

경험공식 및 다중회귀모형을 이용한 붕괴 저수지(습지) 비퇴사량 추정

김동현·이하늘·배영혜·주홍준*·김덕환**·김형수***,†

인하대학교 스마트시티공학과
*한국건설기술연구원 수자원하천연구본부
**한국건설기술연구원 건설시험인증본부
***인하대학교 사회인프라공학과

Estimation of sediment deposition rate in collapsed reservoirs(wetlands) using empirical formulas and multiple regression models

Kim, Donghyun·Lee, Haneul·Bae, Younghye·Joo, Hongjun*·Kim, Deokhwan**·Kim, Hung Soo***,†

Program in Smart City Engineering, Inha University

*Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

**Construction Technology Safety Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

***Department of Civil Engineering, Inha University

(Received : 30 August 2021, Revised : 16 September 2021, Accepted : 16 September 2021)

요약

댐 저수지(dam reservoir wetland)나 농업용 저수지 습지(irrigation reservoir wetland) 같은 시설물은 준공되고 시간이 지남에 따라 침식(erosion), 유사이송(sediment transport), 그리고 유사가 침전(sediment deposition)되어 퇴적이 발생하게 된다. 장기간 유사가 퇴적되면 홍수 및 가뭄 조절 기능에 영향을 주기 때문에 퇴적 문제는 저수지 습지의 유지 관리를 위해 매우 중요하다. 그러나 퇴사에 관한 연구는 가용 자료의 부족으로 인해 주로 경험공식에 의해 추정되어 왔다. 본 연구의 목적은 실측자료 및 경험공식과 더불어 다중회귀모형을 개발하여 비퇴사량(sediment deposition rate)을 산정하고 비교하고자 하였다. 또한, 저수지 습지의 퇴사(reservoir wetland sedimentation) 및 노후화로 인해 2020년 긴 장마에 따른 홍수피해가 발생한 64개소의 저수지 습지에 적용하여 잠재적인 붕괴 원인을 파악하고자 하였다. 대상 저수지는 실측 정보가 있는 한국의 경상남도 밀양시(Miryang city, Gyeongsangnam province)에 위치한 가곡(GaGog) 저수지 등 10개소를 선정하였다. 저수지 유효저수용량 실측자료를 이용하여 비퇴사량을 산정하였고 기존에 개발된 총 4가지 경험공식과 물리적/기후적 특성 등을 고려한 다중회귀모형을 개발하여 비퇴사량을 산정하였다. 비퇴사량 산정 결과, 본 연구에서 개발한 다중회귀모형의 오차가 $0.21(m^3/km^2/yr)$ 부터 $2.13(m^3/km^2/yr)$ 으로 가장 낮았다. 따라서 다중회귀모형에 의해 추정된 비퇴사량을 토대로 저수지 습지의 유효저수용량에 대한 변화를 분석하였는데 유효저수용량이 0.21(%)부터 16.56(%)까지 감소한 것으로 파악되었다. 또한, 월류 피해가 발생한 저수지 습지의 비퇴사량은 파이핑 피해 등이 발생한 저수지의 비퇴사량 보다 상대적으로 높았다. 즉, 저수지 바닥에 비퇴사량이 축적되면 허용할 수 있는 유효저수용량이 부족해지고, 저수지의 홍수 및 가뭄 조절 능력이 감소되어 호우로 인한 저수지 붕괴 피해가 발생할 수 있다는 것이다.

핵심용어 : 저수지 습지, 비퇴사량, 경험공식, 다중회귀모형

† To whom correspondence should be addressed.
Department of Social and Infrastructure Engineering, Inha University
E-mail: sookim@inha.ac.kr

- Kim, Donghyun Department of Civil Engineering, Inha University / Ph.D. Candidate(E-mail : yesdktpdi@naver.com)
- Lee, Haneul Department of Civil Engineering, Inha University / Master' Course(E-mail : haneul6802@naver.com)
- Bae, Younghye Department of Civil Engineering, Inha University / Ph.D. Candidate(E-mail : yhbae@gmail.com)
- Joo, Hongjun Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology / Ph.D. (E-mail : engineer1026@kict.re.kr)
- Kim, Deokhwan Construction Technology Safety Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology / Ph.D. (E-mail : kimdeokhwan@kict.re.kr)
- Kim, Hung Soo Department of Social and Infrastructure Engineering, Inha University / Professor(E-mail : sookim@inha.ac.kr)

Abstract

As facilities such as dam reservoir wetlands and agricultural irrigation reservoir wetlands are built, sedimentation occurs over time through erosion, sedimentation transport, and sediment deposition. Sedimentation issues are very important for the maintenance of reservoir wetlands because long-term sedimentation of sediments affects flood and drought control functions. However, research on resignation has been estimated mainly by empirical formulas due to the lack of available data. The purpose of this study was to calculate and compare the sediment deposition rate by developing a multiple regression model along with actual data and empirical formulas. In addition, it was attempted to identify potential causes of collapse by applying it to 64 reservoir wetlands that suffered flood damage due to the long rainy season in 2020 due to reservoir wetland sedimentation and aging. For the target reservoir, 10 locations including the GaGog reservoir located in Miryang city, Gyeongsangnam province in South Korea, where there is actual survey information, were selected. A multiple regression model was developed in consideration of physical and climatic characteristics, and a total of four empirical formulas and sediment deposition rate were calculated. Using this, the error of the sediment deposition rate was compared. As a result of calculating the sediment deposition rate using the multiple regression model, the error was the lowest from $0.21(m^3/km^2/yr)$ to $2.13(m^3/km^2/yr)$. Therefore, based on the sediment deposition rate estimated by the multi-regression model, the change in the available capacity of reservoir wetlands was analyzed, and the effective storage capacity was found to have decreased from 0.21(%) to 16.56(%). In addition, the sediment deposition rate of the reservoir where the overflow damage occurred was relatively higher than that of the reservoir where the piping damage occurred. In other words, accumulating sediment deposition rate at the bottom of the reservoir would result in a lack of acceptable effective water capacity and reduced reservoir flood and drought control capabilities, resulting in reservoir collapse damage.

Key words : Irrigation reservoir wetland, Sediment deposition rate, Empirical formula, Multiple regression models

1. 서 론

우리나라 수리 시설물 중 용수를 공급하는 가장 중요한 수리 시설물인 저수지는 전국에 17,313개소가 분포하고 있고 농업을 위한 관개용 저수지(irrigation reservoir for agriculture)는 농작물의 생육에 필요한 물을 공급하기 위한 시설물 중 하나이다. 시설물(저수지, 댐, 습지)이 준공(completion)되고 시간이 지남에 따라 퇴적(sedimentation)과 침식(erosion)이 유사이송에 영향을 주고 유역에서 침식이 진행되어, 발생된 유사(erosion)가 저수지 내에 퇴적되는 현상을 야기한다. 이러한 현상을 저수지 퇴사(reservoir sedimentation)라 하고 이는 저수지의 홍수 및 가뭄 조절 기능에 영향을 준다(Morris, G.L. and Fan, J., 2009; Hwang et al., 2001; Lee et al., 2016).

현재 국내 저수지들 중 상당수는 축조된 지 50년 이상으로 대부분 노후화된 실정이고 저수지 유지관리 목적으로 안전점검 및 정밀안전진단을 시행하고 있다. 그러나 모든 저수지에 대하여 시행하기에는 많은 시간과 비용이 소비되며, 현장조사 내용에는 상태변화 외관조사 등 저수지 구조물의 외관에 관한 유지관리가 집중되어 있는 실정이다(Hong et al., 2004; You et al., 2007; Kim et al., 2019).

저수지의 여러 기능 중에서 홍수 및 가뭄 조절 기능에 대응하기 위해서는 수리·수문학적인 분석 및 영향에 대한 연구를 수행하여야 하는데, 정확한 연구를 위해서는 퇴적 및 침식으로 인한 저수지 퇴사에 대한 연구가 중요하다. 저수지 설계 및 유지관리에 있어 저수지에 유입 퇴사가 저수지 내 바닥에 퇴적되어 홍수 및 가뭄 조절 기능에 영향을 줌으로 이를 예측하여 설계에 반영해야 한다. 또한, 저수지의 건설 이후 장기간 축적되면서 이수(conservation)와 치수(flood control)에 대한 영향을 가져오기 때문에 저수지 관리와 설계를 위해 정확한 추정이 필요하다(Jang et al.,

2012; Lee et al., 2016). 퇴사량을 산정하는 방법에는 유량-유사량 곡선 이용법, 유역내의 저수지 퇴사자료 이용법, 경험공식에 의한 방법, 타 유역의 비유사량 이용법이 있으며, 이들 방법 중에서 현지의 여건 및 유역특성 등을 고려하여 적합한 방법을 선정하여 퇴사량을 추정한다(MOLIT, 2011). 한국수자원공사(K-water)에서는 댐 관리 측면에서 건설 이후 10년을 주기로 정밀 측량 조사 및 분석을 통해 댐의 퇴사량을 측정하고, 향후 영향에 대해 분석을 시행하여 각 댐의 비퇴사량(sediment deposition rate) 등 다양한 자료를 제공하고 있다. 그러나 농업을 위한 관개용 저수지의 경우 유사량 관측 자료가 미흡하여 퇴사량 산정이 불가피하다. 따라서, 일반적으로 타 유역의 유사량 관측 자료를 비퇴사량으로 환산하거나 경험공식(empirical formula)을 적용하고 있다.

저수지 퇴사에 관한 연구는 가용 자료의 부족으로 인해 주로 경험공식에 대한 개발 위주로 이루어져 왔다. 저수지 퇴사에 영향을 주는 주요 지표인 유역면적(A, km^2), 유효저수용량(C, m^3), 저수지 포착률($E, \%$) 등을 고려하여 비퇴사량을 산정하는 경험공식을 제안하였다(Churchill(1948); Brune(1950); Ishigai(1966); You and Min(1975); Yoon(1981); Seo et al(1988); Jang et al(2012); Maatooq et al., 2016). 그러나 저수지의 경과년수가 증가함에 따라 유역으로부터 유입되는 퇴적량이 매년 변하는 측면은 고려되지 못해 저수지 퇴사량이 과소 또는 과대해질 우려가 있다. 따라서, 연평균 강우량(P, mm), 저수지 길이(L, km), 준공년수(year) 유효저수용량(C, m^3), 유역면적(A, km^2) 등과 같은 물리적/기후적 특성 및 지형적인 특성 등을 고려할 필요가 있다(Bhattacharya et al., 2006; Maatooq et al., 2016; Lee et al., 2016; Ghose et al., 2019).

따라서, 본 연구에서는 정밀 기기로 실측한 저수지 유효

저수용량 자료를 활용하여 비퇴사량을 추정하고자 한다. 그리고 기존에 개발된 비퇴사량을 산정하는 경험공식을 조사 및 분석하고 경험공식으로 산정된 비퇴사량 값과 실측에 의한 비퇴사량 값의 오차를 파악하고자 한다. 또한, 물리적/기후적 특성 및 지형적인 특성 등을 고려한 다중회귀모형을 개발하여 비퇴사량을 산정하고 실측 퇴사량, 경험공식으로 산정한 퇴사량 및 다중회귀모형으로 산정한 퇴사량의 오차를 비교하고자 한다. 이를 활용하여 2020년 피해가 발생한 64개소의 저수지에 적용하여 잠재적인 붕괴 원인을 파악하고자 한다.

2. 방법론

일반적으로 저수지 퇴사량 산정 방법으로는 실측에 의한 저수지 퇴사 자료를 이용하는 방법, 비유사량을 이용하는 방법 및 경험 공식을 이용하는 방법 등이 있다. 그러나 국내 저수지 유역에는 상류에서의 유사량 관측 자료가 미흡한 실정이며, 일반적으로 타 유역의 유사량 관측 자료를 비퇴사량으로 환산하거나 경험공식을 적용하여 비퇴사량을 산정하여 활용하고 있다(Jang et al., 2012; Lee et al., 2016).

2.1 실측에 의한 방법

실측에 의한 퇴사량 산정 방법은 저수지를 수심 측량해서 산정하고 과거의 저수지 제원과 비교하여 감소된 용량을 산정하는 것이다. 여기에는 유사의 공간적 분포 조사나 표고별 저수용량 및 면적 곡선 작성 등이 포함된다. 현재 우리나라에서는 대형 댐을 위주로 10년마다 저수지 퇴사량 조사를 실시하고 있으나, 중소형 관개용 댐 및 소규모 저수지에 대해서는 주기적인 퇴사량 조사가 실시되지 않고 있다(Kim., 2011). 또한, 실측에 의한 방법은 측량을 통한 저수용량을 기초로 산정하기 때문에 정확한 저수용량 산정이 중요하며, 대부분 설계 시 보다는 건설 이후 관리 측면에서 사용되는 방법이다(Lee et al., 2016). 다음 Eq. (1)과 같이 실측에 의한 비퇴사량으로 산정할 수 있다.

$$\frac{V_r - V_i}{A \times t} \quad (1)$$

여기서, V_i 은 담수시점의 초기 저수용량(m^3) V_r 은 일정 시간 이후 측량을 통해 산정된 저수용량(m^3), A 은 유역면적(km^2), t 는 담수기간(year)이다.

2.2 비유사량을 이용한 방법

비유사량을 이용하여 비퇴사량을 환산하는 방법은 저수지 유역 상류에서 유사량을 관측하여 비유사량을 산정하고 이를 비퇴사량으로 환산하는 방법이다. 이 방법은 상류에서 실제로 유량과 유사량을 관측하여 유량-유사량 관계식을 도출하고, 지속적인 유량 관측을 통해 유사량을 추정된 후

비유사량으로 산정한다. 산정된 비유사량은 비퇴사량으로 환산하기 위해 산정식을 통해 환산된다. 비퇴사량 산정은 다음 Eq. (2)와 같이 비유사량에 저수지 포착률(trap efficiency) 퇴적토의 단위중량을 나누어 환산할 수 있다. 일반적으로 저수용량과 유입량의 비로 산정하고, 퇴적토 조사 자료가 없을 경우 우리나라에서는 1.6을 적용한다(Jang et al., 2012).

$$D = \frac{Y \times E}{100 W} \quad (2)$$

여기서, D 는 퇴사량(m^3), Y 는 유사량(ton), E_t 는 포착률(%), W 는 퇴적토의 단위중량(ton/m^3)이다.

2.3 경험적 공식에 의한 방법

우리나라는 1970년대 이후 저수지 퇴사량 자료, 유역면적, 연평균강우량 및 저수용량 등을 이용하여 여러가지 경험적 공식을 제안하였다. 경험적 공식에 의한 방법은 대부분 측량을 통한 실측 자료가 없거나, 유역 상류에 유사량 관측 자료가 없을 경우 경험적 공식을 이용하여 비퇴사량을 산정한다.

2.3.1 유사량과 민병형 공식

You and Min(1975)은 1974년 경상남도 진양군에 위치한 30개 소류지에 대한 퇴사 자료와 제반 특성을 조사하여 비퇴사량에 대한 관계식을 다음 Eq. (3)-(5)와 같이 제안하였다. 또한, 다중회귀분석을 활용하여 다음 Eq. (6)과 같은 비퇴사량 산정식을 제안하였다.

$$V_r = 1.27(C_d/A)^{0.6} \quad (3)$$

$$V_r = 21.9P^{10.5} \quad (4)$$

$$V_r = 39.6S^{0.75} \quad (5)$$

$$\log V_r = 0.179 + 0.108 \log A - 6.72 \log P + 2.20 \log S \quad (6)$$

여기서, V_r 은 비퇴사량($m^3/km^2/yr$), A 은 유역면적(km^2), C_d 은 계획 저수량(m^3), P 은 연평균 강우량(mm), S 은 유역평균경사(%)이다.

2.3.2 윤용남 공식

Yoon(1982)은 우리나라 관개용 저수지에 대한 저수용량의 감소와 퇴사량 산정에 관한 연구를 통하여 기존 저수지 퇴사량 자료를 이용하여 저수지의 연평균 퇴사량을 산정하는 공식을 다음 Eq. (7)과 같이 제안하였다.

$$V_r = 1334.08A^{-0.2}E_t^{6.2668} \quad (7)$$

여기서, V_r 은 비퇴사량($m^3/km^2/yr$), A 은 유역면적(km^2), E_t 은 저수지 포착률(%)이다.

2.3.3 안상진과 이종형 공식

Ahn and Lee(1984)은 삼교천 유역의 13개소, 영산강 유역의 26개소, 남강 유역의 27개소 저수지 퇴사자료를 이용하였고 대상 저수지의 유역면적은 33km²이하이다. 연평균 퇴사량이 유역면적, 저수지 포착률, 유역의 평균경사 등을 활용하여 회귀모형식을 개발하여, 다음 Eq. (8)-(10)과 같이 유역별로 제안하였다. 또한, 퇴사자료를 저수지 포착률이 100%, 95%, 90%, 85%일 때의 비퇴사량으로 환산한 후, 유역의 구별 없이 회귀분석하면 다음 Eq. (11)과 같다.

$$\text{삼교천, } V_s = 1744301.049A^{0.02}E_t^{17.017}S^{0.429}S_f^{0.684}A_g^{-1.157} \quad (8)$$

$$\text{영산강, } V_s = 66023.721A^{0.546}E_t^{11.061}S^{0.068}S_f^{0.353}A_g^{0.877} \quad (9)$$

$$\text{남강, } V_s = 1488.675A^{0.934}E_t^{4.985}A_g^{0.122} \quad (10)$$

$$V_r = 1419.711A^{-0.174}E_t^{6.596} \quad (11)$$

여기서, V_r 은 비퇴사량($m^3/km^2/yr$), A 은 유역면적(km^2), E_t 은 저수지 포착률(%)이다.

2.3.4 건설교통부 공식

댐 설계를 위한 유역단위 비유사량 조사 연구(MOLIT, 1992)에서 국내 100개소에 대한 저수지의 저수량, 유입량, 비퇴사량, 포착률 등에 대하여 조사 연구를 진행하였다. 다음 Eq. (13)과 같은 퇴사량 산정 공식을 제안하였다.

$$V_r = 196A^{-1.163}C^{0.301} \quad (13)$$

여기서, V_r 은 비퇴사량($m^3/km^2/yr$), A 은 유역면적(km^2), C 은 초기 저수용량($ha \cdot m$)이다.

2.4 다중회귀모형

다중회귀모형은 복수(複數)의 독립변수와 종속변수간의 인과관계를 통계적 방법으로 추정하는 방법을 말한다. 다중회귀분석은 종속변수 Y 에 대한 N 개의 독립변수 $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ 의 관계를 선형 함수라고 가정하여 Eq. (1)와 같이 나타낸다(Kim et al., 2017; Kim et al., 2020).

$$y_i' = \beta_0 + \beta_1x_{i1} + \beta_2x_{i2} + \dots + \beta_ix_i + \epsilon_i \quad (14)$$

여기서, β_0 은 상수항, $\beta_1 \dots \beta_i$ 은 독립변수의 회귀계수, ϵ_i 는 종속변수를 추정할 때 발생하는 오차를 말한다.

회귀모형에서 독립변수들이 서로 독립적일 때 모형의 설명력이 높아지며, 그렇지 않을 경우 독립변수들의 특성이 유사하여 추정량의 변동이 커지게 된다. 이러한 문제를 다중공선성이라고 하며, 원인으로는 표본수가 적거나 독립변수들 사이의 상관관계가 존재할 경우이다(Ryu. et. al, 2017). 다중공선성을 판별할 때 분산팽창요인(variance inflation factors, VIF)을 통해 평가하는데, 일반적인 수용

기준은 VIF가 10이상인 경우 다중공선성이 높다고 판별한다(Kim et al., 2017; Choi et al., 2017; Kim et al., 2018). 다중공선성 문제를 해결하기 위하여 통계적 유의도가 높은 일부변수를 추출하게 되는데, 이때 변수선택법이 고려될 수 있다. 변수선택방법으로는 전진 선택법(forward), 후방 소거법(backward), 단계적 선택법(stepwise)이 있으며, 단계선택법이 가장 안정적이며 주로 사용된다. 본 연구에서는 단계선택법을 이용하여 모형을 구축하였다.

3. 저수지 특성 파악

3.1 대상유역 선정

본 연구의 대상유역은 경상남도 밀양시에 위치한 가곡 저수지 등 10개소이다. 국립재난안전연구원(National Disaster Management Research Institute)에서 무인수심측량장비를 활용하여 저수지를 측량하였고, 총저수용량은 저수지 바닥에서 만수위까지의 높이로 사수위가 확인이 불가능하여 총저수량을 비교 및 분석하였다. 본 연구에서는 국립재난안전연구원에서 측정한 저수지 자료를 활용하였으며, 다음 Fig. 1과 같이 가곡 저수지 등 10개소의 위치를 나타내었다. 가곡 저수지 등 10개소에 대한 명칭은 R(1):가곡,

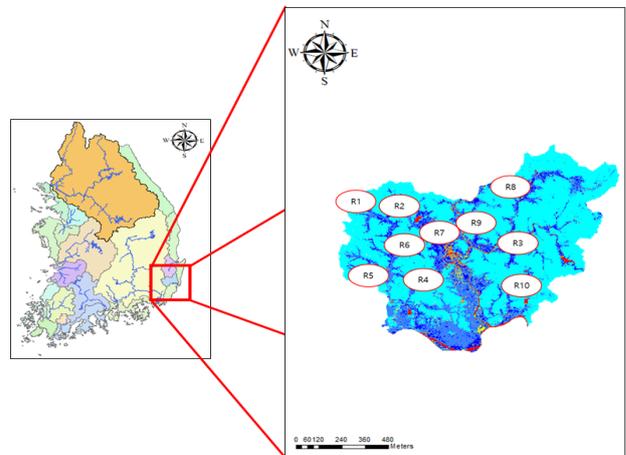


Fig. 1. Study area

Table 1. Name of each reservoir wetland

Classification	Name
R1	Ga-Gog
R2	Nae-Gog
R3	Dae-Gog
R4	Sam-Son
R5	Deog-Am
R6	Un-Jeong
R7	Yong-Po
R8	O-Cho
R9	Ga-Gog2
R10	U-Gog2

Table 2. Comparison and rate of change for available capacity of each reservoir wetland

Classification	Height (m)	Available capacity (1,000m ³)		Rate of change in available capacity (1,000m ³)
		Standard	Data	
R(1)	19.2	254.5	53.0	+201.5(+380.2%)
R(2)	13.3	134.7	153.0	+2.3(+1.5%)
R(3)	3.2	8.1	32.0	-16.4(-51.3%)
R(4)	6.1	41.7	39.0	+3.8(+9.7%)
R(5)	6.8	61.0	90.0	-29.0(-32.2%)
R(6)	11.9	406.9	388.0	+18.9(+4.9%)
R(7)	3.5	36.1	88.0	-48.7(-55.3%)
R(8)	8.2	42.2	61.0	-9.9(-16.2%)
R(9)	8.0	32.4	64.0	-25.8(-40.3%)
R(10)	5.0	22.6	52.0	-9.2(-17.7%)

R(2):내곡, R(3):대곡, R(4):삼손, R(5):덕암, R(6):운정, R(7):용포, R(8):오치, R(9):가곡2, R(10):우곡2 와 같이 명명하였다(Table 1).

3.2 유효저수용량 비교 및 분석

국립재난안전연구원에서는 경상남도 밀양시에 위치한 가곡 저수지 등 10개소의 유효저수용량을 무인수심측량장비를 활용하여 저수지의 유효저수용량의 증가 및 감소된 양을 분석하였다. 유효저수용량은 사수위 확인이 불가능하여 저수지 바닥에서 만수위까지의 높이로 가정하였다. 지자체 제원정보 대비 가곡(380.2%), 내곡(1.5%), 운정(4.9%), 삼손(9.7%) 저수지는 저수지 독 높임(가곡), 제체 보강(내곡) 등 저수용량 변화사업을 실시하여 유효저수용량이 증가하였다. 그러나 저수용량 변화사업 등을 미실시한 대곡(-51.3%), 덕암(-32.2%), 용포(-55.3%), 오치(-16.2%), 가곡2(-40.3%), 우곡2(-17.7%) 저수지의 유효저수용량은 감소하였다. 따라서, 본 연구에서는 저수용량 변화사업 등을 미실시한 대곡, 덕암, 용포, 오치, 가곡2, 우곡2 저수지를 대상으로 선정하였다.

4. 붕괴된 저수지의 비퇴사량 산정

4.1 실측에 의한 저수지 비퇴사량 산정

소규모 농업용 저수지의 경우 체계적으로 관측된 저수지 유입량, 유출량, 수위 자료가 부족하기 때문에 비유사량을 이용한 공식은 이용하지 못하였다. 담수시점의 초기 저수용량, 일정 시간 이후 측량을 통해 산정된 저수용량, 유역면적 및 담수기간을 이용하여 실측에 의한 비퇴사량을 산정하였다. 대곡 저수지의 비퇴사량은 14.88(m³/km²/yr), 덕암 저수지의 비퇴사량은 25.74(m³/km²/yr), 용포 저수지의 비퇴사량은 11.31(m³/km²/yr), 오치 저수지의 비퇴사량은 27.38(m³/km²/yr), 가곡2 저수지의 비퇴사량은 26.32(m³/km²/yr), 우곡2 저수지의 비퇴사량은 22.69(m³/km²/yr)로 산정되었다.

4.2 경험공식을 활용한 저수지 비퇴사량 산정

실측에 의한 저수지 퇴사량과 경험공식을 활용한 저수지 비퇴사량을 비교하기 위하여 총 4가지 경험공식을 이용하여 비퇴사량을 산정 및 비교하였다. 대곡 저수지의 실측 퇴사량은 14.88(m³/km²/yr)이고, You and Min(1975)이 제안한 경험공식으로 산정된 퇴사량은 -17.24(m³/km²/yr)으로 산정됐으며, 공식에 사용된 연평균 강우량의 값이 시간이 지남에 따라서 변화되는 점을 고려하지 못하여 오차가 매우 큰 것으로 파악되었다. Yoon(1982)이 제안한 경험공식으로 산정된 퇴사량은 28.11(m³/km²/yr)으로 관개용 저수지(irrigation reservoir)에 적합한 경험공식으로 본 연구 저수지와 면적이 상이하어 비퇴사량의 오차가 매우 큰 것으로 파악되었다. Ahn and Lee(1984)이 제안한 경험공식으로 산정된 비퇴사량은 34.44(m³/km²/yr)으로 저수지 포착물의 값의 차이로 오차가 매우 큰 것으로 파악되었다. 저수지 포착물의 경우 퇴적토 조사 자료가 없을 경우에 1.6을 적용하고 있어, 실제의 비퇴사량을 산정한 결과 오차가 발생할 수 있다. 건설교통부(1992)에서 제안한 경험공식으로 산정된 비퇴사량은 12.23(m³/km²/yr)으로 앞선 경험공식에 비하여 오차가 확연히 줄어든 것으로 파악되었다. 건설교통부(1992)에서 경험공식을 개발할 때 중·소규모 저수지를 대상으로 개발하였고 본 대상 저수지와 면적과 저수용량이 비슷하여 가장 적합한 경험공식으로 파악되었다. 측량을 이용한 실측 비퇴사량을 기준으로 4가지 경험공식을 이용하여 산정된 비퇴사량을 비교한 결과, 건설교통부(1992)에서 제안한 경험공식이 오차가 가장 낮았다. 다음 Table. 3과 같이 비퇴사량의 오차를 나타냈고, 오차는 실측 비퇴사량을 기준으로 추정 비퇴사량의 증가 및 감소된 양으로 나타났다.

4.3 다중회귀모형을 활용한 저수지 비퇴사량 산정

다중회귀모형을 구축하기 위하여 비퇴사량을 종속변수로 설정하고 경험공식에 사용된 주요 인자 및 지속적으로 활용

Table 3. Reservoir sediment deposition rate calculation using empirical formula

Classification	Measurement (2019)	You and Min (1975)	Yoon (1982)	Ahn and Lee (1984)	MOLIT (1992)
	Sediment deposition rate($m^3/km^2/yr$)				
	Increase or Decrease sediment deposition rate($m^3/km^2/yr$)				
R(3)	14.88	-17.24	28.11	34.44	12.23
	-	32.12	-13.23	-19.56	2.65
R(5)	25.74	-19.05	22.68	28.59	27.03
	-	44.79	3.06	-2.85	-1.29
R(7)	11.31	-19.07	25.27	31.41	16.39
	-	30.38	-13.96	-20.10	-5.08
R(8)	27.38	-18.54	30.47	36.96	30.27
	-	45.92	-3.09	-9.58	-2.89
R(9)	26.32	-16.90	30.32	36.81	31.45
	-	43.22	-4.01	-10.49	-5.13
R(10)	22.69	-17.24	28.29	34.65	26.43
	-	39.93	-5.60	-11.96	-3.74

가능한 독립변수를 설정하였다. 설정된 독립변수는 저수지 유역의 경계 및 면적을 파악할 수 있는 유역면적(A, km^2), 저수지가 허용할 수 있는 물의 양을 파악할 수 있는 유효저수용량(C, m^3), 저수지 유역에 내린 물의 양을 파악할 수 있는 연평균 강우량(P, mm), 저수지로 유입되는 토사 및 물의 속도를 고려하기 위한 유역의 평균경사(S, %), 저수지의 비퇴사량이 언제부터 쌓이기 시작하였는지를 파악할 수 있는 준공년도(Y, year)를 고려하였다. 다중회귀모형을 구축함에 있어서, 독립변수들 사이의 상관성으로 인하여 다중공선성(multicollinearity)의 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 분산팽

창요인(variance inflation factor, VIF)을 통해 다중공선성을 검토하고 다중공선성 문제가 발생하면 단계적 선택법(stepwise)을 활용하여 유의성이 높은 변수만을 활용하여 다중회귀모형을 구축한다. 본 연구에서는 분산팽창요인을 통해 다중공선성을 검토한 결과, 공선성을 가지는 조합은 없는 것으로 확인되었다. 다음 Table 4.와 같이 5개의 변수로 다중회귀모형을 구성하였고, 다음 Eq. (15) 같이 다중회귀모형을 구축하였다.

$$V_r = 13.93 - 0.2071A + 1.1788C - 0.0023P + 0.3107S - 0.0039Y \quad (15)$$

여기서, A는 유역면적(km^2), C는 유효저수용량(m^3), P는 연평균 강우량(mm), S는 유역의 평균경사(%), Y는 준공년도(year)를 말한다.

측량을 이용한 실측 비퇴사량을 기준으로 건설교통부(1992)에서 제안한 경험공식 및 다중회귀모형을 이용하여 산정된 비퇴사량을 비교한 결과, 다중회귀모형으로 산정된 비퇴사량의 오차가 가장 낮았다. 다음 Table. 5와 같이 비퇴사량의 오차를 나타냈고, 오차는 실측 비퇴사량을 기준으로 추정 비퇴사량의 증가 및 감소된 양으로 나타났다.

Table 4. VIF and P-Value of regression model

Variable	VIF
A	1.74
C	3.29
P	4.04
S	5.66
Y	7.78
P-Value	2×10^{-15}

Table 5. Reservoir sediment deposition rate calculation using empirical formula and multiple regression model

Classification	Measurement (2019)	MOLIT (1992)	Multiple regression model
	Sediment deposition rate($m^3/km^2/yr$)		
	Increase or Decrease sediment deposition rate($m^3/km^2/yr$)		
R(3)	14.88	12.23	14.23
	-	2.65	0.65
R(5)	25.74	27.03	25.53
	-	-1.29	0.21
R(7)	11.31	16.39	12.39
	-	-5.08	-1.08
R(8)	27.38	30.27	28.27
	-	-2.89	-0.89
R(9)	26.32	31.45	28.45
	-	-5.13	-2.13
R(10)	22.69	26.43	24.43
	-	-3.74	-1.74

4.4 붕괴된 저수지의 비퇴사량 추정

2020년의 장마철 기간은 54일로 1973년 이후 가장 길었으며, 전국 강수량은 693.4mm를 기록하였다. 또한, 연평균 누적 강수량은 1591.2mm로 평년(1207.6~1446.0mm) 대비 높은 강수량을 기록하였다. 이로 인해 전라남도 장성군에 위치한 외마지 저수지는 제당(L=30m, H=8.5m)이 유실

되었고, 전라북도 남원시에 위치한 갑산제 저수지는 제당(L=10m, H=5m)이 유실, 농경지 및 축사가 침수되는 피해가 발생하였다. 전국에 위치한 총 64개소의 저수지가 월류 및 파이핑으로 인해 제당이 붕괴되거나 유실되어 저수지 하류유역에 침수피해가 발생하였다. 이중 밝혀진 피해사고 원인 중 월류가 23건으로 가장 많았다. 월류 피해가 발생한

Table 6. Estimation of sediment deposition rate in collapsed reservoirs

Classification	Sediment deposition rate ($m^3/km^2/yr$)	Classification	Sediment deposition rate ($m^3/km^2/yr$)	Classification	Sediment deposition rate ($m^3/km^2/yr$)
	Increase or Decrease Useful capacity(%)		Increase or Decrease Useful capacity(%)		Increase or Decrease Useful capacity(%)
seoseong	56.13	bonjug	31.64	songgang	22.52
	7.79		8.45		2.31
onam	57.06	gangnam	27.87	osan	21.27
	8.73		8.29		3.16
deogsan	53.01	gusan	18.69	deogsan	35.20
	8.65		5.43		9.50
cheongyong	52.58	pado	20.32	eunsong	33.30
	8.53		5.20		9.39
janggun	37.40	sugag	28.66	jeomchon	18.06
	1.46		7.13		0.91
singu	45.45	hwabang	31.16	chideung (overflow)	32.68
	8.18		7.26		8.72
gongan	40.03	unam	25.74	naechon (overflow)	23.94
	7.33		5.17		7.88
haengseong	40.47	oemaji (overflow)	21.40	gosan (overflow)	92.08
	7.84		6.06		16.56
geumhyeon	34.91	sangoedong	31.74	naedong (overflow)	23.82
	6.52		7.19		4.82
gaejeong	39.46	wolgog (overflow)	16.41	sinchon (overflow)	24.77
	7.53		3.28		5.93
bongam	37.18	sinpyeong (overflow)	33.97	donghwa	22.04
	7.13		8.65		0.21
wolgog	21.93	hagdong	19.22	hyuam	24.06
	7.05		5.39		6.39
yongha	43.27	seonglag (overflow)	22.58	hansa2	35.64
	8.79		7.29		8.88
sanjeong	35.60	usulji (overflow)	24.12	naesachon	22.15
	7.17		5.12		7.34
sanyang (overflow)	26.92	gabsan (overflow)	20.92	gwangsan	29.97
	5.35		7.31		9.24
yeongcheon	39.30	jisa (overflow)	19.56	mosju (overflow)	18.11
	8.94		6.65		4.10
namyang	35.58	jangsan	21.76	jamo	22.98
	8.65		4.21		2.56
songsan	16.27	gungsan	28.49	tanbang (overflow)	16.10
	1.16		7.99		2.88
yeonhwa (overflow)	37.16	wang (overflow)	30.35	jigdong (overflow)	16.21
	8.06		7.17		0.76
sochon (overflow)	24.23	yonggung1 (overflow)	24.12	bugjwa (overflow)	22.19
	6.12		6.90		4.71
oemag (overflow)	25.40	daegag	29.85	jucheon	20.52
	8.94		7.79		4.61
baegam (overflow)	26.43				
	5.54				

저수지의 경우 준공된 지 오래된 저수지 이었으며, 시간이 지남에 따라 저수지 바닥에 비퇴사량이 쌓여 저수지가 허용할 수 있는 유효저수용량이 줄어든 것으로 파악되었다.

따라서, 본 연구에서는 홍수로 인해 붕괴한 저수지의 잠재적인 붕괴 원인을 파악하고자, 2020년 피해가 발생한 저수지를 대상으로 다중회귀모형을 이용하여 비퇴사량을 산정하였다. 또한, 다음 Eq. (16)과 같이 산정된 비퇴사량을 활용하여 유효저수용량을 추정하였다. 추정한 결과, 저수지의 비퇴사량이 증가한 만큼 유효저수용량은 감소하였고 월류 피해가 발생한 저수지의 비퇴사량은 파이핑 피해 등이 발생한 저수지의 비퇴사량 보다 상대적으로 높았다. 다음 Table. 6과 같이 유효저수용량의 감소 비율을 나타냈다.

$$V_i = -(Unit\ sediment\ deposit \times A \times t) + V_r \quad (16)$$

여기서, V_i 은 담수시점의 초기 저수용량(m^3) V_r 은 일정 시간 이후 측량을 통해 산정된 저수용량(m^3), A 은 유역면적(km^2), t 는 담수기간(year)이다.

5. 결 론

본 연구에서는 시간이 지남에 따라 저수지 바닥에 비퇴사량이 쌓여 이로 인해 감소된 유효저수용량을 추정하고자 하였다. 측량을 이용한 실측 비퇴사량을 기준으로 건설교통부(1992)에서 제안한 경험공식 및 비퇴사량을 추정할 수 있는 다중회귀모형을 구축하여 산정된 비퇴사량을 비교하였다. 또한, 2020년 피해가 발생한 64개소의 저수지에 적용하여 잠재적인 붕괴 원인을 파악하고자 하였다. 따라서 본 연구의 주요 연구결과는 다음과 같다.

(1) 경상남도 밀양시에 위치한 가곡 저수지 등 10개소의 지자체 제원정보 대비 가곡(380.2%), 내곡(1.5%), 운정(4.9%), 삼손(9.7%) 저수지는 유효저수용량이 증가하였고 저수용량 변화사업 등을 미실시한 대곡(-51.3%), 덕암(-32.2%), 용포(-55.3%), 오치(-16.2%), 가곡2(-40.3%), 우곡2(-17.7%) 저수지의 유효저수용량은 감소하였다.

(2) 실측에 의한 저수지 퇴사량 산정 결과, 대곡 저수지의 퇴사량은 $14.88(m^3/km^2/yr)$, 덕암 저수지의 퇴사량은 $25.74(m^3/km^2/yr)$, 용포 저수지의 퇴사량은 $11.31(m^3/km^2/yr)$, 오치 저수지의 퇴사량은 $27.38(m^3/km^2/yr)$, 가곡2 저수지의 퇴사량은 $26.32(m^3/km^2/yr)$, 우곡2 저수지의 퇴사량은 $22.69(m^3/km^2/yr)$ 로 산정되었다.

(3) 4가지 경험공식을 이용하여 산정된 비퇴사량을 비교한 결과, 건설교통부(1992)에서 제안한 경험공식의 오차가 최저 $1.29(m^3/km^2/yr)$ 부터 최고 $5.13(m^3/km^2/yr)$ 으로 가장 낮았다. 또한, 비퇴사량을 종속변수로 설정하고, 총 5가지 유역면적(A, km^2), 유효저수용량(C, m^3), 연평균 강우량(P, mm), 평균경사($S, \%$), 준공년도($Y, year$)를 독립변수로 이용하여 다중회귀모형을 구축하였다. 다중회귀모형으로 비퇴사량을 산정한 결과, 오차가 최저 $0.21(m^3/km^2/yr)$ 부터

최고 $2.13(m^3/km^2/yr)$ 으로 경험공식보다 오차가 더 낮음을 파악하였다.

(4) 2020년에 피해가 발생한 64개소 저수지를 대상으로 다중회귀모형을 이용하여 비퇴사량으로 인해 저수지의 감소한 유효저수용량을 추정한 결과, 0.21(%)부터 16.56(%)까지 유효저수용량이 감소한 것으로 파악되었다. 또한, 월류 피해가 발생한 저수지의 비퇴사량은 파이핑 피해 등이 발생한 저수지의 비퇴사량 보다 상대적으로 높았다.

시간이 지남에 따라 저수지 바닥에 비퇴사량이 쌓이면 저수지의 유효저수용량이 감소되고 이로 인해 저수지가 월류할 수 있는 확률이 증가가 된다. 한국수자원공사에 따르면 국내 다목적댐은 10년을 주기로 퇴사량 조사를 실시하며, 실측 퇴사량이 설계퇴사량을 초과할 경우에 5년 주기로 실시하도록 명시하고 있다. 그러나 소규모 농업용 저수지의 경우에는 그렇지 못하고 있는 실정이다.

국내에서는 저수지에 대하여 안전점검 및 정밀안전진단을 시행하고 있으나, 모든 저수지에 대하여 시행하기에는 불가능한 상황이고 우선순위를 정하기에도 어려움이 있다. 따라서, 본 연구결과를 활용하여 저수지의 잠재적인 붕괴 원인을 파악하여 고려한다면, 저수지의 시설물 안전점검 및 정밀안전진단에 효율적인 관리 및 계획을 수립하는데 유용할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한 재난대응 기반기술개발사업의 연구비 지원(2018-MOIS31-009)에 의해 수행되었습니다.

Reference

- Ackers, P. and White, W.R. (1973) Sediment Transport : A New Approach and Analysis J. of the Hydraulics Division, ASCE, vol. 99, no. HY11, Nov.[<https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0003791>]
- Ahn, J. H., Jang, S. H., Choi, W. S. and Yoon, Y. N. (2006) An Efficient Management of Sediment Deposit for Reservoir Long-Term Operation (1) - Reservoir Sediment Estimation. Journal of Korean Society on Water Quality. Vol. 22, No. 6, pp. 1088-1093.
- Brune, G. N. (1953), Trap efficiency of reservoirs. Transactions of American Geophysical Union. Vol.34, No.3.[<https://doi.org/10.1029/TR034i003p00407>]
- Burns, M., and MacArthur, R(1996). Sediment deposition in Jennings Randolph Reservoir, Maryland and West Virginia", Proc., 6th Federal interagency Sedimentation Conf., Lasvegas, 10.16-1021.
- Choi, C. H., Kim, J. S., Kim, J. H., Kim, H. Y., Lee, W. J., and Kim, H.S. (2017). Development of heavy rain damage prediction function using statistical methodology.

- J. Korean Soc. Hazard Mitig., Vol. 17, No. 3, pp. 331–338. [<https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.3.331>]
- Choi, G. W., Kim, K. N., Han, M. S. and Yun, Y. J. (2011) The Analysis of Sediment Reduction Effect by Installing Check Dams at Domestic Multi-Purpose Dams. J. Korean Soc. Vol. 11, No. 3, pp. 183–189. [<https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2011.11.3.183>]
- Churchill, M. A. (1948) Discussion of analysis and use of reservoir sedimentation data. by L. C. Gottschalk, Federal Inter-Agency Sedimentation Conference. pp. 139–140.
- Hair, Joseph F., William C. Black, Barry J. Babin, and Rolph E. Anderson. (2010) Multivariate Data Analysis, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Hiroshi Ishigai. "On the Amount of Bottom Sediments in Reservoirs" Journal of the Japan Society of Engineering Geology. Vol. 7, No. 4, pp. 173–190. [<https://doi.org/10.5110/jjseg.7.173>]
- Jang, S. W., Hwang, P. S., Kim, K. H and Shin, Y. H. (2012) A Study on Estimation Method of Sediment Deposition Rate of Reservoir. Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference. Korea Water Resources Association, 2012.
- Kim, D. H., Choi, C. H., Kim, J. S., Joo, H. J., Kim, J. W., & Kim, H. S. (2018). Development of a heavy rain damage prediction function by risk classification. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 18(7), 503–512. [<https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.7.503>]
- Kim, J. S., Choi, C. H., Kim, D. H., Lee, M. J., and Kim, H.S. (2017). Development of heavy rain damage prediction function using artificial neural network and multiple regression model. J. Korean Soc. Hazard Mitig., Vol. 17, No. 6, pp. 73–80. [<https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.6.73>]
- Korea Water Resources Corporation. Construction methods of sand storage dam for reservoir sedimentation reduction, (2004).
- Lee, J. W., Paik, K. R. and Yoo, C. S (2016) Empirical equation for estimating specific sediment of the multipurpose dams in Korea. Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference. Korea Water Resources Association, 2016.
- Morris, G.L. and Fan, J.(2009) Reservoir Sedimentation Handbook.
- Rubey, W. W. (1933). Settling Velocities of Gravel, Sand and Silt Particles, American J. of Science, 5th series, vol. 25, no. 148.
- Ryu, H. J. and Kim, S. W. (1976) Study on Sedimentation in Reservoir. The Korea Water Resources Association. Vol. 9, No. 2, pp. 67–75.
- Strand, R.I. and Pemberton, E.L.(1987) "Reservoir Sedimentation", In Design of Small Dams. U.S. Bureau of Reclamation, Denver.
- Suh, S. D., Lim, H. I., Cheon, M. B. and Yoon, K. D. (1988) Regression Analysis Between Specific Sediments of Reservoirs and Physiographic Factors of Watersheds. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers. Vol. 30, No. 4, pp. 45–61.
- Yoon, Y. N. (1981) Estimation of Silting Load and Capacity Loss Rate of Irrigation Reservoirs. Korean society of civil engineers magazine. Vol. 1, No. 1, pp. 69–76.
- You, S. C. and Min, B. H. (1975) A Study for Sedimentation in Reservoir –on district of Chin Young–. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers. Vol. 17, No. 3, pp. 3840–3847.
- Maatooq, J., Omran, H., & Aliwe, H. (2016). Empirical Formula for Estimation the Sediment Load in Shat AL-Gharaf River. Basrah Journal for Engineering Sciences, 16, 38–41.
- Bhattacharya, B., & Solomatine, D. P. (2006). Machine learning in sedimentation modelling. Neural Networks, 19(2), 208–214. [DOI:10.1016/j.neunet.2006.01.007]
- Ghose, D. K., & Samantaray, S. (2019). Sedimentation process and its assessment through integrated sensor networks and machine learning process. In Computational intelligence in sensor networks (pp. 473–488). Springer, Berlin, Heidelberg. [DOI: 10.1007/978-3-662-57277-1_20]