용하였다[19].

$$VM = \frac{\sum(X_1a_1 + X_2a_2 + \cdots\ X_na_n)}{A} \quad (4)$$

Where, $X_1, X_2, \cdots\ X_n$ denotes erosion-control factor by land use, $a_1, a_2, \cdots\ a_n$ denotes area by land use(ha), A denotes basin area of the reservoir(ha)

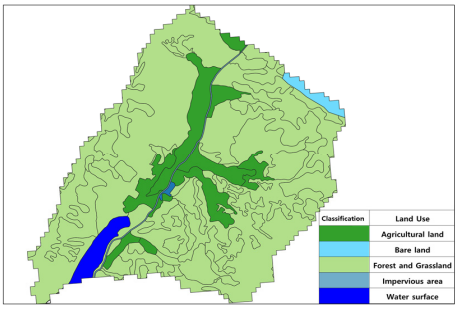


Fig. 5. Land-use types(ex. Songjong reservoir)

2.3.5 토사유출량 산정

저수지 유역 상류부에서 강우 유출로 발생한 토양침식은 하류부로 이동하면서 일정량의 토사만 저수지로 유입되어 퇴적된다. 이는 RUSLE 모형을 통해 저수지 유역으로부터 Eq. (1)과 같이 추정된 토양침식량은 저수지에 유입된 토사유출량과 같지 않음을 의미한다. 따라서 RUSLE 모형을 통해 추정된 중량단위 토양침식량은 유사전달률과 단위중량을 고려해야만 저수지 유역에 유입된 토사유출량이라고 할 수 있다.

유사전달률(SDR, Sediment Delivery Ratio)은 유역면적과 유역 내 모래와 점토의 비율에 따라 다음 Eq. (5)와 같이 산정하며, 흙토람 홈페이지 토양환경지도의 표토토성을 활용하여 모래와 점토의 비율을 각각 산정하였다[20].

$$Sand: Y = 52.94X^{-0.2776}$$
$$Clay: Y = 107.03X^{-0.0964} \quad (5)$$

Where, Y denotes sediment dilivery ratio$(\%)$, X denotes basin area(ha)

RUSLE 모형을 통해 산정된 중량단위 토양침식량을 체적단위로 환산하기 위해서는 단위중량을 고려해야 하며, 단위중량을 고려하는 방법은 다음 Eq. (6)과 같다.

$$\gamma_s = 0.82(P+2)^{0.13} \quad (6)$$

Where, γ_s denotes unit weight(, P denotes sand composition ratio with particle size of 0.05 or more$(\%)$

Table 3. Analysis result of RUSLE model

Reservoir	Area (ha)	R (10^7J/ha·mm/hr)	K (tonnes/ha/R)	LS	VM	A (tonnes/ha)	Soil erosion quantity (tonnes/year)		
							Total	Sand	Clay
Songjong	246.8	478.5	0.031	24.7	0.037	13.5	3,325.3	997.6	2,327.7
Wow	270.5	445.1	0.028	40.3	0.032	16.1	4,350.9	870.2	3,480.7
Dochan	23.5	421.3	0.021	13.1	0.031	3.5	82.1	32.8	49.3
Gahak	74.1	607.6	0.025	13.9	0.103	21.9	1,622.5	649.0	973.5
Pasan	87.0	538.1	0.029	26.3	0.081	33.3	2,894.5	1,157.8	1,736.7

Table 4. Estimation result of sediments

Reservoir	Sediment Delivery Ratio(%)			Unit weight (tonnes/m^3)	Sediments	
	Sand	Clay	Weighted average		(tonnes/year)	(m^3/year)
Songjong	11.5	62.9	47.5	1.3	1,579.4	1,224.3
Wow	11.2	62.4	52.1	1.2	2,268.6	1,844.4
Dochan	22.0	78.9	56.2	1.3	46.1	34.7
Gahak	16.0	70.7	48.8	1.3	792.0	595.5
Pasan	15.3	69.6	47.9	1.3	1,385.9	1,042.0

위와 같은 방법을 통해 RUSLE 모형으로 산정된 토양 침식량을 연평균 토사유출량으로 환산한 결과는 Table 3~4와 같으며, 이 결과는 저수지로 유입된 연평균 퇴사량으로 볼 수 있다. 따라서 RUSLE 모형에 의한 해남 송종저수지의 연평균 퇴사량 추정 결과는 1,224.3m^3, 장성 와우저수지는 1,844.4m^3, 신안 도찬저수지 34.7m^3, 고흥 가학저수지 595.5m^3, 강진 파산저수지 1,042.0m^3의 토사가 매년 저수지로 유입되고 있음을 추정할 수 있다.

3. 무인드론 및 무인보트를 활용한 저수량 분석 및 퇴사량 산정 결과

3.1 저수지 측량 결과

무인드론(UAV)을 활용한 항공측량과 무인보트(USV)를 활용한 수심측량 결과를 바탕으로 저수량을 산출하고, 제원정보와 비교·분석을 통해 저수지별 퇴적량을 산정하였다. 본 연구에서는 연구대상 저수지 5개소 중 송종저수지에 대한 항공측량 및 수심측량 산출물에 대해 제시하였다.

Fig. 6은 항공측량 산출물인 포인트클라우드와 정사영상이며, 포인트클라우드를 활용하여 저수지의 만수위 기준 외곽 경계를 추출할 수 있다. 향후 저수지 제체 보강, 여수로 증고 등 유효저수량 변화사업 실시 후 저수량 파악을 위한 재측량이 필수적이나, 포인트클라우드를 활용한 3차원 지형데이터 구축을 통해 추가적인 예산 투입 없이 저수량을 산출하고, 수위-저수량 곡선식을 개발할 수 있는 장점이 있다. 자동항법 기능이 탑재된 무인보트(USV)를 활용한 수심측량은 Fig. 7(a)와 같이 균일한 간격을 갖는 수심측량을 통해 정밀한 데이터를 확보할 수 있다. 수심측량과 항공측량 산출물인 저수지 외곽경계를 활용하여 Fig. 7(b)와 같이 DSM(Digital Surface Model)을 생성할 수 있으며, Global Mapper 프로그램을 활용하여 저수지별 저수량을 산정하였다. 지자체 저수지의 대부분은 과거 측량을 수행한 이력이 부재하여 본연구에서는 저수지별 준공당시의 제원정보와 금회 측량 성과를 비교 · 분석하고, 퇴사량을 산정하였다.

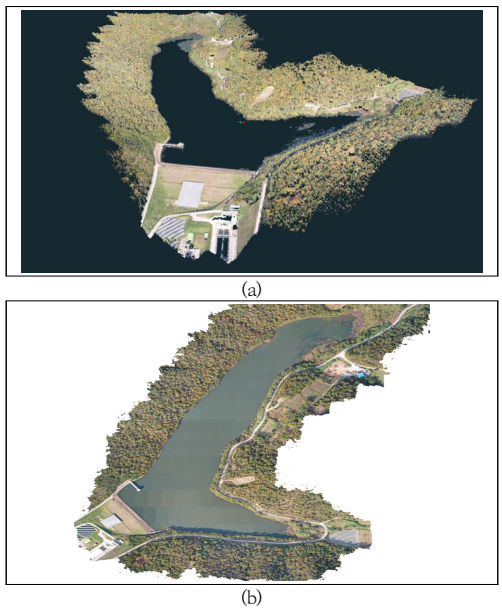


Fig. 6. Result of Aerial survey(ex. Songjong reservoir)
(a) Pointcloud (b) Orthophotograph

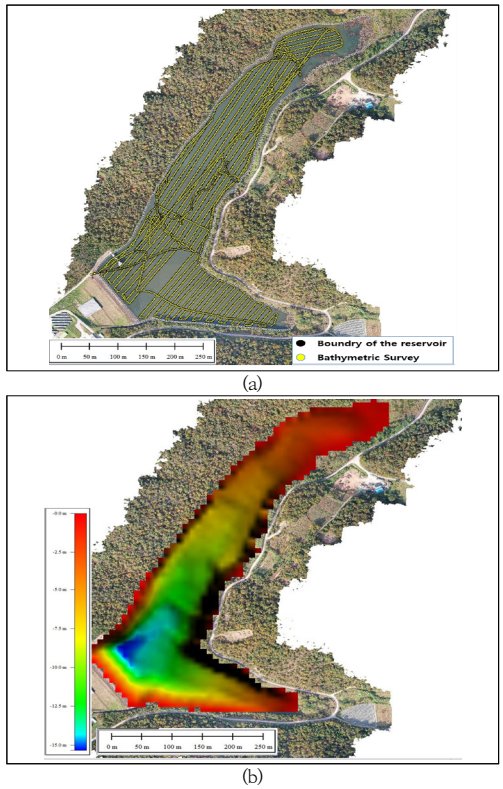


Fig. 7. Result of bathymetric survey(Songjong reservoir)
(a) Track chart (b) DSM

Table 5. Analysis of storage capacity

Reservoir	Survey Date	Completion Year	Maximum Depth(m)	Total storage capacity(1,000m^3)		Sediment (1,000m^3)	Rate(%)
				Specifications information	Survey result		
Songjong	20191104	1992	15.55	700.0	649.2	-50.8	7.26
Wow	20200303	1968	6.67	295.0	141.5	-153.5	52.03
Dochan	20200408	1983	12.51	281.0	268.1	-12.9	4.59
Gahak	20200108	1996	9.44	420.0	402.6	-17.4	4.14
Pasan	20191118	1969	16.45	345.0	265.2	-79.8	23.13

연구대상 저수지별 저수량 분석결과는 Table 5와 같다. 송종저수지는 제원정보 대비 50.8천m^3이 감소하였으며, 와우, 도찬, 가학, 파산저수지는 각각 제원 정보 대비 153.5천m^3, 12.9천m^3, 17.4천m^3, 79.8천m^3이 감소한 것으로 분석되었다. 이는 태풍과 집중호우 등 강우의 영향으로 저수지 유역 상류로부터 토사유입으로 퇴적량이 증가한 것이다. 특히 와우저수지와 파산저수지는 준공 후 50년 이상 경과된 노후 저수지로 제원정보 대비 저수량이 약 52%, 23% 감소하였으며, 가뭄에 대비하여 퇴적토사 준설 등 지속적인 관리가 필요함을 확인할 수 있다.

3.2 연평균 퇴사량 산정 결과

본 연구에서는 무인드론과 무인보트를 활용한 저수지 정밀측량 결과와 RUSLE 모형을 활용한 연평균 퇴사량 추정 결과를 비교·분석하였다. 저수지의 연간 퇴사량을 산정하기 위해서는 매년 반복적인 정밀측량을 통해 저수량을 분석하고, 퇴사량을 산정해야 하나 지자체에서 관리하는 저수지의 개소수 과다, 측량 예산 부족 등에 따라 매년 수행하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 저수지별 연평균 퇴사량 산정을 위해 정밀측량 결과 분석된 Table 5의 누적퇴사량을 저수지별 경과년수로 나누어 산정하였으며, 저수지별 연평균 퇴사량 산정 결과는 Table 6과 같다. 분석 결과 송종저수지는 약 657.2 m^3, 와우, 도찬, 가학, 파산저수지는 각각 1,107.5m^3, 313.9m^3, 129.5m^3, 554.0m^3의 연평균 퇴사량 차이가 발생하는 것으로 분석되었다. 특히 송종, 와우, 파산저수지는 준공 후 약 30년~50년 이상 경과한 노후 저수지로써, RUSLE 모형을 활용한 연평균 퇴사량 추정 시 저수지의 유역면적(A)이 큰 반면 강우침식인자(R)가 적어 태풍과 집중호우 등의 강우강도를 반영하지 못하는 것으로 판단된다.

Table 6. Estimation result of sediments yield

Reservoir	Sediment(m^3/year)		Variation (m^3)
	RUSLE	Survey result	
Songjong	1,224.3	1881.5	-657.2
Wow	1,844.4	2951.9	-1,107.5
Dochan	34.7	348.6	-313.9
Gahak	595.5	725.0	-129.5
Pasan	1,042.0	1596.0	-554.0

연구 결과는 저수지 준공 이후 한 번도 준설이 이루어지지 않았음을 가정하였으며, 과거 준설 이력이 있을 경우 분석 결과는 상이할 수 있다.

4. 결론

저수지는 자연재해대책법에 따라 가뭄에 대비한 퇴적토 준설이 필요하며, 저수지·댐의 안전관리 및 재해예방에 관한 법률에 따라 안전점검 및 진단, 보수 및 보강을 통한 안정성을 확보하여야 한다. 즉, 저수지는 가뭄과 홍수에 대비하여 지속적으로 관리가 필요한 국가의 중요한 수리시설물이라고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 효율적인 저수지 관리를 위해 무인드론과 무인보트를 활용한 정밀측량 결과와 관련법에 따른 자연재해저감종합계획 수립, 사전재해영향평가 등 실무에서 활용중인 RUSLE 모형을 통한 연평균 퇴사량 추정 결과를 비교·분석하였다.

송종저수지의 측량 결과와 RUSLE 모형을 활용한 연평균 퇴사량 추정 결과 약 657.2m^3의 차이를 보이며, 와우, 도찬, 가학, 파산저수지는 각각 1,107.5m^3, 313.9m^3, 129.5m^3, 554.0m^3의 연평균 퇴사량 차이가 발생하는 것으로 분석되었다. 분석 결과 5개 저수지 모두 실측 결과에 비해 RUSLE 모형 결과가 낮게 추정되는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 활용한 RUSLE 모형의 기초인

자는 강우침식인자, 토양침식인자, 지형인자(경사도), 토양침식조절인자 등이며, 여기서 강우침식인자는 퇴사량에 가장 큰 영향을 미치는 인자라고 할 수 있다. 그러나 본 연구에서 활용한 강우침식인자는 단일호우사상이 아닌 연평균 강우침식인자를 활용하였으며, 이로 인해 저수지 유역에 많은 퇴적량을 발생시킬 수 있는 태풍이나 집중호우 등의 강우강도를 반영하지 못하여 퇴사량이 과소 추정된 것으로 판단된다. 이 결과는 저수지 준설 사업계획 수립 등 저수지 시설물 관리를 위한 준설량 산정 시 RUSLE 모형을 활용할 경우 실제 퇴적량에 비해 과소 산정될 가능성이 있음을 의미한다.

선행연구를 통해 경상남도에 위치한 저수지를 대상으로 실측 결과와 우리나라에서 개발된 경험적 공식과의 비교·분석을 수행하였다[5]. 본 연구는 선행연구의 후속 연구로써, 실무에서 활용중인 퇴사량 추정 모형을 적용하여 퇴사량을 비교·분석하였다. 향후 대상 저수지를 확대하고, 측량 데이터 확보를 통해 우리나라 저수지 유역에 적합한 퇴사량 산정 경험식 개발에 활용할 예정이다.

References

[1] Accumulated precipitation, Available From: http://hydro.kma.go.kr/droughtU/analysisAll.do (accessed Oct. 4, 2022)

[2] 2020 National Drought Information Statistics Book, p.328, Joint with related ministries, 2022, pp.81.

[3] Information about the dam, Available From: https://www.water.or.kr (accessed Oct. 4, 2022)

[4] 2020 Statistical Yearbook of Land and Water Development for Agriculture, p.938, ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2021, pp.280-304.

[5] C. H. Won, H. C. Yoon, W. B. Kim, "Estimation of Optimal Empirical Equations based on Sediments of Ageing Reservoir Estimated Using Autonomous Navigation USV", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 21, No. 3, pp. 1-9, 2020. DOI: https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.3.1

[6] D. H Kim, *Evaluation of Reservoir's Effective Storage Capacity Using Autonomous Driving-based Multi-Beams*, Master's thesis, Kyungpook National University, Daegu, Korea, pp. 89-90, 2020.

[7] C. H. Won, H. C. Yoon, J. H. Hwang, W. B. Kim, "A Study on the Analysis of Storage Capacity According to Distance of Sounding Survey in Reservior", *Proceedings of the KSCE 2020 convention*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 756-757, 2020.

[8] T. H. Roh, "Analysis of Precision of Interpolation of Reservoir bed Through Comparison of Data Acquired by Using UAV and Echo Sounder", *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 23, No. 3, pp. 85-99, 2020. DOI: https://doi.org/10.11108/kagis.2020.23.3.085

[9] C. M Lee, *Small-scale Reservoir Capacity Measurement Using Integration of Unmanned Aerial and Shipborne Observation Data*, Master's thesis, Kangwon National University, Chuncheon, Korea, pp. 31-35, 2021.

[10] W. S. Park, S. H. Hong, C. H. Ahn, H. Choi, "Assessment of Soil Loss in Irrigation Reservoir based on GIS", *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 31, No. 6-1, pp. 439-446, 2013. DOI: https://doi.org/10.7848/ksgpc.2013.31.6-1.439

[11] Y. K. Jee, I. C. Park, B. S. Kim, "Sediment Yield Estimation of the Erosion Control Dam Basin and Analysis of Watershed Characterization Using RUSLE", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 1, pp. 123-130, 2017. DOI: http://doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.1.123

[12] G. J. Kim, K. W. Jun, B. D. Kang, "Analysis of Appropriateness of Estimation Methods for Sediment Yields in Damaged Areas by Debris Flow", *Journal of Korean Society of Disaster & Security*, Vol. 15, No. 1, pp. 35-46, 2022. DOI: https://doi.org/10.21729/ksds.2022.15.1.35

[13] M. Erena, J. F. Atenza, S. G. Galiano, J. A. Dominguez, J. M. Bernabe, "Use of Drones for the Topo-Bathymetric Monitoring of the Reservoirs of the Segura River Basin", Water, Vol. 11, No. 3, pp. 445, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/w11030445

[14] R. K. Rangel, J. L. Freitas, V. A. Rodrigues, "Development of a Multipurpose Hydro Environmental Tool using Swarms, UAV and USV", *2019 IEEE Aerospace Conference*, IEEE, MT, USA, 2019. DOI: https://doi.org/10.1109/aero.2019.8741624

[15] G. Hu, H. Song, X. Shi. M. Zhang, X. Liu, X. Zhang, "Soil Erosion Characteristics Based on RUSLE in the Wohushan Reservoir Watershed", *Journal of Scientia Geographica Sinica*, Vol. 38, No. 4, pp. 610-617, 2018. DOI: https://doi.org/10.13249/j.cnki.sgs.2018.04.015

[16] Detailed establishment criteria for comprehensive plan to mitigate natural disasters, p.153, Ministry of the Interior and Safety, 2019, pp. 33.

[17] Practice Guideline for Consultations on Disaster Impact Assessment, p.206, Ministry of the Interior and Safety, 2021, pp. 33-45.

[18] Method of calculating the amount of erosion in the topsoil, p.28, Ministry of Environment, 2019, pp. 4-10.

[19] Land-use types, https://egis.me.go.kr/map/map.do (accessed Oct. 13, 2022)

[20] Soil classification, Available From: http://soil.rda.go.kr/soil/soilmap/characteristic.jsp (accessed Oct. 18, 2022)

원 창 희(Chang-Hee Won) [정회원]

- 2016년 2월 : 충북대학교 공과대학 토목시스템공학과 (공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 행정안전부 국립재난안전연구원 책임연구원

〈관심분야〉
가뭄, 수공학, 방재

김 원 범(Won-Beom Kim) [정회원]

- 2019년 8월 : 영남대학교 공과대학 건설시스템공학과 (공학석사)
- 2019년 6월 ~ 현재 : 행정안전부 국립재난안전연구원 선임연구원

〈관심분야〉
수공학

윤 현 철(Hyeon-Cheol Yoon) [정회원]

- 2012년 2월 : 부산대학교 공과대학 사회환경시스템공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 : 부산대학교 일반대학원 사회환경시스템공학과 (공학박사)
- 2015년 11월 ~ 2016년 10월 : 한국건설기술연구원 박사후연구원
- 2016년 10월 ~ 현재 : 행정안전부 국립재난안전연구원 시설연구사

〈관심분야〉
가뭄, 수공학

양 우 현(Woo-Hyun Yang) [정회원]

- 2018년 2월 : 포항공과대학교 환경공학부과 (이학석사)
- 2021년 4월 ~ 현재 : 행정안전부 국립재난안전연구원 연구원

〈관심분야〉
수공학

김 미 정(Mi-Jung Kim) [정회원]

- 2017년 2월 : 경일대학교 공과대학 토목공학과 (공학석사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 행정안전부 국립재난안전연구원 선임연구원

〈관심분야〉
수공학