

시스템 다이내믹스 기반의 저수지 위험판단 의사결정지원 방안 연구

김덕길 · 유지성 · 장하영 · 장대원[†]

(주)LIG시스템 재난안전연구소

A Study of Decision-making Support Method based on System Dynamics for Reservoir Risk Judgment

Duckgil Kim · Jiseong You · Hayoung Jang · Daewon Jang[†]

Disaster and Safety Research Institute, LIG system Co., Ltd., Korea

(Received : 30 July 2024, Revised : 14 August 2024, Accepted : 14 August 2024)

요약

최근 기후변화에 의한 집중호우의 발생빈도 및 강도가 증가하고 있으며, 이로 인한 지자체의 저수지 붕괴 피해가 지속적으로 발생하고 있다. 지자체 저수지는 대부분 건설된 지 50년 이상된 노후 저수지로, 최근 발생하는 집중호우에 대한 붕괴 위험성이 높다. 집중호우에 의한 저수지 붕괴 또는 월류를 예방하기 위해서는 저수용량 변화에 따른 위험을 판단할 수 있는 의사결정지원체계가 필요하다. 본 연구에서는 다양한 변수 간의 인과관계를 동적으로 나타낼 수 있는 시스템 다이내믹스 기법을 활용한 저수지 방류 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 방류 시뮬레이션을 통해 강우에 의한 저수용량 변화를 분석하고, 저수지 월류 예방을 위한 방류시설의 운영시점 및 종료 시점을 분석하였다. 본 연구 결과를 활용하여 집중호우에 의한 저수지 월류 발생시점을 파악할 수 있으며, 또한 월류 예방을 위한 방류시설의 용량 및 투입시기를 알 수 있다. 이를 통해 지자체에서는 저수지 피해에 대한 위험을 판단하고, 피해예방을 위한 사전 대응계획을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 저수지, 시스템 다이내믹스, 위험판단, 의사결정지원

Abstract

Recently, the frequency and intensity of torrential rains caused by climate change are increasing, and the damage to reservoir collapse in local governments continues to occur. Most local government reservoirs are aged reservoirs that have been built for more than 50 years, and there is a high risk of collapse due to recent heavy rainfall. In order to prevent reservoir collapse or overflow caused by heavy rainfall, a decision-making support system that can judge risks due to changes in storage capacity is needed. In this study, a reservoir discharge simulation model was constructed using a system dynamics technique that can dynamically represent causal relationships between various variables. Through discharge simulation, the change in storage capacity due to rainfall was analyzed, and the operation time and termination time of the discharge facility to prevent overflow of the reservoir were analyzed. Using the results of this study, it is possible to determine the timing of the overflow of the reservoir due to torrential rain, and also the capacity and operation timing of the discharge facility to prevent overflow can be known. Through this, it is expected that local governments will be able to judge the risk of damage to reservoirs and establish a preliminary response plan to prevent damage.

Key words : Reservoir, System Dynamics, Risk Judgment, Decision Support

[†]To whom correspondence should be addressed.

Disaster and Safety Research Institute, LIG system Co., Ltd., Korea
E-mail : daewon.jang@lig.kr

• Duckgil Kim Disaster and Safety Research Institute, LIG system Co., Ltd., Korea / Senior researcher (duckgil.kim@lig.kr)
• Jiseong You Disaster and Safety Research Institute, LIG system Co., Ltd., Korea / Senior researcher (jiseong.you@lig.kr)
• Hayoung Jang Disaster and Safety Research Institute, LIG system Co., Ltd., Korea / Associate researcher (jiseong.you@lig.kr)
• Daewon Jang Disaster and Safety Research Institute, LIG system Co., Ltd., Korea / Research director (daewon.jang@lig.kr)

1. 서론

기후변화로 인한 풍수해 재난의 발생 빈도가 증가하고 있으며, 이로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 재난관리 업무를 수행하는 지자체 담당 공무원과 방재시설물을 관리하는 유관기관 담당자의 신속하고 적절한 대응이 중요하다. 그러나 지자체가 관리해야 하는 시설물의 수에 비해 관리를 하는 담당 공무원과 예산이 한정적이라서 실질적인 시설물 관리에 어려움이 많다. 국내 저수지의 경우 총 17,066개소가 있으며, 이 중 3,429개소는 한국농어촌공사가 관리하고 나머지 13,637개소는 지자체가 관리하고 있어, 지자체별 관리 개수와 인력을 고려하면 실질적으로 타 방재시설에 비해 관리수준이 미비하다고 할 수 있다(Jang and Jeong, 2023).

지자체가 관리하고 있는 13,637개소의 저수지 중 대부분이 저수용량 30만³ 미만의 소규모 저수지이며, 90.1%에 해당하는 12,285개소의 저수지는 준공된 지 50년 이상된 노후 저수지이다. 이러한 저수지 대부분은 수문 등의 긴급 방류 시설이 없는 자연 물놀이 방식으로 월류되는 구조로 집중호우 및 급격한 수위 상승에 따른 대응대책 수립이 어렵다. 최근 붕괴된 저수지의 붕괴 원인을 보면, 집중호우에 의한 급격한 수위상승과 노후화에 따른 제체 파괴 등이 주요 요인이다. 특히, 최근 기후변화에 의한 극한강우 발생으로 2~3시간 정도밖에 되지 않는 단시간에 저수지의 수위가 상승하고, 이로 인한 붕괴위험을 지자체 및 한국농어촌공사 등의 관리주체가 예측하고 대응하기에는 한계가 있다.

앞서 말한 바와같이 지자체 저수지는 대부분 소규모 농업용 저수지로서, 이수와 치수 측면을 모두 고려한 저수지 붕괴 예방 방안이 필요하다. 즉, 집중호우에 의해 단시간에 상승하는 저수지 수위를 예측하고 적절한 사전 방류를 통해 저수지의 붕괴를 예방함과 동시에 이수 측면의 농업용수 확보를 위한 적정 수위를 유지하면서 저수량을 방류하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 다양한 변수 간의 인과관계를 동적으로 나타낼 수 있는 System Dynamics기법을 활용한 저수지 방류 시뮬레이션을 구축하여 지자체 저수지를 대상으로 강우발생 시 수위변화를 예측하고, 이수측면의 농업용수 확보를 위한 적정 저수위를 유지하면서 저

수지 붕괴를 예방할 수 있는 적정 방류량과 방류시간을 예측할 수 있는 의사결정지원 방안을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 시스템 다이내믹스 방법론

시스템 다이내믹스는 1961년 MIT대학의 산업공학 교수 Forrester가 개발한 방법론으로, 시스템 내 특정 변수가 시간의 흐름에 따라 어떻게 동적으로 변화하는지를 관찰하는 것으로, 각 변수의 상호관계를 모사하여 변화를 추정하는 방법론을 의미한다(Oh et al., 2022). 시스템 다이내믹스를 분석에 활용하기 위해서는 Fig. 1과 같이 5단계의 절차가 필요하다. ‘문제의 정의’는 분석 대상이 되는 문제를 정의하는 단계이고, ‘인과지도 작성’은 분석에 활용되는 주요 변수들 간의 관계를 설정하여 이해하기 쉽게 도식화하는 단계이다. ‘저량-유량도 작성’은 실제 분석을 수행할 수 있도록 인과지도를 수식화하여 나타내는 단계이며, ‘시나리오 구성’은 모의실험을 위한 시나리오를 구성하는 단계이다. 마지막으로 ‘모의실험’ 단계를 통해 모델의 효과를 검증하게 된다(Jang et al., 2024).

2.2 시스템 다이내믹스 모델 구축

저수지 방류 시뮬레이션을 위해 강우에 의한 저수량 변화, 저수용량 변화에 따른 방류시설 용량 및 운영시기의 관계에 대한 인과지도를 Fig. 2과 같다. 저수량 변화는 강우에

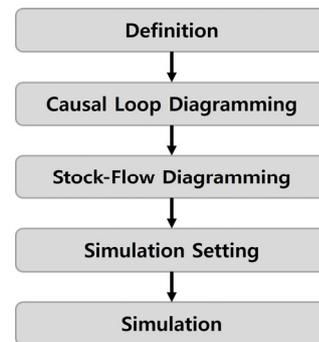


Fig. 1. System dynamics Process

Table 1. Status of reservoirs by completion year (MAFRA and KR, 2023)

Management Agency	Status by completion year				
	Total	within 30 years ('93~'22)	for more than 30 years ('73~'92)	for more than 50 years ('46~'72)	before 1945
Total	17,066	630 (3.7%)	1,559 (9.1%)	6,225 (36.5%)	8,652 (50.7%)
Korea Rural Community Corporation	3,429	413 (12%)	424 (12.4%)	1,330 (38.8%)	1,262 (36.8%)
Local Government	13,637	217 (1.6%)	1,135 (8.3%)	4,895 (35.9%)	7,390 (54.2%)

Table 2. Yugeum reservoir specifications (Gyeongju-si, 2023)

Year of Completion	Basin Area (ha)	Total Storage Capacity (1,000 m ³)	Effective Capacity (1,000 m ³)
1945	129	66.2	60

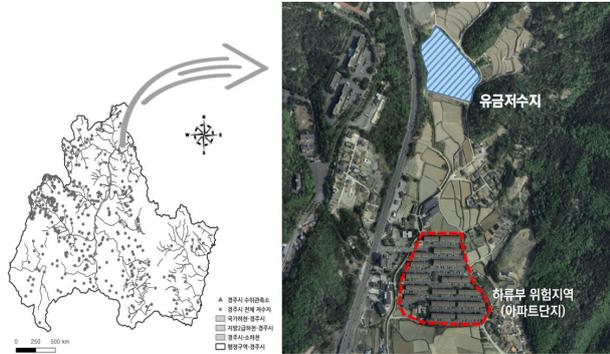


Fig. 4. Study area(Yugeum reservoir)

또는 붕괴가 발생할 경우 위험도가 상당히 높은 지역이다. 동시에 수위 관측센서가 설치되어 운영 중으로 관측자수 수집이 용이하고, 본 연구에서 고려한 방류시설인 이동식 사이펀 설치에 용이하다. 대상지역인 유금저수지의 저수량, 유역면적 등의 기본적인 제원 정보는 Table 2와 같다.

3.2 자료 구축

3.2.1 강우-저수용량 관계

지자체 저수지는 대부분 유역면적이 작아 강우가 발생하면 단시간에 저수위 변화가 발생하며, 저수지 상류에서의 유입량 자료를 확보할 수 없다. 본 연구에서는 과거 강우관측 자료와 저수용량 자료를 활용하여 강우와 저수량 간의 관계를 분석하였다. 강우자료는 ‘유금저수지 정밀안전진단 보고서’에서 제시하고 있는 포항 기상관측소 자료를 이용하였으며, 저수량은 경주시에서 수집된 저수지 수위 및 저수율 자료를 이용하여 산정하였다. 자료 확보 기간은 저수지 수위자료가 있는 2018년 5월~2023년 8월까지이며, 강우가 발생하였을 때의 저수량 변화량을 이용하여 시간당 강우량과 저수량 변화량의 관계곡선을 Fig.5와 같이 도출하였다.

3.2.2 저수용량-수위 관계

유금저수지는 자연물넘이 방식의 여수로가 설치되어 있으며, 여수로의 물넘이 시점의 높이만큼 수위가 상승해야 물이 방류되는 원리이다. 시스템 다이내믹스 기법을 활용한 방류 시뮬레이션 모델은 저수량을 이용하여 수위를 산정하도록 구성했기 때문에 여수로를 통해 방류되는 월류량을 산정하기 위해서 강우에 의해 증가하는 저수량을 수위로 환산하여 여수로 물넘이 시점 높이를 초과하는지를 판단하기 위해 저수량과 수위 간의 관계 분석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 유금저수지의 수위 및 저수율 자료를 이용하여 저수량-수위 관계곡선을 Fig. 6과 같이 도출하였다.

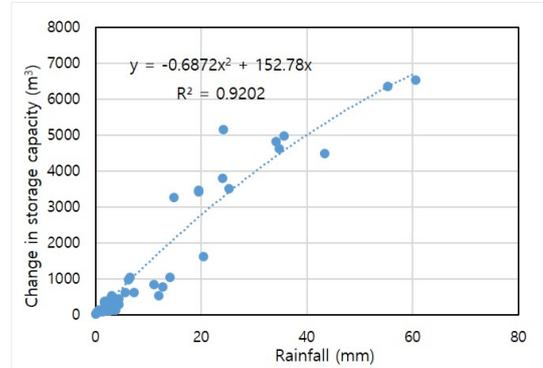


Fig. 5. Rainfall-Reservoir Capacity Relationship Curve

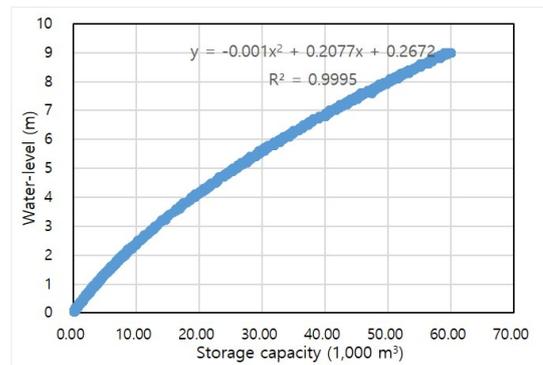


Fig. 6. Reservoir Capacity-Water Level Relationship Curve

4. 시뮬레이션 분석 결과

4.1 시뮬레이션 모델 검토

본 연구를 통해 예측되는 저수량 변화량과 방류시설 운영(용량 및 기간) 방안이 집중호우 발생 시 저수지 붕괴 또는 월류 위험을 판단하는데 지자체에서 활용하기 위해서는 시스템 다이내믹스 기법을 적용한 저수지 방류 시뮬레이션 모델이 적절히 구축되었는지에 대한 검토가 필요하다. 구축된 모델을 검토하기 위해 실제 저수지 월류 위험이 있었던 2022년 태풍 ‘힌남노’의 강우사상을 적용하려 하였으나, 그 당시 유금저수지의 수위측정이 제대로 진행되지 않아 모델 결과를 비교할 관측자료가 없어 힌남노 강우사상을 적용하지 못하고 힌남노가 발생하기 전 강우사상(2022년 8월 23일~26일)을 적용하였다. 강우사상을 포함하여 시뮬레이션은 총 72시간에 대해 수행하였으며, 시뮬레이션 결과와 관측된 저수량의 값을 비교한 결과는 Fig.7과 같다.

시뮬레이션 결과가 관측값을 얼마나 유사하게 나타내는지를 확인하기 위해 결정계수(R²)를 산정한 결과, 값이 0.90이 나와 시스템 다이내믹스를 활용한 저수용량 예측이

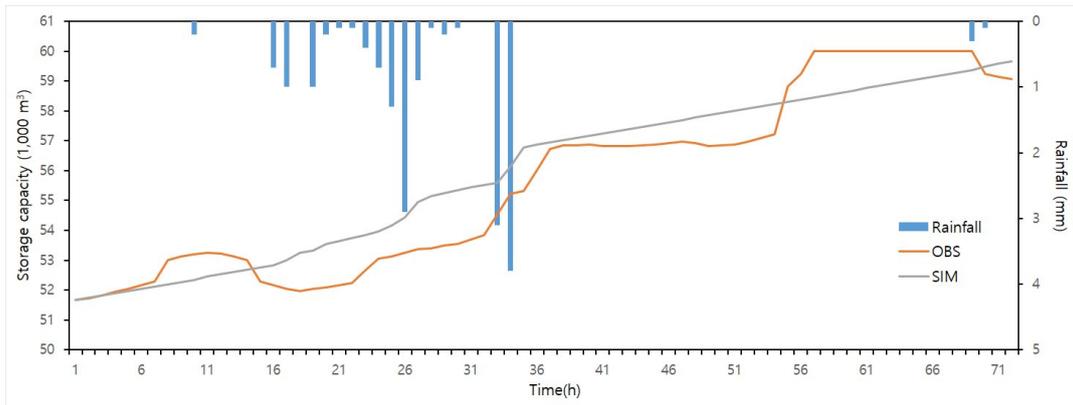


Fig. 7. Comparison of Simulation Result and Observation for Water Storage

가능할 것으로 판단하였다. 비교 결과를 살펴보면, 시물레이션 결과와 관측값의 시작점과 종료점에서는 저수용량이 거의 비슷하나, 중간 부분에서 일부 차이가 발생하고 있다. 이런 차이가 발생원인은 방류량에 대한 정확한 정보가 부족한 것이 원인으로 판단된다. 실제 저수지에서는 여수로로 월류되는 유량 외에 평상시 용수공급을 위해 복통을 이용하여 유출되는 유량이 있는데, 유급저수지의 복통은 펌프를 이용하여 인위적으로 유량을 방류하고 있다. 그러나 펌프로 방류되는 유량에 대한 관측자료가 없어 실제 방류량을 적용하는데 한계가 있어 본 연구에서는 복통으로 방류되는 유량을 무강우 시 감소하는 저수용량을 활용하여 일정하게 방류하는 것으로 모델을 구성하여 시물레이션 결과와 관측값 간에 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

4.2 저수지 방류 시물레이션 결과

소규모 저수지의 경우 집중호우에 의해 단시간에 저수량이 급격하게 변화하고 자연물넘이 여수로 외 이동형 사이편과 같은 추가 방류시설을 현장에서 설치하는 시간이 소요되기 때문에 집중호우가 발생했을 때 방류시설을 이용하여 저수량을 조절하는 것은 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 강우가 발생할 것으로 예측될 때 사전에 방류시설을 이용하여 저수량을 조절하는 방식으로 저수지 방류 시물레이션을 실시하여 강우에 의한 저수지의 저수량 변화와 저수량 관리를 위한 방류시설(이동형 사이편)의 운영 기간을 분석하고자 하였다. 시물레이션을 위한 강우사상은 2022년 태풍 ‘한남노’ 발생 당시 72시간(2022년 9월 4일~9월 6일)의 강우를 적용하였으며, 대상 저수지는 농업용 저수지로 이수측면도 고려할 필요가 있어 사이편 운영 조건은 강우에 의한 증가된 저수량을 사이편을 이용하여 방류하더라도 유효저수량의 70% 정도를 유지할 수 있도록 설정하여 방류 시물레이션을 진행하였다. 여기서 유효저수량을 70% 정도 유지하도록 설정한 이유는 농업용 저수지의 경우 이수측면을 고려하여 홍수기 최소유지관리기준으로 만수위 70~80%로 권하고 있기 때문이다(한국농어촌공사, 2021). 이렇게 진행된 시물레이션 결과는 Fig.8과 같이 이동형 사이편 미운영과 운영으로 구분하여 나타냈다.

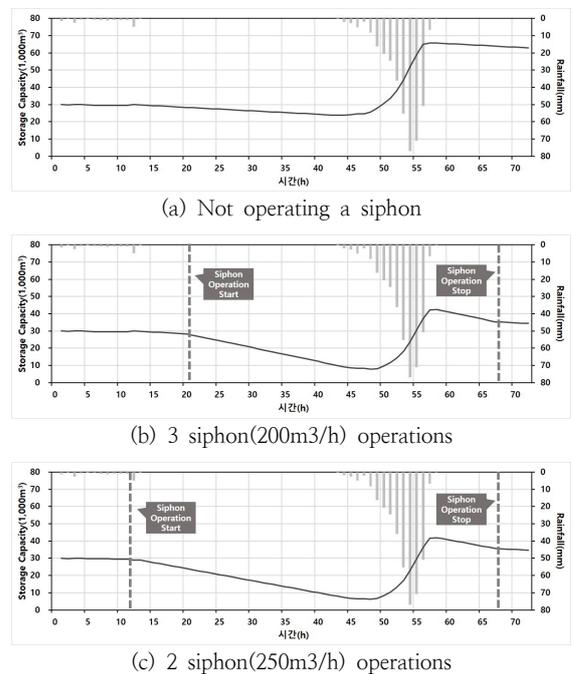


Fig. 8. Results of Reservoir Discharge Simulation

시물레이션 결과를 살펴보면, 사이편 미운영 시 최대치의 강우량이 발생한 지 약 3시간 후에 저수량이 총 저수량에 거의 도달하여 월류 위험성이 있는 것으로 나타났으며 (Fig.8(a)), 사이편 운영 시에는 강우에 의한 저수량 변화를 기반으로 사이편을 이용한 사전 방류를 통해 저수량을 조절함으로써 저수지의 월류 위험을 완화하고 저수량이 유효저수량의 70% 정도를 유지하는 것으로 나타났다. 또한 사이편 운영 조건에 따라 저수지 월류 예방함과 동시에 강우사상이 끝난 이후에도 유효저수량의 70%를 유지하기 위한 사전 방류시점 및 종점을 파악할 수 있었다(Fig.8(a), (b)). 사이편 운영기간에 대해 살펴보면, 200m³/h 성능의 사이편을 3대를 총 72시간 중 21시에 작동시켜 68시에 정지(47시간), 250m³/h 성능의 사이편을 2대를 총 72시간 중 12시에서 작동시켜 68시에 정지(56시간)시키면 저수지의 월류 없이 저수량을 유효저수량의 70% 정도로 유지할 수 있는 것으로 나타났다.

4. 결론

지자체 저수지는 대부분 준공된 지 50년이 지난 노후된 소규모 저수지로, 과거 저수지 설계 및 건설 당시에 비해 최근 기후변화로 인한 강우량 및 강우강도가 급격하게 증가하여 월류 및 파이핑/침투 등에 의한 붕괴 위험성이 높아지고 있다. 또한, 지자체 관리대상 저수지의 개소수에 비해 상대적으로 담당 공무원 및 예산이 부족하여, 집중호우에 의한 급격한 저수량 증가에 따른 대응체계 마련에 한계가 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서는 IoT센서와 실시간 데이터 등을 활용하여 최적의 방안을 제시할 수 있는 의사결정지원 방안이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 시스템 다이내믹스를 활용하여 강우발생에 따른 저수지의 저수량 변화를 시뮬레이션할 수 있는 모델을 구축하고 대상지역인 유급저수지의 월류 직전까지의 상황을 발생시킨 2022년 태풍 ‘힌남노’ 강우사상을 적용하여 방류시설(이동형 사이펀) 운영 여부에 따른 저수량 변화 및 방류시설 운영 시점/종점을 분석하였다. 그 결과, 일정시간 이전에 방류시설을 이용하여 사전 방류를 실시한다면, 치수뿐만 아니라 이수측면을 고려하여 적정 저수용량을 유지하면서 저수지를 운영할 수 있는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 집중호우에 따른 저수지 월류 및 붕괴 위험을 판단하는데 활용할 수 있으며, 또한 지자체가 보유하고 있는 방류시설의 투입시기를 사전에 파악할 수 있어 대응체계 마련에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 이러한 의사결정지원 방안을 적용하기 위해서는 저수지의 제원 및 수리/수문 관측정보가 필요하나, 대부분의 지자체 저수지는 수리/수문 관측이 이루어지고 있지 않거나, 관측을 하고 있더라도 자료를 수위관측 장비 업체가 관리하고 있어 자료 관리 및 공유 등이 원활이 이루어지고 있지 않다. 따라서 지자체 저수지 대상의 관측정보에 대하여 관련 중앙부처 또는 유관기관에서 자료를 수집·관리하여 정보를 제공할 수 있는 통합관리 방안 마련에 대한 연구 수행이 필요하며, 이렇게 관리된 정보를 활용하여 본 연구에서 제시한

저수지 위험판단 의사결정지원체계에 반영한다면, 기후변화로 인한 저수지 풍수해 피해예방에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 기후변화대응 AI 기반 풍수해 위험도 예측기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2022-MOIS61-005(RS-2022-ND634032))

References

- Jang, DW and Jeong, CS (2023). Application of Emergency Response Technology for Small and Medium-Sized Aging Reservoirs by Local Governments, *Waeter and the Future : Magazine of Korea Water Resources Association*, 56(2), pp 42-48 [Korean Literature]
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs and Korea Rural Community Corporation (2023). Statistical Yearbook of Land and Water Development for Agriculture [Korean Literature]
- Korea Rural Community Corporation (2021). Management Standards Study for Drought and Flood in Agricultural Reservoirs [Korean Literature]
- Oh, SH, Jeong, HS and Ha, HS (2022). An Analysis of the Effects of a Shift in Regional Balanced Development Policies on the Regional Disparity : Using System Dynamics, *J. of Local Government Studies*, 34(1), pp. 245-275 [Korea Literature]
- Jang, HY, Kim, YS and Jang, DW (2024). Simulation of Mobilization and Support of Disaster Management Resources Using System Dynamics, *Crisisonomy*, 20(1), pp. 115-123 [Korea Literature]
- Gyeongju-si (2023). Report on the Precision Safety Inspection of the Yugeum Reservoir, pp. 10