

강수를 고려한 필댐 침투수량의 관리기준에 관한 연구

A Study on Management Criteria of Seepage for Fill Dams Considering Rainfall Effect

이 종 은¹ Lee, Jongeun 윤 석 민² Yoon, Sukmin
임 은 상³ Im, Eun-Sang 강 기 천⁴ Kang, Gichun

Abstract

The purpose of this study is to suggest the management criteria through the decision tree analysis for a seepage, which is an important instrumentation type of the fill dam. In the case of the seepage of the dam in Korea, seepage can be increased rapidly because rainfall directly flow into the downstream slope and abutment of dam during rainfalls. Therefore, it is necessary the management criteria for the seepage of the fill dam in consideration of rainfall. In this study, decision tree analysis was performed for a fill dam in Korea by setting the seepage as the response variable and the rainfall and water level of dam as explanatory variables. As the study results, the water level acted as an explanatory variable from the conditions under daily rainfall of 34.75 mm/day, and the branch conditions of the water level were analyzed to be 37.4 m and 35.23 m. 98% of the rainfall data is distributed under the conditions of the daily rainfall of 34.75 mm/day, and coverage of the seepage is indicated from 13.25 L/min to 24.24 L/min. When the rainfall and water level as the influence factors for the seepage were selected, the influence of the rainfall was dominant. Finally, the seepage of fill dam by considering the rainfall and water level was suggested as a management criteria.

요 지

본 연구의 목적은 필댐의 중요 계측항목인 침투수량에 대해서 의사결정나무 분석을 통해 관리기준을 제시하는 것이다. 국내 댐의 침투수량의 경우는 강수시 하류사면 및 양안으로부터 강수의 직접적인 유입이 발생하여 침투수량이 급증하는 현상이 발생한다. 따라서 강수를 고려한 필댐의 관리기준이 필요한 설정이다. 본 연구에서는 국내 필댐 1개소에 대해 침투수량을 반응변수로 하고 강수량 및 저수위를 설명변수로 설정하여 의사결정나무 분석을 수행하였다. 그 결과 강수량 34.75mm/day 이하의 조건에서부터 저수위가 설명변수로서 작용하였고 저수위의 분기조건은 37.4m, 35.23m로 분석되었다. 강수량 34.75mm/day 이하의 조건에서 침투수량 자료의 98%가 분포하며, 해당 집단의 평균값은 13.25L/min~24.24L/min으로 나타났다. 침투수량에 대한 영향인자로서 강수량 및 저수위를 선택하는 경우 강수량의 영향이 지배적이었고 강수 및 저수위별 평균 침투수량의 관리기준이 제안되었다.

Keywords : Decision tree analysis, Fill dam, Seepage, Rainfall, Water level

1 비회원, 경상대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Gyeongsang National Univ.)

2 비회원, 경상대학교 공학연구원 학술연구교수 (Research Prof., Engrg. Research Institute, Gyeongsang National Univ.)

3 정회원, K-water 물인프라-에너지연구소 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Water Energy&Infrastructure Research Center, K-water)

4 정회원, 경상대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Gyeongsang National Univ., Tel: +82-55-772-1792, Fax: +8282-55-772-1799, gkang@gnu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 11월 30일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2020 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

우리나라 댐의 수는 약 18,000개 이상에 이르며 산업 기반시설의 중요한 기능을 하고 있다. 그러나 최근에 지진 발생 빈도의 증가, 기상이변 및 댐 노후화 등에 의한 위협을 해소하기 위해 댐의 안정성 확보를 위한 설계, 시공 및 유지관리 기술의 개발 및 향상이 절실히 요구되고 있다(Park et al., 2016). 특히, 1960년대부터 건설되어 온 다목적댐들이 점차 고령화 되어감에 따라 보수보강의 필요성이 대두되고 있다. 국내의 다목적댐 및 용수 전용댐 37개 댐 중에서 30년 이상 지난 댐도 30% 정도에 달하고, 용수전용 댐 14개 중에는 절반이 넘는 댐이 30년 이상 경과되었다. 이들 댐에 문제가 생길 경우 수(水)재해가 발생할 뿐만 아니라, 국가 물 공급에 부정적인 영향을 끼칠 것으로 생각된다. 따라서 댐에는 침투수량계, 간극수압계, 지진계, 토압계, 경사계, 침하계 등 다양한 종류의 계측기가 매설 및 설치되어 실시간 감시 또는 수동 감시를 통해 그 안정성 분석에 활용되고 있다(K-water, 2019). 그리고 이러한 다양한 계측기에서 얻어지는 데이터는 댐의 유지 관리 또는 연구를 위한 기본 데이터로서 매우 중요하다(KGS, 2010). 특히 댐을 통하여 유출되는 침투수량은 댐 거동, 변화, 이상 징후를 파악하는데 중요하며 이를 정확하게 파악하는 것은 댐 관리에 필수조건이다(Park and Shin, 2013). Fig. 1에 나타나 있는 바와 같이 댐은 담수 개시 후 최초의 상시 만수위가 될 때까지를 제1기라고 하며, 최초의 만수위에서 댐의 거동이 안전한 상태에 도달할 때까지를 제2기라고 한다. 그리고 댐의 거동이 안정된 상태에 도달한 이후를 제3기라고 한다. Fig. 1과 같이 침투수량은 제 1기에 최대치가 되어 시간에 따라 필댐이 안정화 되면서 침투수량은 점진적으로 줄어들어 제 3기에서는 일정한 값이 되는 것이다.

미국 대댐회(USCOLD, 1975)에 의하면 미국 내에서

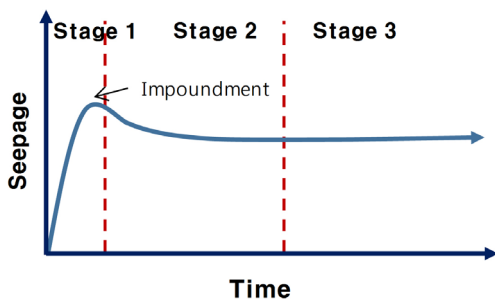


Fig. 1. Management stage of fill dams (Park and Shin, 2013)

발생한 사력댐 붕괴사례 77건(1980년대 까지 발생한 사고)을 분석한 결과 댐 제체 또는 기초지반을 통한 누수와 파이핑에 의한 파괴가 44%를 차지였고 침투수량계는 이러한 파괴유형을 감시할 수 있는 중요한 계측항목이다(Ahn and Lim, 2010; Heo and Chung, 2019). 그리고 침투수량 계측관리는 관측된 값에 대해 안전한 수준을 의미하는 관리기준치를 설정하고 계측치와 관리기준치와의 비교에 의해 관리하는 것이 기본이다. 관리기준치의 결정은 설계에 포함되는 많은 가정 조건이나 주변 환경 조건 등을 고려하여 관리하기 쉽도록 여러 단계에서 판단할 수 있는 기준치를 설정하는 것이 중요하다(Noh, 2002). 그러나 설계시 예측된 침투수량과 주변 환경 조건에 의해 댐에 매설된 계측기로부터 측정된 계측치는 차이가 있다. 따라서 댐에서는 시험담수 및 운영기간의 계측자료를 분석하여 댐의 정상적인 범위를 확인하고 이를 토대로 관리기준치를 설정한다. 하지만 국내에는 시험담수의 미 실시, 계측기의 부재, 강수의 유입에 따른 계측치의 신뢰도 저하 등에 의해 운영 중 얻어진 계측치 등을 이용하여 관리기준치를 수립하는 것이 일반적이다.

댐 계측값의 관리기준에 대해 Kuperman 등(2007)은 동일 계측기로부터 측정된 계측치들이 과거와 유사한 저수위 등의 조건에서 특정 범위내에 있다면 그 댐의 거동은 정상범위로 고려하였고, Lee(2014)는 댐 거동의 정상범위 내의 경시변화 특성에 따라 슈하르트 관리도법과 선형회귀분석에 의한 방법으로 상한계와 하한계를 산정하여 관리기준치로 제시하였다. Ryan(2000)과 Lewis et al.(2001), Myers and Montgomery(2002)에는 정규분포를 따르지 않는 많은 측정치들에 대한 연구를 수행하였고 댐 계측기에서 측정된 계측치의 경우에도 정규분포를 따르지 않는 비대칭 분포를 나타내는 경우가 많다. 그리고 Park and Park(2006)은 비대칭 분포를 따르는 측정치에 대한 관리도에 정규성 가정을 기초로 한 슈하르트 관리도를 그대로 사용한다면 측정치의 변동성을 관리하는데 효율성이 떨어져 비대칭성이 증가할수록 제1종 오류를 범할 확률이 증가한다고 하였으며 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 사분위수 관리도를 제안하였다. 하지만 실제 국내 댐의 경우 집수벽이 하류사면 선단에 위치하여 강수시 하류사면을 통한 강수의 직접적인 유입으로 인해 침투수량이 증가함에 따라 상기의 방법을 도입하기는 한계가 있다.

의사결정나무(Decision Tree) 분석은 자료들의 분류 구조를 이해하기 쉽고, 의사결정의 이유를 설명할 수 있

어서 댐의 침투수량과 상관관계가 높은 저수위와 강수의 영향을 고려할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국내의 필댐 1개소를 사례로 침투수량 계측치에 대해 의사결정나무 분석을 수행하였고 그 결과를 통해 관리기준치를 제시하고자 한다.

2. 연구대상지역

2.1 연구 대상댐

연구대상 댐인 OO댐은 중심코아형 석괴댐(Central Core Rockfill Dam)으로 댐 단면은 댐 축 선상에 Core를 설치하고 상류 및 하류 방향으로 향하면서 Filter와 Rockfill

Table 1. Summary of OO dam

| Dam type | Center-cored Rockfill Dam |
|------------------------------|---------------------------|
| Dam crest elevation (m) | 44 |
| Dam crest wide (m) | 8 |
| Upstream slope | 1 : 2.2 |
| Downstream slope | 1 : 1.8 |
| Dam crest length (m) | 108 |
| Dam height (m) | 35.2 |
| Dam volume (m ³) | 153,000 |

순으로 축조되었다. 댐의 주요 제원은 Table 1에 나타난 바와 같다. 사업기간은 2002년~2007년이고 담수이후 약 10년이 경과한 댐이다(Fig. 2).

2.2 침투수량 측정장치 설치 현황

OO댐의 침투수량 측정장치는 댐체 및 기초지반을 통한 침투수량의 상대적인 변화를 파악하기 위하여 댐의 하류부 선단부에 차수 집수벽을 설치하고 집수벽은 침투수량 측정실과 침투수 유도관에 의해 연결되고, 침투수량 측정실에는 V-notch가 설치되어 유도관을 통해 흐르는 침투수의 양을 V-notch를 월류하는 높이(h)를 측정하여 산정한다. K-water에서는 필댐의 침투수량은 댐 관리규정에 의거하여 필댐의 유지관리의 주요 계측으로 지정하여 실시간(1회/hr)으로 감시할 수 있도록 규정화하였다. Fig. 3은 댐에 설치된 침투수량 측정장치인 V-notch와 수위계를 나타내고 있다. OO댐은 침투수량계가 1개소 설치되어있으며, 수로의 저면 폭(B)는 0.5m이고, 수로 바닥에서 V-notch 저면까지의 높이(D)는 0.3m이다. V-notch의 깊이(h)와 각(a)는 각각 0.2m, 90도이다. 침투수량 측정을 위해 침투수 유입부에 부자식 수위

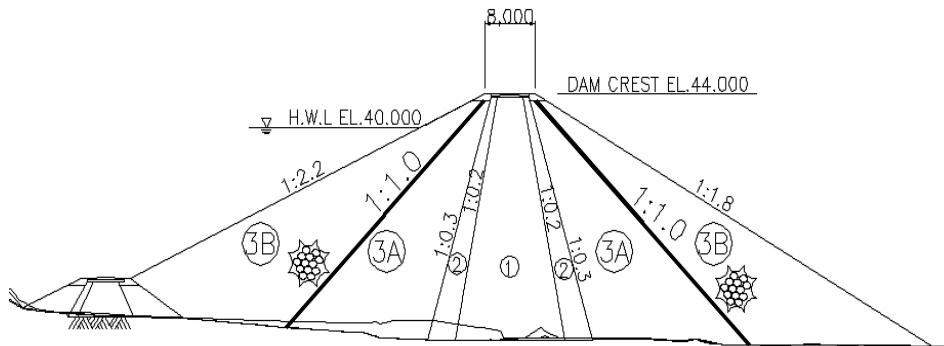


Fig. 2. Cross-sectional plan for OO dam



(a) V-notch (Jang and Lee, 2018)



(b) Float level meter installed at the rear of V-notch

Fig. 3. Instruments for measuring seepage of a dam

계가 설치되어 V-notch를 월류하는 높이를 자동으로 측정하고 유량으로 환산하여 계산한다. OO댐의 경우 국제기준(ISO, 1998)에서 제시한 규격으로 설치되어 그 정확도는 이미 검증이 되었다(Jang and Lee, 2018).

3. 계측현황

3.1 저수위

Fig. 4는 OO댐의 시간에 따른 저수위와 강수의 변화를 나타내고 있다. 댐 관리 및 운영에서 중요한 요소가 되는 저수위는 자료수집 기간 내 결측률이 0%로 우수하게 데이터가 관리되고 있고 그림에 나타난 바와 같이 강수가 급증할 경우 저수위가 상승되는 것을 알 수 있다. 평균 저수위는 EL. 35.68m이고 표준편차는 2.97m이다. 저수위 및 강수량의 통계분석을 위해서 2009년 6

월 1일부터 2019년 6월 10까지의 계측결과를 활용하였고, OO댐 내 저수지의 평균강수량은 3.27mm/day이며 최대강수량은 2016년 10월 05일에 발생한 강수로 약 234mm/day였다.

3.2 침투수량

침투수량의 통계 분석을 위해서 저수위와 강수량과 동일한 기간의 계측결과를 활용하였다. 자료수집기간 동안의 침투수량의 평균 결측률은 21.6%(792일/3,662일)로 댐에 설치된 다른 계측 데이터(간극수압계, 토압계, 변위계 등)와 비교하여 상대적으로 높은 결측률을 나타내고 있다. 또한, 필댐의 침투수량의 경우 차수벽이 하류 선단에 위치하고 있어 강수시 하류사면 및 양안으로부터 강수의 직접적인 유입이 발생하여 침투수량이 급증하는 현상이 발생한다. Fig. 5에 나타난 바와 같이

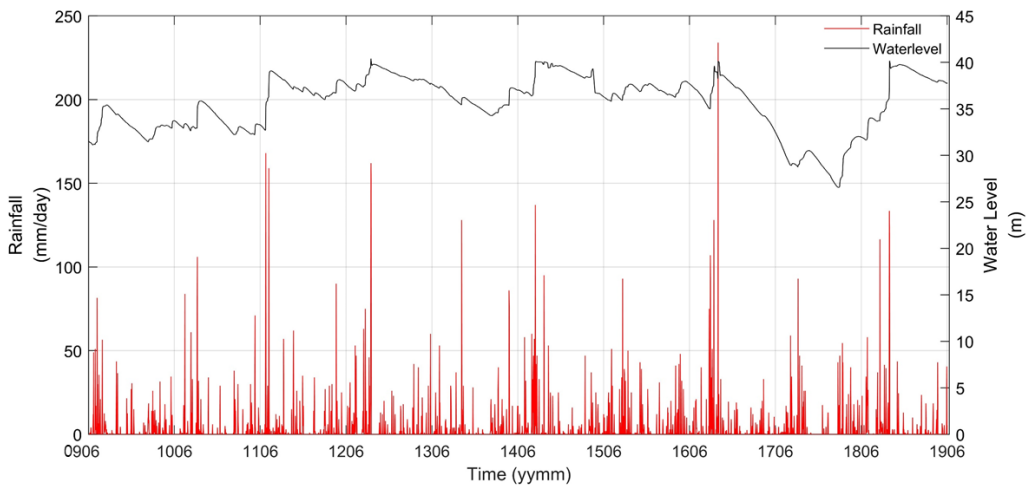


Fig. 4. Comparisons between water level and rainfall

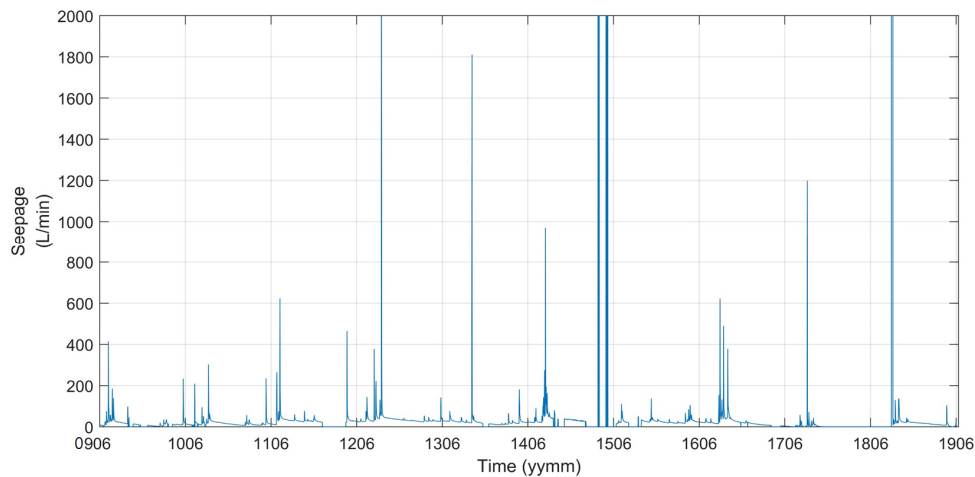
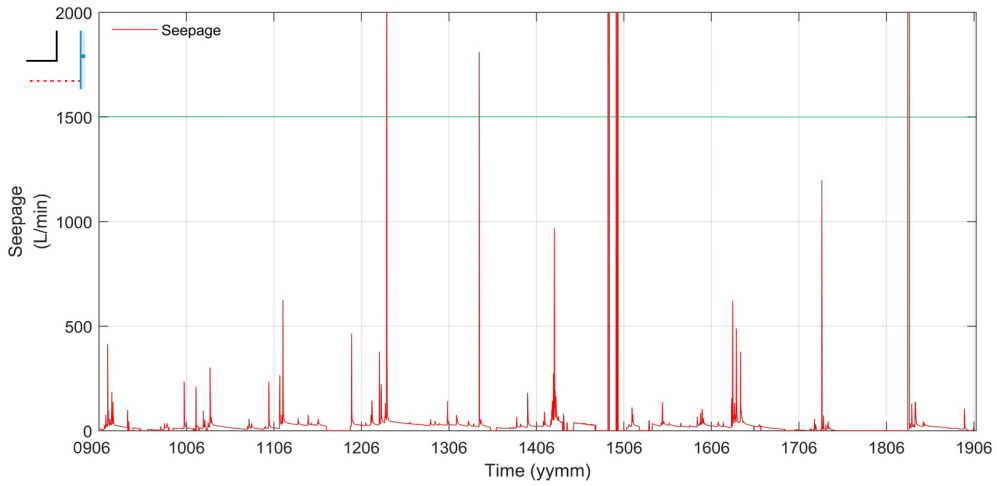


Fig. 5. Seepage of OO dam

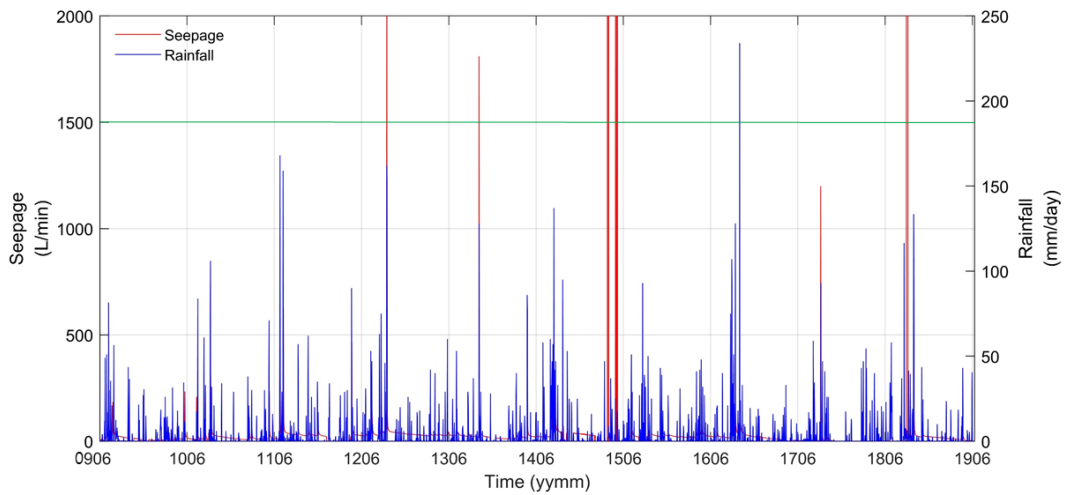
잠재적 상한 이상치가 자료 전반에 분포하고 있으며 강수 1,000L/min 이상의 침투수량이 계측되기도 한다.

3.2 침투수량 이상치 제거

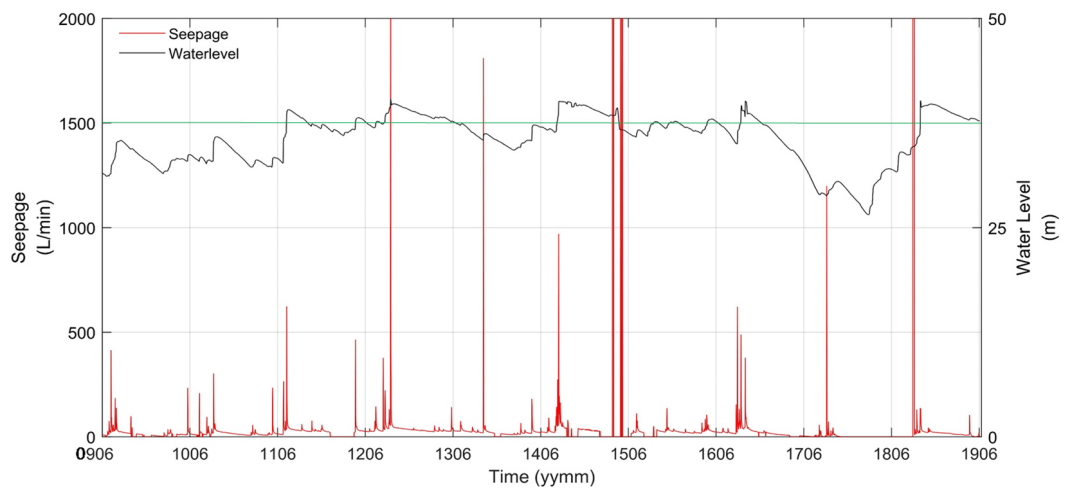
침투수량의 통계 분석 결과 평균 관측값은 178.74L/min 인 반면에 중위수는 18.41L/min 그리고 표준편차는 2,950



(a) Raw data for seepage



(b) Raw data for seepage with rainfall



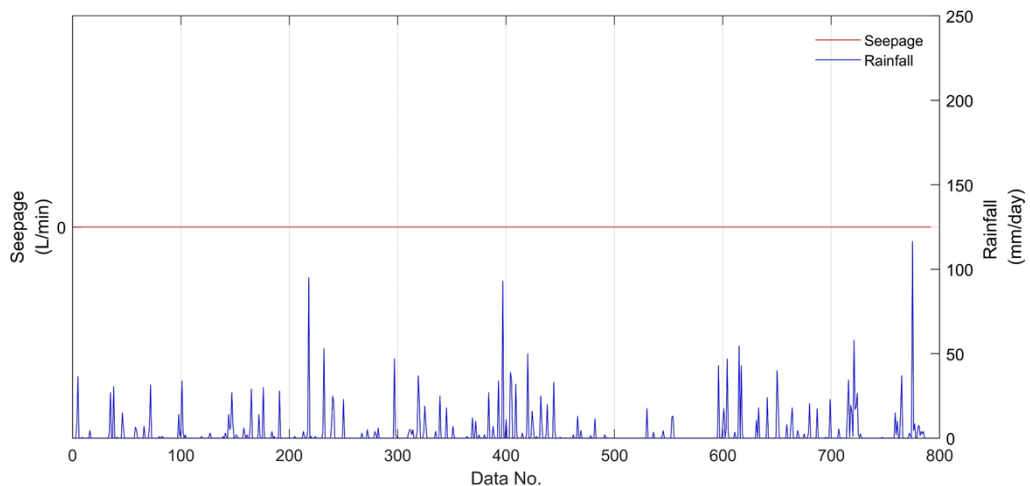
(c) Raw data for seepage with water level

Fig. 6. Comparisons among seepage, rainfall, and water level

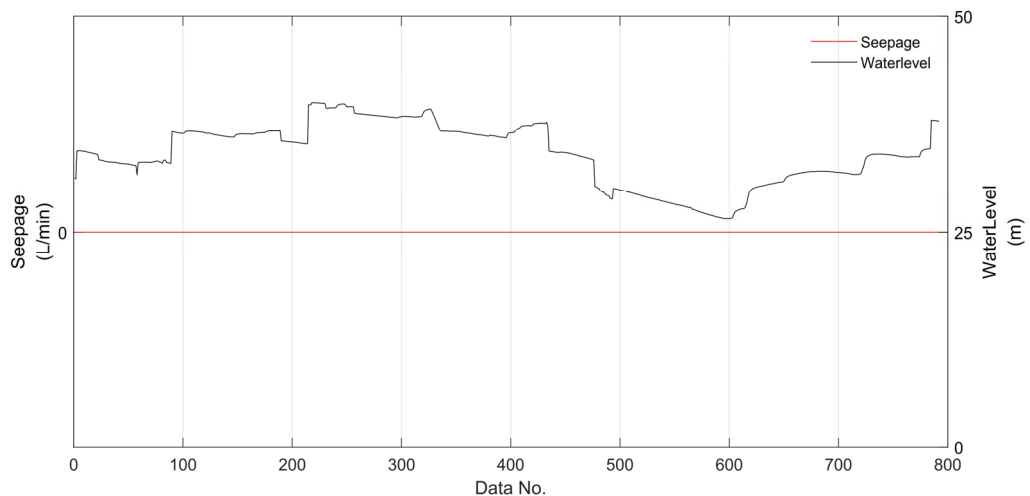
L/min로서 극심한 비대칭 분포를 나타내고 있다. 침투수량계의 경우 1개소에서만 측정됨에 따라 z-score 등의 단변량 기반의 이상치 탐색으로는 효과적인 이상치 제거가 불가능할 것으로 판단되어, 본 연구에서는 침투수량 자료에 대한 정량적 분석을 위해 강수량 및 저수위 자료를 활용한 자료분석 기반의 이상치 제거 방법을 적용하였다. 침투수량 자료 전반에 분포하는 극단적 이상치들의 제거를 위해 침투수량을 측정하는 V-notch의 최대 용량은 국제기준(ISO)에서 제시하는 Kindsvater-Shen 공식을 적용하고 있으며(ISO, 1998), 이를 적용하여 계산한 결과 가능 최대 관측값은 약 1,500L/min으로 조사되었다(K-water, 2017). Fig. 6(a)(침투수량에 대한 시계열 그래프)에 도시한 것과 같이 가능최대 관측값을 초과하는 침투수량 자료가 시계열자료 전반에 분포하는 것을 알 수 있다. 그리고 침투수량, 강수량 그리고 저수

위 관계를 도시한 Fig. 6(b)(침투수량과 강수량의 시계열 그래프)와 Fig. 6(c)(침투수량과 저수위의 시계열 그래프)를 살펴보면 침투수량의 가능최대 관측값을 초과하는 시점에서 강수량 및 저수위의 극값은 발생되지 않는 지점을 확인 할 수 있다. 본 연구에서의 상관분석을 위해서는 정량적 데이터가 필요하며, 삼각웨어를 초과하는 침투수량에 대해서는 정확한 수치를 측정할 수 없기 때문에 상관분석에는 제외되었다. 본 연구의 결과에서는 1,500L/min이상의 침투수량 데이터에 대해서는 신뢰성이 저하될 것으로 판단되며 연구대상 댐의 경우는 현재 설치된 삼각웨어보다 큰 용량의 시설이 설치되어야 할 것으로 판단된다.

침투수량 자료내에는 결측을 나타내는 “0(zero)”으로 기록된 관측값이 약 22%(결측률)가 포함되어 있다. 해당 관측값이 결측값 또는 실제 관측값인가에 대한 구분



(a) z-score seepage and rainfall



(b) z-score seepage and water level

Fig. 7. Time histories for no data

을 위해 강수량 및 저수위 자료와 비교하였다. 아래 Fig. 7의 (a)는 “0”으로 기록된 시점과 그 시점의 강수의 관계를 도시화한 것이고 (b)는 저수위와의 관계를 도시화한 것이다. Fig. 7은 침투수량 결측 시점에 대응하는 강수량 및 저수위를 도시한 것으로 침투수량이 “0(zero)”의 값으로 기록된 시점에 있어서 실제 강수량이 발생하였으며, 저수위의 변화도 평균을 중심으로 상하에서 분포하는 점 등을 고려해 해당 관측값을 단순 결측값으로 판단 가능하여 제거하였다. Fig. 7의 Data No.는 결측치 및 이상치로 판단된 값을 제거한 후 시계열데이터의 의미가 없어진 단순 데이터들을 나열해 표현한 것이다.

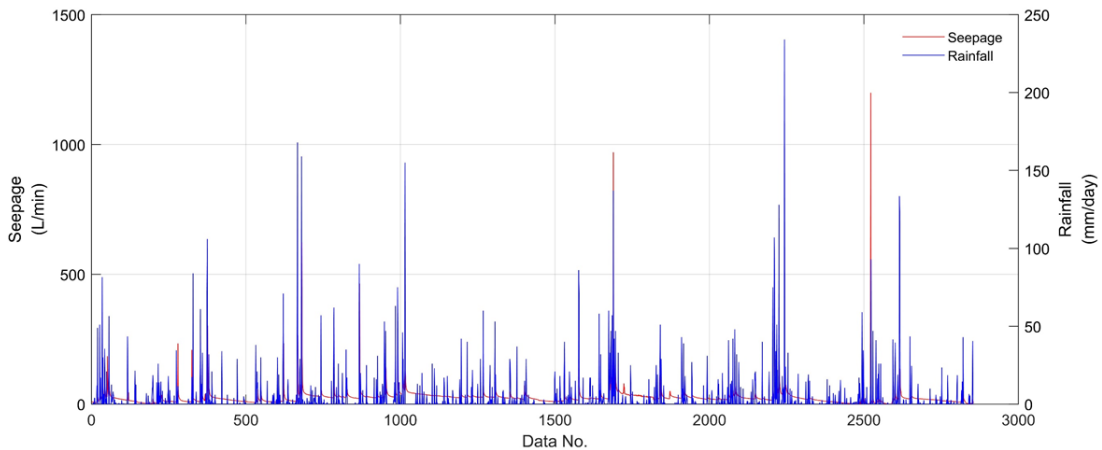
Fig. 8은 침투수량 이상값 및 결측값을 제거한 결과를 나타내고 있다. Fig. 8은 이상치로 판단된 침투수량 계측치를 제거한 후 침투수량-강수량, 침투수량-저수위를 비교한 것이다. 침투수량과 강수량을 도시한 Fig. 8(a)에서, 강수량이 크게 증가할 경우 침투수량도 증가하는 것

을 알 수 있다. 침투수량과 저수위의 관계를 도시한 Fig. 8(b)에서, 침투수량은 강수량만 아니라 저수위의 변동에 따라 증감하는 것을 알 수 있다. 즉, 연구대상인 OO댐의 침투수량은 강수와 저수위를 반응변수로 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다.

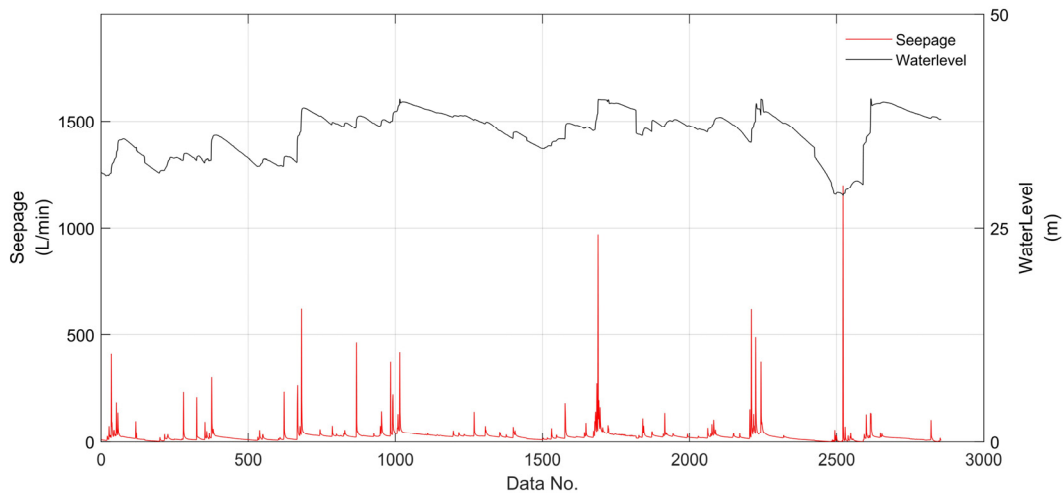
Table 2는 이상값 및 결측값을 제거한 침투수량, 강수량, 저수위에 대한 평균과 표준편차, 그리고 중위수를 나타내고 있다. 표에 나타낸 바와 같이 이상치 제거 이후 침투수량의 표준편차와 중위수가 43.20L/min과 22.29 L/min으로 변경된 것을 알 수 있다.

Table 2. Standard deviation and average of Seepage, Rainfall and Water level

| | Standard deviation | Mean | Median |
|-------------------|--------------------|-------|--------|
| Seepage (L/min) | 43.20 | 27.06 | 22.29 |
| Rainfall (mm/day) | 12.50 | 3.23 | 0 |
| Water level (m) | 2.61 | 36.13 | 36.85 |



(a) Sort Data: seepage and rainfall



(b) Sort Data: seepage and water level

Fig. 8. Removal of abnormal and missing value for seepage

3.3 침투수량의 관리기준

계측기의 관리기준치란 자동 또는 수동에 따른 계측값의 변동에 대해 댐의 비정상적인 거동을 판단하기 위한 기준이 되는 측정값으로 정의될 수 있다. 침투수량의 일반적인 관리기준치는 설계 때의 설계값과 수치해석에 의한 예측치, 초기 담수 시 계측된 최대 계측치, 최대 과거 타 댐에서의 측정치, 그리고 해당 댐 운영 중 얻어진 계측치 등을 이용하여 수립할 수 있다. 하지만 실제 필댐의 경우는 그 규모, 재료 특성, 원지반의 상태 등에 따라 침투수량이 변하기 때문에 댐을 통과하는 침투수량을 모든 댐을 대상으로 일괄적으로 규정할 수 없다. 따라서 국내에서도 댐시설기준(MLIT, 1993)에서는 필댐의 허용 침투수량에 대해서 일부 언급하였으나, 일률적인 기준 설정의 불합리로 인해 현재는 그 내용이 삭제되어 적용되지 않고 있다. 현재 국내에서는 계측된 자료의 경시 변화 분석을 통해 댐 제체의 이상 유무에 대해서 판정하고 있다.

OO댐 침투수량의 관리기준치는 건설 이후 비 강수 때의 기왕의 최대치를 적용하고 있다. 하지만 전술한 바와 같이 댐의 가장 위험한 상황인 강수 때에는 적용될 수 없는 관리기준이다. 즉, 강수 시 강수의 직접적인 유입으로 인해 관리기준치를 적용하기 곤란한 실정이며 이에 대한 대책이 필요하다.

4. 의사결정나무 분석

4.1 의사결정나무 분석의 목적

의사결정나무(Decision Tree) 분석은 비슷한 유형인 신경망 구조분석(Neural Network Analysis)과 달리 자료들의 분류구조를 이해하기 쉽고, 의사결정의 이유를 설명할 수 있어 더욱 많이 적용된다. 의사결정나무 분석의 Tree 구조 형성을 위한 알고리즘은 현재 다양하게 개발되고 있다. 의사결정나무는 뿌리부터 시작하고 각 가지가 끝의 마디가 될 때까지 세분화된 마디를 분할하면서 형성된다. 이처럼 의사결정나무의 완성을 위해서는 마디 분할 기준(splitting rule)의 선택, 분할을 멈추기 위한 정지 기준(stopping rule)의 선택, 가지 확장(pruning) 방법의 선택, 입력변수 값 내에 결측이 있는 경우 대치(imputation) 방법 등에 대해 여러 단계를 수행하여야 한다(Park et al., 2015). 주로 알려진 알고리즘으로는 CART

(Classification and Regression Trees), CHAID(Chisquared Automatic Interaction Detection), 그리고 C4.5 등이 있으며(Park et al., 2015), 본 연구에서는 보편적으로 가장 널리 사용되고 있는 CART 알고리즘(Leo Breiman, 1984)을 이용하여 침투수량 분석을 수행하였다.

4.2 의사결정나무 분석의 절차

CART 알고리즘은 자료의 여러 부분집합 Tree를 생성하고 그 중에서 최적의 부분집합 Tree를 찾는 방법론이다. CART 알고리즘은 명목형, 순서형, 연속형 변수에 적용 가능하며, Fig. 9에 나타난 바와 같이 모형의 구성을 뿌리(Root Node) → 가지(Child Node) → 잎(Branch)으로 구성하여 설명변수들의 조건에 따른 관계 규칙을 구조화하는 특징이 있다. 뿌리 노드는 반응변수의 변화를 설명하는 설명변수 중 가장 높은 영향력을 가지는 변수가 위치하며, 해당 변수의 조건에 따라 이진 가지를 구성하게 된다. 가지 노드는 제1 설명변수 또는 이외의 설명변수들이 위치되며, 잎 노드는 뿌리 및 각 마디에서 분기된 최종 단계의 노드이며 하나의 잎 노드는 분류된 규칙에 따른 군집을 나타낸다. 그리고 분류된 군집 단위로부터 추정된 회귀식들을 종합하여 반응변수의 거동을 예측할 수 있는 모형을 생성할 수 있다.

특히, CART 알고리즘은 독립변수들의 교호작용이 존재하거나, 다중공선성의 문제가 존재할 경우 등에 대한 회귀분석의 대안으로서 제안될 수 있다. CART 알고리즘에서 분리기준은 부모 마디들로부터 자식 마디들이 형성될 때 설명변수의 선택과 범주(category)의 병합을 결정하는 기준을 의미한다. 따라서 분리기준의 정량화를 위해서는 반응변수의 분포를 가장 잘 구분할 수 있는 설명변수 선택 및 분리조건을 수치화해야 한다. 이상형 자료의 경우 반응변수의 각 범주에 속하는 빈도에 기초하여 분리 발생되며 연속형 자료는 목표변수의 평균과 표준편차에 기초하여 마디의 분리가 발생된다(Kang et al., 2014). 그리고 각 자료형태에 따른 세부 분리기준 및 조건은 Table 3에 요약하였다.

본 논문에서는 의사결정나무 분석을 위해 Matlab 2019b를 활용하였으며, 대상자료의 형태가 연속형임에 따라 분산 감소량을 분리기준으로 적용하였다. n 개로 구성된 설명변수 $x_i = (x_1, \dots, x_d)$ 및 반응변수 $y = (y_1, \dots, y_n)$ 의 dataset에 대해 각각의 분리노드 t 에서 분산 감소량 $R(t)$ 는 식 (1)과 같이 정의된다.

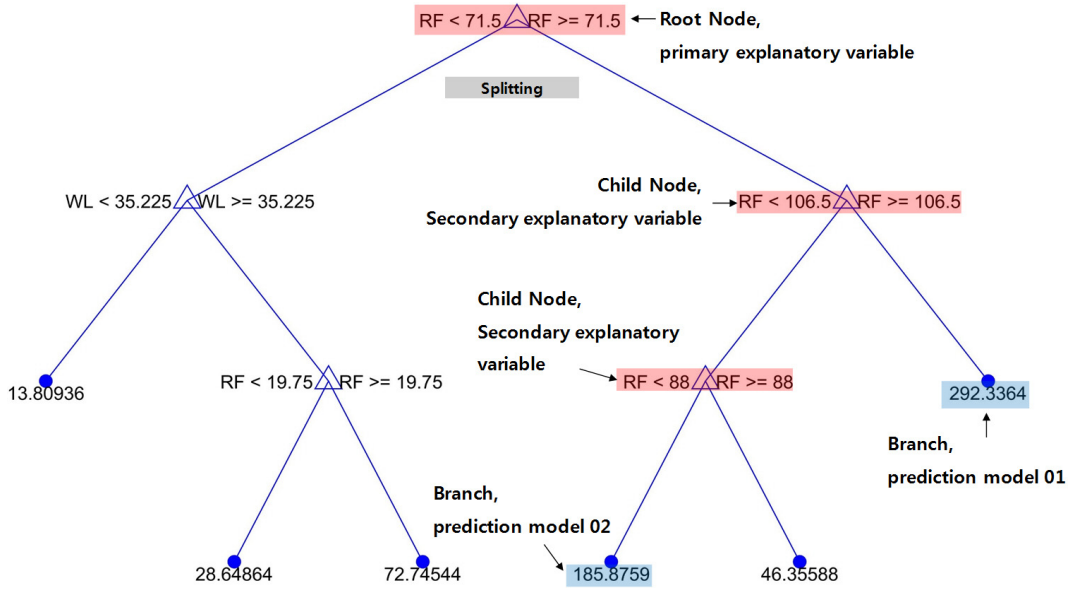


Fig. 9. CART algorithm

Table 3. Splitting rules for decision trees

| Categories | Splitting rules | Splitting conditions |
|-------------------------|------------------------|---|
| Discrete distribution | p-value for χ^2 | Under the condition that p-value is minimized |
| | Gini index | Under the conditions that most reduce the Gini index |
| | Entropy index | Under conditions that reduce the most entropy index |
| Continuous distribution | p-value for F | Under conditions where p-value is minimized |
| | Decrements of variance | Under conditions that maximize the amount of variance reduction |

$$R(t) = \frac{1}{n} \sum_{y_i, x_i \in t} (y_i - \bar{y}(t))^2 \quad (1)$$

$$\text{here, } \bar{y} = \frac{1}{n(t)} \sum_{y_i, x_i \in t} y_i$$

$$PI_{x_i} = \frac{1}{N_t} (\Delta R(s^*, t)_{x_i}) \quad (3)$$

각 분리단계에서 가능한 모든 분기 조건의 집합을 S , 각각의 분기조건을 s 라 할 때, 최적 분기조건은 s^* 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta R(s, t) &= R(t) - R(t_L) - R(t_R) \\ \Delta R(s^*, t) &= \max_{s \in S} \Delta R(s, t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $R(t_L)$ 및 $R(t_R)$ 는 각 마디에서 좌/우측 가지의 분산 감소량이다.

그리고 각 마디의 최적 분기조건 s^* 로부터 선택된 설명변수 x_i 및 분산감소량 $\Delta R(s^*, t)_{x_i}$ 를 통해 설명변수들의 중요도(Predictor Importance, PI)는 식 (3)을 이용해 산정할 수 있으며, PI 가 큰 설명변수일수록 반응변수에 대한 설명력이 우수한 것을 의미한다.

4.3 침투수량의 의사결정나무 분석

분석나무 모형은 뿌리(제1 설명 변수) → 가지(기타 설명변수) 분화 → 잎(분류집단/예측모형)으로 구성됨에 따라 교호작용이 포함된 다변량 인자들의 분석이 용이하다. 따라서 침투수량의 변화 원인에 대해 강수량 및 저수위의 영향을 분석하고자 CART 알고리즘을 적용한 분석나무 분석을 수행하였다. Fig. 10은 침투수량을 반응변수로 강수량 및 저수위를 설명변수로 설정하여 수행된 분석나무 결과를 강수량(RF), 저수위(WL), 표본크기(N), 평균(avg), 표준편차(SD)를 토대로 도시한 것이다.

그리고 Fig. 11은 설명변수로 적용된 강수량 및 저수위에 대한 무차원 PI 를 나타낸 것이다. 여기서 무차원 PI 는 각 설명변수의 PI 의 크기를 전체 PI 의 대한 비율로서 나타낸 것이다. 변수 강수량 0.87, 저수위 0.13임에

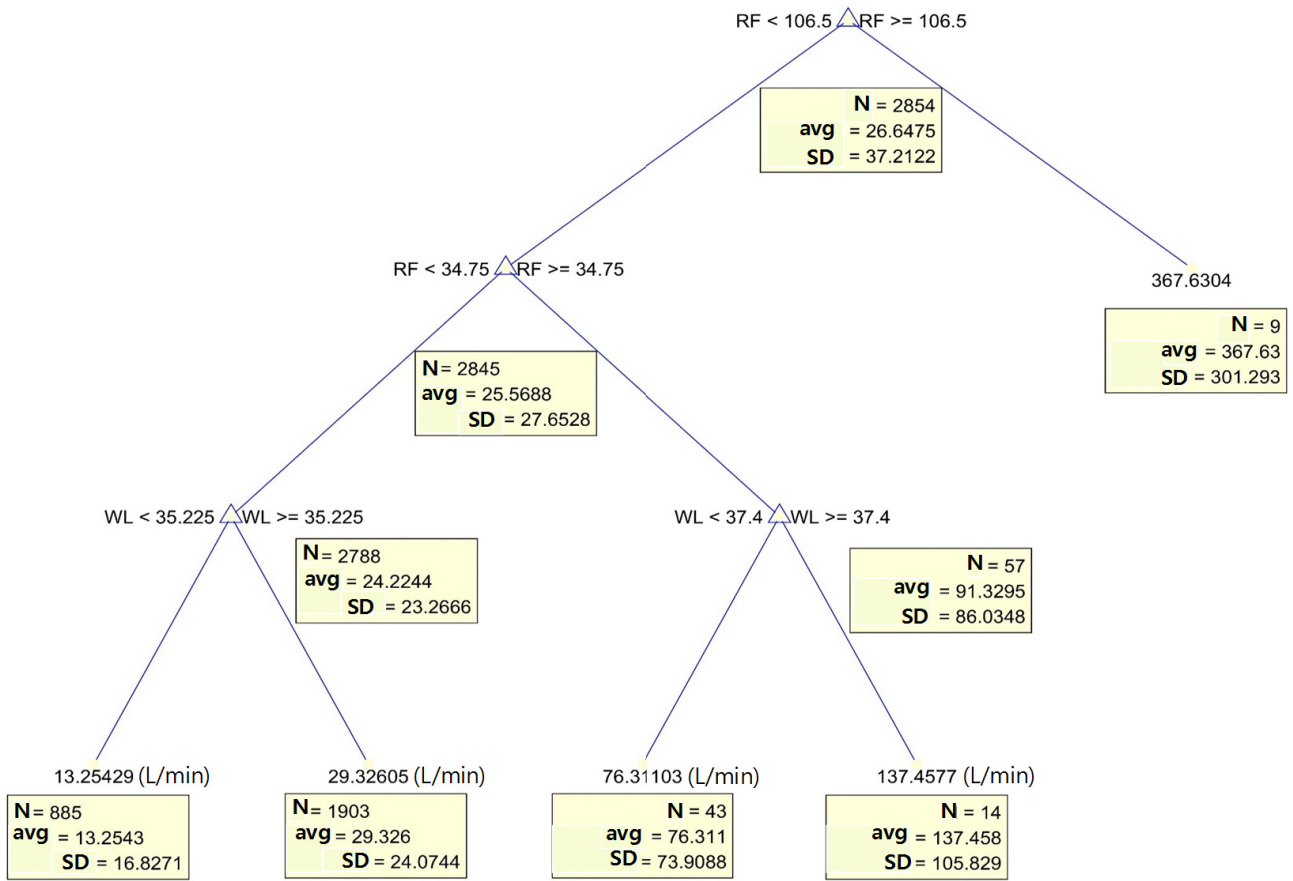


Fig. 10. Decision tree among seepage, rainfall, and water level

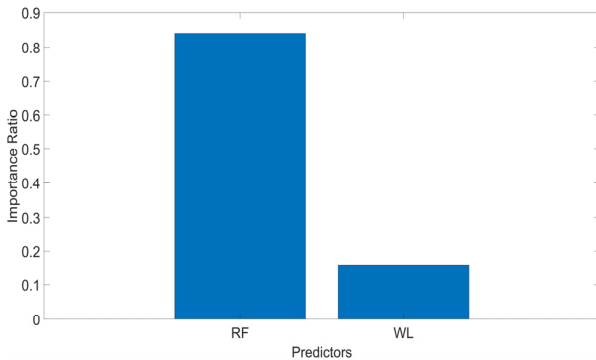


Fig. 11. Predictor importance estimates

따라, 제1 설명변수로서 강수량이 선택되었다. 그리고 강수량 및 저수위 변동에 따른 침투수량의 변화를 분석하고자 분류된 조건에 따른 침투수량 집단의 통계량을 산정하였다.

Fig. 10 및 Table 4에 요약한 것과 같이 제1 설명 변수로 선택된 강수량의 분기 조건은 106.5mm/day, 34.75mm/day 이며, 강수량 34.75mm/day 이하의 조건에서부터 저수위가 설명변수로서 작용한다. 저수위의 분기 조건은 37.4m, 35.23m로 분석되었다. 특히, 강수량 34.75mm/day 이하

Table 4. Results of decision tress analysis

| Primary explanatory variable | Second explanatory variable | Response variable | |
|------------------------------|-----------------------------|---------------------|-------------|
| | | Seepage (LQ, L/min) | |
| Rainfall (RF, mm/day) | Water level (WL, m) | Mean | Subset n |
| RF >= 106.5 | | 367.63 | 9 (0.3%) |
| 34.75 <= RF < 106.5 | WL >= 37.4 | 91.32 | 57 (2%) |
| | WL < 37.4 | 73.11 | 43 (1.5%) |
| RF < 34.75 | | 24.24 | 2,788 (98%) |
| | WL >= 35.23 | 29.33 | 1,903 (67%) |
| | WL < 35.23 | 13.25 | 885 (31%) |

의 조건에서 침투수량 자료의 98%가 분포하며, 해당 집단의 평균값은 13.25L/min~24.24L/min으로서 상위 집단의 평균값(73.11L/min~367.63L/min)과 비교해 현저히 낮은 값을 나타내었다. 따라서 침투수량에 대한 영향 인자로서 강수량 및 저수위를 선택하는 경우 강수량의 영향이 지배적이며, 침투수량 상승에 대한 관리기준으로 강수량 34.75mm/day를 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 34.75mm/day이하의 강수시 저수위가 35.23m보다 높을 경우 평균 침투수량은 29.33L/min이고, 저수위가 35.23m보다 낮을 경우 평균 침투수량은 13.25L/min이다. 표본수가 n=9개로 가장 작은 경우인 강수 106.5mm/day이상 일 때 평균 침투수량은 최대 367.63L/min이었다.

5. 결론

본 연구에서는 필댐의 누수 및 파이핑의 예측을 위한 주요 계측항목인 침투수량에 대해서 댐 저수위 및 강수의 영향을 고려한 의사결정나무 분석을 수행한 결과 아래와 같은 결과를 얻었다.

- (1) 침투수량 예측값내 강수량 및 저수위의 영향을 분석하고자 CART 알고리즘을 적용한 분석나무 분석을 수행한 결과 강수량의 분기조건은 106.5mm/day, 34.75mm/day이며, 강수량 34.75mm/day 이하의 조건에서부터 저수위가 설명변수로서 작용하며, 저수위의 분기 조건은 37.4m, 35.23m로 분석되었다.
- (2) 강수량 34.75mm/day 이하의 조건에서 침투수량 자료의 98%가 분포하였고, 평균값은 13.25L/min~24.24L/min이었다. 따라서 침투수량에 대한 영향 인자로서 강수량의 영향이 지배적이었다. 또한, 침투수량 상승에 대한 관리기준으로 강수량 34.75mm/day미만일 때 침투수량 자료의 98%가 분포하여 가장 유효한 것으로 나타났다.
- (3) 따라서 현장적용을 위한 OO댐의 허용 침투수량으로는 단일의 값을 제시하기 보다는 강수량을 제 1변수로 하고 제 2변수로서 저수위의 변화에 따른 허용 침투수량을 각각 제시할 수 있고, 자동 조기경보를 위해서는 위의 경계치에 대한 알고리즘의 구축이 필요하다.

본 연구에서는 국내 필댐 1개소에 대해서 의사결정나무

무에 의한 강수량-저수위-침투수량의 관계를 분석하였으며, 향후 강수의 영향을 받는 댐의 경우에는 본 연구에서 제시된 방법을 통해 각각의 댐에 대해 실시간 안전감시를 위한 저수위-강수량-침투수량의 관계를 고려한 조기경보시스템의 운영이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌 (References)

1. Ahn, H. and Lim, H. (2010), "Analysis of Electrical Resistivity Change in Piping Simulation of a Fill Dam", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.04, pp.59-68.
2. Breiman, L., Friedman, J., Stone, C.J., and Olshen, R.A. (1984), *Classification and Regression Trees*, Taylor & Francis.
3. Heo, G. and Chung, C. (2019), "Quantification on Dam Condition Related to Internal Erosion of an Embankment Dam and its Applicability Evaluation", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.35, No.4, pp.5-14.
4. International Organization for Standardization (1998), *Water flow measurement in open channels using weirs and Venturi flumes- Part 1: Thin-Plate Weirs*, Amendment 1.
5. Jang, C.R. and Lee, J.W. (2018), Development of National Standard Technology and Status of V-notch for measuring seepage of dam in Korean, Water for Future, *The Korea Water Resources Association*, Vol.51, No.5, pp.57-63.
6. K-water (2019), A Study on the Combined Analysis Method of Measurement Data for Dam Safety and Maintenance (II).
7. K-water (2017), field investigations and improvement plans for existing seepage instruments of 25 dams in Korea.
8. Kang, H., Han, S., Choi, J., Kim, E., and Um, I. (2014), Data mining methodology for big data analysis, Seoul, Free Academy.
9. Korean Geotechnical Society (KGS) (2010), Design, Construction and Safety Management for the Dam and Embankment, Goomi book, Seoul, 2010.
10. Kuperman, S.C., Moretti, M.R., Pinfari, J.C., and Carneiro, E.F. (2007), "Placing Limit Values on Instrument Readings", *Hydro Review*, Vol.15, No.3, pp.24-31.
11. Lee, J.W. (2014), Application of Statistical Method for Establishment of Alert Level for Dam Instrumentation, KSCE 2014 conference, pp.283-284.
12. Lewis, L. S., Montgomery, C. D., and Myers, H. R. (2001), "Examples of Designed Experiments with Nonnormal Response", *Journal of Quality Technology*, 33, 2001, pp.265-278.
13. MLIT (1993), criteria of Dam Facilities, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
14. Myers, R.H. and Montgomery, D.C. (2002), Response Surface Methodology: Product and Process Optimization Using Designed Experiments. 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.
15. Noh, B.D. (2002), "A Study on Road Slope Safety Investigation Plan for Disaster Prevention", 7th Seminar for Disaster Prevention Administration.
16. Park, H., Nah, B., and Lim, H. (2016), "Shear Wave Velocity Profile Considering Uncertainty Caused by Spatial Variation

- of Material Property in Core Zone of Fill Dam”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.11, pp.51-60.
17. Park, H.K. and Shin, D. H. (2013), *Safety management of dams*, CIR.
18. Park, N. S., Lee, Y., Chae, S., and Yoon, S. (2015), “A Study on the Statistical Predictability of Drinking Water Qualities for Contamination Warning System”, *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, Vol.29, No.4, pp.469-479.
19. Park, S.H. and Park, H.J. (2006), “A Control Chart Method Using Quartiles for Asymmetric Distributed Processes.” *Journal of the Korean Statistical Society*, Vol.19, No.1, pp.81-96.
20. Ryan, P. T. (2000), “Statistical Methods for Quality Improvement”, Second Edition, John Wiley and Sons, New York.
21. USCOLD (1975), *Lessons of Dam Incidents*, USA.
22. Witten, I.H., Frank, E., and Hall, M.A. (2011), *Data Mining*, 3ed, Morgan Kaufmann Publishers.

Received : March 20th, 2020

Revised : May 22nd, 2020

Accepted : May 22nd, 2020