붕괴 저수지의 형태학적 특성 분석

Analysis of Morphological Characteristics of Collapsed Reservoirs in Korea

김동현* · 김종성** · 왕원준*** · 이준석**** · 정재원***** · 김형수*****

Kim, Donghyun* · Kim, Jongsung** · Wang, Wonjoon*** · Lee, Joonseok**** · Jung, Jaewon*****
and Kim, Hung Soo*****

Abstract

The purpose of this study is to analyze the basic specifications or items of 17,313 reservoirs distributed throughout Korea and in particular, to establish the relationships among the morphological characteristics of the reservoirs. In addition, the morphology index, the storage (S)-area of full water (A)-levee height (H) (S-A-H) relationship, and the storage(S)-area of full water (A) (S-A) relationship were determined for collapsed reservoirs. In this study, histograms for 11 parameters, such as storage capacity, area of full water, levee height, and basin area, were plotted, and the distributions of the reservoir parameters were examined. The morphology index was used to classify the reservoirs based on the depth, and the coefficient values of the relationships of S-A-H and S-A were used to compare S with both A and H or only A. The coefficient value of S-A-H was inversely proportional to S, and when the coefficient value was high, the storage was small. The coefficient value of S-A was proportional to S, and when the coefficient value was small, the storage was small. Cluster analysis was performed based on the given items to determine the characteristics of all the reservoirs and only the collapsed reservoirs. From the cluster analysis results, the reservoirs were divided into five groups: A, B, C, D, and E. There were 7,714 (14) in Group A, 6,053 (4) in B, 2,633 (2) in C, 745 (1) in D, and 168 (0) in E for all the reservoirs and collapsed reservoirs (with the values of the collapsed reservoirs in parenthesis). The morphological indexes were low in the order of $A > B > C > D > E$, and the coefficient values of S-A-H were high in the order of $A > B > C > E > D$. The coefficient values of S-A were low in the order of $A > B > D > C > E$. Based on the clustered analysis results for 21 collapsed reservoirs, the reservoirs were clustered in the order of $A (14) > B (4) > C (2) > D (1) > E (0)$. A reservoir with shallow water depth and small storage capacity has an inherent probability of collapsing. Therefore, the results of this study are useful for reservoir management and operation, as well as for the prevention of reservoir collapse.

Key words : Reservoir, Morphology Index, Relationship of Storage-area of Full Water-levee Height, Cluster Analysis

요 지

본 연구에서는 전국에 분포되어 있는 17,313개의 저수지의 기본적인 제원을 분석하고, 특히, 붕괴 피해가 발생한 저수지의 형태학적 특성 및 저수량(S), 만수면적(A), 제당높이(H) 간의 관계를 파악하는 것을 목적으로 한다. 즉, 저수지의 11가지 제원 항목에 대하여 히스토그램을 작성하여 계급구간별 빈도에 대한 분포특성을 확인하였다. 또한, 깊이에 의해 저수지를 분류하기 위하여 형태지수(morphology index)를 이용하였으며, S-A-H와 S-A관계 분석을 토대로 각 관계의 계수값을 이용해 저수지의 특성을 파악하였다. 여기서, S-A-H의 계수값은 저수량과는 반비례하고, 계수값이 크면 저수량이 작다. S-A의 계수값은 저수량(S)과 비례하고, 계수값이 작으면 저수량이 작다. 주어진 저수지 제원의 항목들을 토대로 군집 분석을 수행하였으며, 군집 분석 결과, A부터 E까지 총 5개로 군집화 되었다. A군은 7,714개, B군은 6,053개, C군은 2,633개, D군은 745개, E군은 168개로 구분되었다. 형태지수는 $A > B > C > D > E$ 순서로 낮았으며, S-A-H관계의 계수값은 $A > B > C > E > D$ 순서로 높았다. S-A관계에 대한 계수값은 $A > B > D > C > E$ 순서로 낮았다. 또한, 21개의 붕괴된 저수지에 대해 군집된 결과를 보면, $A(14) > B(4) > C(2) > D(1) > E(0)$ 순서로 군집 되었다. 저수지의 수심이 얕고 저수량이 작은 저수지의 경우 붕괴될 확률이 높게 대재 되어 있었다. 따라서, 본 연구의 결과를 토대로 붕괴가 주로 발생하는 저수지의 특성을 파악함으로써 저수지 관리, 운영 및 발생할 수 있는 재난의 사전 대비 등을 위하여 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 저수지, 형태지수, 저수량-만수면적-제당높이 관계, 군집분석

*정회원, 인하대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: yesdktpdi@naver.com)

Member, Doctor's Course, Department of Civil Engineering, Inha University

**정회원, 인하대학교 토목공학과 박사수료

Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Inha University

***정회원, 인하대학교 토목공학과 박사과정

Member, Doctor's Course, Department of Civil Engineering, Inha University

****인하대학교 토목공학과 박사수료

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Inha University

*****정회원, 인하대학교 수자원시스템 연구소 박사후연구원

Member, Post-Doctoral Researcher, Institute of Water Resources System, Inha University

*****교신저자, 정회원, 인하대학교 사회인프라공학과 교수(Tel: +82-32-874-0069, Fax: +82-32-876-9787, E-mail: sookim@inha.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Inha University

1. 서 론

국내 수리 시설물의 수는 총 71,189개소이고 용수를 공급하는 가장 중요한 수리 시설물인 저수지는 17,313개소이다. 한국농어촌공사에서 관리하는 저수지는 3,406개소, 지자체에서 관리하는 저수지는 13,907개소이다. 또한, 준공된지 50년 이상된 저수지는 13,079개소로 저수지가 노후화되어 본래의 기능을 발휘하지 못하는 시설물이 전국에 산재해 있다(Kim et al., 2019).

국내 국토의 약 70%가 산지이고 지형이 비교적 험하며 강우의 유출이 빨라 토지의 보수력이 낮기 때문에 농업용 저수지는 농업용수 확보를 위해 중요한 시설물이자 수단이 된다(Park et al., 2002). 용수 공급 및 홍수 예방을 목적으로 대규모 다목적 댐이 건설되기도 하였지만, 농업이 발달한 국내에서는 소규모 농업용 저수지가 절대적으로 다수를 차지한다. 최근 빈번히 발생하는 극심한 가뭄으로 인해 저수지의 농업용수 활용이 중요할 수 밖에 없다. 현재 국내에 축조되어 있는 농업용 저수지들 중 상당수는 축조된 지 50년 이상으로 대부분 노후화된 실정이고(Hong, 2004; Kim et al., 2019), 대부분의 농업용 저수지의 관개규모가 100 ha (0.01 km²) 이하의 소규모 저수지이다. 또한, 저수지의 주요한 기능 중 하나인 농업용수 공급 측면에서도 효율이 높지 않은 상황이고, 저수지의 유지관리 자체도 비효율적으로 운용하고 있는 것으로 조사되고 있다(Yoo and Park, 2007). 그리고, 저수지의 안정성을 크게 위협하는 누수현상도 심각한 수준인 것으로 파악되고 있고, 관리가 제대로 이루어지지 않은 소규모 저수지들의 붕괴 위험성이 내재(內在)되어 있는 실정이다.

국외에서 발생한 대표적인 저수지(댐) 붕괴 사례를 살펴보면 1975년 중국 Banqiao 댐 붕괴로 인한 피해로 171,000명이 사망하였다. 1979년 인도의 Machhu II 댐 붕괴로 5,000여명 이상의 인명피해가 발생하였고, 1983년 스페인 Tous 댐 붕괴로 30여명, 1985년 이탈리아의 Val de Stava 댐 붕괴로 268명의 사망자가 발생하였다(Kim and Han, 2016). 또한, 2018년 라오스 Xe Pian-Xe Namnoy 댐이 붕괴 되면서 이재민 6,000여 명을 포함해 1만 1,000여 명이 피해를 입었다. 국내에서는 다목적 댐과 같은 대규모 댐이 붕괴된 경우는 없으나 2002년 장현저수지, 2002년 동막저수지, 2013 산대저수지, 2018년 모원저수지 붕괴 등과 같은 소규모이거나 농업용 저수지의 붕괴사례는 많은 실정이다(Kim et al., 2019).

붕괴된 저수지에 대해 저수지의 형태학적 특성과 관련된 연구들이 수행된바 있다(Takeuchi, 1997; Leonard and Crouzet, 1998; Lehner and Döll, 2004). Nam et al. (2015)은 국내 1,346개의 농업용 저수지를 대상으로 관개취약성 평가모형을 활용하여 용수공급 위험도를 평가 하였다. Campos et al. (2016)은 브라질 Ceará State의 40개 저수지의 형태를 분류하기 위하여 형태지수(Morphology Index)를 활용하였

다. Song et al. (2018)은 저수지의 정확한 수심측정 및 지형정보 구축을 위해 GPS 및 음향측심기가 탑재된 무인보트와 무인항공기(UAV)를 활용하여 3차원 지형정보를 구축하였다. Won et al. (2020)은 자율항법 무인측량선을 활용하여 저수지 10개소에 대한 저수용량, 퇴사량을 비교·분석하여 저수지가 가지고 있는 특성을 나타냈다. 그러나 현재 국내 모든 저수지를 대상으로는 정확한 측량을 통하여 저수지의 특성을 파악하기에는 수 많은 시간과 비용이 소요된다.

따라서, 본 연구에서는 저수지의 제원을 활용하여 형태학적 특성을 정량화하고 분석하여 국내에서 붕괴피해가 발생한 저수지에 대해 고찰하고자 한다. 즉, 유역면적, 유효저수용량, 만수면적, 제당높이, 제당길이, 인가면적, 순관개면적, 관개배수면적, 구역외급수면적, 준공년도, 한발빈도의 총 11가지 항목의 자료들에 대하여 히스토그램을 작성해 계급구간별 빈도에 대한 분포특성을 확인하였다. 저수지 제원은 대체적으로 왼쪽에 있는 전체구간의 히스토그램처럼 작은 규모의 값이 대부분을 차지하고 있는 특징을 보이고 있다(Fig. 3). 또한, 저수지의 깊이(Depth)를 파악하기 위하여 형태지수(Morphology Index)를 활용하였고, 저수량-만수면적-제당높이 및 저수량-만수면적 관계식을 활용하여 저수지 내 저수량에 관한 관계를 분석하였다. 그리고 붕괴된 저수지의 특성을 파악하기 위하여 주어진 항목들을 토대로 군집 분석을 수행하였다. 붕괴된 저수지에 대해 군집 분석을 함으로써 저수지들의 특성을 파악하고자 하였다.

2. 방법론

2.1 히스토그램 분석

히스토그램은 모집단의 확률밀도함수를 추정해 보는데 유용하다. 이 히스토그램을 작성하는데 필요한 계급구간(Class Interval)의 크기(Δx)는 Sturges (1926)의 공식을 이용해 결정하였다. 다음 Eq. (1)과 같다.

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{3.221 \log_{10}(n)} \quad (1)$$

여기서, n 은 전체 자료의 개수를 $x_{\max}$ 와 $x_{\min}$ 은 히스토그램으로 나타내고자 하는 자료의 최대값과 최소값을 나타낸다.

2.2 형태지수 분석

저수지의 경우에 있어 형태지수(Morphology Index)는 저수지의 평균수심과 만수면적을 이용하여 정량화한다. Leonard and Crouzet (1998)의 연구에 의하면 형태지수가 10.5 이상이면 깊은호수(Deep Lake)에 속하고, 형태지수가 0.6~10.4에 속하면 보통 호수(Normal Lake)로 구분된다. 또한, 형태지수가 0.5 이하이면 얕은 호수(Shallow Lake)로 분류된다. 다음 Eq. (2)는 저수지에 적용한 형태지수를 나타냈다.

$$Morphology index = 1,000 \times average depth (m) \times area of full water (m^2)^{-0.5} \quad (2)$$

2.3 저수량-만수면적-제당높이 관계분석

Lehner and Döll (2004)은 전 세계의 저수지 및 호수에 대하여 Eq. (3)과 같이 관계를 추정하였고, 저수량(S)은 만수면적(A)과 제당높이(H)의 곱의 약 1/3.42 정도임을 나타냈다. 즉, 계수값이 3.42인데 계수값이 크다는 것은 A와 H에 비해 S가 적다는 것을 의미하고, 저수량(S)과는 반비례하고, 만수면적(A)과 제당높이(H)와는 비례 관계를 나타낸다.

$$area of full water (m^2) = 3.42 \times \frac{storage (m^3)}{levee height (m)} \\ \Rightarrow 3.42 \times S = AH \Rightarrow S = (1/3.42)AH \quad (3)$$

2.4 저수량-만수면적 관계분석

또한, Takeuchi (1997)는 만수면적 36.1 km² 이상, 저수용량 0.5 km³ 이상의 규모의 전 세계의 저수지를 대상으로 만수면적(A)과 저수량(S)과의 관계를 다음 Eq. (4)와 같이 추정하였다. 여기에서는 계수값이 9.208을 나타내고 있는데 계수값이 크다는 것은 A에 비해 S가 크다는 것을 의미한다. 즉, S-A 관계의 계수는 2.3절의 S-A-H관계에서의 계수와는 반대의 개념을 나타내고 있다. 계수값은 저수량(S)과 비례하고, 만수면적(A)과는 반비례 관계를 나타낸다.

$$storage (10^6 \times m^3) = 9.208 \times area of full water^{1.114} (km^2) \\ \Rightarrow S = 9.208 \times A^{1.114} \quad (4)$$

2.5 군집 분석

전체의 자료에서 사전에 알 수 없는 관계를 발견하는 방법을 비지도 방법(Unsupervised Methods)이라고 한다. 비지도 방법은 자료의 패턴을 찾고자 할 때 사용된다(Zumel and Mount, 2017). 비지도 방법에는 연관 규칙 마이닝과 군집 분석 등이 있다. 연관 규칙 마이닝 방법은 경향성이

있는 자료의 요소 또는 속성을 찾는 방법이고, 군집 분석은 유사한 특성을 가진 자료를 활용하여 그룹화하는 방법이다. 군집 분석은 군집의 중심(Cluster Center)을 기준으로 군집의 수(Cubic Clustering Criterion)와 시작점을 지정하여 전체 자료를 한번에 군집한다(Nam et al., 2015). 본 연구에서는 저수지별 유사한 특성을 가진 자료에서 그룹을 찾기 위하여 군집 분석을 활용하였다. Fig. 1은 군집 분석의 개념을 그림으로 나타냈다.

3. 자료 수집 및 저수지의 형태학적 특성 분석

3.1 저수지 자료 수집 및 분석

3.1.1 저수지의 자료 수집

본 연구의 대상지역은 전국에 분포되어 있는 저수지로 광역지자체별로 저수지의 분포를 Table 1에 나타내었으며, 전국적인 공간분포는 Fig. 2와 같다. 국내 저수지 분포 현황은 다음과 같이 경상북도, 경상남도, 전라남도, 경상남도, 전라북도, 충청남도의 순으로 저수지의 개소가 많다. 전체적으로는 경기도, 강원도 등 중부지방이 밀도가 낮고, 경상도, 전라도 등 남부지방에 밀도가 높게 분포되어 있다.

3.1.2 저수지 제원 항목들의 기본통계 및 히스토그램

저수지의 특성을 파악하기 위하여 저수지의 제원(유역면적, 유효저수용량, 만수면적, 제당높이, 제당길이, 인가면적, 순관개면적, 관개배수면적, 구역외급수면적, 준공년도, 한발빈도의 최고(Max) 값, 최저(Min) 값, 평균(Average), 표준편차(Standard Deviation), 변동계수(Coefficient of Variation)를 Table 2와 같이 나타냈다. 유역 면적, 유효저수용량 등 저수지 제원의 최대 값과 최소 값은 큰 차이를 보였다. 또한, 각 지표에 대한 저수지 제원의 분포를 파악하기 위하여 저수지 제원 항목들의 자료들에 대해 계급구간을 설정하고 빈도 분포를 히스토그램으로 도시하였다(Fig. 3). 빈도 분포가 대체적으로 왼쪽에 있는 계급구간의 작은 규모의 값이 대부

Fig. 1. Concept of Cluster Analysis

Table 1. National Distribution of the Reservoir, Korea

Local Government	Number	Local Government	Number
Gyeongsangbuk Province	5,510	Gangwon Province	316
Jeollanam Province	3,205	Daegu City	199
Gyeongsangnam Province	3,179	Gwangju City	136
Jeollabuk Province	2,237	Busan City	97
Chungcheongnam Province	898	Sejong City	38
Chungcheongbuk Province	746	Incheon City	36
Gyeonggi Province	348	Daejeon City	16
Ulsan City	348	Jeju Province	4

Fig. 2. Study Area**Table 2.** Basic Statistics for Each Reservoir Item

Reservoir Item	Max	Min	Average	Standard Deviation	Coefficient of Variation
Basin Area (ha)	37,360.00	0.1	133.90	628.67	129.90
Total Storage Capacity (1,000 m ³)	106,540.00	0.1	188.27	1,839.80	469.52
Area of Full Water (ha)	1,088.70	0.1	3.51	19.83	977.22
Levee Height (m)	90.00	0.5	7.85	6.21	565.59
Levee Length (m)	6,390.00	1.5	110.92	135.09	79.09
Permissible Area (ha)	13,900.00	0.1	38.20	250.41	121.79
Area Irrigated (ha)	8,856.00	0.1	29.92	197.99	655.58
Irrigated Collected Area (ha)	655.90	0.5	0.07	5.81	661.73
Out-of-Area Water Supply Area (ha)	1,278.50	0.2	0.26	11.32	8,207.02
Completion Year (year)	2,016.00	1,945	1,956.37	17.54	4,303.68
Frequency of Drought (year)	200.00	1.00	3.66	4.75	0.90

Fig. 3. Histograms for Reservoir Items

분을 차지하고 있는 특징을 보이고 있다. 모집단의 확률밀도 함수를 추정하는 히스토그램 만으로는 국내 저수지의 형태학적 특성을 구분하는데 어려움이 있다고 판단하였다. 따라서 저수지의 형태학적 특성을 구분하기 위하여 형태지수, 저수량-만수면적-제당높이(S-A-H)의 계수, 저수량-만수면적(S-A)의 계수를 활용하였다.

3.2 지방정부 저수지의 형태학적 특성 분석

3.2.1 형태지수

전국에 분포되어 있는 17,313개 저수지의 형태학적 특성을 파악하기 위하여 형태지수를 활용하였다. Fig. 4와 같이 저수지의 형태지수를 만수면적의 함수로 나타내었다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이 대부분의 저수지들은 보통 또는 깊은 저수지로 분류 되었으며, 국내 저수지에 형태지수는 약 4.39로 보통 호수로 분류되었다. 만수면적이 1 m² 이하와 이상에서 저수지 형태지수의 패턴을 볼 수 있다.

3.2.2 저수량-만수면적-제당높이 관계 분석

Lehner and Döll (2004)은 전 세계의 만수면적이 50 km² 이상, 저수량이 0.5 km³ 이상인 저수지에 대하여 Eq. (3)과 같이 저수량(S)-만수면적(A)-제당높이(H)의 관계를 추정하였고, 저수량은 만수면적과 제당높이의 곱의 약 1/3.42 정도임을 나타냈다(Eq. (3)). S-A-H의 계수값은 저수량(S)과는 반비례하고, 만수면적(A)과 제당높이(H)와는 비례 관계를 나타낸

다. 본 연구에서는 국내에 분포하고 있는 저수지의 저수량-만수면적-제당높이에 관하여 관계분석을 하였고, S-A-H의 관계로 정의하였다. 저수량은 만수면적과 제당높이에 곱의 약 1/11.01 정도임을 나타냈다(Eq. (5)). 즉, S-A-H의 관계의 계수값은 11.01임을 알 수 있다. Lehner and Döll (2004)의 연구와 본 연구와 비교 하였을 때 국내 저수지의 S-A-H의 관계 계수는 상대적으로 큰 계수값을 나타냈다. 국내 저수지의 경우 저수량이 작은 저수지가 분포한다는 것을 알 수 있다.

$$\text{area of full water}(m^2) = 11.01 \times \frac{\text{storage}(m^3)}{\text{levee height}(m)}$$

$$\Rightarrow S = (1/11.01)AH \quad (5)$$

3.2.3 저수량-만수면적 관계 분석

Takeuchi (1997)은 만수면적 36.1 km² 이상, 저수용량 0.5 km³ 이상 규모의 전 세계 저수지를 대상으로 저수량(S)-만수면적(A)의 관계를 추정하였다. S-A 관계의 계수값은 약 9.208 정도임을 나타내었다(Eq. (4)). S-A 관계의 계수값은 저수량(S)과 비례하고, 만수면적(A)과는 반비례 관계를 나타낸다. 본 연구에서는 국내에 분포하고 있는 저수지의 S-A의 관계에 관하여 분석을 하였고, 계수값은 12.304 정도임을 나타냈다(Eq. (6)). Takeuchi (1997)의 연구와 본 연구와 비교 하였을 때 국내 저수지의 S-A의 관계 계수가 상대적으로 큰 계수값을 보여주고 있다. Takeuchi (1997)는 자연적인 호수를 포함

Fig. 4. Morphology Indices for All the Reservoirs in Korea as Function of Area of Full Water

하여 연구를 하였으며, 자연적인 호수의 경우 저수지에 비해 수심이 낮은 편이다(Yoo and Park, 2007). 이는 국내 저수지의 경우 만수면적(A)에 비해 저수량(S)의 값이 큰 저수지가 분포한다는 것을 알 수 있다.

$$\text{storage}(10^6 \times m^3) = 12.304 \times \text{area of full water}^{1.114}(km^2)$$

$$\Rightarrow S = 12.304 \times A^{1.114} \quad (6)$$

Table 3과 Fig. 5와 같이 국내 행정단위를 광역시도(道) 단위로 지자체를 구분하여 나타내었다. 형태지수(Morphology Index)는 경상남도, 대구광역시 순으로 낮았으며, 이는 다른

행정구역에 비하여 저수지의 깊이가 낮은 저수지가 분포하는 것을 알 수 있다. 또한, 충청북도, 충청남도 순으로 저수지의 깊이가 깊은 저수지가 분포하는 것을 알 수 있다. S-A-H 관계의 계수값의 경우 경기도, 충청남도 순으로 높았으며, 이는 다른 행정지역보다 만수면적이 작은 저수지가 분포하는 것을 알 수 있다. 또한, 세종시, 강원도 순으로 낮았으며, 이는 다른 행정지역보다 만수면적이 큰 저수지가 분포하는 것을 알 수 있다. S-A 관계의 결과는 부산, 인천 순으로 저수량이 작은 저수지가 분포하는 것을 알 수 있다. 또한, 전라북도, 충청북도 순으로 높았으며, 이는 다른 행정지역보다 저수량이 큰 저수지가 분포하는 것을 알 수 있다.

Table 3. The Reservoir Characteristics of 16 Local Governments in Korea

Classification	Morphology Index	Classification	Coefficient of S-A-H Relationship	Classification	Coefficient of S-A Relationship
Gyeongsangnam province	2.53	Gyeonggi province	11.92	Busan city	8.86
Daejeon city	2.67	Chungcheongnam province	11.43	Incheon city	9.59
Gyeonggi province	3.15	Gyeongsangnam province	11.21	Ulsan city	10.45
Gwangju city	3.17	Jeollabuk province	11.08	Gyeongsangbuk province	10.87
Sejong city	3.46	Gyeongsangbuk province	11.08	Chungcheongnam province	11.23
Gyeongsangbuk province	3.63	Chungcheongbuk province	11.01	Gangwon province	11.24
Incheon city	4.15	Jeollanam province	10.88	Daejeon city	11.33
Ulsan city	4.34	Daejeon city	10.79	Jeollanam province	11.61
Gangwon province	4.56	Ulsan city	10.29	Daegu city	11.73
Jeju province	4.56	Busan city	10.23	Gyeonggi province	11.83
Jeollabuk province	4.56	Jeju province	10.17	Gyeongsangnam province	13.21
Busan city	4.6	Incheon city	10.05	Sejong city	13.48
Jeollanam province	4.83	Daegu city	9.95	Gwangju city	13.97
Daegu city	4.91	Gangwon province	9.86	Chungcheongbuk province	14.65
Chungcheongnam province	8.25	Sejong city	9.85	Jeju province	14.99
Chungcheongbuk province	9.96	Gwangju city	9.81	Jeollabuk province	15.01

Fig. 5. Comparison of the Reservoir Characteristics for 16 Local Governments in Korea

4. 붕괴된 저수지의 군집 분석을 통한 형태지수 특성 분석

4.1 붕괴 저수지 특성 분석

본 연구의 목적은 최근에 붕괴된 저수지의 형태학적 특성을 분석하고자 하였다. 2000년 이후에 집중호우 및 제체누수로 인한 저수지 피해 사례를 Table 4와 같이 나타내었고, 과거 피해발생 시점을 토대로 피해원인과 강우량(mm)을 기준으로 확인하고자 하였다. 대표적으로 21개 저수지의 붕괴 원인을 나타내었는데, 집중호우로 인한 저수지 붕괴는 15건, 제체누수로 인한 저수지 붕괴는 6건으로 분석되었다. 저수지의 제원은 대부분 상이하였다.

4.2 붕괴 저수지의 군집 분석

전국 저수지의 유역면적, 유효저수용량, 만수면적, 제당높이, 제당길이, 인가면적, 순관개면적, 관개배수면적, 구역외 급수면적, 준공년도, 한발빈도의 총 11가지 지표 항목들을 활용하여 군집 분석을 수행하였다. 군집의 개수를 설정하기 위하여 군집 내 총 제곱합(Total Within Sum of Squares, 총 WSS)을 계산하고, 곡선에서 첫 번째 “엘보우” 값을 도출하고자 하였다. 총 WSS는 모든 군집의 군집 내 제곱합의

합계이고, “엘보우”란 k값이 증가하다가 첫 번째로 감소하는 구간을 뜻한다. 여기서 k값은 군집의 개수를 의미한다. 또한, 칼린스키-하라바쯔(Calinski-Harabasz, CH) 지수는 군집 간 분산과 전체 군집 내 분산의 비율이고, 주어진 자료에서 총 제곱합(Total Sum of Squares, TSS)은 자료의 중심에서 모든 자료의 제곱합이다. WSS(k)가 k개 군집의 총 WSS이면, 군집 간 제곱합(Between Sum of Squares, BSS)은 $BSS(k) = TSS - WSS(k)$ 로 주어진다. 따라서 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있다. 군집의 중심은 모든 점의 평균값인 점으로 정의하였고, CH 지수를 활용하여 적절한 군집의 개수를 설정하였다. 즉, WSS의 그래프를 기준으로 CH의 값이 위쪽에 위치하고, CH의 기울기가 증가하다가 하강하는 첫 번째의 지점을 찾아서 최적의 값을 도출하였다. Fig. 6에서 k = 5에서 최적의 값을 가지고 있으므로 최적의 군집 개수는 k = 5개로 정의하였다.

$$TSS = WSS(k) + BSS(k) \quad (7)$$

전국 저수지 군집 분석 결과 총 5개의 A, B, C, D, E 군으로 나뉘어 졌으며, A군 7,714개, B군 6,053개, C군 2,633개, D군 745개, E군 168개로 구분되었다. 또한, 붕괴된 저수

Table 4. Collapsed Reservoir Specification

Name of Reservoir	Basin Area (ha)	Total Storage Capacity (1,000 m^3)	Area of Full Water (ha)	Levee Height (m)	Collapse Year	Damage Cause	Rainfall (mm)
Goeyeon	125	61.4	6.1	5.5	2014	Rainfall	67
Naedeog	287	44.9	0.8	11	2014	Rainfall	117.5
Daegwan	153	51	3.5	4.4	2013	Rainfall	242
Daesa	22	16.8	0.67	6	2007	Rainfall	241.5
Deogam	98	8.7	1	11	2005	Rainfall	125.5
Dongmag	1,839	941.5	12.8	24.15	2002	Rainfall	884.5
Myeonggog	29	8.3	0.5	6	2010	Rainfall	25.5
Mowon	80	9.3	1.5	6	2018	Rainfall	163.5
Buggun	130	114.7	4	10.1	2014	Leak	0
Bulmigol	10	1.3	0.3	6	2014	Leak	90.2
Sagog	8	4.1	0.2	6	2007	Leak	0
Sandae	40.7	194.4	4.9	12	2013	Leak	0
Songho	32	25.1	1.2	5.6	2006	Leak	0
Sindeog	765	3,339.9	45.5	23.6	2005	Rainfall	238
Yanggog	47	6.3	0.6	4	2010	Rainfall	25.5
Yeongcheon	725	2,575.8	42.7	20	2005	Rainfall	176
Jangcheon	118	113	3.6	16	2005	Rainfall	176
Janghyeon	1,152	2,197.1	43.6	16.06	2002	Rainfall	884.5
Cheoggog	120	79.8	0.3	16.5	2011	Rainfall	420.5
Chunjeong1	35	11.1	0.5	8.5	2007	Rainfall	371
Hwabon	210	155	9.4	10	2014	Leak	11

Fig. 6. Calinski-Harabasz and WSS Index

Table 5. Characteristics of All the Reservoirs and Collapsed Reservoirs in Korea

Cluster Classification (all)	Morphology Index	Coefficient of S-A-H Relationship	Coefficient of S-A Relationship	Cluster Classification (collapsed)	Morphology Index	Coefficient of S-A-H Relationship	Coefficient of S-A Relationship
A(7,714)	2.57	12.81	10.47	A(14)	2.24	13.55	10.01
B(6,053)	2.84	11.01	11.09	B(4)	2.68	11.96	10.88
C(2,633)	3.91	10.98	13.89	C(2)	3.78	10.88	13.38
D(745)	5.03	10.53	13.29	D(1)	6.73	10.55	13.45
E(168)	6.55	10.75	14.92	E(0)	-	-	-

지는 A군 14개, B군 4개, C군 2개, D군 1개, E군 0개로 구분되었다. 형태지수, S-A-H 관계의 계수값, S-A 관계의 계수값을 Table 5와 같이 나타내었다.

전국 저수지의 형태지수는 $A > B > C > D > E$ 순서를 보였다. 즉, $A > B > C > D > E$ 군의 순서로 저수지의 깊이가 낮다는 것을 의미한다. S-A-H 관계는 $A > B > C > E > D$ 순서로 높았다. 즉, $A > B > C > E > D$ 군의 순서로 저수지의 총 저수량이 적다. S-A 관계는 $A > B > D > C > E$ 순서로 낮았다. 즉, $A > B > D > C > E$ 군의 순서로 저수지의 총 저수량이 적다. 또한, 붕괴된 저수지는 $A > B > C > D > E$ 순서로 군집되었다. 형태지수는 $A > B > C > D$ 이고, 각각 A군, B군, C군의 경우 전국 저수지의 형태지수보다 낮았다. S-A-H 관계는 $A > B > C > D$ 순서로 높았다. 즉, $A > B > C > D$ 군의 순서로 저수지의 총 저수량이 적다. S-A 관계는 $A > B > C > D$ 순서로 낮았고, 저수지의 총 저수량이 적다. 과거에 피해가 발생하였던 저수지를 대상으로 군집 분석을 평가한 결과, 다른 저수지와 비교하여 저수지의 깊이는 낮고, 총 저수량이

적었다. 즉, 저수지의 수심이 얇고 저수량이 작은 저수지의 경우 붕괴될 확률이 내재 되어 있다고 판단하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 전국에 분포되어 있는 17,313개의 저수지의 기본적인 제원을 분석하고, 특히, 붕괴 피해가 발생한 저수지의 형태학적 특성 및 저수량, 만수면적, 제당높이 간의 관계를 파악하는 것을 목적으로 한다. 저수지의 형태지수, S-A-H, 그리고 S-A의 관계를 분석하였다. 붕괴된 저수지의 특성을 파악하기 위하여 주어진 항목들을 토대로 군집 분석을 하였고 5개의 형태로 군집이 되었다. 21개의 붕괴된 저수지에 대해 군집한 결과를 보면, $A(14) > B(4) > C(2) > D(1) > E(0)$ 순서로 군집이 되었다. 본 연구의 주요 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 국내의 저수지의 형태지수는 4.39로 분석되었으며, 보통 호수로 분류되었다. 즉, 보통의 형태지수 범위인

0.6 ~ 10.4 사이에 존재하고 있었으며, 이는 국내의 저수지가 수심이 얇은 형태임을 나타내고 있다. S-A-H의 계수는 11.01로 분석되었으며, 계수값은 저수량(S)과는 반비례하고, 만수면적(A)과 제당높이(H)와는 비례 관계를 나타내고 있다. S-A의 계수는 12.30으로 분석되었으며, 계수값은 저수량(S)과 비례하고, 만수면적(A)과는 반비례 관계를 나타내고 있다.

- (2) 군집 분석 결과 총 5개의 A, B, C, D, E 군으로 나뉘어졌으며, A군은 7,714개, B군은 6,053개, C군은 2,633개, D군은 745개, E군은 168개로 구분되었다. 전체 저수지는 $B > A > C > D > E$ 순서로 분포하였다. 또한, 붕괴된 저수지는 A군 14개, B군 4개, C군 2개, D군 1개, E군 0개로 구분되었다. $A > B > C > D > E$ 순서로 분포하였다.
- (3) 형태지수는 $A > B > C > D > E$ 순서로 낮았고, S-A-H는 $A > B > C > E > D$ 순서로 높았으며, S-A는 $A > B > D > C > E$ 순서로 낮았다. 또한, 붕괴된 저수지의 군집된 결과는 $A(14) > B(4) > C(2) > D(1) > E(0)$ 순서로 군집되었다. 형태지수는 $A > B > C > D$ 이고, S-A-H 관계는 $A > B > C > D$ 순서로 높았으며, S-A 관계는 $A > B > C > D$ 순서로 낮았다.

저수지마다 가지고 있는 저류 용량 및 저수 면적 등 제원이 다르므로 특성을 규명하기 어렵고, 국내 모든 저수지를 대상으로는 정확한 측량을 통하여 저수지의 특성을 파악하기에는 수 많은 시간과 비용이 소요된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 저수지의 형태학적 특성을 분석하고, 저수지의 제원을 활용하여 군집 분석을 한다면 비슷한 형태학적 특성을 내포하고 있는 저수지를 알 수 있다. 또한, 붕괴된 저수지의 형태학적 특성을 알 수 있다면, 저수지 관리 및 운용을 더욱 효율적으로 할 수 있다고 판단된다. 따라서, 본 연구의 결과를 토대로 붕괴가 주로 발생하는 저수지의 특성을 파악함으로써 저수지 관리, 운영 및 발생할 수 있는 재난에 사전 대비 등을 위하여 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

Campos, J.N.B., Lima Neto, I.E., Studart, T.M.C., and Nascimento, L.S.V. (2016). Trade-off between reservoir yield and evaporation losses as a function of lake morphology in semi-arid Brazil. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, Vol. 88, No. 2, pp.

1113-1125.

Hong, B. M. (2004). Problems and improvement plans for the construction of agricultural reservoirs. *Water for Future*, Vol. 37, No. 4, pp. 29-33.

Kim, B.H., and Han, K.Y. (2016). Flood inundation analysis resulting from two parallel reservoirs' failure. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 2, pp. 121-132.

Kim, D.H., Kim, J.S., Choi, C.H., Wang, W.J., You, Y.H., and Kim, H.S. (2019). Estimations of hazard-triggering rainfall and breach discharge of aging reservoir. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 7, pp. 421-432.

Korea Rural Community Corporation (KRC). (2017). *Statistical yearbook of land and water development for agriculture*.

Lehner, B., and Döll, P. (2004). Development and validation of a global database of lakes, reservoir and wetlands. *Journal of Hydrology*, Vol. 296, No. 1-4, pp. 1-22.

Leonard, J., and Crouzet, P. (1998). *Lakes and reservoir in the EEA area*. Topic Report No. 1/1999, European Environment Agency (EEA), Copenhagen, Denmark.

Nam, W.H., Kim, T.G., Hong, E.M., Hayes, M.J., and Svoboda, M.D. (2015). Water supply risk assessment of agricultural reservoirs using irrigation vulnerability model and cluster analysis. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 57, No. 1, pp. 59-67.

Park, S.G., Song, S.H., Choi, J.H., Choi, B.G., and Lee, B.H. (2002). Applicability of geophysical prospecting for water leakage detection in water utilization facilities. *Proceedings of 4th Special Symposium*, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists, pp. 179-195.

Song, B.G., Oh, J.Y., Kim, S.S., Lee, T.W., and Park, K.H. (2018). Analysis of 3D topographic information on reservoir using UAV and echo sounder. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 7, pp. 563-568.

Sturges, H. (1926). The choice of a class interval. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 21, No. 153, pp. 65-66.

Takeuchi, K. (1997). Least marginal environmental impact rule for reservoir development. *Hydrological Science Journal*, Vol. 42, No. 4, pp. 583-597.

Won, C.H., Yoon, H.C., and Kim W.B. (2020). 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.

Yoo, C.S., and Park, H.K. (2007). Analysis of morphological characteristics of farm dams in Korea. *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 42, No. 6, pp. 940-954.

Zumel, N., and Mount, J. (2017). *Practical data science*

with R. Shelter Island, NY, USA: Manning Publication Co.

Received	■	July 9, 2020
Revised	■	July 10, 2020
Accepted	■	August 3, 2020