

하이브리드형 지하댐-샌드댐 연계 물공급체계 구축 기술 개발

Development of Hybrid Sand Dam and
Underground Dam for Water Supply in
Water Shortage Areas

2023.12.

하이브리드형 지하댐-샌드댐 연계 물공급체계 구축 기술 개발

Development of Hybrid Sand Dam and
Underground Dam for Water Supply in Water
Shortage Areas

2023.12.

한국건설기술연구원

연구책임자/ 정일문

연구수행자/ 김경탁, 김철겸, 이정우, 김주훈, 최윤석, 장선우, 이정은, 김길호, 오정선,
최천규, 김민규, 김일환, 히요 하티아 와레, 제노비아 탈푸루, 타레켄
멘기스투, 우소영



KOREA INSTITUTE of CIVIL ENGINEERING
and BUILDING TECHNOLOGY

제 출 문

한국건설기술연구원장 귀하

본 보고서를 “하이브리드형지하댐-샌드댐 연계 물공급체계 구축 기술 개발” 과제의
보고서로 제출합니다.

2023년 12월 31일

주관연구기관명 : 한국건설기술연구원
총괄연구책임자 : 선임연구위원 정일문
참 여 연 구 원 : 선임연구위원 김경탁

연구위원 김철겸, 이정우, 김주훈, 최윤석,
장선우

수석연구원 이정은, 김길호, 오정선

전임연구원 최천규, 김민규

박사후연구원 김일환

UST학생연구원 히요 하티아 와레,

제노비아 탈푸루, 타레켄

멘기스투

박사후연구원YS 우소영

요 약 문

I. 연구 제목

하이브리드형 지하댐-샌드댐 연계 물공급체계 구축 기술 개발

II. 연구개발의 목적

물공급 소외지역(지방·광역상수도 보급이 어려운 산간 고지대)의 안정적 물공급과 가뭄 대응능력 향상을 위한 지하댐과 샌드댐(Sand Dam)을 연계한 하이브리드형 물공급체계 구축 기술 개발

III. 연구개발의 필요성

기후변화로 인하여 극심한 이상 가뭄이 최근 들어 빈번하게 발생하고 있으며, 우리나라의 경우 2~3년에 한번씩 가뭄이 발생하고 있으며, 7년 주기의로는 극한 가뭄이 발생하고 있다. 특히 지방상수도가 보급되지 않아 마을상수도와 소규모 급수시설에 의존하는 산간 고지대에서 가뭄 피해가 주로 발생하고 있다. 2016년 가뭄발생 당시 강원도에서는 1,443세대 3,817명(22개 면, 44개 마을)이 급수차량에 의한 식수 공급(285회, 1,845톤)을 받는 등 극심한 물 부족 피해가 발생한 기록이 있다. 따라서 상수도 혜택을 받지 못하는 물 복지 사각지대의 안정적인 물 공급과 가뭄 대응력을 높이기 위한 지역 맞춤형 물 공급 체계 구축이 시급하다.

산간 고지대 상수도 미보급 지역에서는 일반적으로 계곡수 또는 지하수를 수원으로 이용하고 있으며, 최근 들어 수질 개선, 결빙 방지, 증발 저감 등의 장점이 있는 샌드댐이 이를 대체할 수 있는 것으로 알려져 있다. 특히 샌드댐은 계곡수 결빙 지역이나 지하수 산출능이 낮은 지역에 효과적이다. 그러나, 극한 가뭄 시 유입수량 부족으로 샌드댐만으로 물 수요를 만족하는 데 한계가 있다. 따라서 가뭄 시 안정적인 수량 확보와 물 공급량 증대를 위해 지하댐과 연계한 샌드댐 설치, 운영이 최선의 대안이 될 수 있다. 이에 따라 지하댐-샌드댐 연계 물 공급 시설에 대한 수문, 수리학적 분석과 최적 연계 운영 기술의 개발이 필요하다.

IV. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구는 전체 2023년에 수행된 1차년도 주요 연구내용 및 범위는 다음과 같다.

- 지하댐-샌드댐 연계 물수지 분석 기술 개발
 - 지하댐 관련 선행 기술 동향 조사
 - 지하댐 설치에 따른 지하수 거동 변화 예비 분석
 - 지하댐-샌드댐 연계 물공급 테스트베드 수문 및 지질 조사
 - 지하댐-샌드댐 연계 물공급 테스트베드 물수지 분석을 위한 지하수 함양량 산정
- 현장 및 모형실험 기반 지하수-샌드댐 수리해석 기술 개발
 - 샌드댐의 지하수 유입, 저류, 유출시 수리학적 특성을 해석하기 위해 3차원 실험 모형 제작
 - 지하댐-샌드댐 실험 모형의 운영 시나리오 설정
 - 실험 모형을 이용한 수리상수 산정
- 산간 고지대 홍수해석 기술 개발
 - 테스트베드 유역에 대한 분포형 수문모형 GRM 모형 구축
 - 관측유량과의 적합을 통한 GRM 모형의 매개변수 산정

V. 최종 목표

본 연구가 지향하는 최종 목표는 “하이브리드형 지하댐-샌드댐 연계 물공급체계 구축 기술 개발”이며, 최종 성과물은 다음과 같다.

- (최종성과물) 샌드댐-지하수댐 하이브리드형 물공급 체계 구축 및 최적 운영을 통한 물공급 신뢰도 99% (이수안전도 100년 빈도) 이상 달성
- (단기목표 최종성과물) 지하댐-샌드댐 연계 물공급시설의 구조 설계도 및 수문설계 기술보고서
- (중기목표 최종성과물) 테스트베드 지하댐-샌드댐 연계 실증시설 운영 효과 검증

Executive Summary

I. Title

Development of Hybrid Sand Dam and Underground Dam for Water Supply in Water Shortage Areas

II. Objectives

Development of a hybrid water supply system linking underground dams and sand dams to improve the stable water supply in underprivileged areas (mountainous highlands where it is difficult to supply regional and wide-area water supply) and improve drought response capabilities

III. Necessities

Extreme abnormal droughts have occurred frequently in recent years due to climate change, and in Korea, large and small droughts and extreme droughts of approximately seven-year cycles occur every two to three years depending on the region. In particular, due to the lack of local water supply, drought damage is mainly occurring in mountainous highlands that rely on village water supply and small water supply facilities. For example, in the event of a drought in 2016, 3,817 people (22 myeon, 44 villages) in 1,443 households in Gangwon-do received water supply (285 times, 1,845 tons) by water supply. Therefore, it is urgent to establish a regional customized water supply system to increase the ability to respond to drought and stable water supply in blind spots of water welfare that do not receive water supply benefits.

Valley water or groundwater is generally used as a source in areas where water supply is not supplied in the mountainous highlands, and it is known

that sand dams, which have advantages such as water quality improvement, prevention of freezing, and evaporation reduction, can replace them. Sand dams are particularly effective in valley water freezing areas or areas with low groundwater output capacity. However, there is a limit to satisfying the water demand with only sand dams due to the lack of inflow water during extreme drought. Therefore, the installation and operation of sand dams in connection with underground dams can be the best alternative to secure stable water quantity and increase water supply in case of drought. Accordingly, it is necessary to develop hydrological and hydraulic analysis of the water supply facility linked to the underground dam and optimal connection operation technology.

IV. Contents and Scopes

This study conducted the first year of the entire three-year study period, and the main contents and scope of the first year are as follows.

- Development of Water Residual Analysis Technology for Underground Dam-Sand Dam
 - A Study on the Trend of Pre-Technical Technology related to Underground Dam
 - Preliminary analysis of changes in groundwater behavior according to underground dam installation
 - Testbed Hydrological and Geological Survey of Water Supply Testbeds linked to Underground Dam and Sand Dam
 - Estimation of the amount of groundwater cultivation for water balance analysis of underground dam-sand dam-linked water supply testbed
- Development of Underground Water-Sand Dam Repair Analysis Technology based on Field and Model Experiments
 - A three-dimensional experimental model was constructed to analyze the hydraulic properties of the sand dam during the inflow, retention, and outflow of groundwater

- Establishment of Operation Scenario of Underground Dam-Sand Dam Experimental Model
- Calculating the mathematical constant using the experimental model
- Development of Flood Analysis Technology in Mountain Highlands
 - A Study on the GRM Model of Distributed Hydrological Model for Testbed Basin
 - Calculation of parameters of the GRM model through fit with the observed flow rate

V. Final Goal

The final goal of this study is to “develop technology for building a hybrid underground dam-sand dam-linked water supply system,” and the final outcome is as follows.

- (Final deliverables) Achieving more than 99% reliability in water supply through the establishment and optimal operation of a hybrid water supply system for sand dam and underground water dam (with a frequency of 100 years of water safety)
- Technical Report on Structural Design and Hydrological Design of Underground Dam-Sand Dam-Linked Water Supply Facilities
- Verification of the effectiveness of the testbed underground dam-sand dam connection demonstration facility (final outcome of mid-term target)

목 차

제1장 연구개발과제 개요	1
1. 개념 및 정의	1
2. 추진배경 및 필요성	2
2.1 추진배경	2
2.2 필요성	2
제2장 연구개발과제의 수행과정 및 수행내용	3
1. 연구개발 수행과정	3
2. 수행내용	4
2.1 지하댐-샌드댐 연계 물수지 분석 기술 개발	4
2.2 현장 및 모형실험 기반 샌드댐 수리해석 기술 개발	5
2.3 산간 고지대 홍수해석 기술 개발	5
제3장 연구개발과제의 수행결과 및 목표달성 정도	6
1. WBS 1: 지하댐-샌드댐 연계 물수지 분석 기술 개발	6
1.1 지하댐 건설에 따른 수위상승 효과 분석	6
1.2 지하댐 건설에 따른 유역 내 지하수위 변화 및 저류 특성	9
1.3 춘천 물로리 지역의 지하수 함양량 추정	25
2. WBS 2: 현장 및 모형실험 기반 샌드댐 수리해석 기술 개발	49
2.1 실험 장비 구성	49
2.2 실험 시나리오 구성	51
2.3 지하수댐 장비를 이용한 수리전도도 실험	55
3. WBS 3: 산간 고지대 홍수해석 기술 개발	57
3.1 GRM모형 유출해석을 위한 공간자료 및 수문자료구축	57
3.2 샌드댐 상류 GRM모형 대표매개변수 산정 및 검토	70
4. 정량적 연구개발 성과	73
4.1 과학적 성과	73

4.2 기술적 성과	73
4.3 경제적 성과	73
4.4 사회적 성과	73
5. 기타 성과	74
5.1 Groundwater Korea 2023 전시참가	74
제4장 차년도 연구개발계획	75
1. 연구개발 목표 및 내용	75
1.1 연구개발 목표 및 예상 성과물	75
2. 국내외 관련 분야 환경변화	78
3. 연구개발 추진전략	79
4. 연구개발 일정 및 기대성과	81
5. 연구비 사용계획	82
5.1 인건비	82
5.2 직접비	82
5.3 위탁연구개발비 : 해당사항없음	83
6. 성과활용방안	84
7. 기대효과	85
참고문헌	86

표 목 차

표 3.1 다공질매질의 비산출률 비교	14
표 3.2 초기 체적함수비 조건에 따른 주입/배수에 의한 유전율 반응	19
표 3.3 유효공극률에 따른 실제 확보수량	24
표 3.4 전국 단위의 지하수 함양량 산정 연구 사례	25
표 3.5 함양량 산정 방법별 시간적·공간적 특성(from Scanlon, Healy and Cook, 2002) ·	26
표 3.6 기후에 따른 함양량 산정 기법 적용 대상(from Scanlon, Healy and Cook, 2002) ·	27
표 3.7 지하수 함양량 산정 방법의 장단점 비교	27
표 3.8 입력 및 출력 변수로 사용되는 지하수 관측정의 위치 특성	42
표 3.9 춘천시 물로리의 지하수 함양량 산정 결과	48
표 3.10 GRM 모형의 입력자료와 매개변수	58
표 3.11 GRM 모형의 입력자료	59
표 3.12 GRM 모형의 입력자료	60
표 3.13 보정 매개변수 특징	71

그림목차

그림 1.1 하이브리드형 샌드담 모식도	1
그림 2.1 연구추진체계	3
그림 3.1 지하담 개념도	7
그림 3.2 사용목적에 따른 지하담의 구분	9
그림 3.3 저류형태에 따른 지하담의 구분	10
그림 3.4 차수벽 시공법에 따른 지하담의 구분	11
그림 3.5 입경과 비산출률의 관계	15
그림 3.6 수위변동에 따른 매질의 수분분포특성 곡선	16
그림 3.7 연속 주입/배수시험 및 증력배수시험 모식도	17
그림 3.8 체적함수비 10%인 시료에 대한 주입/배수시험 시 유전율 반응 특성	17
그림 3.9 체적함수비 20%인 시료에 대한 주입/배수시험 시 유전율 반응 특성	18
그림 3.10 체적함수비 30%인 시료에 대한 주입/배수시험 시 유전율 반응 특성	18
그림 3.11 체적함수비 10%인 시료에 대한 압력배수시험 결과	19
그림 3.12 체적함수비 20%인 시료에 대한 압력배수시험 결과	20
그림 3.13 체적함수비 30%인 시료에 대한 압력배수시험 결과	20
그림 3.14 수위변동에 따른 포화/불포화 조건에서의 침하 모식도	21
그림 3.15 수위변동에 따른 포화/불포화 조건에서의 침하 모식도	22
그림 3.16 양수 후 지하담 건설 전·후의 유황변화 분석	23
그림 3.17 지하담 건설로 인한 지하수위 증가 범위(0.2m 이상 상승)	23
그림 3.18 00천 유역 및 유효공극률 산정	24
그림 3.19 지하담 건설에 따른 지하수위 변화 분포	24
그림 3.20 지하수위 변동 수위 산정 (Healy and Cook, 2002)	29
그림 3.21 비포화 수리모델과 지하수위 변동 모델을 이용한 충전공극률 및 함양량 산정 체계도 (윤희성 외, 2016)	31
그림 3.22 지하수위 예측 시계열 모델과 hWTF 연계 지하수 함양 산정 개념도(윤희성 외, 2016)	32
그림 3.23 은닉층을 갖는 다층퍼셉트론 인공신경망 기법 개념도	35
그림 3.24 활성함수의 종류	36

그림 3.25	지하수 함양량 및 개발가능량 산정 프로세스	38
그림 3.26	지하수 관측소 지점의 지하수 함양율 분포도	38
그림 3.27	우리나라의 지형 분포도	38
그림 3.28	지질구조선과 지하수 함양율의 분포	39
그림 3.29	행정구역별 지하수 함양율의 단순 분포	39
그림 3.30	지하수 관측소의 지점 특성 정보 추출 사례	40
그림 3.31	지하수 관측소의 지하수함양율과 지점 특성과의 비교	41
그림 3.32	입력변수의 모델에 미치는 중요도	43
그림 3.33	지하수 함양율 예측값과 실제값의 비교 분포(좌: 학습데이터, 우: 검증데이터)	43
그림 3.34	물로리 지역의 그리드 작성 및 입력인자 분포	45
그림 3.35	물로리 지역의 지하수 함양율 분포	46
그림 3.36	각 지점 속성과 지하수 함양율의 상관관계	47
그림 3.37	물로리 지역의 지하수 함양량 분포	48
그림 3.38	실험체 기본구상도	49
그림 3.39	샌드담 설계도	50
그림 3.40	지하수담 설계도	51
그림 3.41	실험장치 구성	52
그림 3.42	지하수담을 모사한 MODFLOW 모의 결과 지하수위 분포	52
그림 3.43	실험 2 운영 모식도	54
그림 3.44	수리전도도 실험 모식도	55
그림 3.45	수리전도도 실험 계산식	56
그림 3.46	예비실험 사진	56
그림 3.47	수문성분의 유출과정	57
그림 3.48	검사체적에서의 수문성분 입출력	58
그림 3.49	흐름방향 인덱스	60
그림 3.50	event 선정결과	61
그림 3.51	DEM 수집	61
그림 3.52	토지피복도 수집	62
그림 3.53	토양도 수집	62
그림 3.54	하천망도 작성	63
그림 3.55	수위자료 구축	63

그림 3.56 강우자료 구축	64
그림 3.57 유역도 작성 흐름도	64
그림 3.58 Fill Sink 개념도, ESRI 자료 참조	65
그림 3.59 Flow Direction 개념도, ESRI 자료 참조	65
그림 3.60 하천 흐름도 결과	66
그림 3.61 Flow Accumulation 개념도, ESRI 자료 참조	66
그림 3.62 흐름 누적도 결과	67
그림 3.63 Drainage의 Stream 수행 방법	67
그림 3.64 토지피복도 속성데이터 수정	68
그림 3.65 토지피복도 래스터화 수행	68
그림 3.66 토양도 속성데이터 수정	69
그림 3.67 토양심도 속성데이터 수정	69
그림 3.68 입력자료 구축현황	70
그림 3.69 대표 매개변수 산정(2020년 5월 19일-2020년 5월 26일)	71
그림 3.70 대표 매개변수 산정(2020년 7월 28일-2020년 8월 8일)	72
그림 3.71 대표 매개변수 산정(2020년 8월 9일-2020년 8월 14일)	72
그림 72	74

제1장

연구개발과제 개요

1. 개념 및 정의

물공급 소외지역(지방·광역상수도 보급이 어려운 산간 고지대)의 안정적 물공급과 가뭄 대응능력 향상을 위한 지역 맞춤형 샌드댐(Sand Dam)과 지하댐을 연계한 하이브리드형 지하댐-샌드댐 연계 물공급체계 구축 기술 개발

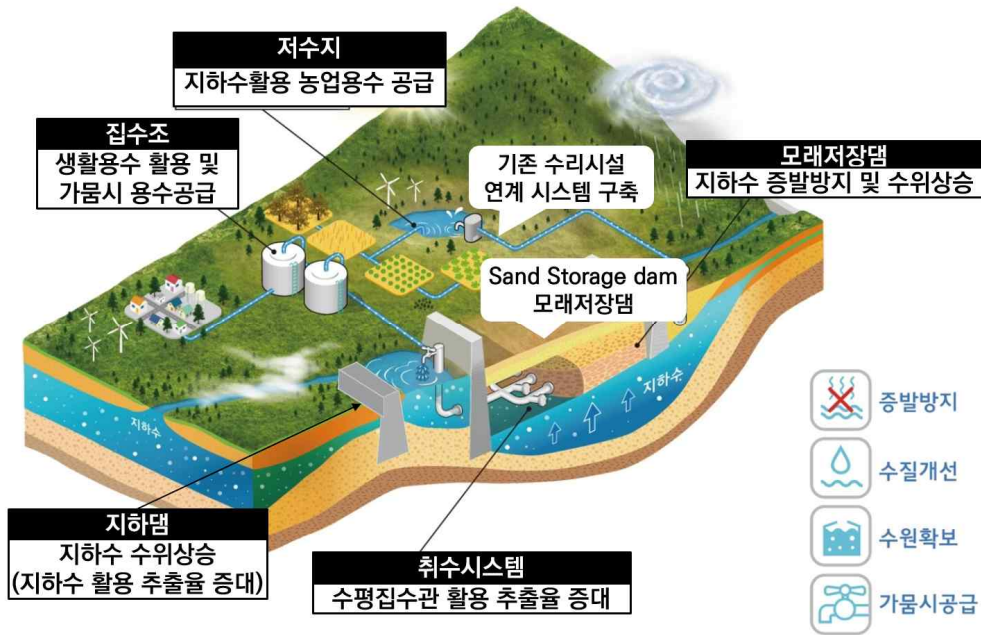


그림 1.1 하이브리드형 샌드댐 모식도

2. 추진배경 및 필요성

2.1 추진배경

최근 우리나라는 지구온난화와 기후변화로 인하여 극심한 이상 기후가 빈번하게 발생되고 있으며 우리나라의 경우 2~3년 주기의 가뭄이 발생하고, 7년 주기의 극한가뭄이 발생하고 있다. 국토교통부의 연구에서 서울, 부산 등의 가뭄 발생 예측을 한 결과 과거('97년~'06년)보다 미래('61년~'90년)의 가뭄 발생기간이 3.4배 증가할 것으로 분석되었다. 호우 역시 지난 100년간 발생 빈도가 꾸준히 증가하였고, 가뭄은 최근 10년간 증가하는 추세를 보이고 있다. 매년 반복되는 가뭄과 홍수 등의 재난으로 인해 상습 가뭄 및 홍수지역이 증가하고 있으며, 상수원의 원수 수질악화 및 수량 부족으로 체계적인 대응이 어려운게 현실이다.

2.2 필요성

대부분의 가뭄은 지류 또는 상류에 소규모 급수시설이 위치한 지역을 중심으로 발생하기 때문에, 이러한 수복지 사각지대에서 단기적인 가뭄을 안정적으로 공급할 수 있는 용수 확보 기술에 대한 연구가 필요합니다. 2025년 기준 지역별 용수유량은 6,472천 m^3 /일인 반면, 전국 161개 지방자치단체 중 74곳은 상수도 불균형으로 인해 2,377 m^3 /일(가정용수 703 m^3 /일, 공업용수 1,534 m^3 /일)의 용수 부족이 발생하고 있습니다. 국토교통부는 '가뭄 대비 지하수 지원체계 구축사업(2009~2026년)'을 추진하고 있으며, 현재까지 18개 시·군의 공공 지하수 시설을 조사·보수하는 등의 사업을 수행하고 있으며, 향후 연구를 통해 가뭄 대응을 위한 현장 기술이 확보된다면, 본 사업과 연계한 현장 적용 사업이 가능합니다. 지금까지 우리나라 가뭄 발생 시 비상정을 개발하는 제한적인 지하수 활용 정책에 국한되어 있었고, 이러한 시설은 다음 가뭄이 도래할 때 효과적인 재활용에 미흡한 실정이었으며, 이를 근본적으로 해결하기 위해서는 가뭄이 잦은 지역에서 용수원 확보 및 가뭄을 견딜 수 있는 지역별 공급체계 확보가 필요합니다. 소규모 수도시설은 지방 및 광역상수도에 비해 용수 안전성이 낮고 가뭄에 상대적으로 취약하기 때문에 이들 시설이 밀집된 읍·면·도서지역에 지하수를 연계한 안정적인 용수 관리체계에 대한 검토가 필요하나, 이에 대한 연구는 거의 없는 실정입니다.

제2장

연구개발과제의 수행과정 및 수행내용

1. 연구개발 수행과정

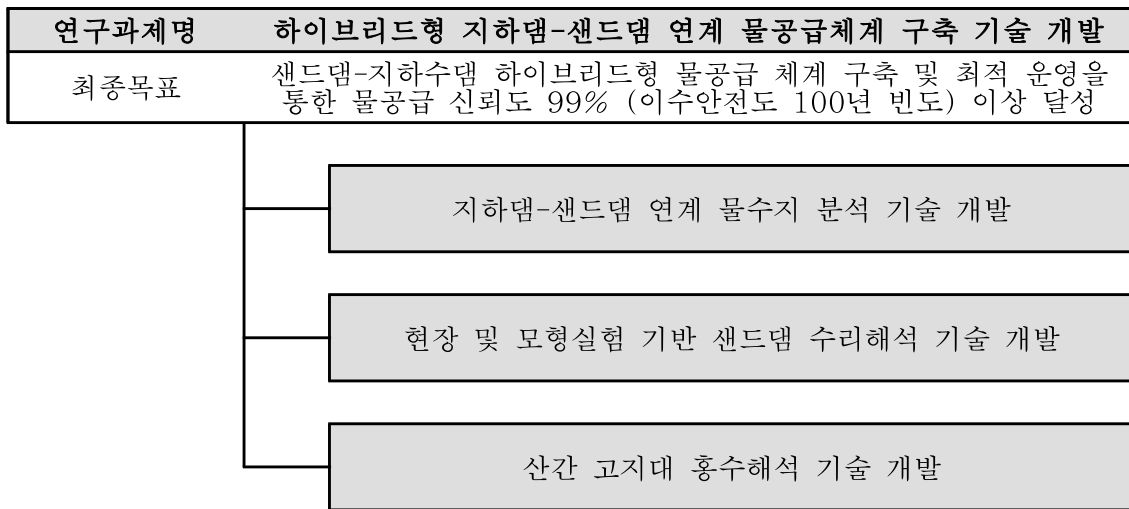


그림 2.1 연구추진체계

2. 수행내용

2.1 지하댐-샌드댐 연계 물수지 분석 기술 개발

지하댐은 많은 양의 지하수를 효과적으로 확보할 수 있는 시설로 1980년대 초 우리나라에 설치되었으나, 최근에 많은 양의 물을 취수하는 방법으로 주목받기 시작하였습니다. 상류지역의 유역조건, 대수층 조건, 오염원 분포 및 수질에 따라 저류수는 용수공급, 중수공급, 농업용 또는 공업용 등 다양하게 활용될 수 있으며, 사용목적에 따라 간단한 수처리를 할 수 있습니다. 지하댐은 많은 양의 지하수를 효과적으로 확보할 수 있는 시설로 우리나라에 1980년대 초에 설치되었으나, 최근에 많은 양의 물을 취수하는 방법으로 주목받기 시작하였습니다. 상류지역의 유역조건, 대수층 조건, 오염원 분포 및 수질에 따라 저류수는 용수공급, 중수공급, 농업용 또는 공업용 등 다양하게 활용될 수 있으며, 사용목적 및 수질에 따라 간단한 수처리를 할 수 있어 적절한 지하댐 설치 방법은 물 부족을 해결할 수 있는 주요 기술 중 하나입니다. 특히 해외의 경우와 같이 지반댐 건설이 점점 어려워지고 있는 환경적인 측면에서 향후 물 부족을 해결할 수 있는 중요한 대안으로 여겨지고 있습니다.

개발된 인공신경망 모형을 이용하여 춘천시 물로리 유역의 지하수 함양량을 산정하고 유역의 강우량을 적용하여 지하수 함양량을 산정하였다. 춘천시 물로리 지역을 포함한 유역의 경계를 설정한 후 500 m 간격의 격자를 구축하여 유역 내 인공신경망 모형의 입력 인자를 추출하였다. 춘천시 물로리 지역의 면적은 31.31 km²이며, 총 격자 수는 117개이다. 격자점의 평균 지형고도는 417.0 El.m, 최대 957.3 El.m, 최소 177.5 El.m, 표준편차 154.9 El.m으로 강원도 산지의 특성이 반영되어 있다. 격자 반경 내에서 가장 높은 고도의 평균은 516.5 EL.m, 가장 낮은 고도의 평균은 3.19.9 EL로 나타났다. 물로리 지역의 지질 구조선 밀도의 평균은 0.134로 높은 지반으로 갈수록 밀도가 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

물로리 지역은 북쪽은 소양호, 남쪽은 높은 산지로 둘러싸인 분지 형태로, 하천은 남동쪽에서 발원하여 북서쪽으로 흘러 소양강댐 유역으로 흘러갑니다. 물로리 지역 격자점 중 변성암은 105개, 관입 화성암은 11개, 미고립 퇴적물은 1개로 나타났습니다.

2.2 현장 및 모형실험 기반 샌드댐 수리해석 기술 개발

하이브리드형 모래댐의 지하수 유입, 저류, 유출에 대한 수리적 특성을 파악하기 위하여 실험 모형을 제작하였다. 모래댐 설치 시 발생할 수 있는 문제점을 사전에 평가하고 대안을 마련한다. 실험 모형을 통하여 저류수의 유동 특성을 파악한다.

연구 지역의 초기 조건을 만족시키기 위해 혼합형 모래 댐으로 구성하였다. 기존 차수벽으로부터의 유출량은 Q_1 로 표현하였다. 계곡부 기저류와 주변 산지의 배경 지하수 유동은 Q_2 로 구성하였다. Q_1 과 Q_2 는 독립적으로 공급되도록 설계하였다. Q_2 의 유입량에 따라 좌측 탱크로 수위가 변화하며, 계곡부 기저류와 주변 산지의 배경 지하수 유동에 대한 시나리오를 모의할 수 있다. 측정 항목은 Q_1 과 Q_2 에 따라 모래 댐으로부터의 유출량, 모래 댐의 수위 및 모래 댐 상부로부터의 유출량을 측정할 수 있다. 수압 전도도 측정을 목표로 별도의 장치 없이 기존 실험으로 수압 전도도 측정이 가능하다. 실험 방법은 바닥에서 15 cm 출구 밸브를 열어 수위를 고정하고 3가지 방식으로 유입량을 조절하여 각 경우에 대해 좌변 정수리를 기록한다. 20 cm 출구 밸브를 아래에서 열어 수위를 고정하고 다양한 방식으로 유입량을 조절하여 각 경우에 대해 좌변 정수리를 기록한다. 25 cm 출구 밸브를 아래에서 열어 수위를 고정하고 3가지 방식으로 유입량을 조절하여 각 경우에 대해 좌변 정수리를 기록한다. 이러한 방식으로 총 9개의 데이터 세트를 구하여 위의 식에 대입하여 수리 전도도를 계산한다.

2.3 산간 고지대 홍수해석 기술 개발

GRM NSE 모의 결과 결정계수 및 가 낮은 값을 가진다. 8월 1일 시간당 강우가 최대 69mm이며, 직접유출 될 경우 유량은 대략 37.5cms 정도가 된다. 그러나 최대 강우 시간에서 최대 관측 유량이 3.3cms 정도로 차이가 크다.

또한 시간당 20mm ~ 30mm의 강우 이벤트가 발생되어도 관측 수문곡선은 거의 반응하지 않는다. 이는 대상유역이 산지이고 너무 작으며 대상유역에서, 강우 관측소의 위치가 멀리 떨어져 있음에 따라 실제적인 유출 해석을 하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 이에 따라 대상유역에서 실측한 강우 자료의 수집이 필요하며 향후 강우 자료 취득을 통해 모형에 대한 보정을 수행하고자 하였다.

제3장

연구개발과제의 수행결과 및 목표달성 정도

1. WBS 1: 지하댐-샌드댐 연계 물수지 분석 기술 개발

1.1 지하댐 건설에 따른 수위상승 효과 분석

1.1.1 지하댐의 원리 및 적용 검토

지하댐의 일반적인 원리는 지하수가 흐르는 대수층에 인공 물막이 구조물을 설치하고, 흐르는 지하수를 지하 대수층에 저장하거나 수용하여 배관 등 취수시설을 이용하는 것입니다.

일본에서는 지하수 흐름을 끊기 위해 지반의 일부를 굴착하고 점토로 대체하여 성벽을 축조하는 작업이 오래전부터 진행되어 왔으며, 아이치현 井 愛知縣 春시 부근에서는 1930년경 길이 330m, 두께 8m의 점토로 물막이를 건설한 사례가 있었습니다. 그러나 지하댐 개념에 대한 이론적이고 실험적인 연구를 수행한 교토 郎의 마쓰오 이치로 교수에 의해 1964년에 본격적인 지하댐이 구체적인 형태로 제안된 것은 처음이며, 이를 일본 민간학회에 제시했습니다. 이 제안이 최초로 적용된 것은 1973년 나가사키현 노모사키시에 속한 카바지섬의 급수원으로서 지하 대수층에 지하수벽(물막이 또는 물막이라고도 함)을 건설한 것이 일본 최초의 지하댐이 되었습니다. 이후 1979년에는 농림부로부터 오키나와섬에 지하댐을 건설하게 되었습니다.

우리나라에서 '지하댐'이라는 용어는 1982년 한국농업진흥공사(현 한국농업기반공사)의 지하댐 조사시험보고서에서 처음 사용된 것으로, 이러한 어원은 일본에서 사용된 것처럼 지상댐에 대비해 지하에 물막이를 설치했기 때문인 것으로 추정됩니다.

Hanson과 Nielsen(1986)은 '인공적인 차수벽 시설을 통한 지하수 저장의 모든 방법'을 지하수댐으로 명명하였는데, 이는 지표면의 바닥에 차수벽을 건설하여 지하수를 저장하는 지하댐으로 정의하고, 지하댐, 계곡 등 주변 지표면보다 낮은 면에 지지력을 가진

댐을 건설하는 것으로, 댐으로 확보된 공간을 모래와 같은 투수성 물질로 채운 후, 물을 저장하여 사용하는 모래저장댐은 두 종류가 있습니다. 일본 농업국토기술대사전은 '지하의 공극률이 높은 지층에 지표벽을 설치하여 지하수의 흐름을 정지·저장하는 시설로서 지하수의 안정적인 이용을 가능하게 하는 시설'을 지하댐으로 정의하고 있습니다(吉田健治, 2000).



그림 3.1 지하댐 개념도

지하댐은 지하수 저류형태 외에도 용수 사용목적, 축조목적, 물막이벽의 설치형태 및 시공방법 등에 따라 그 종류를 구분할 수 있다. 실제로 지하댐은, 단일 시공방식에 따라 건설되는 경우보다는 구간별로 지하 매질의 특성을 조사하여 가장 적합한 시공방식을 선택하는 경우가 더 효과적이다.

1.1.2 지하댐 역할 및 효과 검토

최근 국민생활수준 향상, 사업형성, 산업의 고도화 등으로 물에 대한 수요가 크게 증가할 것으로 예상되나, 지표수 개발은 물 수요의 지역적 집중으로 하천 유역에 의한 물 공급이 어렵고, 댐 개발지의 감소, 침수 보상비의 증가, 지역사회의 반발 등으로 한계에 다다르고 있습니다. 1992년 이후 가뭄에 따른 지하수 개발의 필요성이 대두되면서 수자원 개발 계획의 일환으로 지하수 자원에 대한 재평가가 이루어지게 되었습니다. 사무원인 상수도 개발과 함께 다량의 물을 취수할 수 있는 지하 저수지의 효율성에 대한 관심이 높아지고 있습니다.

지하저류지는 지형적, 지질적 구조적 측면에서 적절한 위치에 지하수 차단벽을 설치하여 지하수를 저장하는 기능을 가지고 있으며, 그 효율적인 관리를 위해서는 유역의 지표수 문학적 특성, 대수층의 토양 특성, 대수층계의 수리지질 특성, 댐의 차수효과 등을 기본 설계 단계부터 계획적으로 분석·검토하여야 합니다.

그러나 국내 대부분의 지하저류지는 유역 내 대수층의 특성을 충분히 파악하지 못하여 수요에 따라 과도한 지하수를 사용하여 대수층의 파괴, 지반침하 및 차수벽의 기능 저하를 초래하고 있습니다.

지하댐의 영향을 생각해보면 지하 대수층에 방벽을 설치함으로써 효과를 얻게 되는데, 크게 두 가지로 구분하면 다음과 같습니다. 첫째, 벽체에 의한 상류로부터의 지하수 유입 방지, 둘째, 하류로부터의 역류 방지(해수 침입 방지)를 들 수 있습니다.

1.1.3 지하댐 건설에 따른 주변 환경에의 영향

담수 차단이 바다로 유입되는 해양생물에 미치는 영향으로 하천이나 암반을 통해 담수가 바다로 유입되지만, 차수벽의 설치로 해당 지역의 담수가 바다로 유입되는 것을 방지하여 연안 인근에 서식하는 해양생물의 생태계 변화를 초래할 수 있습니다.

보 상류 및 보 주변의 지하수 수질 악화는 보 상류에 오염원이 많거나 소규모로 오염물질이 지속적으로 배출되는 경우 저장된 지하수를 오염시켜 식수나 농업용수로 사용하는 경우 유해할 수 있습니다.

수위 상승 및 과도한 양수로 인해 차수막 설치 이전에 건설된 지하구조물이 침수될 수 있으며, 경작량보다 더 많은 지하수를 지속적으로 섭취할 경우 지반침하를 예측할 수 있습니다. 특히 협곡에 차수막을 설치할 경우 집중호우 시 지하수 수위가 급격히 상승하여 배제불량으로 인한 침수피해가 예상됩니다. 일본 카바지마 지하댐의 경우 1977년 10월부터 3개의 상수도에서 1년간 약 20~45cm의 지반침하가 발생하였는데, 이는 양수에 따른 풍화플랫폼의 공고화에 의한 것으로 보고되고 있습니다(건설산업연구회, 1980).

우리나라는 일본과 달리 충적층의 두께가 평균 10m 내외로 얇고 지하수위가 높게 유지되고 있습니다. 이로 인해 물막이에 의한 수위 상승 효과를 보기 위해 과도한 지하수위 상승은 농작물에 악영향을 미칠 수 있으며, 지표면의 얇은 곳까지 포화되어 육상생물의 서식지가 변화할 수 있습니다.

1.2 지하댐 건설에 따른 유역 내 지하수위 변화 및 저류 특성

1.2.1 지하댐 분류

저류형 지하댐은 지하수의 유출을 완전 차단하고 그 대부분을 지하 저류지에 저류시킬 목적으로 지하 불투수성 기반암까지 차수벽을 시공하는 유형으로 지하수위 상승을 목적으로 함. 이 유형은 지하수 유역이 작거나 저류수량이 부족할 때 이용되는 지하댐이다.

유출억제형 지하댐은 지하수 유출의 일부를 차단하고 지하수의 일부는 그대로 유출시켜 지하수위를 일정수준으로 유지시킬 수 있도록 차수벽을 기반암에 미달되게 시공하거나 일부만 시공하는 방법이 있음. 이 유형은 지하수 유역이 크거나 지하수 함량이 양호한 지역에 시공하는데, 하천 유수를 막아 이용하는 보(weir)도 유출억제형 지하댐의 유형이라고 볼 수 있다.

염수침입 방지형 지하댐은 해안지역에 시공되는 지하댐으로 담수와 해수 경계 부근에 차수벽을 시공함으로써 해수의 침입을 방지하고 담수의 유출을 억제하는 형태로 완전 저류형에 속함. 차수벽은 기반암까지 시공하고 상부는 해수면 수위를 감안하며 시공한다.

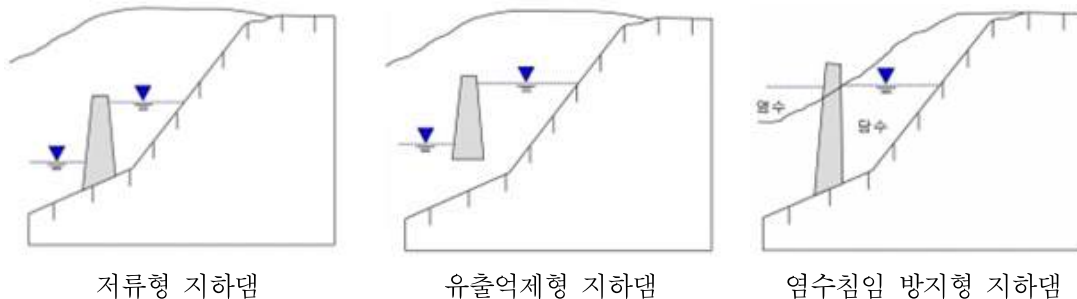


그림 3.2 사용목적에 따른 지하댐의 구분

완전 지하 저류형은 지하수를 완전히 지하에 저류시키고 지표에는 노출되지 않는 형태임. 이 경우 내륙에서 지상은 농경지로 사용하거나 기타 목적으로 사용되며 사용목적에 따른 구분 중 저류형 또는 유출억제형의 대부분이 여기에 속함

일부 지표 저류형 지하댐은 대부분의 지하수를 지하에 저류시키고 지하수위가 상승됨에 따라 지형상 일부 저지대에서는 지하수가 노출되어 지표에 저류되는 유형. 차수벽이 하천의 하상부에 보 형태로 존재하는 경우 또는 해안 부근에 시공한 지하댐에서 지하댐 안의 지하수위가 지표이상 상승하는 경우 등에 사용하는 지하댐이다.

지표댐 병용형 지하댐은 계곡부의 지표수까지 동시에 저류하는 형태로 이것은 사막 인근 지역에서 강우 시 지표수를 저류시켜 사용하다가 지표수가 고갈되면 지하수를 이용하는

방법이다.

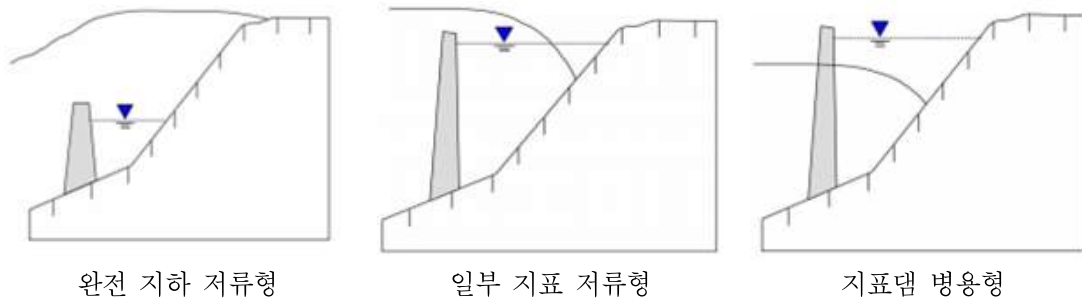


그림 3.3 저류형태에 따른 지하댐의 구분

주입공법형은 일반적으로 그라우팅공법을 의미하며 보링기로 지하를 천공하고 시멘트 등을 강제 주입하여 지하 공극을 충전함으로써 지하수 유동을 억제하는 방법. 시공 후 지수효과가 시간에 따라 점차 감소될 수 있으므로 장기적인 관리를 위해서는 정기적인 지수 효과에 대한 검증이 필요. 지수 효과에 대한 검증은 일반적으로 차수벽 상·하류에 설치된 관측공을 활용한 수압 시험이나 추적자 시험 등을 고려하여 설치한다.

연속벽 공법형은 지하댐 위치를 인력이나 기계로 일정심도까지 굴착 또는 절개하여 점토, 벤토나이트, 시멘트를 이용한 차수벽을 타설하는 시공방법. 이 공법은 목적에 따라 공법을 적절히 적용할 수 있고 완전 차수는 물론 거의 영구적이며 규모도 자유롭게 조정할 수 있는 장점이 있으나 비교적 공사비가 비싼 것이 단점이다.

타입공법형은 파일 등을 지하에 강제 타입하여 지하 차수벽을 형성하는 방법으로 연약지반에 주로 이용되며 암반층이나 전석이 많은 지층에서는 강제 타입이 불가능해 시공이 어려움. 파일 하부나 연결부위의 완전 지수를 위해서는 주입공법을 겸용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

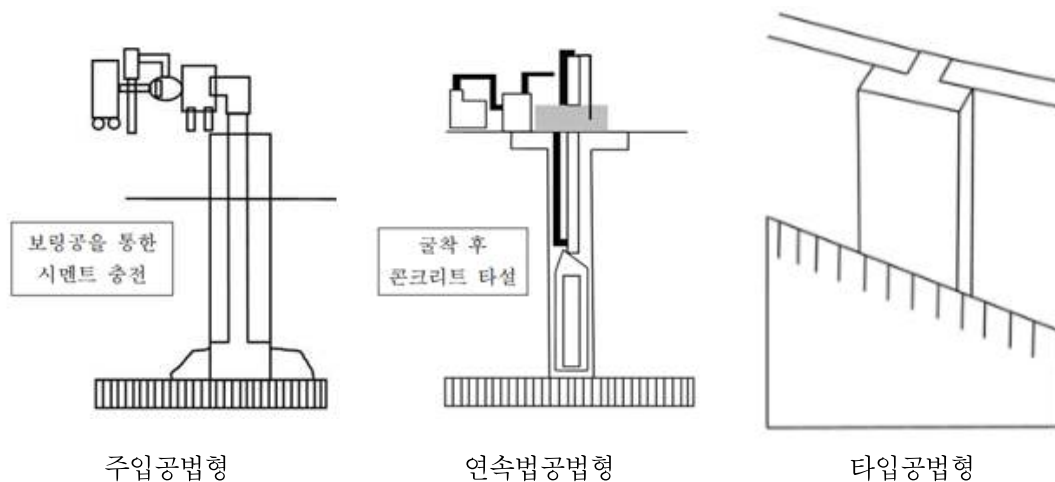


그림 3.4 차수벽 시공법에 따른 지하댐의 구분

1.2.2 지하댐의 장단점과 입지조건

지하댐은 일반적으로 지형학적 이점을 갖고 있는 일반 지상댐에 비해 많은 장점을 가지고 있으나, 침수지역이 없기 때문에 지상공간 활용이 가능하고, 수질오염 가능성이 적으며, 증발손실도 적다. 친환경적인 수자원 확보가 가능하며, 자연오염의 위험성이 거의 없습니다. 그러나 취수를 위해 별도의 급수시설이 필요하고, 지하수의 저장량을 직접 평가하기 어렵고, 한번에 많은 양의 물을 사용할 수 없으며, 물 차단막을 정화하기 어려운 등의 단점이 있다. 지하수가 오염되어 균열이나 누수 확인이 어렵습니다.

방수벽 건설 이후 국내에서는 과도한 채수로 인한 지반침하나 대수층 규모 감소, 지반 상승으로 인한 침수지역, 기후변화, 지하수 오염 등의 사례는 아직 보고된 바 없습니다. 국내 건설되는 지하댐의 대부분을 차지하는 5개 댐은 농업용수를 위한 지하댐이기 때문에 농번기 집중으로 물을 보충할 여지가 있고, 유역에서 물을 사용하므로 향후 활용이 기대된다. 방수방어벽 건설현장에서 지하수위가 높아진 것은 급격한 수위 상승으로 인한 것이 아니라는 것이다. 국내에 건설되는 지하댐이 적고 대부분의 지하댐이 농업용수용 지하댐인 이유는 수질변화 및 지반침하와 관련된 문제가 적다는 점과, 지하댐 건설로 인해 지하댐에 대한 연구가 거의 이루어지지 않았기 때문이다. 일본과 같이 대수층의 충전층이 두껍게 발달하지 않은 우리나라에서는 과도한 침수로 인해 지하댐에 대한 연구가 거의 이루어지지 않았다. 향후에도 지하댐 건설과 같이 수자원 확보를 위해 지하댐을 추가로 건설하게 된다면 지하댐 계획수립 시 충분한 고려가 필요하며, 본 지하댐 현장에서는 지하댐 이후 지하수량의 변화에 대한 연구가 필요하다. 댐 건설이 필요하다.

지하댐을 구성하는 구성요소에는 물 장벽, 대수층, 지하수를 공급하는 유역, 취수 및 배수 시설이 모두 포함됩니다. 그 중에서 지하댐의 가장 중요한 시설은 저장시설인 물막이이며, 취수시설, 급수시설, 배수시설 등 저장된 물을 이용하는 시설 또한 매우 중요하다. 이들 시설은 지하댐의 부대시설로서, 제대로 관리되지 않으면 저장수 이용에 큰 문제가 발생하게 된다. 연구지역 지하댐의 경우 취수장의 건설 및 관리체계는 취수목적 및 이용목적이 결정된 후 결정되며, 농업용수 지하댐은 필요한 경우에만 취수시설을 운영하므로, 연간 관리인력이 필요 없으며, 관리체계는 건설관리직원과 수혜자가 직접 관리하며, 시설 규모도 크지 않을 것으로 예상된다.

1.2.3 지하수 이용에 따른 지반 특성 변화

우리나라는 지하수 이용이 증가함에 따라 지하에 공동이 생성되어 지반침하가 발생하고 이로 인해 건물, 도로, 시설물 등이 붕괴될 수 있습니다. 우리나라도 지하수 고갈 현상에서 예외가 아니며, 지하수 이용이 많은 온천지역, 해안지역, 도서지역 등에서 빈번하게 조사되고 있습니다. 실제로 제주도의 경우 1996년 51개 지하정에 장기관측망을 설치한 결과 도내 평균 지하수 수위(해발대비 지하수 수위)가 12.40m로 1992년 160.07m보다 약 3.67m 하락한 것으로 나타났습니다. 부곡온천지역의 경우 1973년 지하수 수위가 70m였으나, 1999년 지하 230m에서 지하수가 발견되면서 21년 만에 지하수 수위가 약 160m 하락했습니다. 특히 온천 개발이 가속화된 1982년부터 1987년까지 6년간 약 145m 하락했는데, 이는 부곡지역의 하루 최적 지하수 섭취량인 600 m³/일의 2배 이상이 모여 발생한 문제로 분석됐습니다.

지하수 고갈이 심해지면서 해안지역이나 도서지역에서는 지하수 수위가 떨어지고 해수가 지하 대수층으로 침투해 바닷물이 지하수로 유입됩니다. 이는 지하수를 식수나 생활용수로 활용할 수 있는 능력이 상실됨을 의미합니다. 실제로 1997년 조사에 따르면 제주도 전체 지하정 733개소 중 소금이 471개소(62%)에서 나오는 것으로 나타났으며, 해안 1km 지점의 평균 염도는 1,000 ppm까지 높은 것으로 나타났습니다. 부하량은 다른 해안지역도 예외가 아니며 울산, 포항, 동해안, 서해안, 제주도 등의 지역에서 지하수가 고갈되면서 바닷물이 역류하여 식수로 사용할 수 없게 됩니다.

해수 유입의 문제 외에도 지하수의 고갈은 토지 침하를 동반할 수도 있습니다. 지반 침하하는 토지의 자연 표면이 수직적으로 하향 이동하는 것을 포괄적으로 표현하는 용어입니다. 이는 수직적, 수평적 변위나 수압적 구배에 의한 지표면의 하강 등 지질학적, 수문 지질학적, 지질학적 구조적 모든 원인에 의해 발생합니다. 때로는 인간의 경제적, 사회적

활동 영역 내에서 예측할 수 없는 사건들이 발생하여 인명 및 재산 피해를 일으키는 심각한 재해로 발전하기도 합니다.

지하댐의 경우, 충적층과 같이 다공성 토양층이 분포하는 지역의 경우, 지하수의 집수량이 지하수 충전량보다 많으면 지하수 수위가 낮아지고, 지반 침하와 같은 국지적 침하가 발생하기 쉽습니다. 따라서 지하수 개발 전에 수문학적 균형을 고려해야 하며, 지반 침하 가능성과 규모를 예측해야 합니다. 수문학적 균형을 분석하기 위해서는 자연적인 충전량과 예상 최대 집수량을 계산해야 합니다.

1.2.4 지반 매질의 저류 특성 평가

지반을 구성하는 다공성 매질 내 지하수의 분포특성을 이해하기 위해서는 산란율과 유효공극률 간의 상관분석을 통해 이들 매질의 공간적 개념인 공극의 성질을 측정해야 한다. 지하수는 매질의 공극과 연결된 유효공극을 통해 이동, 저장되기 때문에 지하수추적시험이나 펌핑시험을 통해 물성치를 계산하여 지하수의 경작량과 지하수 침투정도를 판단하게 된다.

여기서, 지하수의 비산율은 포화된 다공성 매질에 대하여 중력적으로 배수할 때 배수되는 물의 부피비를 나타내며, 매질의 유효공극률을 통해 배수되는 물의 부피는 실제 매질의 유효공극률과 유사하다. 그러나 중력배수에 의해 매질에 포함된 수분이 배수되더라도 배수되지 않으며, 매질에 포함된 물의 부피에 대한 비율을 비보류율로 표현하고, 산란율과 비잔류율은 다공성의 개념으로 볼 수 있습니다.

표 3.1 다공질매질의 비산출률 비교

물질	비산출률		
	최대	최소	평균
점토	5	0	2
모래질 점토	12	3	7
실트	19	3	18
세립 모래	28	10	21
중립 모래	32	15	26
조립 모래	35	20	27
자갈질 모래	35	20	25
세립 자갈	35	21	25
중립 자갈	26	13	23
조립 자갈	26	12	22

유효 기공도는 일반적으로 기공도에 비해 작은 값을 가지며, 유효 기공도의 범위는 매질이 포화상태인지 불포화상태인지에 따라 약 10% 이상 차이가 납니다. 즉, 유효 기공도는 중력 배수에 의해 배수되지 않고 남아있는 매질의 부피비인 비보류비를 제외한 부피임을 알 수 있습니다. 또한 평균 입경이 다른 같은 기공도를 가진 매질에 비해 세립형 매질의 표면적이 증가하고 흡착된 물의 분포가 많아 비보류율이 증가합니다. 따라서 세립형 매질의 유효 기공도는 조립형 매질에 비해 작습니다. 또한 다공성 매질과 비수율의 관계를 보여주는 삼각도에서 비수율은 모래의 양이 증가할수록 급격히 증가하고, 실트와 점토의 양이 증가할수록 크게 감소하는 것을 알 수 있습니다.

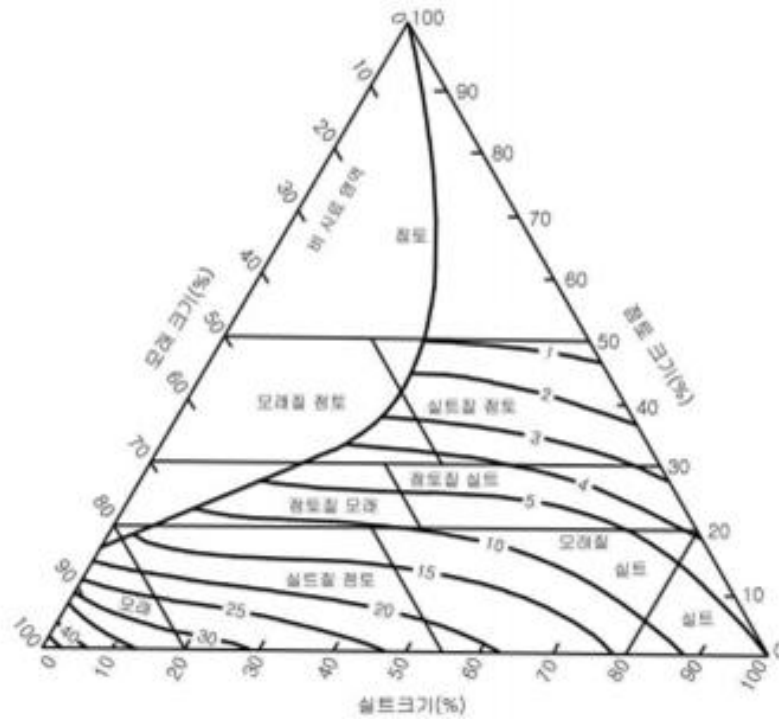


그림 3.5 입경과 비산출률의 관계

지하수의 비산율과 매질의 유효공극률은 집합체에서의 산란율과 유효공극률의 특성이 미세입자에 비해 높으므로 지하댐이 건설될 충적지역에 대해서는 대상 매질의 입도 분포 특성과 입도에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다.

포화 지하수 매질의 보유특성은 공극이 연결된 유효 공극을 통해서만 평가되며, 이들 공극의 공극률은 지하수위 변화에 따라 감소한다. 이러한 지하수위 변동은 지반의 포화부분과 불포화부분의 반복을 의미하며, 이러한 상태가 장기간 지속되면 지반침하 등 지반 매질의 구조가 재배열되게 된다. 따라서 지반침하 문제는 공극률의 감소를 의미하며, 공극률의 감소는 유효공극률의 감소와 직결된다.

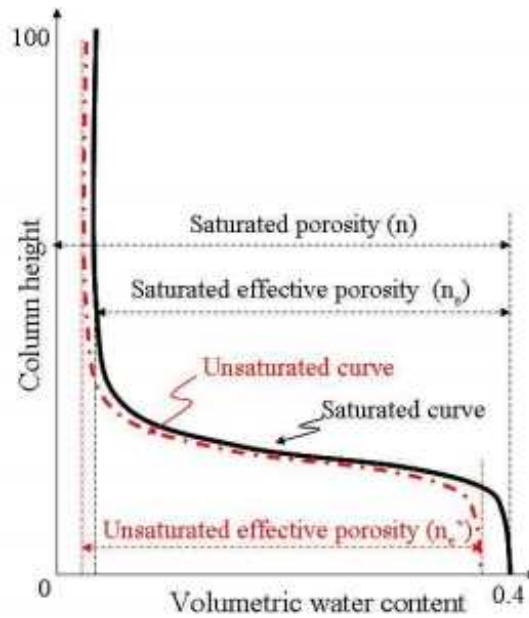


그림 3.6 수위변동에 따른 매질의 수분분포특성 곡선

분쇄 매체의 수위 변동은 매체의 포화 및 불포화 상태를 반복적으로 형성하므로 매체의 공극은 점차 감소합니다. 이러한 공극의 감소는 실질적으로 다공성 매질에서 지하수를 담을 수 있는 공간의 감소를 의미하므로, 시간이 지남에 따라 지하수를 재배하는 능력은 감소하게 된다.

다공성 매질의 수위변화로 인해 포화상태와 불포화상태가 반복적으로 발생하는 경우, 유전상수 반응을 통해 매질의 기공 변화를 파악할 수 있습니다. 즉, 초기 불포화 상태에서 다공성 매질의 초기 유전율 측정값이 물의 변화에 따라 불포화 상태에서 포화 상태로, 포화 상태에서 불포화 상태로 변화함에 따라 측정된 유전율은 점차 감소한다. 레벨 변화. 따라서, 초기 유전율과 최종 유전율의 측정값의 변화로부터 대상 다공성 매질의 유효 기공률 감소를 판단할 수 있다.

따라서 분쇄매체에서 침투수로 작용하는 부피함수비의 분포특성과 수위변동에 따른 유효 공극률의 변화를 이해하기 위해 포화 및 불포화 조건을 만족하는 아크릴 기둥을 제작하였다.

포화 및 불포화 조건에서 매질의 유효 기공률을 측정하기 위해 높이 100cm, 직경 5cm의 아크릴 기둥으로 시험장치를 제작하고, 기공률 0.40으로 제작된 표준사 시료를 기둥에 넣었다. 시험 장치로, 아크릴 기둥 하단에 주입된 물을 반복하여 포화 및 불포화 조건을 만족시켰습니다. 이때 완전히 포화된 상태에서 배수되는 물의 양은 컬럼 하단에 설치

된 자동계량저울로 자동 측정하였다.

FDR 측정 프로브의 길이는 7cm를 사용하여 컬럼 상단에 설치하였고, 매질의 포화, 불포화 조건에 따라 유전율을 자동으로 측정하였고, 분리하여 건조시험을 통하여 부피함수비를 측정하였다. 10cm 높이의 기둥을 5cm 단위로 나누어 최종 배수가 끝난다.

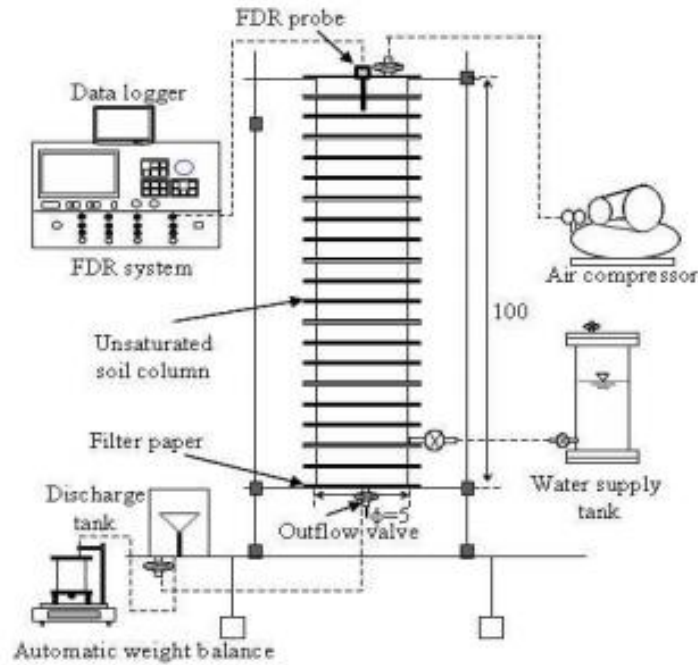


그림 3.7 연속 주입/배수시험 및 중력배수시험 모식도

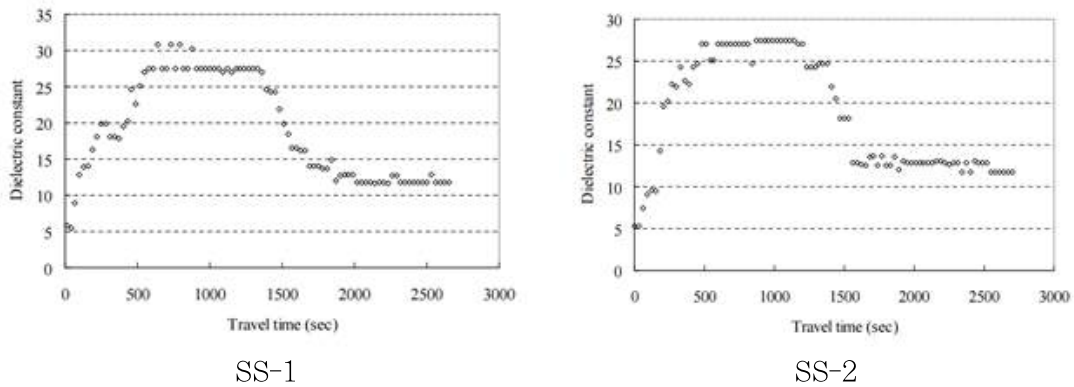
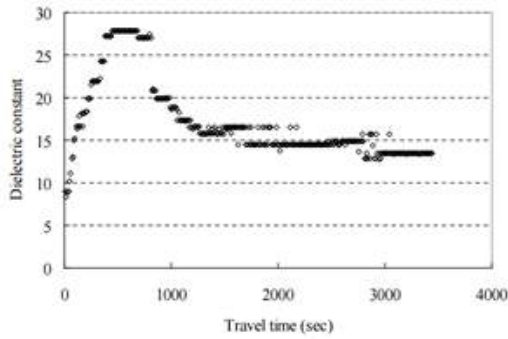
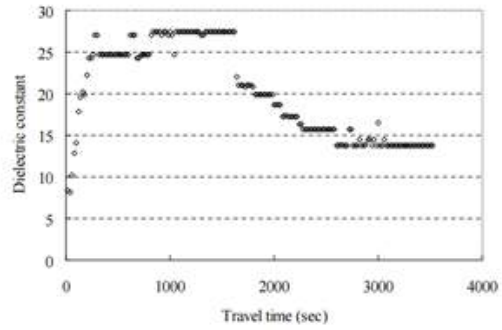


그림 3.8 체적함수비 10%인 시료에 대한 주입/배수시험 시 유전율 반응 특성

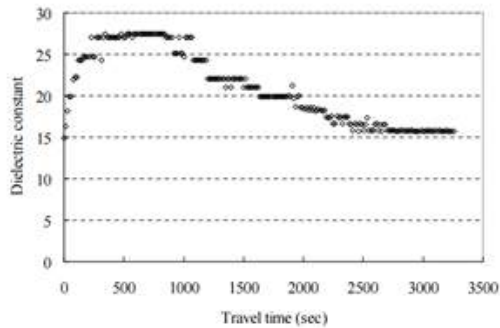


SS-3

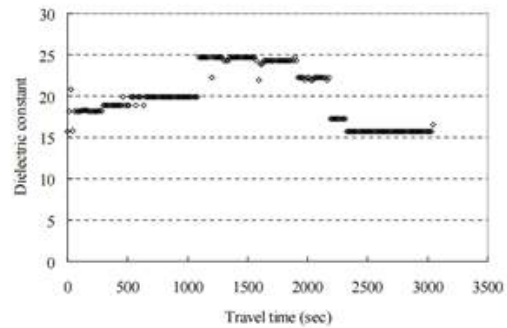


SS-4

그림 3.9 체적함수비 20%인 시료에 대한 주입/배수시험 시 유전율 반응 특성



SS-5



SS-6

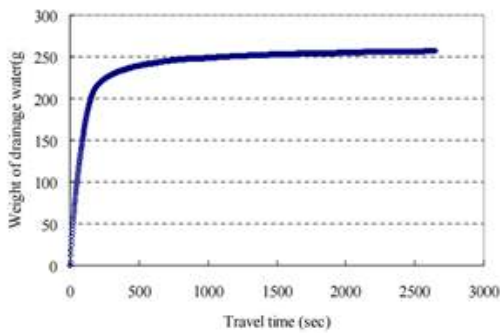
그림 3.10 체적함수비 30%인 시료에 대한 주입/배수시험 시 유전율 반응 특성

유전율과 부피함수비 변화의 관계는 다음과 같습니다. 최초 제작된 불포화도 기둥에 대하여 주입과 배수를 통해 유전율의 변화와 배수되는 물의 양을 자동으로 측정하였다. 제작된 토양 시료 기둥은 표준사를 사용하여 초기 공극률 0.40으로 조밀하게 제작되었으며, 부피함수 비율이 10%, 20%, 30%로 각각 2개씩 변화하여 총 6개의 시료를 제조하였다. 부피함수비 조절을 통해 제조된 토양 시료는 초기 상태에서 불포화 상태를 갖고 있어 물 주입 및 배수를 통해 불포화/포화 조건을 충분히 만족시킬 수 있었다.

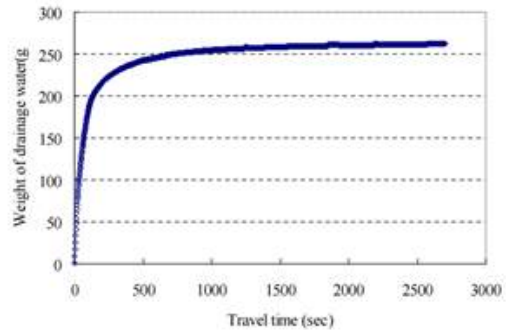
표 3.2 초기 체적함수비 조건에 따른 주입/배수에 의한 유전율 반응

시료번호	흙시료의 체적함수비	측정 유전율상수		
		불포화상태 초기조건	포화상태 주입조건	불포화상태 배수조건
SS-1	10%	5.8	27.5	11.8
SS-2	10%	5.3	27.5	11.8
SS-3	20%	8.9	27.9	13.3
SS-4	20%	8.3	27.5	13.8
SS-5	30%	14.8	27.5	15.8
SS-6	30%	15.7	24.7	15.7

위의 표는 토양시료에 대한 초기/주입/배수 조건에 따라 측정된 유전율의 변화를 부피함수비별로 나타낸 것으로, 부피함수비가 10%가 아닌 30%일 때 높은 초기유전율을 보이며, 거의 완전 배수 상태에서도 동일한 변화 패턴을 보입니다. 이러한 현상은 초기 불포화 조건에서 부피함수비 배양 정도에 따라 부피함수비가 증가할수록 토양시료의 공극 중 유효공극의 부피가 감소하는 것을 의미하며, 이는 실제로 유효공극률인 것으로 판단된다. 물의 흐름 경로는 점차 감소하는 경향이 있습니다.

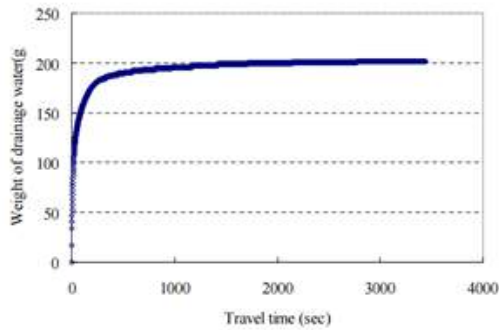


SS-1

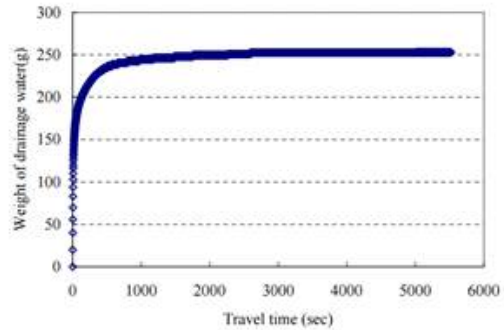


SS-2

그림 3.11 체적함수비 10%인 시료에 대한 압력배수시험 결과

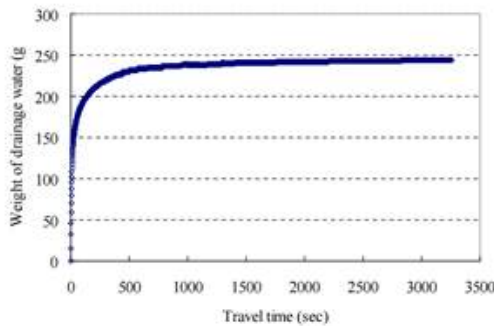


SS-3

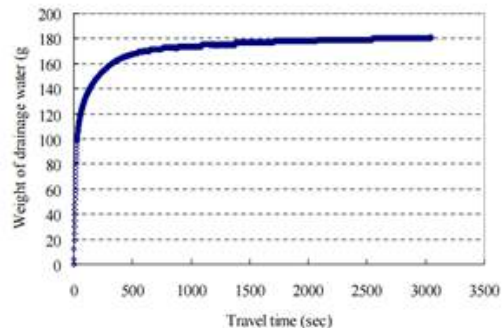


SS-4

그림 3.12 체적함수비 20%인 시료에 대한 압력배수시험 결과



SS-5



SS-6

그림 3.13 체적함수비 30%인 시료에 대한 압력배수시험 결과

즉, 토양기둥이 불포화상태에 도달했다는 의미일 뿐만 아니라, 초기 유전율보다 낮게 나타나게 되는데, 이는 공극의 분포 범위가 커짐에 따라 토양 입자의 공극이 감소함을 의미한다. 수위를 변경하고 불포화 → 불포화 → 불포화 상태를 반복적으로 변경합니다. 따라서 수위 변동에 따른 토양의 침강 경향은 유전율 반응을 통해 충분히 확인할 수 있다고 판단된다.

분쇄매체의 유전상수 반응을 이용한 수위변동에 따른 실시간 유효공극률 모니터링 기술은 매체 내 체적함수비의 분포특성에 민감하게 반응한다. 일반적으로 부피함수비는 분쇄매체가 보유하고 있는 매체의 기공에 분포된 수분의 양으로, 대상매체의 부피에 비례한다. 따라서 지반 내부의 체적함수비에 영향을 미치는 요인은 지반의 변화에 따른 강수량과 모세관에 의해 투과되는 투과수량에 크게 좌우된다(Har, 1991).

이는 지반이 불포화와 포화 조건을 반복하면서 매질의 공극에 분포하는 부피함수 비율의

변화를 가져오며, 공극의 분포도 수위 변동에 따라 폐쇄공공과 개방공공으로 나누어진다. 이러한 물리적 변화는 다공성 및 유효 다공성의 감소를 동반합니다. 따라서 수위변동에 따른 매질의 공극률이나 유효공극률의 측정은 유전상수 반응과 그 변동을 통해 충분히 파악할 수 있다고 판단된다.

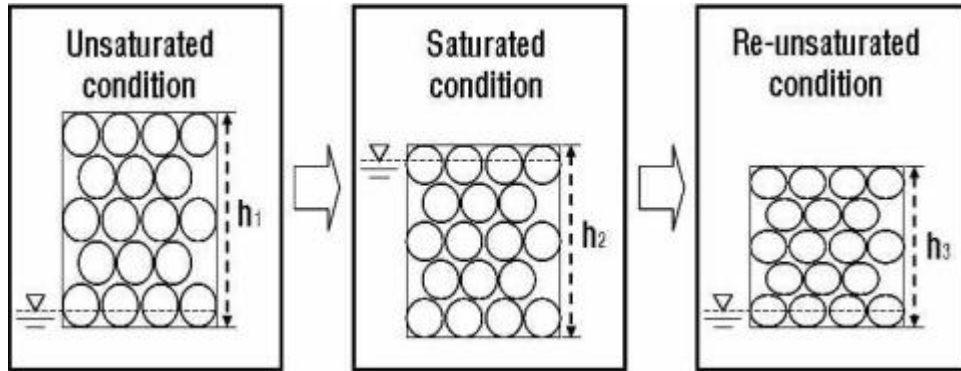


그림 3.14 수위변동에 따른 포화/불포화 조건에서의 침하 모식도

위 그림은 수위 변동에 따른 매질의 침강을 나타냅니다. h_1 이 동일한 부피와 다공성을 갖는 시료에 대한 초기 불포화 조건에서의 매질의 높이라면, 수위가 높아지면 매질의 높이가 h_2 로 낮아지고, 그 다음에는 매질의 높이가 h_3 으로 낮아진다. 수위가 더 낮아지면 다시.

포화 및 불포화 매질에 대한 대상 매질의 유전상수 반응특성을 통해 지반침하와 유효공극률의 상관관계 분석이 이미 정량적으로 측정 가능합니다. 따라서 지반침하와 관련된 지반의 물리적 변화는 매질의 부피변화, 공극률 및 유효공극률의 감소, 유전율의 감소 등의 물리적 성질의 변화로 확인할 수 있다. 포화 및 불포화 매체에서의 유전 상수 반응은 토양 입자, 물, 공기 및 공극의 영향에 민감합니다(Wilson et al., 195; Novorio, 201; Reddi, 2003). 포화 매질은 공극이 물로 완전히 채워져 있기 때문에 토양 입자의 유전율보다는 물의 영향으로 높은 유전율을 나타내지만, 불포화 매질은 공기의 영향으로 유전율이 낮습니다. 모공. 또한 토양 입자의 밀도가 큰 경우보다 토양 입자의 밀도가 작은 경우 유전율이 상대적으로 낮습니다. 이러한 다양한 매체의 물리적 특성을 고려하면, 수위 변동으로 인한 매체 내 기공의 분포 특성에 따라 측정되는 유전율의 범위는 낮을 것입니다.

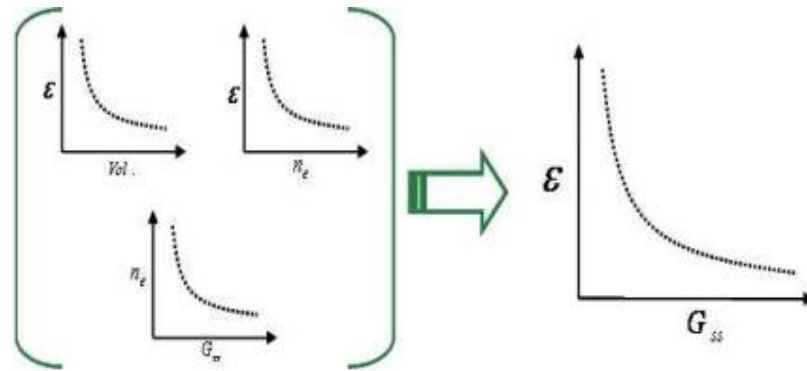


그림 3.15 수위변동에 따른 포화/불포화 조건에서의 침하 모식도

지상 매체의 유효 다공도와 그에 포함 된 지하수 재배량 사이의 관계를 고려할 때, 지하수의 양을 평가하기 위해 수위의 변화로 인해지면 자산 가치의 변화량을 완전히 파악해야 합니다. 지하 댐 분지에서 수집 및 재배. 이를 위해,지면 매체의 본질적인 속성 값인 유전체 상수 반응으로부터의 수위 변화로 인해 포화 및 불포화 조건 하에서 배지의 유효 다공도의 변화를 측정해야한다. 지하 댐의 효율적인 운영 및 관리.

1.2.5 지하댐 유역 수문성분 해석

국내 하천의 경우 계절에 따른 유속변화가 심하여 홍수 피해를 줄이고 안정적인 물 공급을 위해 하천 유향에 대한 다양한 연구가 시도되었으나 지하댐 건설에 따른 유향분석은 실시되지 않았다(진원 이우효섭, 192). 따라서 본 연구에서는 지하댐 건설 전후의 황분석을 통해 유출량의 변화를 파악하였다. 특정 지점의 하천 유향을 분석하는 것은 하천유량의 시간적 변동을 결정하며 목적에 따라 분석기간 및 분석자료를 설정하며 유향분석은 일반적으로 두 가지 방법으로 나뉘어진다. 첫 번째 방법은 매년 일별 데이터를 크기순으로 나열하고 각 순서대로 유량을 평균하는 것이고, 두 번째 방법은 분석기간 전체에 대한 데이터를 크기순으로 나열하여 유량의 크기를 나타내는 것이다. 유지율에 따라 달라지며, 본 연구에서는 두 번째 방법을 사용하였다. 아래 그림은 경상북도 영덕군 00천유역의 유향곡선으로, 본 연구에서는 소요량인 10,080m³/일을 고려하여 지하댐 건설 전과 후의 유향곡선을 비교하였다. 그래프 분석 결과 지하댐 건설 이후 하류로 갈수록 유량이 다소 감소하는 것으로 나타났으나, 지표수댐의 영향에 비하면 매우 작은 것으로 나타나 지하댐의 지표수 환경에 대한 변화 및 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

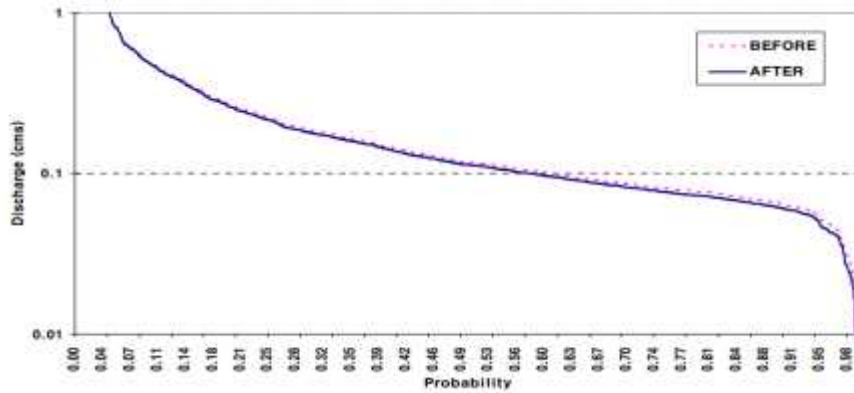


그림 3.16 양수 후 지하댐 건설 전·후의 유황변화 분석

지하댐 건설로 인해 지하수위가 상승한 유역 중 지하수위가 0.2m 이상 증가한 면적을 이용하여 부피를 산정하고, 실제 확보할 수 있는 수량을 다음과 같이 분석하였다. 일반 지질학의 최대 및 최소 유효 다공성을 적용합니다. 아래 그림은 지하수위가 최대로 상승할 때의 유역과 지하수위의 변화를 나타낸 것이다. 수위상승지의 면적은 모델해석을 통해 얻은 결과를 바탕으로 하였으며, 수위가 상승한 셀의 전체 면적을 이용하였으며, 증가된 지하수위를 각 셀에 적용하였다. 계산결과 층적층의 증가체적은 하루 최대 29,300m³로 나타났으며, 예상체적에 최대(27%)와 최소(22%)의 유효공극률을 적용한 결과, 각각 80,811m³, 65,846m³의 수량을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

	0.04	0.04	0.05	0.05	0.11	0.15	0.2	0.19	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10
0.04	0.05	0.07	0.09	0.11	0.15	0.18	0.2	0.2	0.2	0.2	0.21	0.22	0.22	0.25	0.19	0.14	
0.05	0.06	0.09	0.12	0	0.17	0.21	0.2	0.22	0.23	0.24	0.24	0.24	0.26	0.26	0.19	0.15	
0.05	0.07	0.10	0.13	0.16	0.21	0.24	0.23	0.25	0.26	0.26	0.27	0.26	0.26	0.31	0.17	0.15	
0.05	0.08	0.11	0.14	0.18	0.26	0.26	0.27	0.26	0.27	0.29	0.29	0.3	0.29	0.29	0.28	0.26	0.11
0.05	0.09	0.12	0.15	0.19	0.27	0.27	0.28	0.31	0.33	0.35	0.35	0.33	0.3	0.27	0.26	0.31	0.17
0.05	0.10	0.13	0.16	0.20	0.28	0.28	0.31	0.35	0.39	0.42	0.41	0.36	0.3	0.27	0.24	0.31	0.14
0.05	0.11	0.14	0.17	0.21	0.3	0.31	0.35	0.39	0.42	0.41	0.36	0.3	0.27	0.24	0.31	0.14	0.11
0.05	0.12	0.15	0.18	0.22	0.3	0.37	0.4	0.47	0.51	0.51	0.42	0.3	0.22	0.18	0.15	0.20	0.10
0.05	0.13	0.16	0.2	0.24	0.37	0.42	0.49	0.55	0.66	0.71	0.51	0.23	0.15	0.12	0.1	0.15	0.05
0	0.02	0.05	0.08	0.05	0.1	0.16	0.25	0.37	0.58	0.67	0.88	1.16	2.08	-0.96	0.02	0.05	0.06
0	0.02	0.05	0.08	0.07	0.09	0.16	0.25	0.37	0.58	0.67	0.88	1.16		-0.19	-0.01	-0.01	0.01
0	0.01	0.03	0.05	0.05	0.07	0	0.18	0.33	0.53					-0.42	-0.22	-0.11	-0.05
0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.01	0.01	0.37						-0.45	-0.21	-0.2	-0.11

그림 3.17 지하댐 건설로 인한 지하수위 증가 범위(0.2m 이상 상승)

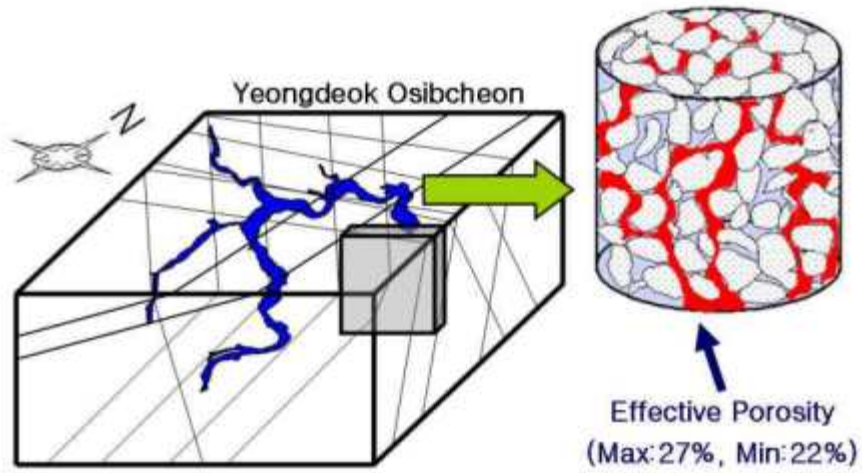


그림 3.18 00천 유역 및 유효공극률 산정

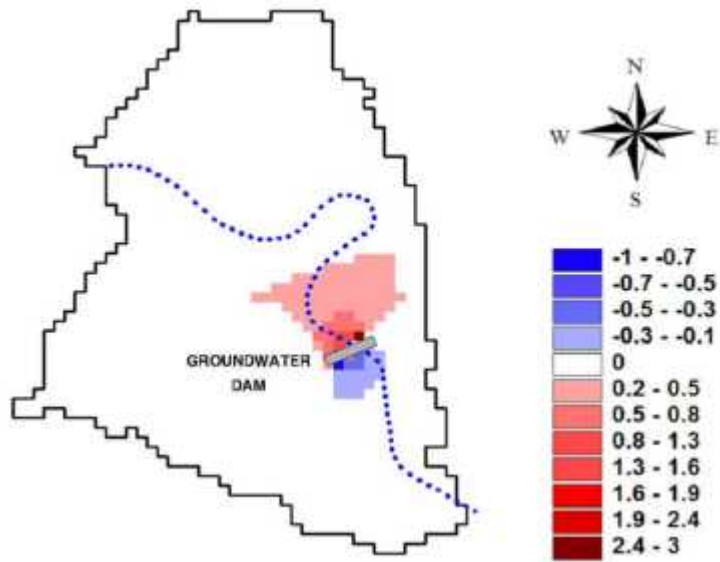


그림 3.19 지하댐 건설에 따른 지하수위 변화 분포

표 3.3 유효공극률에 따른 실제 확보수량

지하수위 증가면적 (m ²)	증가된 지 하수위 (m)	증가된 부 피(m ³)	최대 공극 률(%)	최소 공극 률(%)	최대 확보 수량(27% 적용)	최소 확보 수량 (22%) 적 용
840,000	0.21~1.1 6	299,300	27	22	80,811	65,846

1.3 춘천 물로리 지역의 지하수 함양량 추정

1.3.1 지하수 함양량 개요

지하수 재배는 여러 방향에서 지하 대수층에 도달하는 물의 양으로 정의할 수 있으며, 일반적으로 물의 하향 이동으로서 지하수에 도달하는 물의 양을 말합니다. 지역 재배는 넓은 지역에 걸쳐 균일하게 발생하는 강수 또는 관개로부터 유래된 재배를 의미합니다. 지역 재배는 하천, 호수, 저지대 등 지하 지형으로부터 집중된 재배를 의미합니다. 지역 재배가 소규모 하행 지역, 절리 또는 하천에서의 재배에 국한되는 경우도 있습니다. 기저 유출의 발생원이 지표면에서 침투된 물이며, 기저 유출이 재배량과 동일하다는 가정하에 여러 연구가 수행되었습니다.

국내에서는 1990년대부터 지하수 함양량에 대한 지속적인 연구가 진행되어 왔으며, 현재까지 수행된 지하수 함양량 산정방법은 주로 지표수의 수문곡선을 이용한 방법, 지하수위 하강곡선을 이용한 방법, WTF(Water Table fluid analysis), 물수지 분석, 지하수 분석 등이 주를 이루고 있습니다.

표 3.4 전국 단위의 지하수 함양량 산정 연구 사례

연구자(기관)	추정량 ($10^6 \text{m}^3/\text{년}$)	강수량 대비 비율	적용 방법
선우중호(1992)	100~150	7.9~11.8%	Cheremisinoff(1988) 기준, 물수지 분석
한국수자원공사 (1994)	134.3	10.6%	물수지 분석
한정상(1995) 이천복(1994)	228	18%	물수지 분석
한국수자원공사 (1994)	193.9	15.3%	갈수시 기저유출량 산정
한국수자원공사 (1995)	186.3	14.7%	Ridge regression 방법 적용
건설교통부(2002)	168.4	13.2%	지하수위 강하곡선 해석 방법
국토교통부(2017)	188.4	14.4%	유역별 다양한 해석 방법 적용

지난 수십 년간 지하수 수문학 분야에서 연구 개발되어 온 지하수 재배량 추정 방법은 크게 1) 수문학적 분석 방법, 2) 불포화 분석 방법, 3) 포화 지하수 분석 방법 등 3가지입니다.

위와 같은 방법들은 각각 재배기간 및 대상면적 등의 한계점을 가지고 있으며, 많은 지

표수 자료를 이용한 재배량 산정은 단기간의 재배량 산정에 유용하며, 장기간의 재배량 산정 시에는 이러한 짧은 기간의 축적량으로부터 산정된다. 비포밍 분석법은 단기간의 지하수 재배량 산정에 이용되며, 수치해석 모델링 기법은 특정 기간의 지하수 재배량 산정에 주로 이용된다.

최근에는 위와 같은 단일 방법이 아닌 다수의 방법을 결합한 방법들이 개발되고 있다. Excriptioned(1991)은 비발포포의 물수지 방법이 지하수 수위변동법(WTF)을 결합하여 지하수 재배의 신뢰성을 높일 수 있음을 보여주었다. 그 후에도 소분지 단위의 지표수 유역 모형 분석을 통해 지하수 재배량을 추정하는 연구가 있었으나, 용수 침투와 지하수 재배 간에 시차가 없는 것으로 가정하였다(Davies-Smith et al. 1988; Handman et al. 1990). 최근에는 SWAT와 MODFLOW를 결합한 지표수 통합모형이 개발되어 지하수 재배량 산정에 활용되고 있다(Sophobic and Perkins, 2000).

기저유출법, WTF법 또는 Tracker법은 장기간에 걸친 지하수 재배량 추정 시 지표수 분석 방법으로 유용하게 활용될 수 있을 것입니다. 특히 포화수 분석 방법으로 WTF법 또는 Darcy의 법칙 방법과 지표수 분석 방법으로 기저유출법은 습윤지역(Scanlon, Healy and Cook, 2002)에서 유용한 것으로 알려져 있으며, 우리나라에 적용 가능한 방법으로 평가되고 있습니다.

표 3.5 함양량 산정 방법별 시간적·공간적 특성(from Scanlon, Healy and Cook, 2002)

산정 방법		함양량이 의미하는 기간	함양량이 의미하는 대상 구역
포화대 해석법	Tracers	2~20,000년	2~10,000m ²
	WTF	5년 이하	50~10,000m ²
비포화대 해석법	Tracers	0.3~10,000년	1m ² 이하(일부 200m ² 이하)
	Darcy's law	500년 이하	1m ² 이하
	Zero flux plane	6년 이하	1m ² 이하
	Lysimeter	6년 이하	30m ² 이하
지표수 해석법	Heat tracers	5년 이하	1m ² 이하
	Baseflow discharge	0.3~50년	100m ² ~1,300km ²
	Seepage meter	5년 이하	1m ² 이하

표 3.6 기후에 따른 함양량 산정 기법 적용 대상(from Scanlon, Healy and Cook, 2002)

산정 방법	건조 및 반건조 기후지역	습윤 기후지역
포화대 해석법	- - Tracers Numerical modeling	Water-table fluctuations Darcy's law Tracers Numerical modeling
비포화대 해석법	Lysimeters Zero-flux plane Darcy's law Tracers Numerical modeling	Lysimeters Zero-flux plane Darcy's law Tracers Numerical modeling
지표수 해석법	Channel-water budget Seepage meters Heat tracers Isotopic tracers Watershed modeling	Channel-water budget Seepage meters Baseflow discharge Isotopic tracers Watershed modeling

표 3.7 지하수 함양량 산정 방법의 장단점 비교

분석 기법	기본 개념	장 점	한계점
물수지 분석	수문성분별 분리에 의한 함양량 산정	질량 보전의 법칙에 근거하여 이론적 기반이 명확함	경험식에 근거한 입력자료의 임의성이 존재함
기저유출분석	지하수-지표수 완전연계 가정이 존재함	모델이 단순하고 명확함	단일 유역내에서 연계성 불명확함
지하수위 강하곡선	지하수위 강하속도와 함양률의 비례관계 가정	이론과 실제 적용이 매우 쉬움	이론적 기반 취약
지하수위 변동법 (WTF)	지하수 함양은 지하수위 변동에 기반함	이론적 기반이 명확함	비포화대 충전공극률에 대한 검토 필요
환경 추적자 활용	자연 또는 인위적 추적자의 지하수내 비율 평가	이론이 단순하고 명확함	대수층은 폐쇄계가 아니며 분석에 대한 경제성도 낮음
지하수 모델링	지하수 유동 수치모델을 통해 실제 현장을 모사	광역적 함양량 추정에 용이함	입력자료가 많고 복잡함

1.3.2 함양량 분석법

WTF 방법은 많은 연구가들에 의하여 연구되었으며(Meinzer and Stearns, 1929;

Gerhart, 1986; Hall and Risser, 1993), 2002년 Healy and Cook에 의하여 명확히 정의되었다. 본 방법은 얇은 지하수위를 갖는 지역에서 짧은 기간 동안의 함양을 계산하는데 잘 적용이 되었으며, 지하수위가 뚝뚝하게 상승하는 패턴에서 잘 적용되는 것으로 연구되었다. 또한, 본 WTF 방법은 토지이용의 변화나 기상의 변동에 의하여 나타나는 함양량의 장기간의 변동 강도를 분석하는데도 유용하게 활용된다. 본 방법의 가장 핵심적인 문제점은 관측지점의 비산출율(S_y)이 대표성을 갖느냐는 부분과 지하수위의 변동 현상이 함양에 의해서만 발생한다는 점을 정의하는 것이다. 지하수위 변동은 대기압 효과, 양수 등과 같은 외부적인 요인에 의해서도 발생할 수 있기 때문이다. 그러나, 지하수위의 변동은 공간적으로 평균적인 함양 작용에 의하여 발생하기 때문에 WTF 방법은 매우 유용하게 활용이 되며, 대상 지역도 수십 m^2 내지 수천 m^2 의 범위에 대해서도 적용 가능하다.

지하수위 변동법은 자유면 대수층 최상부 수위인 자유면의 변동에 강우에 의해 발생하는 지하수 함양이 반영됨을 기초로 한다(Healy and Cook, 2002). 지하수위 변동법은 기본적으로 물수지에 근거하나 연구자에 따라 서로 다른 근사적 식을 제시하고 있는데, Schich and Walton(1961)은 지하수 함양량(R)을 지하저류량(ΔS^{gw}), 기저유출량(Q^{bf}), 증발산량(ET^{gw}), 및 인위적인 성분을 포함한 총 지하수 유출량(ΔQ^{gw})의 합으로 정의하였으며 이는 다음과 같이 주어지며 각 성분의 단위는 [LT-1]로 주어진다.

$$R = \Delta S^{gw} + Q^{bf} + ET^{gw} + \Delta Q^{gw}$$

지하수 함양에 의한 지하수위의 변화가 매우 빠른 속도로 일어나 (수 시간 내지 수 일) 다른 성분을 무시할 수 있는 경우를 가정하여 Healy and Cook(2002)은 지하수 함양량과 시간에 따른 지하수위 상승률 사이에 비례 관계가 성립함을 제시하였으며 이는 다음과 같이 주어진다.

$$R = S_y \frac{dh}{dt} \Leftrightarrow R_i = S_y \frac{\Delta h_i}{\Delta t}$$

S_y 는 비산출율[-], h 는 자유면 수위[L] 그리고 t 는 시간[T]을 의미하며 R_i 및 Δh_i 는 각각 i 번째 시간차분에서의 함양량[LT-1]과 변동수위[L]를 의미한다.

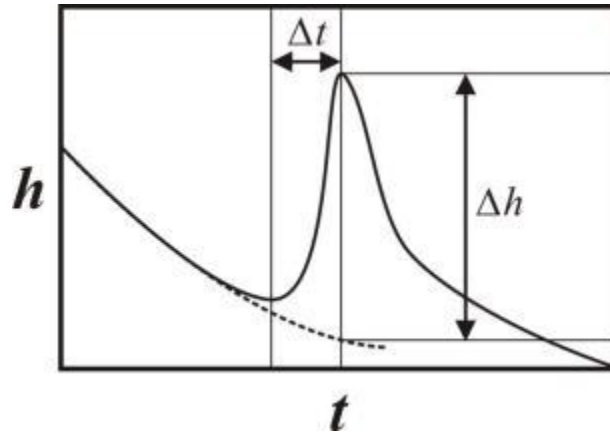


그림 3.20 지하수위 변동 수위 산정 (Healy and Cook, 2002)

그러나 실제 지하로 침투된 강우가 지하수면까지 도달하기 위해서는 일정 정도 이상의 시간이 요구되며 포화대 직상부 비포화대와 대수층의 수리성이 양호한 경우 지하수 함양과 대수층을 통한 기저유출 혹은 지하수위 저감은 동시에 일어난다. 지하수위 변동법은 지하수위 변동 자료를 이용하여 비산출률과 지하수위 변동 폭으로 함양량을 산정하므로 개념적으로 단순하고 지하수 관측망의 시계열 자료를 최대한 활용할 수 있는 장점이 있으나, 비산출률과 지하수위 변동폭 산정에 따른 다음과 같은 문제점 및 제한점 또한 존재한다.

본 방법은 예리한 지하수위 상승 반응을 보이는 얇은 지하수 수위 관측값에 잘 적용될 수 있다. 일반적으로 수백 m 이상의 깊은 지하수위의 경우에는 예리한 지하수위 상승 변동을 보이지 않기 때문에 유의하여야 한다. 우리나라의 경우 지하수위가 평균 약 5~6 m 깊이에 분포하므로 본 방법의 사용에 큰 문제가 없다.

전형적으로 지하수 함양율은 표고차이, 지질특성, 지표면 경사 등에 의하여 영향을 받을 수 있기 때문에 유역내에서 매우 다양하게 나타날 수 있다. 따라서, 지하수위 시계열 자료를 취득할 수 있는 관측지점은 이와 같은 유역내의 특성들을 잘 반영할 수 있는 지점들에 위치되어야 한다.

또한, 비산출률 적용에 대한 개념적 오류가 존재하는데(Kayane, 1983; 구민호와 이대하, 2002; Park, 2012), 비산출률은 대수층의 단위 면적 당 단위 수위 강하 당 배출되는 물의 부피로 정의되는데 지하수 함양은 지하수면 상부의 불포화대를 충전시키는 현상이므로 둘 사이에 물리적 개념의 차이가 존재한다. 또한 실내 및 현장 실험을 통해 추정된 대수층의 비산출률 값을 그대로 적용하는 것은 심도별 수분 함량 분포 및 선행 강우에 대한 수분 함량 분포 변화를 고려하기 어려운 제한점이 있다. 이에 토양 내 심도별

수분 함량 변화 및 선행 강우에 의한 변화를 고려한 부정류 충전 공극률의 개념을 도입할 필요가 있다(윤희성 외, 2016).

hWTF 방법은 위에서 언급한 바와 같이 지하로 침투된 강우가 지하수면까지 도달하기 위해서는 일정한 시간이 요구되며, 포화대 직상부 비포화대와 대수층의 수리성이 양호한 경우 지하수 함양과 대수층을 통한 기저유출 혹은 지하수위 저감이 동시 일어나는 것을 반영하기 위해서는 대수층을 통한 지하수위 저감이 고려되어야 하며 Park and Parker(2008)는 다음의 식을 제시한 바 있다.

$$n \frac{dh}{dt} = \frac{I - O}{A} + R$$

여기서 $I - O$ 는 한 지점을 기준으로 인근 대수층으로부터 유입 혹은 유출되는 지하수 유동량[L3T-1]을 의미하며 A 는 대수층 상부 지표의 면적[L2] 그리고 n 은 위 식에서 S_y 에 해당하는 량으로 충전공극률(fillable porosity)이라 정의한다. Park and Parker(2008)는 $(I - O)/A = kh$ 임을 증명한 바 있으며, 여기서 k 는 지하수위의 지수적인 감소율을 결정하는 상수[T-1]임. Park and Parker(2008)는 위의 식의 해로,

$$h^{(i+1)} = h^{(i)} \exp(-k\Delta t) + \frac{\gamma P_i}{kn} [\exp(-k\Delta t) - 1]$$

를 제시하였으며 위의 식 중 γP_i 를 함양량인 R_i 로 놓고 이에 대하여 풀면

$$R_i = -kn \frac{h^{(i)} \exp(-k\Delta t) - h^{(i+1)}}{\exp(-k\Delta t) - 1}$$

와 같다. 여기서 $h^{(i+1)}$ 및 $h^{(i)}$ 는 각각 $i+1$ 및 i 번째 시간차분에서의 수위를 의미하며 Δt 는 시간차분 간격을 의미한다.

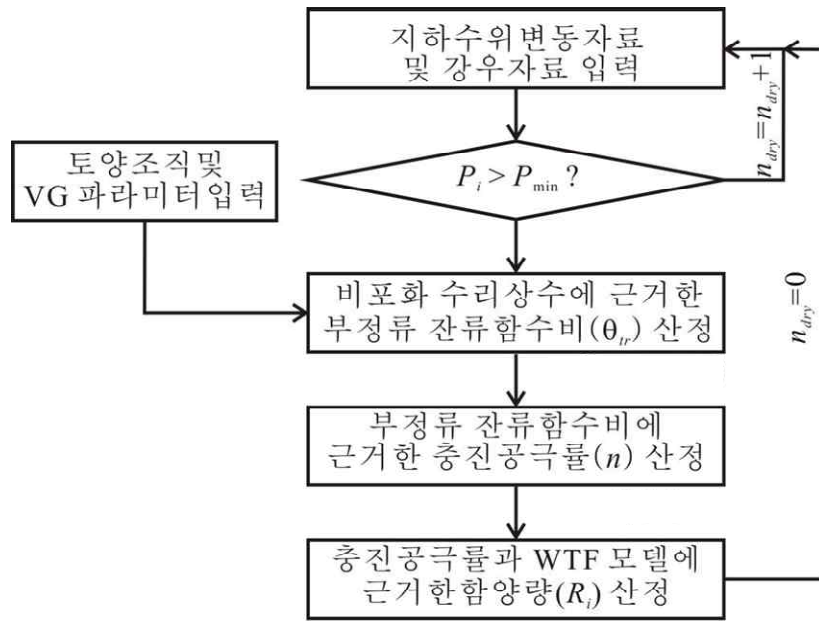


그림 3.21 비포화 수리모델과 지하수위 변동 모델을 이용한 충전공극률 및 함양량 산정 체계도 (윤희성 외, 2016)

위의 식에서 알 수 있는 바와 같이 함양량은 비산출을 또는 충전공극률과 비례하며 이는 함양량이 이 두 상수 산정 시 가질 수 있는 마찬가지로의 불확실성을 가짐을 의미한다. 위 식에서 충전공극률은 다음과 같이 표현된다.

$$n_i = \frac{R_i}{\Delta h_i}$$

지하수위 변동과 충전공극률은 비선형의 관계를 보이는데, 비포화대 수분 거동을 설명하는 van Genuchten(1980) 모델을 이용한 충전공극률의 수학적 표현은 아래와 같다(조진욱과 박은규, 2008).

$$n = \frac{R}{\Delta h} = \theta_s - \frac{1}{\Delta h} \int_0^{\Delta h} \theta dz$$

여기서 $\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha z)^n]^m}$ 이며, θ_r 및 θ_s 는 각각 잔류함수비(irreducible water content)[-]와 포화함수비(saturated water content)[-]를 의미하며 α , m ,

및 n 은 van Genuchten 모델 상수를 의미한다(van Genuchten, 1980)

TSM-hWTF 방법은 지하수위 변동법으로 지하수 함양률을 산정하는데 있어 지하수위 관측 자료에 문제가 있거나 강우 외의 영향이 존재하는 경우 적용하는데 제한점이 있을 수 있다. 우선 지하수위 시계열 자료를 기반으로 함양률을 산정하기 때문에 지하수위 자료에 결측 구간 및 계측 이상 자료가 다수 존재하거나 주변 양수 등의 인위적인 영향이 빈번하게 나타나는 경우 적용에 제한이 있다. 또한 하천과 인접한 수변지역 관정의 경우 강우 혹은 하천 관리에 의한 하천수위 변화가 지하수위에 미치는 영향과 강우에 의한 함양이 지하수위에 미치는 영향이 중첩되어 발생할 수 있는데 이러한 경우 지하수위 변동법에 의한 지하수 함양률 산정은 과대 평가될 가능성이 있다(구민호 외, 2013; 윤희성 외, 2015). 따라서, 이와 같은 문제를 해소할 수 있는 방안 중 하나로 지하수위 예측 시계열 모델을 활용하여 지하수위 변동법과 연계하는 방법이 개발되었으며, 그 내용은 아래와 같다(윤희성 외, 2016)

지하수위 예측 시계열 모델과 hWTF 기법을 연계하여 지하수 함양을 평가하는 방법의 개념도는 아래의 그림과 같다. 기본적으로 지하수위 자료 분석 후 결측, 양수 및 하천수위 변화에 대한 영향이 있다고 판단되는 경우 지하수위 시계열 예측 모델을 구성하고 이를 이용하여 모의된 지하수위 자료를 hWTF 기법에 적용하는 것이다.

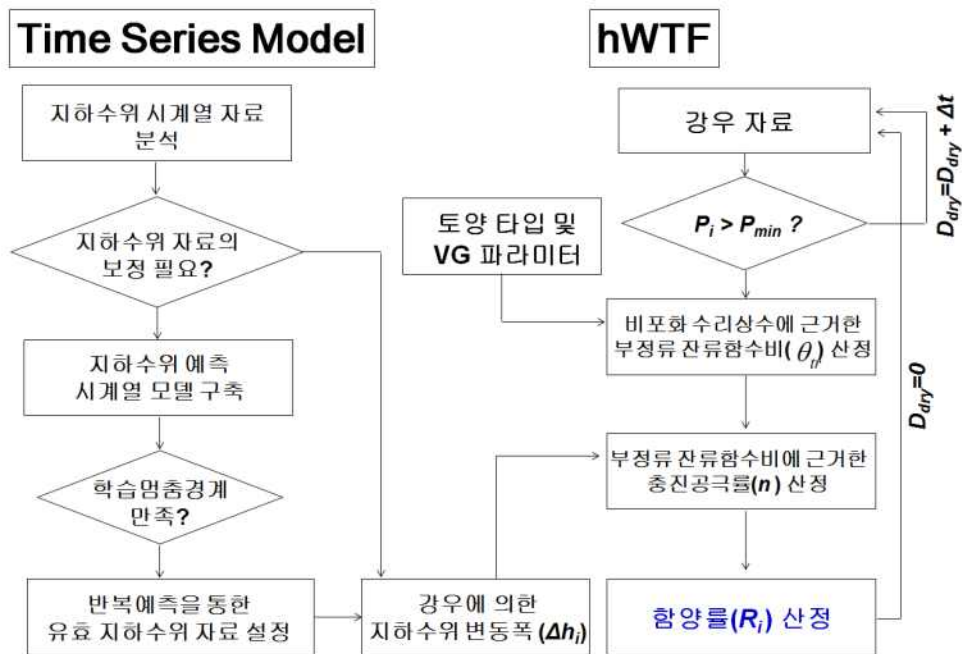


그림 3.22 지하수위 예측 시계열 모델과 hWTF 연계 지하수 함양 산정 개념도(윤희성 외, 2016)

일반적으로 시계열 모형을 이용한 예측 방법은 크게 직접 예측(Direct Prediction)과 재귀적 예측(Recursive Prediction)의 두 가지로 구분할 수 있습니다(Ji et al., 2005, Errera et al., 2007). 직접 예측 방법은 모형의 입력값, 특히 실시간 관측자료의 단기 예측 지평에서 실제 과거 관측치만을 사용하며, 이후 반복 예측에서 설명할 예측이 진행됨에 따라 전산오차가 중복되지 않는 장점이 있습니다. 그러나 장기 예측을 위해서는 예측 범위별로 모형 구축이 필요하며, 입출력 시계열 간의 상관지연시간을 초과하게 되면 예측능력이 점차 떨어지게 됩니다(Yoon et al., 2011). 반복 예측 방법은 일반적으로 최소 예측 범위, 예를 들어 1개의 데이터에 대해 직접 예측 모형을 구축하고, 자기회귀 성분에 대한 입력값은 예측값을 지속적으로 사용합니다. 따라서 반복 예측 방법은 하나의 모형을 반복적으로 사용함으로써 장기 예측과 무작위 입력을 위한 목표변수를 모의하는 특성이 있습니다. 하지만 반복 예측 방법은 예측값을 입력으로 반복적으로 사용하기 때문에 예측값에서 발생하는 오차는 이후 예측에 지속적으로 영향을 미치게 됩니다. 본 연구에서 다루는 지하수 수위 예측을 위한 직접 예측과 반복 예측 모형은 다음과 같이 표현할 수 있습니다.

$$\hat{g}_t^{DP} = TSM^{PRG}(\mathbf{x}), \mathbf{x} = \{p_{t-a}, \dots, p_{t-1}, r_{t-b}, \dots, r_1, g_{t-c}, \dots, g_{t-1}\}$$

$$\hat{g}_t^{RP} = TSM^{PRG}(\mathbf{x}), \mathbf{x} = \{p_{t-a}, \dots, p_{t-1}, r_{t-b}, \dots, r_1, \hat{g}_{t-c}, \dots, \hat{g}_{t-1}\}$$

여기서 \hat{g}_t^{DP} , \hat{g}_t^{RP} 는 각각 시간 t 에서의 직접예측과 반복예측에 의한 지하수위 예측값, TSM^{PRG} 는 강우, 하천수위, 지하수위 과거값을 이용한 지하수위 예측 모형, p , r , g 는 각각 강우, 하천수위, 지하수위 입력값, a , b , c 는 각각 p , r , g 에 대한 과거값 활용 정도를 의미하고, 하천수위 자료가 없거나 영향이 없는 것으로 판단된다면 r 성분은 생략할 수 있다.

지하수 변동법과 연계하여 지표면의 변화를 예측하기 위해서는 반복적인 예측기법의 활용이 필요합니다. 일별 예측을 위한 직접 예측 모형을 구축하여 최소 시간 단위, 즉 일별 자료에 대해 반복적으로 사용합니다. 가중치 값, 지지벡터 등 모형 구성요소를 선택하거나 갱신하는 데 필요한 학습단계, 모형별 최적의 모형 모수를 설정하는 데 필요한 보정 단계, 구축한 모형의 예측 성능을 검토하는 검증단계로 구분하여 할당합니다. 투입과 산출의 상관성이 높고 자료상의 문제가 없는 자료를 기반으로 모형을 구축하고, 이 모형을

이용한 예측을 통해 지하수 자료에 존재할 수 있는 지하수 변동법 적용상의 한계를 보정합니다. 하천 수위 영향을 제거하는 경우 실제 관측 자료를 이용하여 모형을 구축하고, 예측 시 하천 수위 변화에 대한 지표면 변동 요소를 제거하기 위해 관측 구간 내의 중앙값 등 특정 고정값을 적용합니다(윤희성 외, 2016).

1.3.3 인공신경망(Deep learning) 기법 활용

인공신경망 기법은 시냅스의 결합으로 네트워크를 형성한 뉴런(노드)이 학습을 통하여 시냅스의 결합 세기를 변화시키면서 문제를 모델을 의미하는 것으로서, 함수 추론, 회귀 분석, 시계열 예측, 근사 모델링, 풀어가는 패턴 인식, 클러스터링 등 다양한 분야에 활용되고 있다.

인공신경망은 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성되며, 각 층 간 뉴런의 연결 강도를 최적의 상태로 적응시키는 과정을 의미합니다. 본 연구에서는 역전파 알고리즘을 이용한 다층 퍼셉트론 신경망 기법을 적용하였으며, 각 지하수 관측정이 위치하는 특성 정보를 입력변수로, 지하수 관측정의 지하수 함양률을 출력변수로 적용하였습니다. 출력 뉴런에 의하여 절단되는 은닉층의 출력은 아래 식과 같이 각 시냅스의 가중치 (w_{ij})와 노드의 입력자료 (x_j)에 의하여 결정된다

$$t_j = g\left(\sum w_{ij}x_i\right)$$

또한, 출력층에서 출력값 (y_k)는 시냅스의 가중치와 은닉층 및 출력층에서의 활성화 함수 (g 및 \bar{g})에 의하여 결정된다.

$$y_k = \bar{g}\left(\sum_{j=0}^n w_{kj} \cdot g\left(\sum_{i=0}^m w_{ij}x_i\right)\right)$$

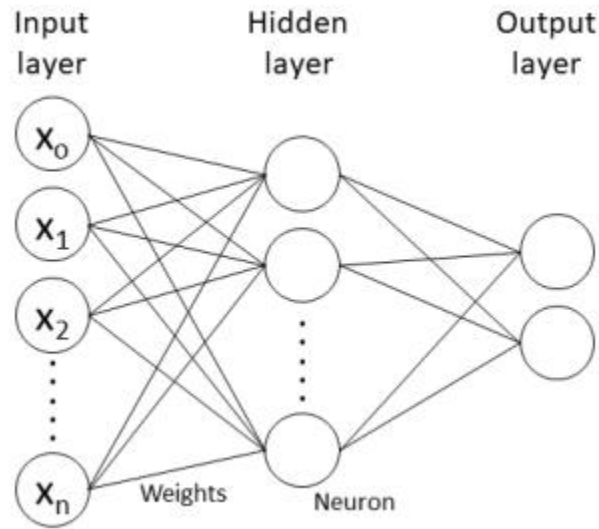


그림 3.23 은닉층을 갖는 다층퍼셉트론 인공신경망 기법 개념도

활성함수란 입력함수의 결과값을 특정 임계값과 비교하고, 입력함수 결과값이 이 임계값보다 크면 1, 그렇지 않으면 -1로 출력하는 방식으로 함수를 정한 것을 의미한다. 즉, 원 입력값과 가중치의 곱의 합을 특정임계값과 비교하는 방식을 활성화함수로 표현한다. 활성화함수는 sigmoid function, hyperbolic tangent function 또는 relu function 등이 일반적으로 사용된다.

Sigmoid 함수

$$s(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

Hyperbolic tangent 함수

$$\tanh z = \frac{\sinh z}{\cosh z} = \frac{e^{2z} - 1}{e^{2z} + 1}$$

relu 함수

$$f(z) = \max(0, z)$$

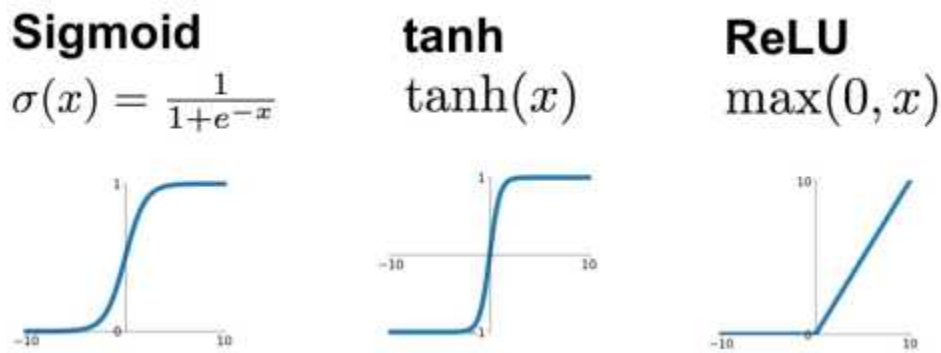


그림 3.24 활성화함수의 종류

퍼셉트론이란 다수의 훈련자료를 이용하여 일종의 지도학습을 수행하는 것으로서, 훈련 자료에는 자료의 특성값에 대응되는 실제 결과값을 갖고 있으며, 입력되는 특성값 $x_0 \sim x_n$ 에 대한 실제 결과값을 y 라고 하면 이 y 를 활성화함수에 의해 -1 또는 1 로 변환한다. 이 변환된 값과 퍼셉트론 알고리즘에 의해 예측된 값이 다르면 이 두 개의 값이 같아질 때까지 특정 식에 의하여 가중치 $w_0 \sim w_n$ 을 업데이트 한다.

단층퍼셉트론에서는 활성화함수가 1개인 구조인데, 이 단층퍼셉트론의 경우는 비선형적으로 분리되는 자료에 대해서는 제대로 된 학습이 이루어지기 어렵다는 한계점이 존재한다. 이를 극복하기 위하여 입력층과 출력층 사이에 하나 이상의 중간층을 두어 비선형적으로 분리되는 자료에 대해서 학습이 가능하도록 하는 것이 다층퍼셉트론이다. 입력층과 출력층 사이의 숨은 층을 은닉층이라 하며, 은닉층이 여러개인 인공신경망을 심층신경망(Deep neural network)이라 부르며 이 알고리즘을 Deep learning이라 한다.

다층퍼셉트론에서 입력층에서 전달되는 값이 은닉층의 모든 노드로 전달되며 은닉층의 모든 노드의 출력값 역시 출력층의 모든 노드로 전달되는데, 이와 같이 순차적으로 전달되는 것을 전방향연산(Forwardpropagate)이라 한다.

다층 퍼셉트론이 동작되는 원리는 다음 과정을 거치게 된다.

- 1) 각 층에서의 가중치를 임의의 값(보통 0으로 설정됨)으로 설정하며, 각 층의 바이어스 값은 1로 설정
- 2) 하나의 훈련자료에 대해서 각 층에서의 입력 함수값을 계산하고 최종적으로 활성화함수에 의한 출력값을 계산
- 3) 출력층의 활성화함수에 의한 결과값과 실제값이 허용 오차 이내가 되도록 각 층에서의

가중치를 업데이트

4) 모든 훈련 자료에 대해서 출력층의 활성화함수에 의한 결과값과 실제값이 허용오차 이내가 되면 학습을 종료

다층퍼셉트론에서는 입력층과 출력층 사이에 은닉층이 존재하며, 은닉층의 출력값에 대한 기준값을 정의하는 것이 불가능하다. 즉, 은닉층에서 어떤 값이 출력되어야 합리적이고 적정한지에 대한 기준값이 없는 상태가 된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 역전파 알고리즘(Backpropagation)이 사용된다.

다층퍼셉트론 학습시 훈련데이터가 지나치게 과적합되는 overfit이 발생하여 예측값의 정확도가 떨어질 수 있으므로 유의하여야 하며, 지나치게 많은 layer를 구성할 경우 역전파알고리즘에 의하여 에러를 뒤로 전파하는 문제가 생길 수 있으며 학습이 잘 수행되지 못하는 경우가 존재한다. 이와 같은 과적합을 방지하기 위하여 훈련자료의 정규화, 표준화, 그룹화 등 다양한 방법들이 사용되기도 한다.

1.3.4 지하수 함양율 산정 모델 개발

지하수 관측 지점의 함양율에 대한 정확한 추정치는 지하수 관리에 대단히 중요한 영향을 끼친다. 그러나 인접 지역임에도 불구하고 지질특성, 지형특성 등 제반 인자에 의하여 지하수 함양률이 차이가 나타나며, 유사한 특성을 갖고 있음에도 지하수 함양율의 계산 결과가 서로 다른 특성에 대한 어떤 의미 있는 해석이 이루어 지지 못하고 있는 실정이다. 또한, 현재 소유역으로 설정된 지역 안에 있는 관측 지점에서 산정된 지하수 함양율이 그 소유역을 대표할 수 있는지에 대한 근거도 정립하는 것이 필요하다. 지하수 함양율의 보편성 및 일관성 있는 산정은 유역이나 분지의 지하수 함양량을 결정하는 가장 중요한 요인이 된다.

위에서 언급한 바와 같이, 국가지하수관측소의 지하수위 데이터로부터 TSM-hWTF 방법에 의하여 계산된 지하수 함양율과 각 관측지점의 특성 자료를 도출한 후 다층퍼셉트론 인공지능망 기법을 이용하여 이들 간의 상관성에 의한 지하수 함양율 추정 모델을 개발하였다. 이 개발 모델은 임의의 지점의 특성 자료 DB를 확보할 수 있다면 그 지점의 지하수 함양율을 구할 수 있게 되며, 이로부터 Thiessen 망에 의한 유역별 강우량을 적용하여 각 지점별 지하수 함양량을 산정할 수 있다.

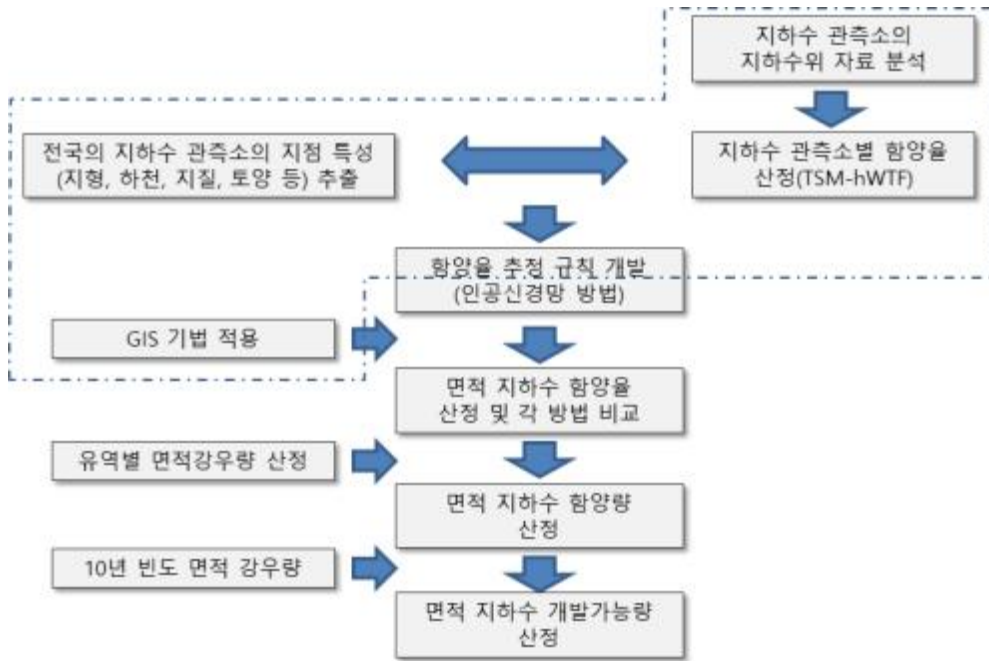


그림 3.25 지하수 함양량 및 개발가능량 산정 프로세스

전국 지하수 관측소의 지하수 함양율을 토대로 단순 분포도를 작도해 보면 아래와 같다.

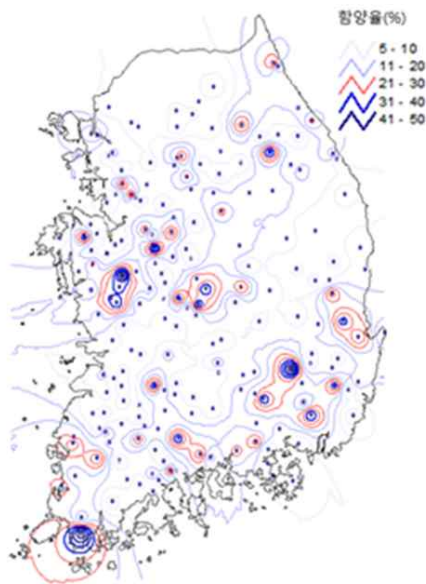


그림 3.26 지하수 관측소 지점의 지하수 함양율 분포도

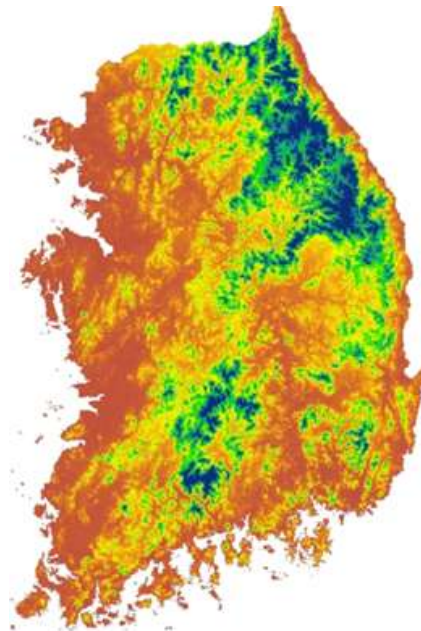


그림 3.27 우리나라의 지형 분포도

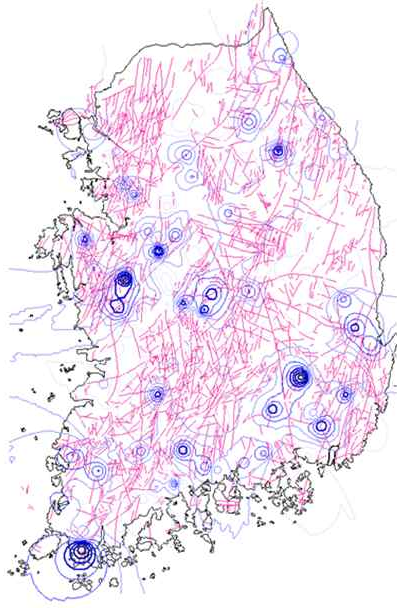


그림 3.28 지질구조선과 지하수 함양율의 분포

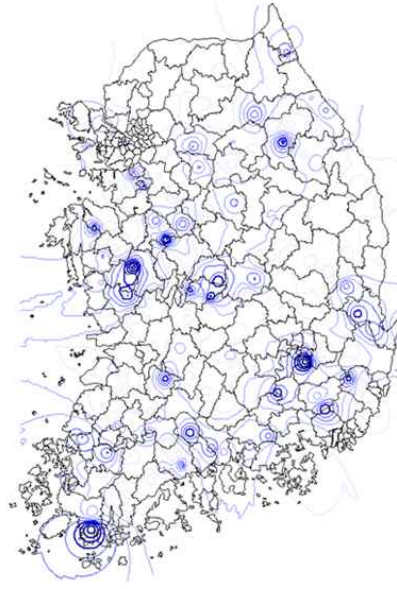


그림 3.29 행정구역별 지하수 함양율의 단순 분포

지하수 함양율에 영향을 미칠 수 있을 것으로 추정되는 관측소의 지점 특성으로는, 지형 표고, 지형경사, 토양 특성, 충적층 분포 특성, 지질(암석), 수리전도도, 하천과의 관계, 하천의 특성, 분지의 형태, 강우량 등 매우 다양한 항목들이 포함될 수 있다. 그러나, 지하수 함양율 추정을 위한 모델 개발을 위해서는 모델의 적용 대상 지역에서도 입력 인자 값을 쉽게 추출할 수 있는 조건이 되어야 한다. 따라서, 전국적으로 균질하게 데이터가 취득되고 통일성이 있고 규격화되었으며 공공기관 또는 국가가 공인한 데이터를 활용하는 것이 필요하다. 이를 위하여 고려한 관측소 지점의 특성인자 추출 대상은 아래 자료를 기본으로 하였다.

- 행정구역도
- 지형도 : 1:5,000 축척
- 토양도 : 1:25,000 축척
- 지질도 : 1:50,000 축척
- 지질구조선도 : 1:250,000 축척 (지질구조선 밀도 산정)

상기 기본 자료 외의 수리전도도, 충적층 두께 등은 전국 대상으로 표준화되어 있지 않으며 데이터 확보가 용이하지 않으므로 입력인자로 제외하였다. 지형도 자료로부터는 지형 표고, 지형 경사, 하천과의 거리, 하천의 특성, 하천의 표고 등에 대한 데이터를

GIS를 활용하여 자동 추출하였다.. 토양도에서는 심토토성, 표토토성, 배수등급 등을 추출하였으며, 지질도에서는 암석명을 추출하였다.

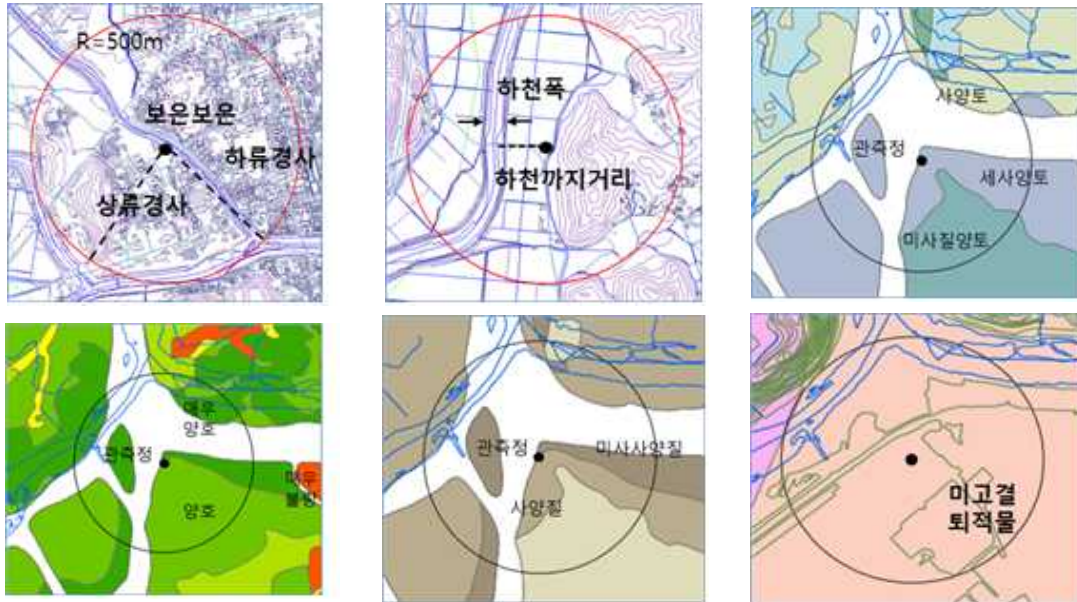


그림 3.30 지하수 관측소의 지점 특성 정보 추출 사례

지하수 관측소 지점의 TSM-hWTF 방법에 의한 지하수 함양율이 어떤 인자에 의하여 영향을 받는지 파악하기 위하여 box-plot를 이용한 해당 지점의 다양한 특성과의 비교를 수행하였다. 아래 그림에서 보는 바와 같이, 일부 특성인자의 경우에는 지하수 함양율과 양의 관계를 보이기도 하나, 일부는 상관성이 거의 없는 특성을 나타내기도 한다. 그림에서 보는 바와 같이, 토양 특성의 경우에 함양율과 미약한 상관성을 보이고 있어 hWTF의 기본 개념인 토양의 특성에 의하여 지하수위 변동 폭이 나타난다는 개념을 부분적으로 반영하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 전반적으로 각 인자간의 상관관계의 불균질성으로 볼 때 지하수 함양율 추정을 위한 회귀분석적 접근 방법은 바람직하지 않은 것으로 보이며, 위에서 언급한 인공지능기법을 활용한 분석을 수행토록 하였다.

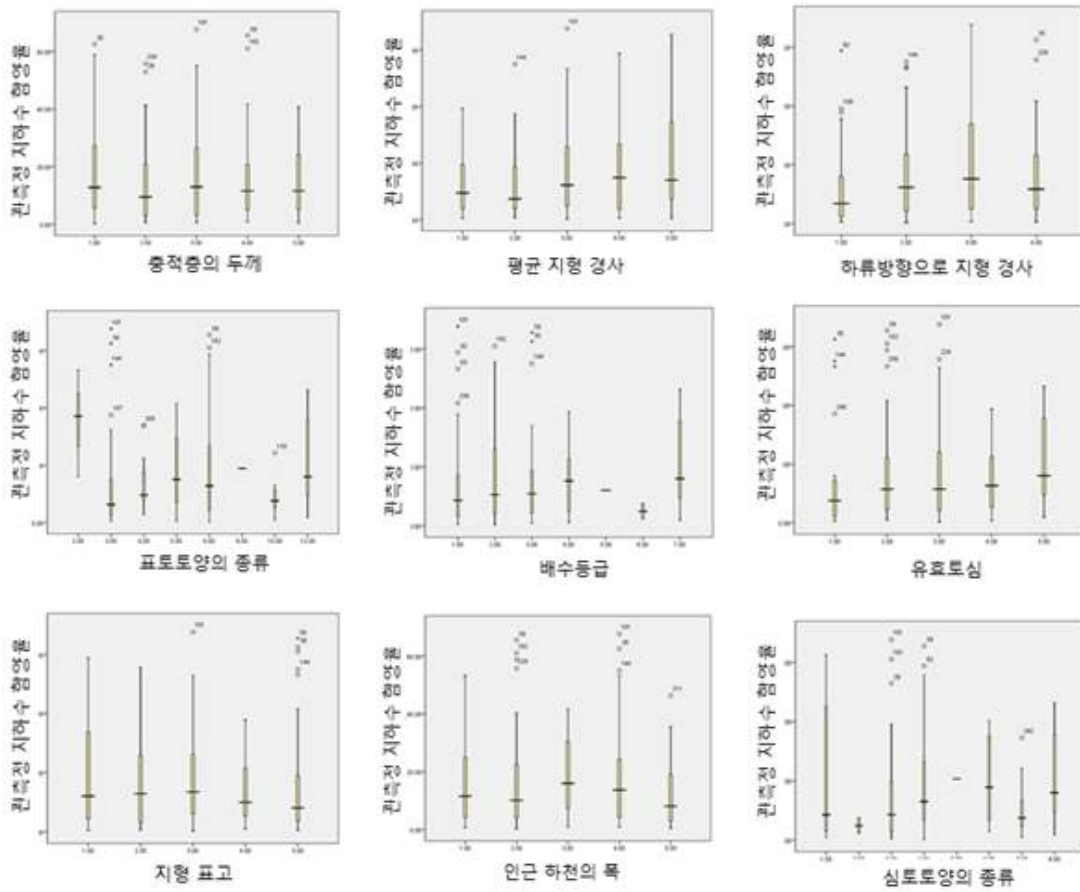


그림 3.31 지하수 관측소의 지하수함양율과 지점 특성과의 비교

이상 입력 변수를 토대로 출력변수(지하수 함양율)와의 관계를 다양한 모델을 활용하여 시도하였다. 회귀모형, 분류모형은 유의하지 않았으며, 앙상블 모형과 인공신경망을 적용한 결과, 인공신경망 모형이 가장 잘 적합하는 것으로 나타났다. 입력 및 출력에 사용된 변수는 아래 표와 같다.

표 3.8 입력 및 출력 변수로 사용되는 지하수 관측정의 위치 특성

입력변수		출력변수
연속형 데이터	지하수 관측정 표고	지하수 함양률
	주변 500m 그리드상의 최고 표고	
	주변 500m 그리드내 상류방향 기울기	
	주변 500m 그리드상의 최저 표고	
	주변 500m 그리드내 하류 방향 기울기	
	평균 기울기	
	인근 실폭하천까지 거리	
	인근 실폭하천의 표고	
	인근 실선하천까지 거리	
	인근 실선하천의 표고	
	관측지점의 지질구조선 밀도	
범주형 데이터	수문지질단위(3개 범주)	
	심토 토성(7개 범주)	
	표토 토성(7개 범주)	
	배수 등급(6개 범주)	

표에서 보는 바와 같이 1:5,000 지형도, 수문지질도, 토양도(1:25,000), 지질구조선도 등에서 추출 가능한 변수를 선정하였으며, 기타 관측 지점의 토양 공극이나 지질 특성과 같은 수리수문학적 특성은 데이터 취득이 용이하지 않으므로 입력 변수로 사용하지 않았다. 즉, 지하수 관측정이 위치하지 않는 미계측 지역에서는 이들 자료를 추출하는 것이 거의 불가능하기 때문에 입력변수로 사용하는 것은 무의미하다.

최종적으로 도출된 인공신경망 모델은 다음과 같다.

- 모델에 사용된 지하수 관측정의 갯수: 211개
- 은닉층 수: 2개
- 학습 데이터: 75%, 검증 데이터: 25%
- 학습 데이터 평균절대오차: 0.411, 검증 데이터 평균절대오차: 0.406
- 학습 데이터 상관계수: 0.810, 검증 데이터 상관계수: 0.819

출력변수에 영향을 미치는 입력변수의 중요도를 보면, 표토특성이 가장 높고, 심토토성, 주변실폭하천의 표고, 주변실선하천의 표고 등의 순으로 나타났다.

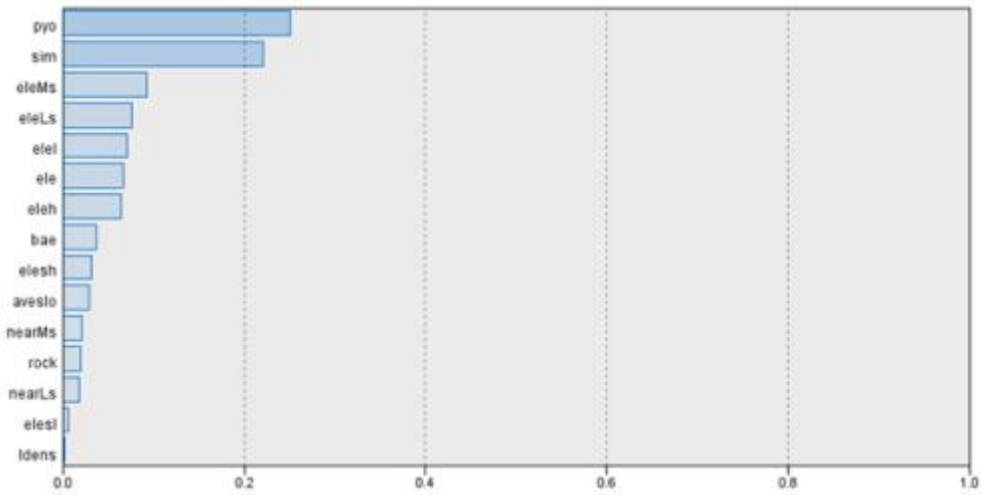


그림 3.32 입력변수의 모델에 미치는 중요도

훈련 데이터와 출력 데이터의 모델 수행 결과 도출된 실측값과 예측값의 분포를 비교해 보면, 비례 관계를 잘 보이고 있다. 학습 데이터의 상관계수는 약 0.810이며, 검증 데이터의 상관계수는 약 0.819로서 학습 데이터와 검증 데이터의 상관계수가 매우 유사하면서 높게 나타난다. 따라서, 본 모델을 지하수 관측정이 존재하지 않는 미계측 지역의 지하수 함양을 추정의 최종 모델로 선정하였다.

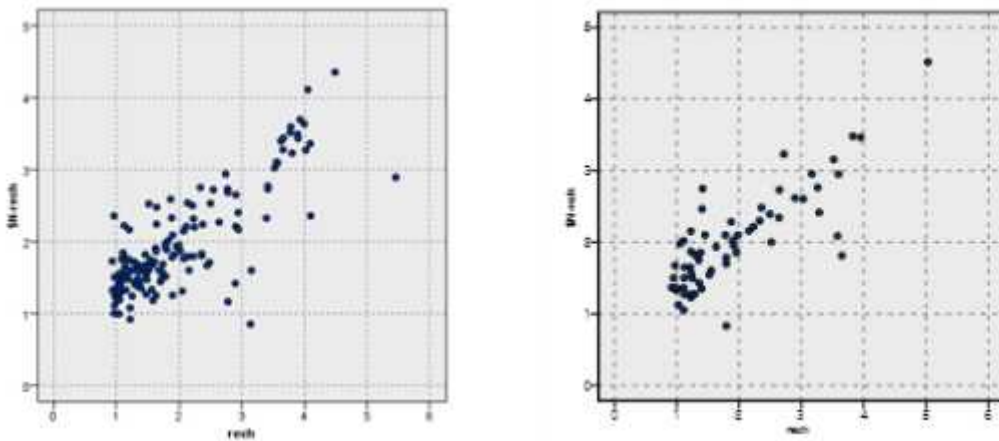


그림 3.33 지하수 함양을 예측값과 실제값의 비교 분포(좌: 학습데이터, 우: 검증데이터)

1.3.5 춘천시 물로리 지역의 지하수 함양율 산정

개발된 인공신경망 모델을 활용하여 춘천시 물로리 유역의 지하수 함양율을 산정하고, 유역의 면적 강우량을 적용하여 지하수 함양량을 계산하였다. 춘천시 물로리 지역을 포함하는 유역 경계를 설정한 후 유역내에서 인공신경망 모델의 입력 인자를 추출하기 위하여 500 m 간격의 그리드를 구성하였다. 춘천시 물로리 지역의 면적은 31.31 km²이며 총 그리드 수는 117개이다. 그리드 지점의 지형 표고 평균은 417.0 El.m, 최대 957.3 El.m, 최소 177.5 El.m 및 표준편차 154.9 El.m로서 강원도 산악지역의 특성을 잘 반영하고 있다. 그리드 반경내 최고점 고도의 평균은 516.5 EL.m, 최저점 고도의 평균은 319.9 EL.m로 나타났으며 경사도 평균은 약 0.4로서 급경사 지역을 반영하고 있다. 물로리 지역의 지질구조선 밀도 평균은 0.134이며 고지대로 갈수록 밀도가 커지는 것을 확인하였다.

물로리 지역은 북측의 소양호와 남측의 높은 산악지역으로 둘러싸여 있는 분지 형태를 띠고 있으며, 하천은 남동쪽에서 발원하여 소양강댐 유역으로 북서쪽으로 흐르는 특성을 보인다. 물로리 지역내 그리드 지점 중 변성암은 105개, 관입화성암은 11개, 미고결 퇴적물은 1개로 나타난다. 심토 토성은 모두 사양질로 나타났으며, 표토 토성은 사양토 116개, 양토 1개로 나타났고 배수 등급은 매우 양호가 112개, 양호가 5개로 나타났다.

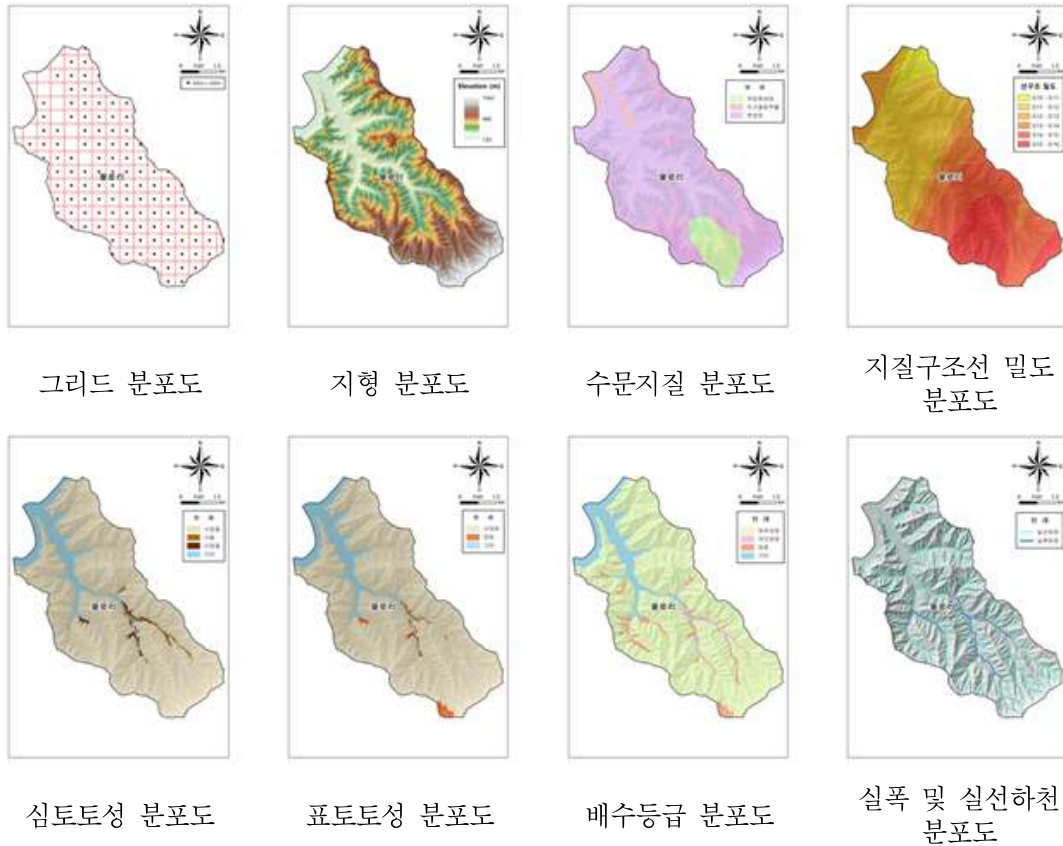


그림 3.34 물로리 지역의 그리드 작성 및 입력인자 분포

각 그리드 지점의 속성 정보를 활용하여 위에서 개발된 인공지능망 모델을 적용하였다. 인공지능망 모델에 적용하기 위하여 각 지점의 특성 자료에 대한 표준화 과정을 거쳤으며, 최종적으로 산정된 지하수 함양율 분포는 아래 그림과 같다. 물로리 지역의 함양율은 산악지대로 갈수록 점차 높아지는 경향을 보이고 있으며, 지역내 그리드 지점의 지하수 함양율은 최대 23.0%, 최소 1.3%로 산술평균은 13.3% 정도이다.

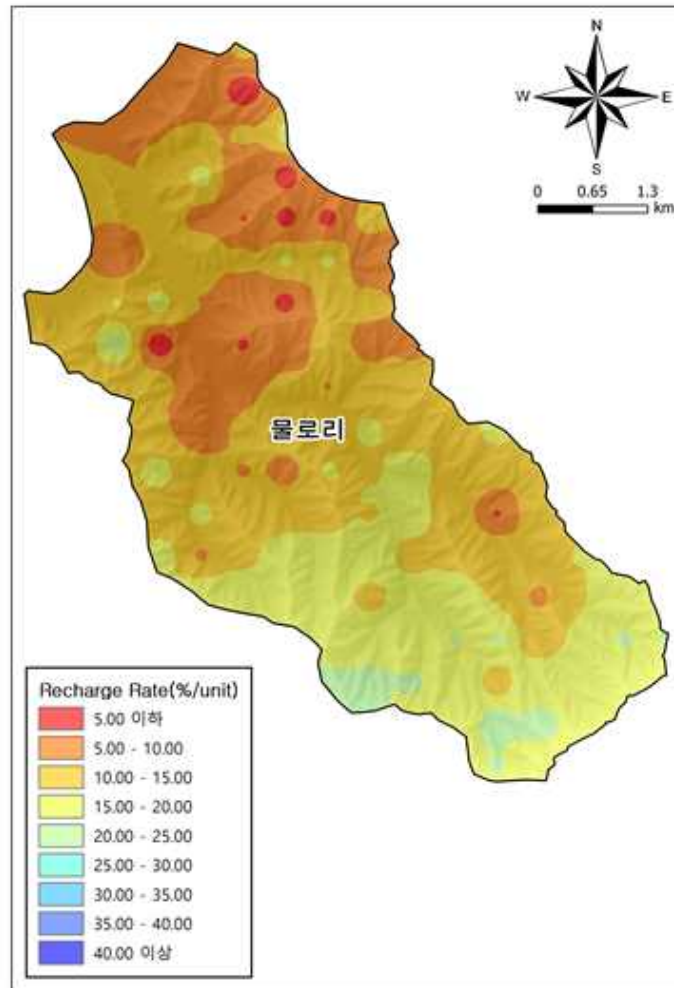


그림 3.35 물로리 지역의 지하수 함양율 분포

물로리 지역의 지하수 함양율은 고도 인자와 선구조 밀도에 대하여 비교적 양의 상관 관계를 보이고 있으나, 인근 하천과의 거리 관계에서는 상관성이 거의 없는 것으로 확인된다. 또한 지하수 함양율이 어떤 비모수 인자들에 의하여 영향을 받는지 파악하기 위하여 box-plot을 이용한 해당 지점의 특성과의 비교를 수행하였는데, 아래 그림에서 보는 바와 같이 관입화성암, 배수등급이 양호일 때 지하수 함양율이 높게 나타나는 것으로 해석되었다.

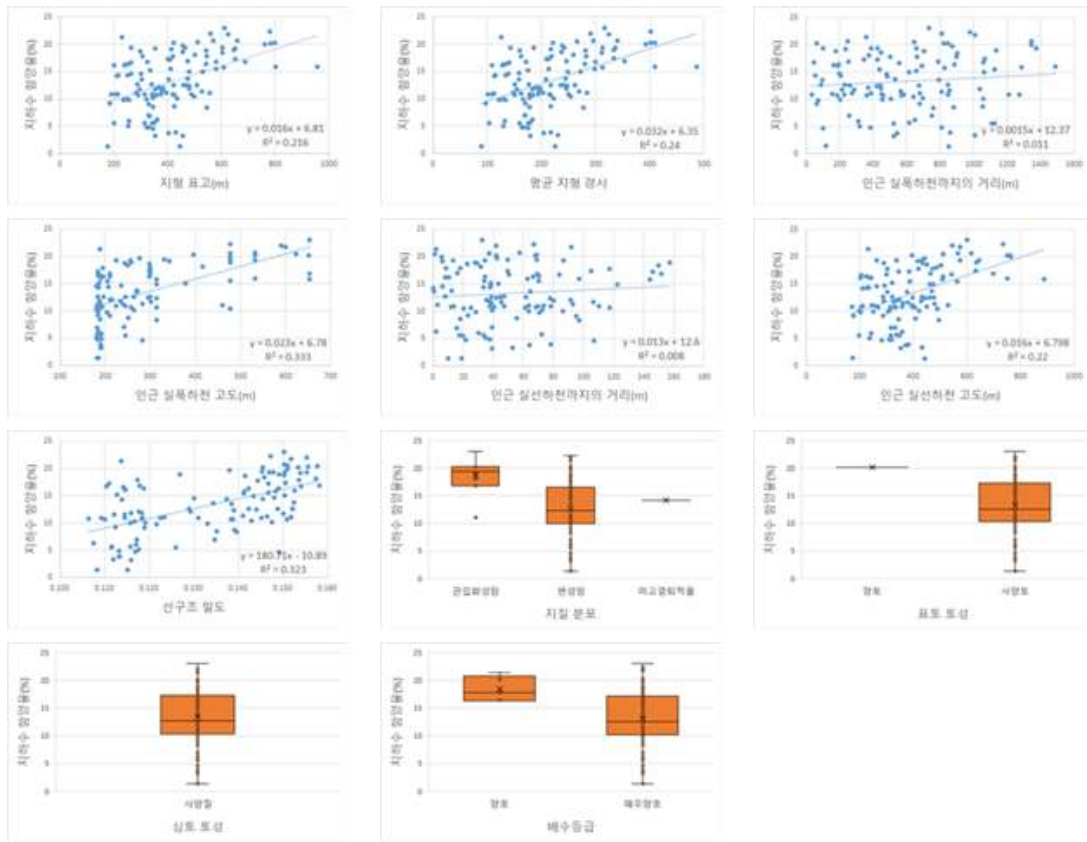


그림 3.36 각 지점 속성과 지하수 함양율의 상관관계

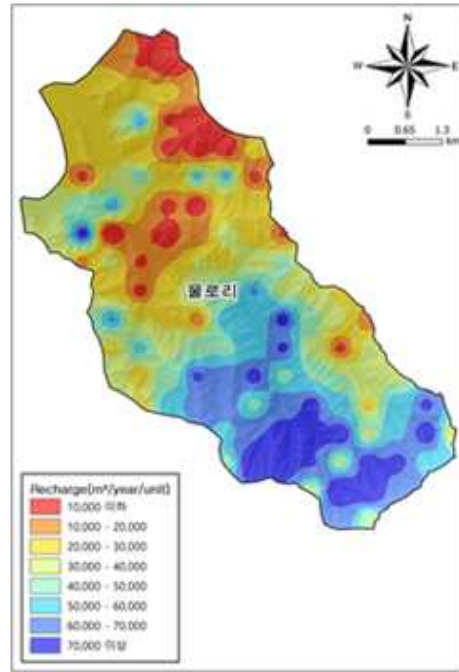
최종적으로 아래의 식을 적용하여 물로리 지역의 지하수 함양량을 산정하였다.

$$\text{지하수 함양량} = \text{평균 강우량} \times \text{그리드별 함양율} \times \text{그리드별 면적}$$

유역별 강우량은 Thiessen 망을 작도한 후 해당 강우관측소의 평균 강우량을 활용하여 적용하였다. 춘천시(소양강댐) 관측소의 평균 강우량은 1,228 mm, 홍천군(두촌중교) 관측소의 평균 강우량은 1,358 mm로 나타났다. 해당 유역의 강우량과 각 그리드별 면적 및 함양율을 토대로 산정한 결과, 최종적인 물로리 지역의 함양량의 총합은 4,713.6 천m³/y로 평가되었다.



Thiessen 망도



지하수 함양량 분포도

그림 3.37 물로리 지역의 지하수 함양량 분포

표 3.9 춘천시 물로리의 지하수 함양량 산정 결과

구분	면적 (km ²)	금회 산정 결과		춘천시 지하수기초조사 (2010) 평균 함양을 적용	
		지하수 함양률 (%)	지하수 함양량 (천 m ³ /y)	지하수 함양율 (%)	지하수 함양량 (천 m ³ /y)
물로리	27.5	13.3	4,713.6	21.9	7,706.8

2. WBS 2: 현장 및 모형실험 기반 샌드댐 수리해석 기술 개발

2.1 실험 장비 구성

2.1.1 샌드댐 지하수댐 조립 구조

실험 본체, 지지대 등의 재료 사양은 기존 지방서 및 실험 노하우를 기본으로 하며 실제 설계 단계에서 현장 조건에 맞는 수정을 진해도 무방하다.

샌드댐의 바닥면은 지하수댐의 매질과 수리학적으로 연결되지 않는다.

실험체의 지하수위 불연속면 실험 설계는 정일문과 이정우 (2021)의 성과를 참고하였으며 경계 조건, 유출입 조건 등은 Chang Clement. (2012)의 물탱크 설계를 바탕으로 진행하였다. 또한 수리전도도 측정방식은 Chang et al. (2009)의 Dupuit discharge formular 이론을 기반으로 하였다.

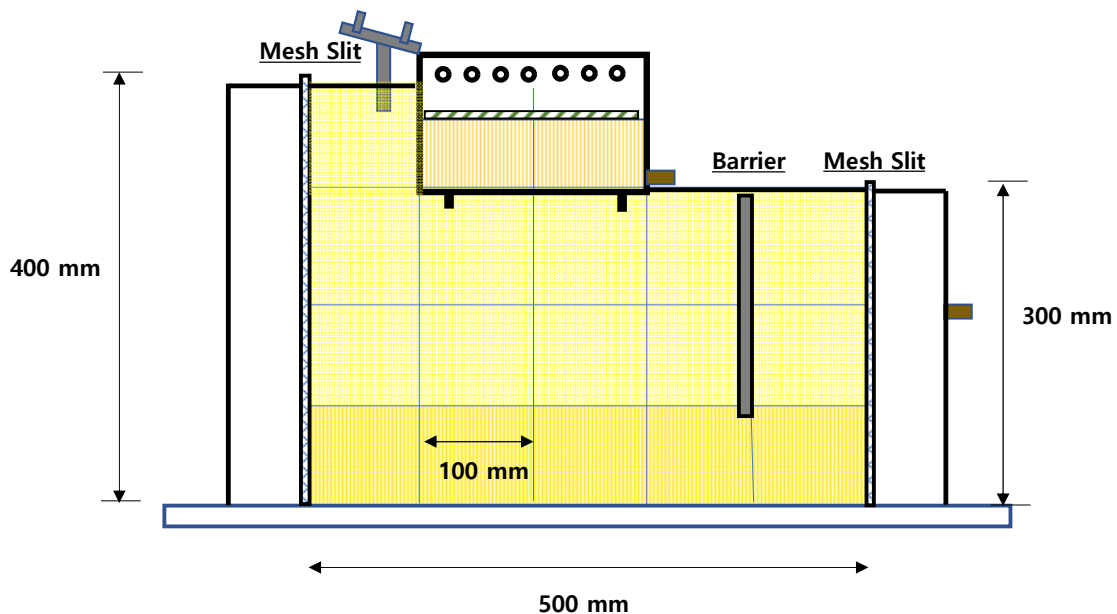


그림 3.38 실험체 기본구상도

2.1.2 샌드댐 구조

샌드댐의 규격은 가로 20 cm * 높이 15 cm * 두께 3~4 cm의 규모로 제작한다. 상부는 덮여있지 않으며 좌, 우 바닥은 아크릴재질로 불투수층을 표현하였다. 기존취수조 (intake tank)에서 유입되는 물은 펌프에서 연결된 튜빙으로 직접 샌드댐 상부 열린 공간으로 공급한다. 이 때 튜빙을 지탱할 지지대를 스테인레스 스틸로 위의 그림과 같이

제작하거나 또는 지하수댐 덮개의 개수로 형태를 활용하여 유입 튜빙을 고정할 수 있다. 샌드댐의 두께는 지하수댐 본체 두께와 동일하게 제작한다. 샌드댐 아래에 약 2cm 전후의 기둥(pile) 4개 존재함. 지하수댐 본체에 올려놓을 때 매질에 박히도록 하여 샌드댐 실험체 기초의 안정성을 도모한다. 유출구는 현장에서 유공관 노출부를 모사하는 장치이다. Drain 밸브를 원칙으로 한다. 바닥으로부터 2cm 높이에 위치하며, 지하수댐에 덮개를 덮었을 때 덮개에 방해되지 않아야 한다.. 유출의 흐름을 방해하지 않기 위해 내경의 크기를 1 cm 이상 확보한다. 샌드댐 매질 상부는 부직포로 덮어 매질의 유실을 방지한다.

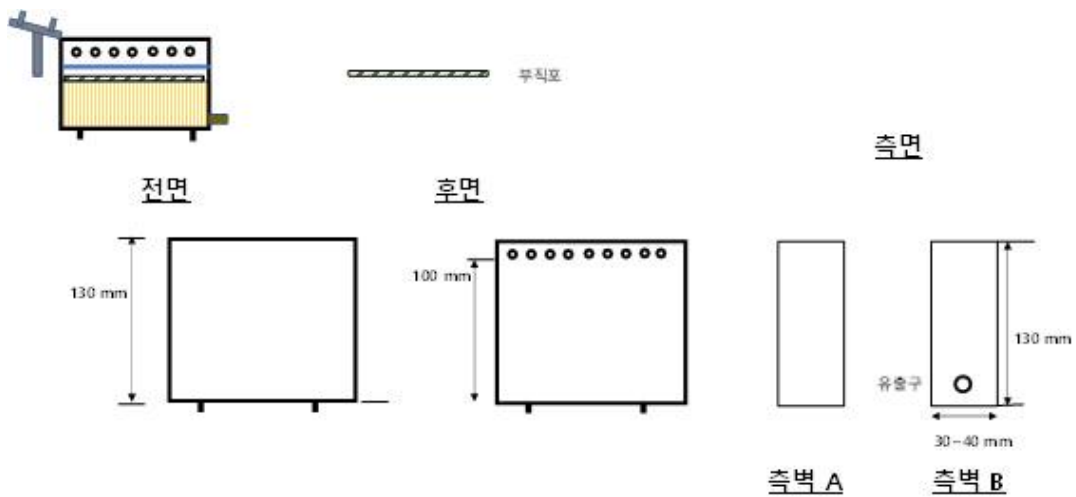


그림 3.39 샌드댐 설계도

2.1.3 지하수댐 구조

지하수댐의 규격은 (중간 공간을 기준으로) 가로 50 cm * 높이 40(30) cm * 두께 3~4 cm 지하수댐은 3개의 공간으로 구분한다. 이 중 중간 공간은 glass beads 또는 모래 등의 매질로 채운다. 샌드댐 측면과 접촉하는 좌측 30~40 cm 상부의 매질 공간은 수리학적으로 의미를 가지지 않으며 물로리댐의 현장에서 보여주는 계단식 구성을 구현하기 위해 존재하는 공간이다. 제작의 어려움이 있을 경우 없어도 무방하다. 실험체 전면 중 중간 공간의 표면을 10cm 간격으로 홈을 새겨 대략의 거리를 가늠할 수 있게 한다. 실험체의 좌우 측벽의 높이가 다르다. 좌측벽은 40 cm 높이이며 우측벽은 30cm 이다. 지하수댐 중간 공간 양 옆은 스테인레스 스틸망 칸막이를 설치하여 중간 공간에서 좌우 공간으로 매질이 넘어가지 않도록 방지한다. 지하수댐 매질 (모든!) 상부는 부직포로 덮어 매질의 유실을 방지한다. 또는 10cm 길이로 제작된 블록식 덮개를 상단에 (탈

착식으로) 설치한다. 예를 들어 샌드댐 왼쪽의 돌출된 지하수댐 상부를 블록식 덮개 1개로, 샌드댐 오른쪽의 지하수댐 상부를 블록식 덮개 2개를 설치할 수 있다. 유출구는 Drain 밸브를 원칙으로 한다. 유출의 흐름을 방해하지 않기 위해 내경의 크기를 1 cm 이상 확보한다. 수리전도도 실험을 위하여 측벽 B의 유출구는 바닥 유출구 외에도 15,20,25,30 cm에 위치한다. 제작의 원활함을 위하여 배치를 실험설계안에서 1~2cm 변경하여도 무방하다. 지하수댐의 덮개는 개수로로 작용한다. 샌드댐의 좌측 및 우측 덮개 1개씩 제작한다. 이 때 덮개의 모양은 개수로로 작용할 수 있도록 높은 ㄷ 자 모양으로 제작한다. 지하수댐 벽체 (Barrier)는 약 20 cm의 길이로 매립 또는 설치한다. 바닥면 10cm 높이에서 지하수댐 상부까지 위치하여 높은 수리전도도 매질의 흐름을 방해한다. 실험 본체와 고정식으로 아크릴 소재로 제작하거나, 고무 등의 매질로 탈착식으로 제작 가능하다

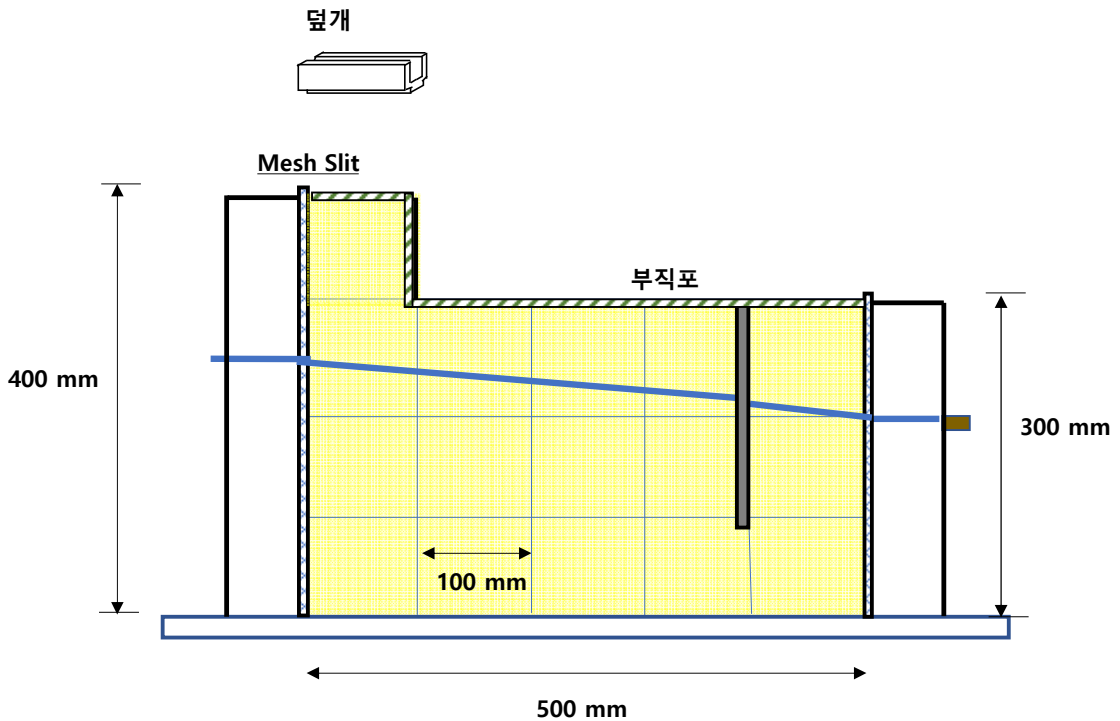


그림 3.40 지하수댐 설계도

2.2 실험 시나리오 구성

2.2.1 실험1 : 지하수댐 매질 영역의 지하수위 생성

샌드댐과 지하수댐의 정상상태 모의1를 목표로 하며, 지하수댐 벽체의 영향으로 상승한

지하수위 및 벽체를 기준으로 불연속면 생성하였다.

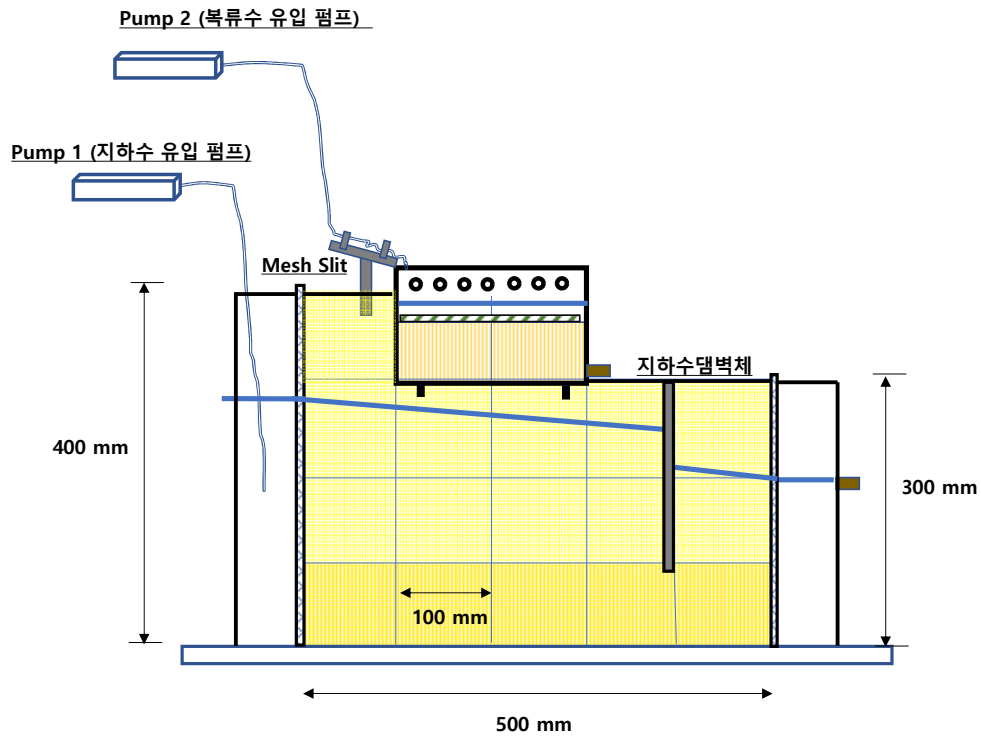


그림 3.41 실험장치 구성

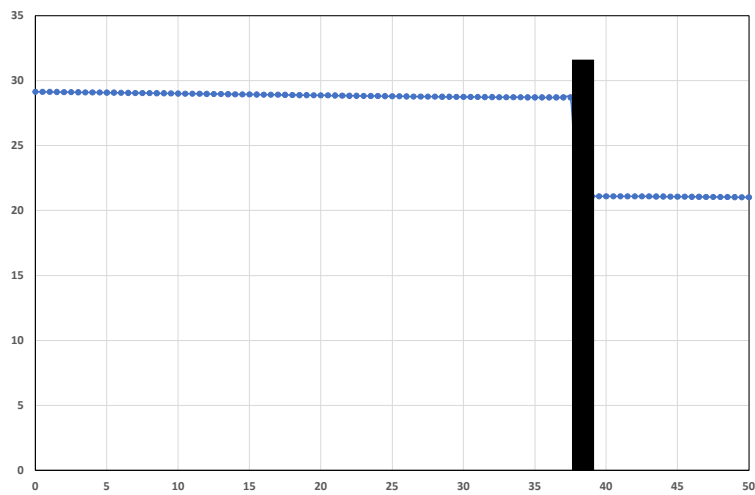


그림 3.42 지하수댐을 모사한 MODFLOW 모의 결과 지하수위 분포

샌드댐 운영은 1) 복류수 유입 펌프 작동 : 샌드댐의 기준수위를 채운 후 여분의 물은

샌드댐 상류의 유출구를 통하여 방류, 2) 샌드댐의 기준 수위를 채운 후 복류수 유입 펌프 중지를 기본으로 하여 운영 시나리오를 작성하였다.

지하수댐 운영은 사전 모델링 및 예비실험으로 유입수량 조절을 수행하고, 우측에 20cm 높이 유출구를 개방하여 수위 고정한다. 바닥으로부터 10cm 높이까지 낮은 수리전도도의 매질(glass beads)로 채움재를 설치하고, 바닥으로부터 10cm 높이 이후의 상부 매질은 높은 수리전도도의 매질로 채임. 이 때 매질간의 수리전도도 격차를 100배 정도로 대비하였다. 운영 결과 벽체 전후의 지하수위 차를 5~10cm 정도로 확인할 수 있어야 하고, 대수층에서 항상 지하수가 흐르기 때문에 모든 시나리오 조건에서 Pump1 (지하수 유입 펌프) 는 계속 가동한다.

기타 설정은 샌드댐으로 유입되는 물/지하수 유입되는 물은 시각적 효과를 위해 색소를 섞을 수 있도록하고, 샌드댐과 지하수댐의 매질은 수리학적으로 연결되어 있지 않는 것으로 설계하였다.

모델링 경계조건은

입력)

좌측 유입수 0.832 cm³/s

우측 유출수두 21 cm

수리전도도 $K1 = 1.46$ cm/s, $K2 = 0.0146$ cm/s

Ss 0.00001 cm⁻¹

결과)

7.5 cm의 수위상승 발생

2.2.2 실험2 : 가뭄시의 지하수댐 샌드댐 연계 운영

샌드댐 운영은 샌드댐 실험체 제거하고 지하수댐 운영하는 시나리오이다.

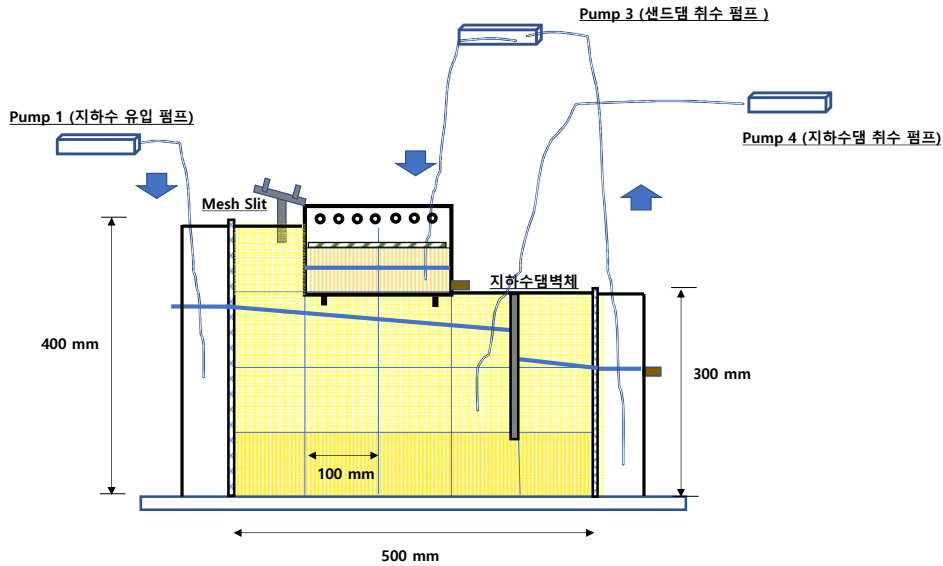


그림 3.43 실험 2 운영 모식도

가뭄 기간 (무강우 기간) 운영 모의를 수행하고, 지하수댐에서 샌드댐으로 물공급 모사
 샌드댐 운영은 다음과 같다. 샌드댐에 저장되어 있는 물의 양을 밸브를 통해 배출하여
 수위 하강 유도한다. 실험 1 : pump 3 (샌드댐 취수 펌프)를 작동. 지하수가 배출되어
 모인 오른쪽 물 저장조에서 샌드댐으로 이송하고, 관측데이터 : 지하수댐 벽체 전후의
 수위 하강, 샌드댐 수위 상승을 유도한다. 실험 2: pump 4 (지하수댐 취수 펌프) 작동
 하고, 지하수댐의 영향으로 수위가 상승된 벽체 상류 부분의 공간에서 취수, 관측데이터
 : 지하수댐 벽체 전후의 수위 하강, 샌드댐 수위 상승을 기록한다.

2.3 지하수댐 장비를 이용한 수리전도도 실험

수리전도도 측정을 목표로, 별도의 장치 없이 기존 실험체로 수리전도도 측정 가능하다. 실험방법은 바닥으로부터 15 cm 배출구 밸브를 열어 수위를 고정시키고 유입 유량을 세 가지로 조절하여 case 마다 좌측의 수두를 기록한다. 바닥으로부터 20 cm 배출구 밸브를 열어 수위를 고정시키고 유입 유량을 여러 가지로 조절하여 case 마다 좌측의 수두를 기록한다. 바닥으로부터 25 cm 배출구 밸브를 열어 수위를 고정시키고 유입 유량을 세 가지로 조절하여 case 마다 좌측의 수두를 기록한다. 이렇게 총 9가지 데이터셋을 얻어 위 식에 대입하여 수리전도도를 계산한다.

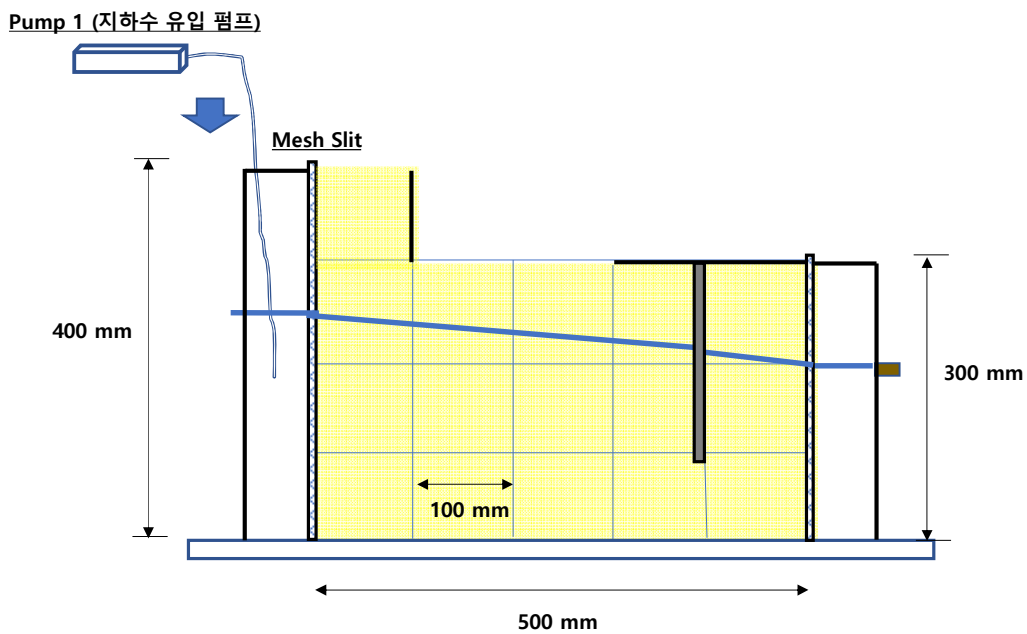


그림 3.44 수리전도도 실험 모식도

1. Hydraulic Conductivity Test

The hydraulic conductivity of the flow tank was estimated based on the Dupuit discharge formula. Figure 5 shows experimental data and its linear regression line. The slope of the line becomes a hydraulic conductivity for our system.

$$q^* = \frac{1}{2}K(h_1^2 - h_2^2)$$

Where,

q^* is the depth averaged flux,

in which, $q^* = Q/b$ (cm²/s),

K is the hydraulic conductivity (cm/s),

h_1 and h_2 are the head at each boundary (cm).

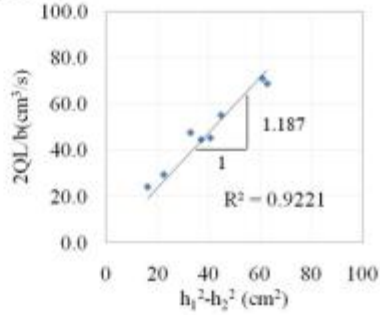


Figure 5. Determination of hydraulic conductivity

그림 3.45 수리전도도 실험 계산식

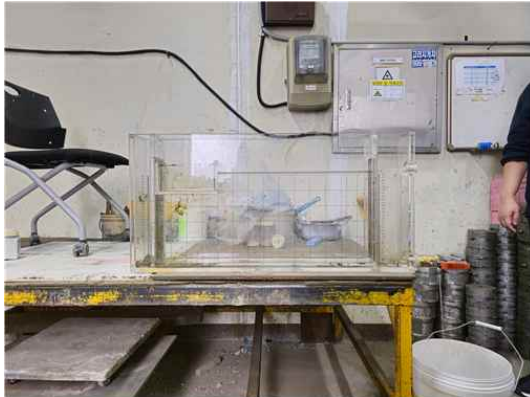


그림 3.46 예비실험 사진

3. WBS 3: 산간 고지대 홍수해석 기술 개발

3.1 GRM모형 유출해석을 위한 공간자료 및 수문자료구축

3.1.1 GRM 모형

Grid 기반 강우-유출 모형(GRM)은 강우 유출 사건 모의를 위한 물리적 기반의 분산 강우 유출-모형입니다. 운동과 모형은 지표 유출과 하도 유출의 분석에 사용되며, 침투량과 녹색-Ampt 계산이 사용됩니다. 지배방정식의 분석은 유한체적법을 사용하며, 비선형 용어의 경우 수렴해를 도출하기 위해 뉴턴-랩슨 방법을 사용합니다. 지표 유출은 지표 유출과 하도 유출로 구분되며, 직접 유출은 지표 유출과 지하 유출로 구성됩니다. 지표 유출은 침투 초과 유출(Horton, 1933)(사구 포화 초과 유출과 Black, 1970)로 유발되며, 토양수역에 대해서는 침투 과정과 지하 유출을 모의합니다(Bras, 1990). 한국건설기술연구원에서도 유동 방향을 x 방향으로 설정하고, 구성요소 중 유동에 수직인 방향을 y 방향으로 설정하고, h는 수심을 나타냅니다.

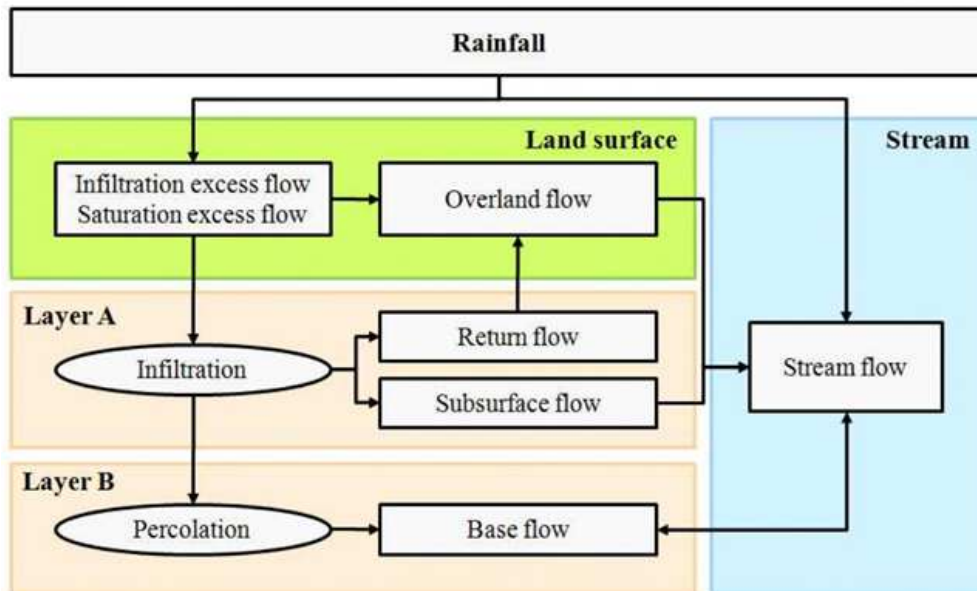


그림 3.47 수문성분의 유출과정

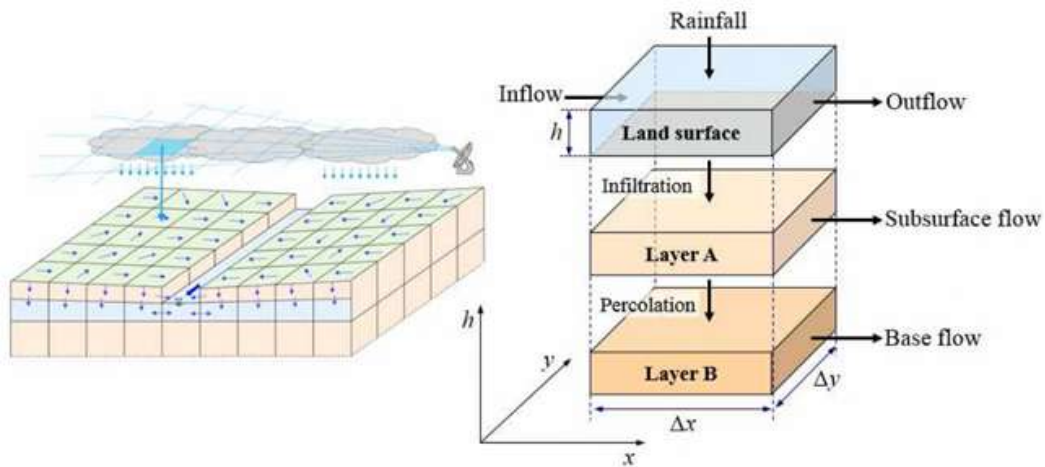


그림 3.48 검사체적에서의 수문성분 입출력

검사대상물로의 유입수문학적 성분은 상류측 검사대상물에서의 지표유입, 횡단유입, 강우량으로 구성되며, 검사대상물에서의 유출수문학적 성분은 지표유출량과 침투량(이 경우 침투량은 지표하 유출량에 기여)으로 구성됩니다. 지표하 유출량은 하류측이 하천인 경우 하천의 횡단유입으로 작용하며, 포화면인 경우 지표하 유입에 기여합니다(Bevan and Kirkby, 1979).

표 3.10 GRM 모형의 입력자료와 매개변수

모형 입력자료	대분류
유역	검사체적 번호, 격자크기, 유출해석 영역
흐름방향	상하루 검사체적, 흐름관계, 계산순서
흐름누적수	
경사	경사, 하도 최소경사
하천망	최소하폭, 하천 검사체적, 하천차수, 건천차수, 하천 조도계수
토지피복도	지표면 조도계수, 불투수율
토양도	Green-Ampt 매개변수, 유효토심
강우	강우, 초기포화도
유량(지점자료)	초기유량

3.1.2 입력자료

GRM은 프로젝트 단위로 실행됩니다. GRM 모형의 프로젝트 파일은 확장자가 .gmp이며, xml 형식으로 저장됩니다. GRM 프로젝트 파일에는 GRM 실행에 필요한 입력 데이터, 모의 환경, 파라미터 등이 저장됩니다. GRM은 강우 래스터 파일이나 텍스트 형식

의 DEM, 토·토지 피복도, 강우 시계열 데이터를 이용하여 생성된 지형·공간 데이터를 입력 데이터로 사용합니다. DEM 분석을 통해 생성된 유역, 사면, 유량방향, 유량축적, 하천망 파일은 수문학적 공간정보를 생성할 수 있는 GIS 툴을 이용하여 생성할 수 있습니다. 입력 데이터 생성을 위한 GIS 툴은 HyGIS, ArcGIS, TauDEM, QGIS D배수 플러그인 등 DEM 분석을 통한 수문학적 공간정보 생성 툴을 포함한 범용 S/W를 사용할 수 있습니다. GRM은 ASCII 래스터 형식을 사용함에 따라 GIS 툴을 이용하여 생성된 다양한 형식의 데이터를 ASCII 형식으로 변환하여 모델에 적용합니다.

표 3.11 GRM 모형의 입력자료

구분	자료의 종류	포맷	활용가능한 원본데이터	비고
지형	모의영역	ASCII 래스터	DEM (수치 지형도, 원격탐사 영상)	하천망과 하폭 데이터는 선택적 입력
	경사			
	흐름방향			
	흐름누적수			
	하천망			
	하폭			
토지피복	토지피복도		토지피복도 원격탐사 영상	토지피복 속성별 GRM 매개변수는 환경부 대분류 토지피복 속성을 참조값으로 제공
토양	토성		정밀토양도 글로벌 토양정보	토양 속성별 GRM 매개변수는 Green-Ampt 모형의 매개변수를 사용
	토양심			
수문	강우	ASCII 래스터	관측, 추정	래스터 형식의 분포형 강우 시계열 혹은 텍스트 형식의 유역 평균강우량 시계열 자료 중 선택적 사용
		텍스트		
	유량	ASCII 래스터	관측, 추정	텍스트는 flow control 모의를 위한 특정 격자에서의 유량 시계열, 보정지점에서의 초기 유량 ASCII 포맷 자료는 모든 하천 격자에서의 초기유량
포화도	ASCII 래스터	초기포화도 매개변수 대신, 유역내 모든 격자에서의 초기포화도를 ASCII 파일로 입력할 수 있음(선택적 적용)		

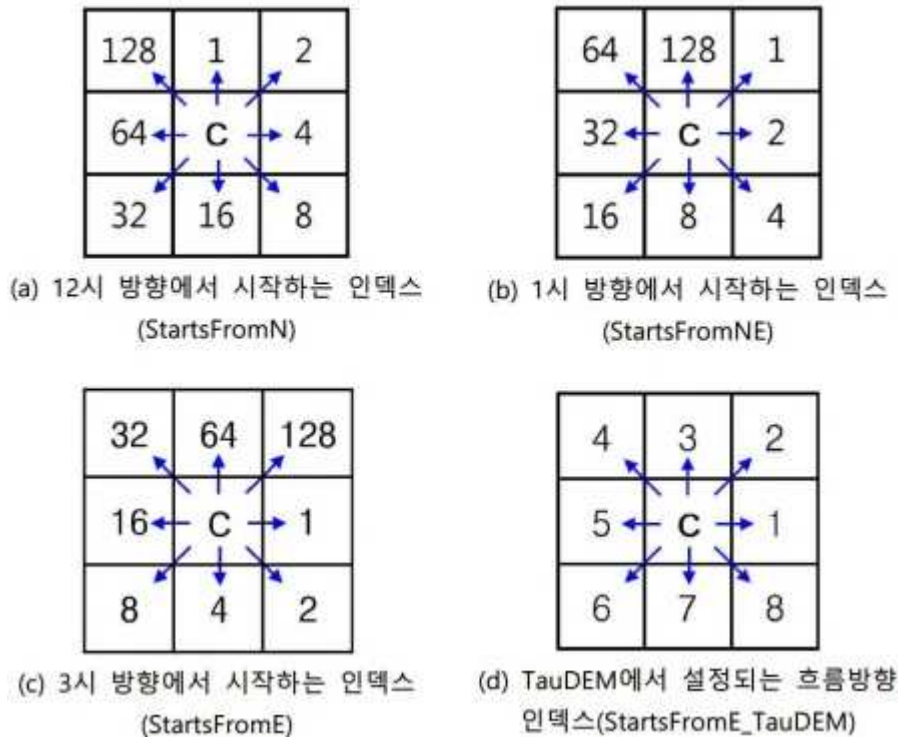


그림 3.49 흐름방향 인덱스

DEM으로부터 흐름방향 정보를 생성하는 경우, GIS S/W 마다 흐름방향에 대응하는 인덱스가 각기 다를수 있으므로, 흐름방향 데이터 적용시 주의해야 한다.

3.1.3 유량자료 수집

대상유역에 대한 유량자료 수집은 실제 측정된 자료를 활용하였다. 대상기간은 2020년 3월 13일부터 2020년 8월 27일까지이며, 1시간 단위 자료이다. 수집된 유량자료에 대해 스프레드 형식으로 가공하였으며, 강우에 의한 유량이 집중된 기간을 4개의 event로 선정하였다.

표 3.12 GRM 모형의 입력자료

구분	event 선정
2020	03. 31. - 04. 11.
	05. 19. - 05. 26.
	07. 28. - 08. 08.
	08. 09. - 08. 14.
	08. 15. - 08. 23.

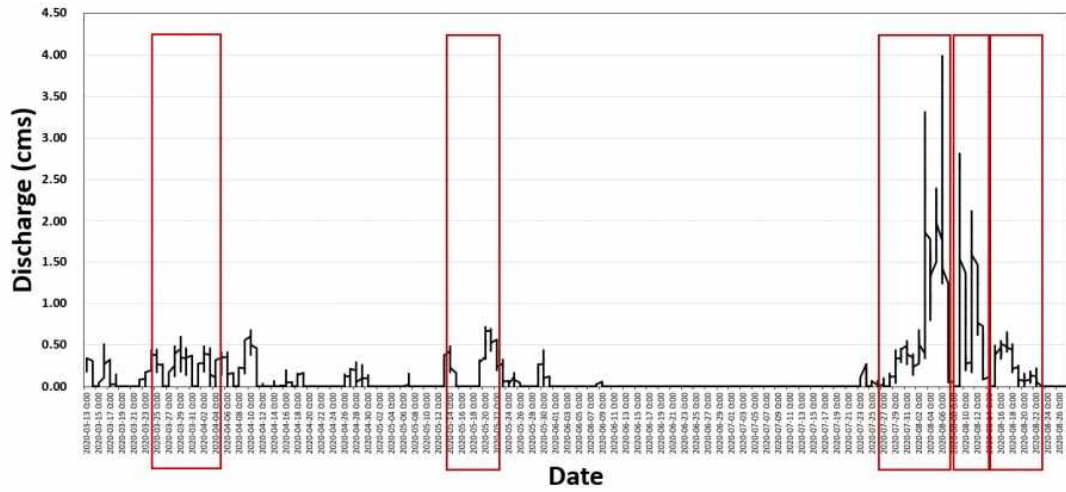


그림 3.50 event 선정결과

3.1.4 공간자료 구축

DEM의 좌표일치 및 공간해상도 등을 확인하였다(공간해상도 10m).

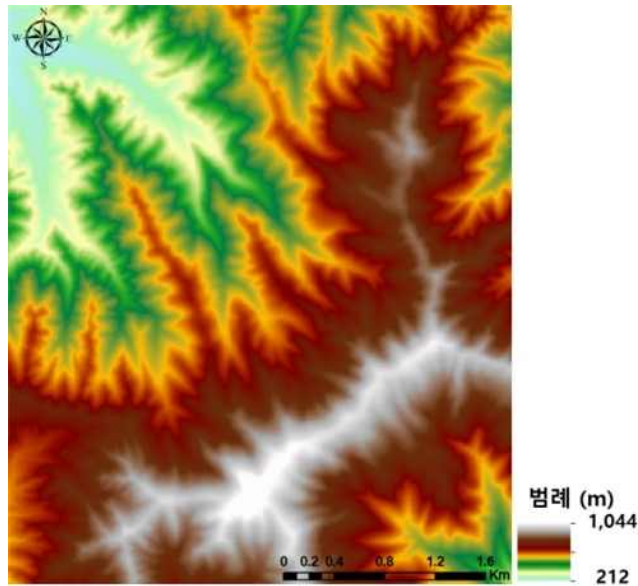


그림 3.51 DEM 수집

대상유역에 대한 토지피복도를 수집하였으며, 좌표검토 등을 수행하였다.

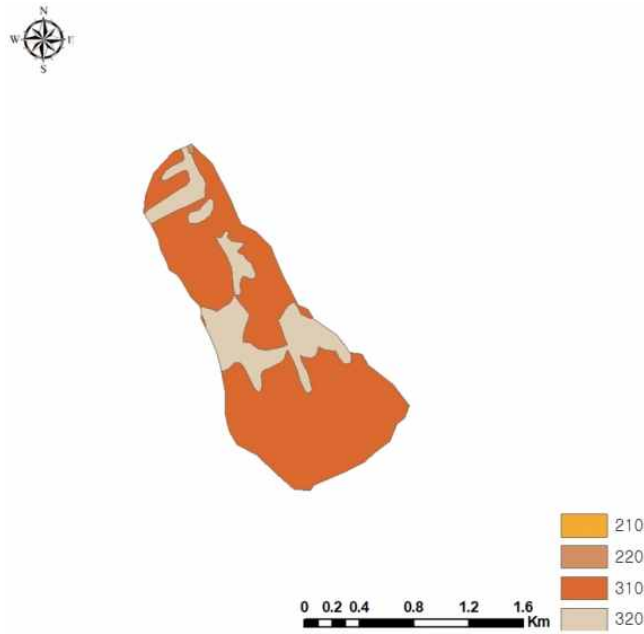


그림 3.52 토지피복도 수집

대상유역에 대한 토양도를 수집하였으며, 좌표검토 등을 수행하였다.

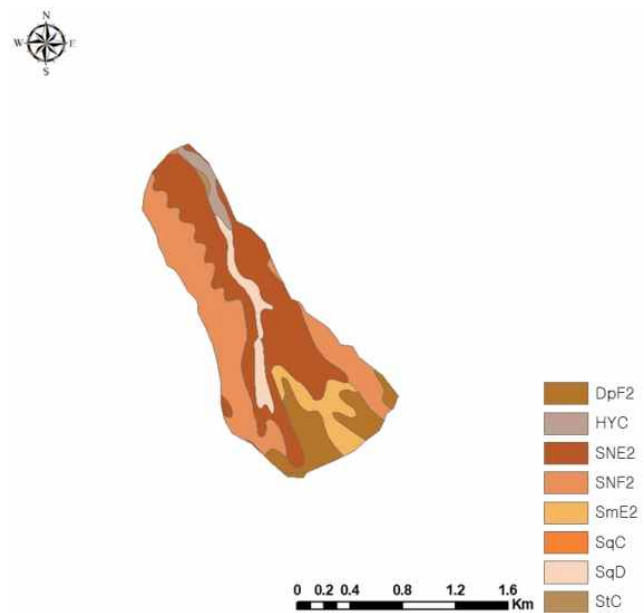


그림 3.53 토양도 수집

대상유역에 대한 DEM을 이용하여 하천 단면 정보 추출 수행, 3개의 하천으로 분석하였으며, 모든 단면은 interval 50m, width 300m로 설정하였다.

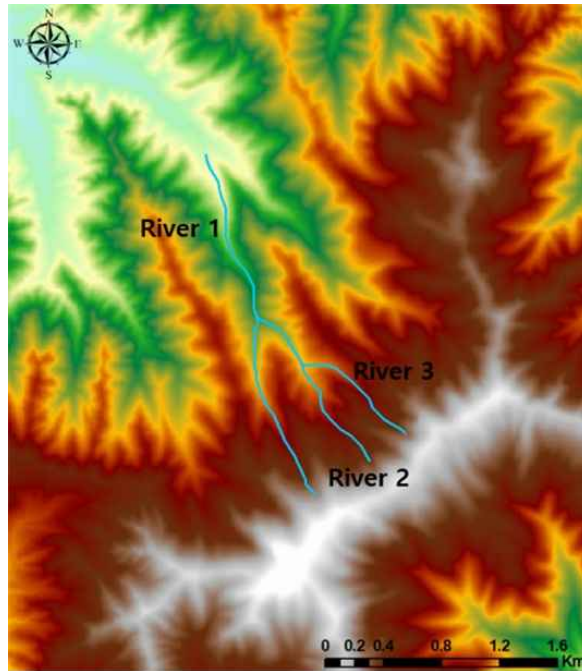


그림 3.54 하천망도 작성

3.1.5 수문자료 구축

대상유역에 대한 수위자료를 수집하였으며, 대상기간인 2020년 3월 13일 부터 2020년 8월 27일까지의 수위자료 수집하여 분석하였다.

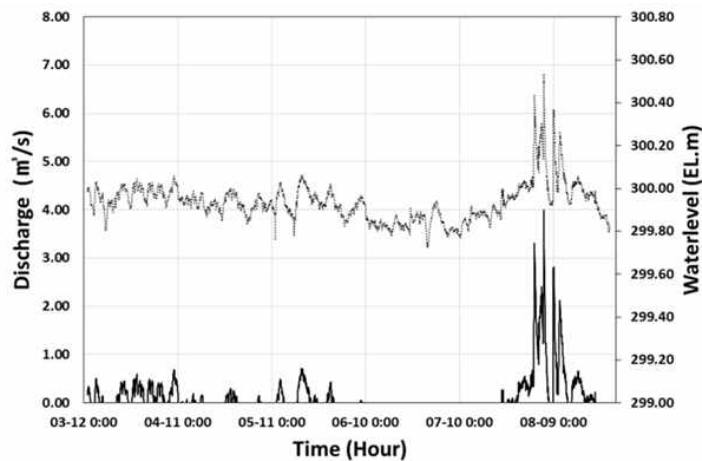


그림 3.55 수위자료 구축

대상유역에 대한 강우자료를 수집하였으며, 대상 강우관측소는 홍천군 두촌중교(code 10144100)로 선정하였다. 대상기간인 2020년 3월 13일부터 2020년 8월 27일까지의

수위자료 수집하였다.

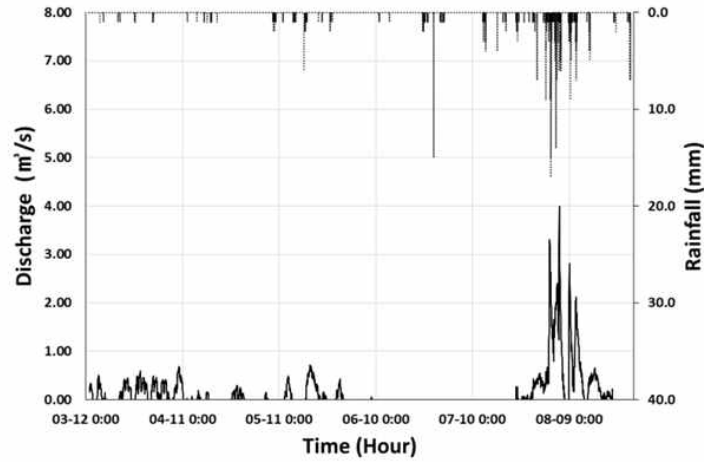


그림 3.56 강우자료 구축

3.1.6 GRM 모형 유출해석 체계 구축

- (하천 흐름도 및 누적도 산정) 국토지리정보원에서 수집하여 가공한 공간해상도 10m DEM을 이용하여 흐름방향도(Flow Direction), 흐름누적도(Flow Accumulation), 하천망도(Stream), 유역도(Watershed)를 작성하였다.

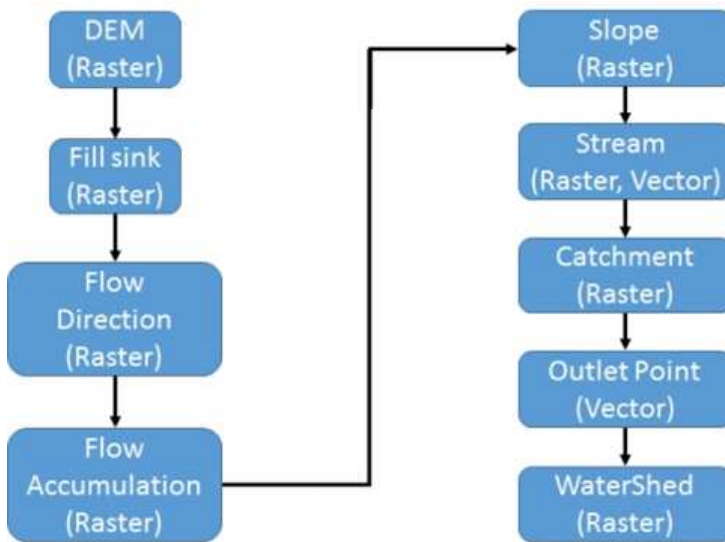


그림 3.57 유역도 작성 흐름도

① Fill Sink : 단순하게 물은 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르며 특정 셀 주변 8개의 방향 중 가장 경사가 심한 곳으로 흘러간다. DEM 단면상 물의 흐름을 방해할 수 있는 부분에 대해 채우거나 깎아내는 원리이다.

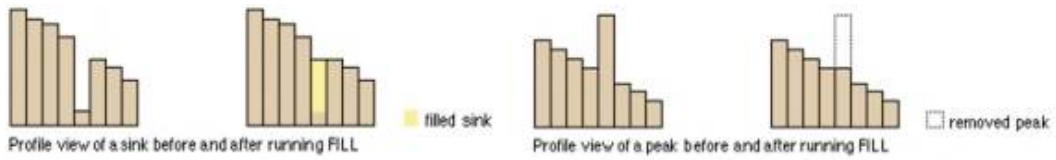


그림 3.58 Fill Sink 개념도, ESRI 자료 참조

② Flow Direction : 각 셀에서 가장 가파른 아래쪽 경사까지 이르는 흐름 방향의 래스터 생성

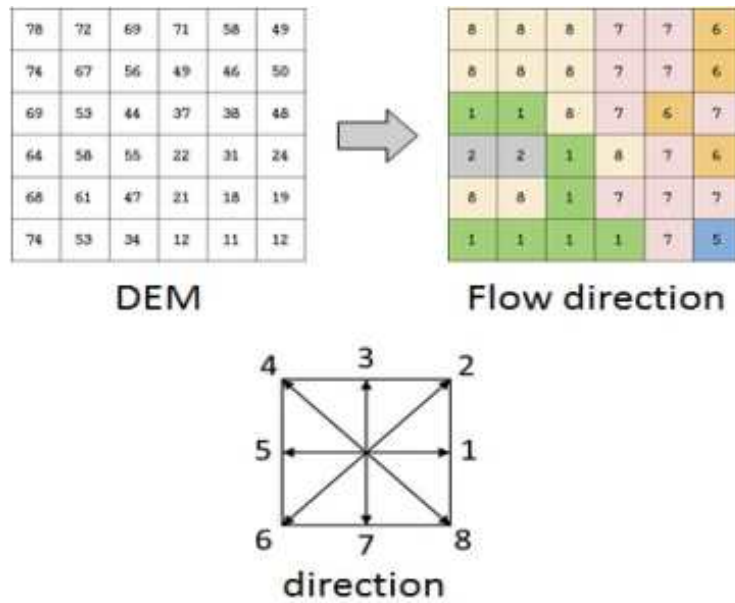


그림 3.59 Flow Direction 개념도, ESRI 자료 참조

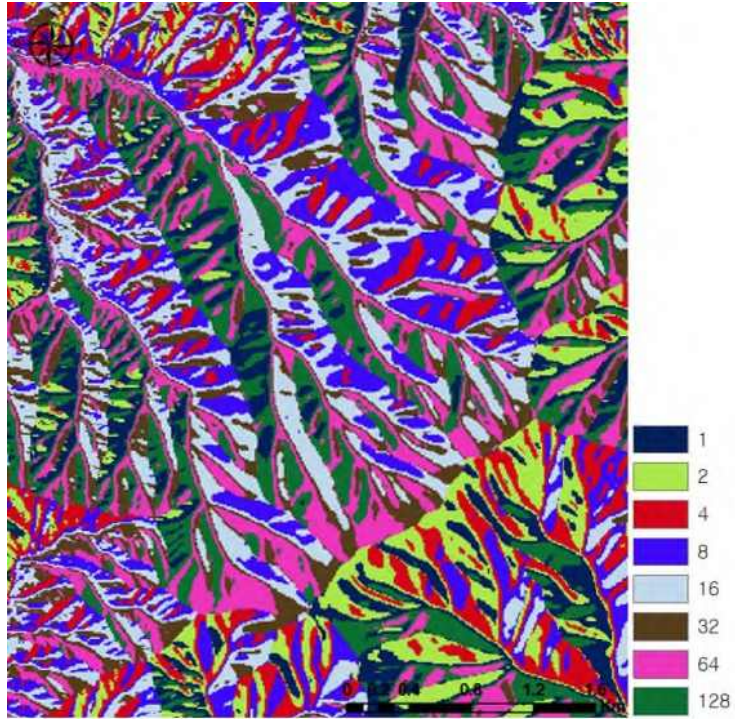


그림 3.60 하천 흐름도 결과

③ Flow Accumulation : 모든 셀의 흐름방향을 아래쪽 경사에 누적하여 나타냄

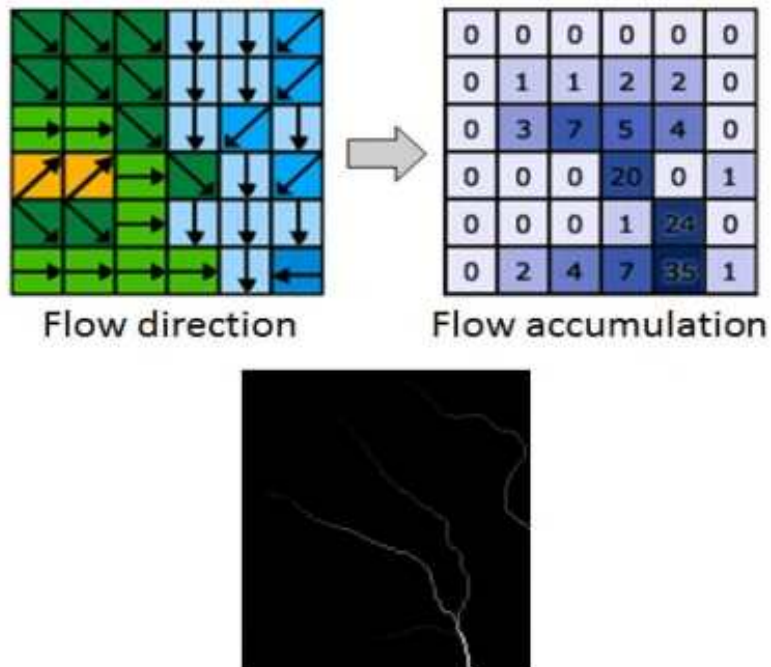


그림 3.61 Flow Accumulation 개념도, ESRI 자료 참조

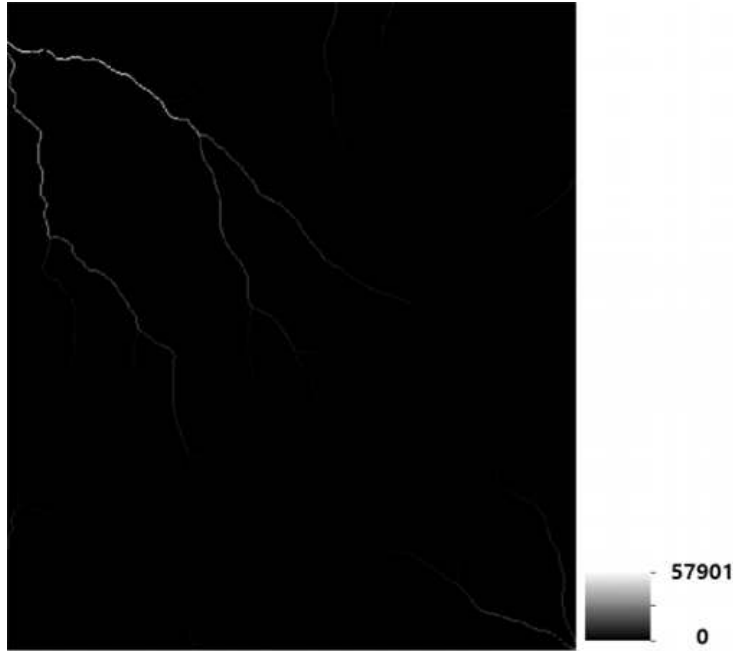


그림 3.62 흐름 누적도 결과

④ Stream : 누적 흐름도에서 나온 특정 누적값 이상을 하천으로 정의한다. 기본자료 구축은 QGIS-Drainage를 이용하였으며, 자료 생성 방법은 다음 절차와 같다.

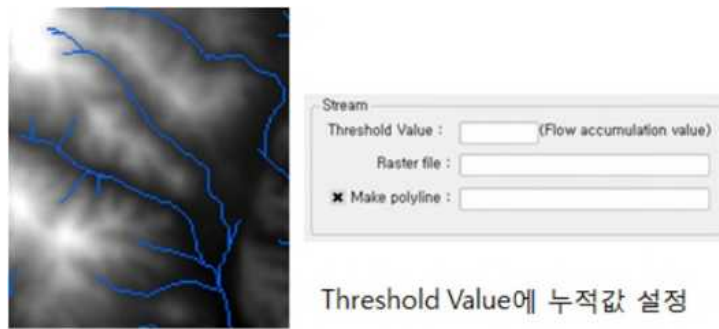


그림 3.63 Drainage의 Stream 수행 방법

- 1) Drainage 툴과 DEM을 이용하여 Catchment까지의 일련과정을 거침
- 2) 현재 하천라인(WAMIS)과 생성된 Stream 결과와의 비교를 통해 Flow Direction을 수정함
- 3) 수정된 Flow Direction은 tauDEM을 이용하여 Catchment까지의 과정을 다시 거침
- 4) 유역 출구점 설정 후 유역도(Watershed) 생성

- 5) 표준유역도(WAMIS)자료와 유역도 비교 및 Flow Direction 수정
- 6) 수정된 Flow Direction을 기준으로 Watershed까지의 과정 수행
- 7) 수정 유역도(Watershed) 추출(Raster, Vector)

환경부 토지피복도를 수집하였으며, 대상유역을 기준으로 분할 실시(Clipping) 하였다. 중분류로 구성된 토지피복도에 대해 대분류로 재분류(Resampling) 수행하였으며, 벡터 자료를 래스터 형식으로 변환하였다(공간해상도 10m로 변환).

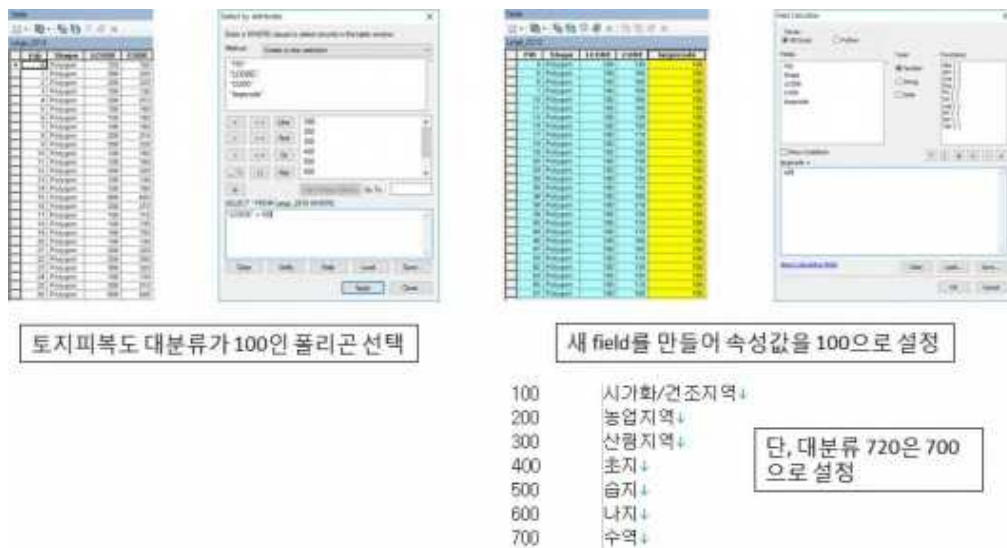


그림 3.64 토지피복도 속성데이터 수정



그림 3.65 토지피복도 래스터화 수행

농촌진흥청 토양도 및 토양심도를 수집하였으며, 대상유역에 대해 분할수행(Clipping)

하였다. 토양도 및 토양심도를 GRM 입력구조에 맞게 수정하였으며, 벡터자료를 래스터 형식으로 변환하였다(공간해상도 10m로 변환).



그림 3.66 토양도 속성데이터 수정



그림 3.67 토양심도 속성데이터 수정

3.2 샌드댐 상류 GRM모형 대표매개변수 산정 및 검토

3.2.1 샌드댐 유역 대표 매개변수 추정

GRM 모형 구축을 위해 유역도, 토지피복도, 토양도, 경사도, 수문학적 분석 주제도에 대한 자료 구축을 수행함

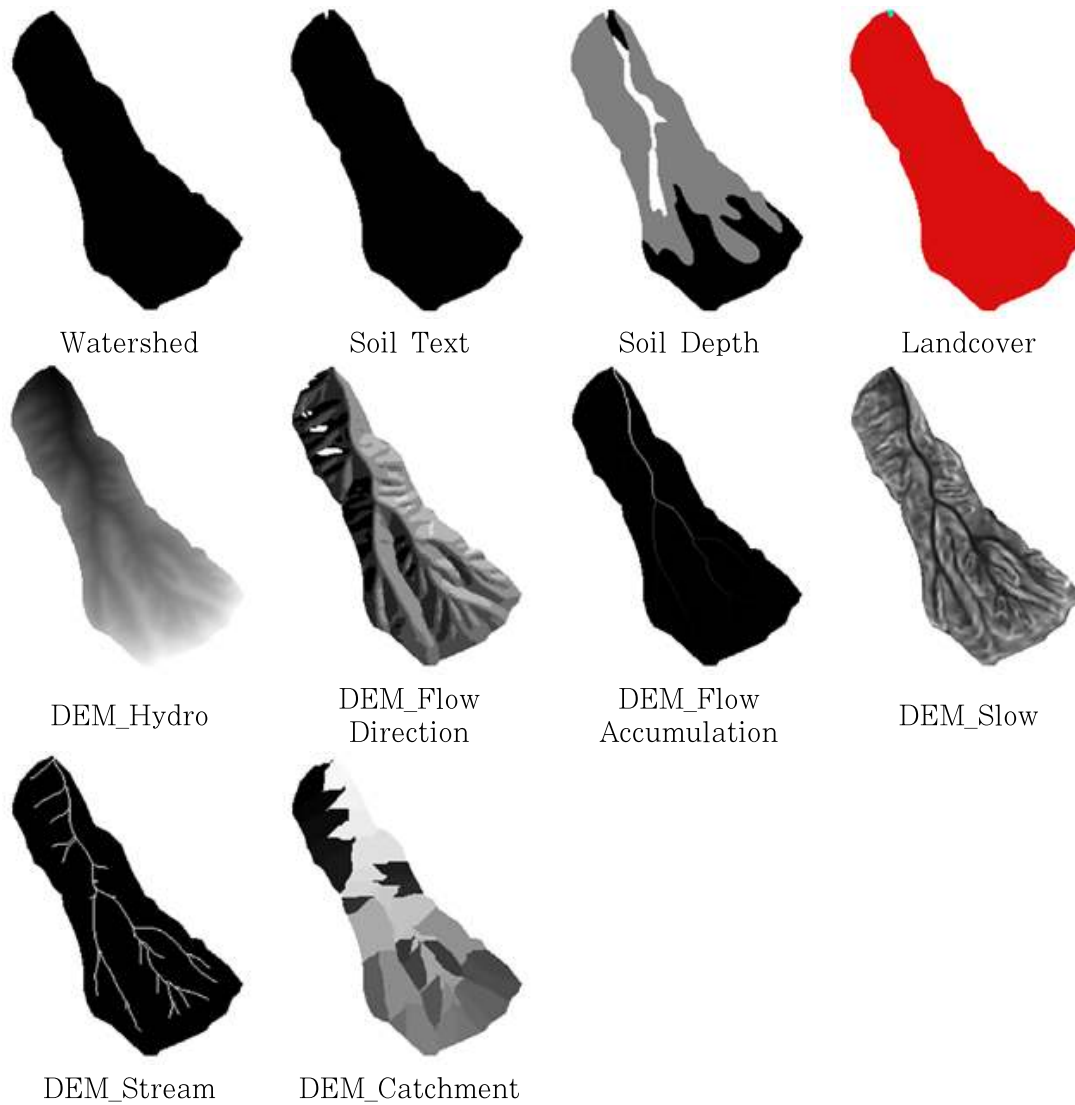


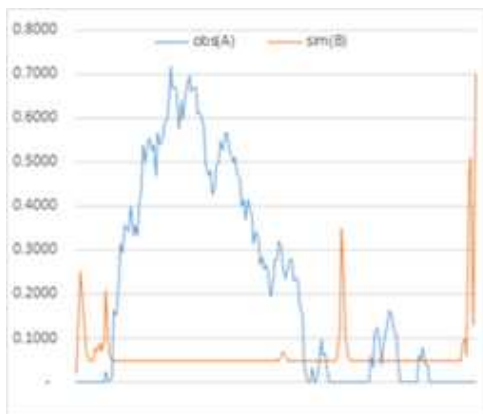
그림 3.68 입력자료 구축현황

3.2.2 대표 매개변수 산정

보정지점에 대해 관측 유량과 모의 유량을 비교하여 gmp 파일의 매개변수 수정하였다.

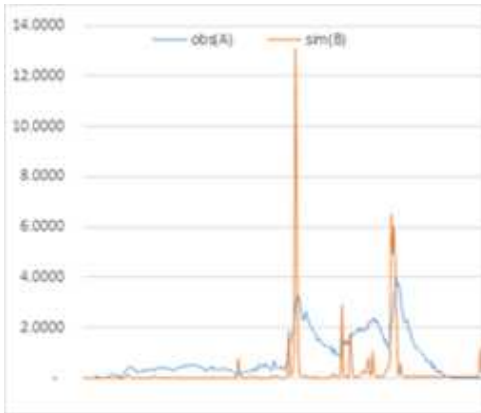
표 3.13 보정 매개변수 특징

매개변수	정의	데이터 형식
IniSaturation	초기포화도 매개변수(0~1 사이의 값 입력) 토양포화도 ASCII 파일이 입력된 경우에는 이 매개변수는 유출해석에 사용되지 않음	Single
MinSlopeOF	지표면흐름 최소 바닥 경사 조건 매개변수	Single
CoefUnsaturatedK	불포화투수계수 계산을 위한 계수 UnsaturatedKType이 'Linear'인 경우에는 0.2, 'Exponential'인 경우에는 6.4, 'Constant'인 경우에는 0.1이 기본 값으로 적용됨	Single
MinSlopeChBed	하도흐름 최소 바닥 경사 조건 매개변수	Single
MinChBaseWidth	최소 하폭 조건 매개변수 (m)	Single
ChRoughness	하도 조도계수 매개변수	Single
IniFlow	초기 유량 매개변수 (m ³ /s) 대상 유역 하천의 최하류 지점에서의 모의시작 시점에서의 관측유량 입력 초기유량 ASCII 파일이 입력된 경우에는 이 매개변수는 유출해석에 사용되지 않음	Single
CalCoefLCRoughness	토지피복도에 의해 설정된 조도계수 보정 매개변수	Single
CalCoefPorosity	토양 공극율 보정 매개변수	Single
CalCoefWFSuctionHead	토양 습윤전선 흡인수두 보정 매개변수	Single
CalCoefHydraulicK	토양 수리전도도 보정 매개변수	Single
CalCoefSoilDepth	토양심 보정 매개변수	Single



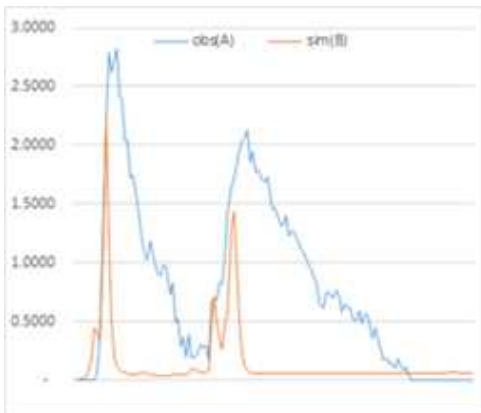
항목	매개변수
IniSaturation	0.9
MinSlopeOF	0.0001
CoefUnsaturatedK	0.2
MinSlopeChBed	0.0001
MinChBaseWidth	1
inflow	0.0001
ChRoughness	0.045
CalCoefLCRoughness	1

그림 3.69 대표 매개변수 산정(2020년 5월 19일-2020년 5월 26일)



항목	매개변수
IniSaturation	0.1
MinSlopeOF	0.0001
CoefUnsaturatedK	0.2
MinSlopeChBed	0.0001
MinChBaseWidth	1
inflow	0.0001
ChRoughness	0.06
CalCoefLCRoughness	1

그림 3.70 대표 매개변수 산정(2020년 7월 28일-2020년 8월 8일)



항목	매개변수
IniSaturation	0.45
MinSlopeOF	0.0001
CoefUnsaturatedK	0.2
MinSlopeChBed	0.0001
MinChBaseWidth	1
inflow	0.0001
ChRoughness	0.045
CalCoefLCRoughness	1

그림 3.71 대표 매개변수 산정(2020년 8월 9일-2020년 8월 14일)

3.2.3 GRM 모형 적용성 평가

- GRM 모의 결과 결정계수 및 NSE가 낮은 값을 가짐
- 8월 1일 시간당 강우가 최대 69mm이며, 직접유출 될 경우 유량은 대략 37.5 cms 정도가 됨. 그러나 최대 강우 시간에서 최대 관측 유량이 3.3 cms 정도로 차이가 큼
- 또한 시간당 20 mm ~ 30 mm의 강우 이벤트가 발생되어도 관측 수문곡선은 거의 반응하지 않음
- 이는 대상유역이 산지이고 너무 작으며, 대상유역에서 강우 관측소의 위치가 멀리 떨어져 있음에 따라 실제적인 유출 해석을 하기에는 무리가 있을 것으로 판단됨
- 이에 따라, 대상유역에서 실측한 강우 자료의 수집이 필요하며, 향후 강우 자료 취득을 통해 모형에 대한 보정을 수행하고자 함

4. 정량적 연구개발 성과

4.1 과학적 성과

4.1.1 국내등재논문 : 0편

4.1.2 학술발표 : 0편

4.2 기술적 성과

4.2.1 특허등록 : 0건

4.3 경제적 성과

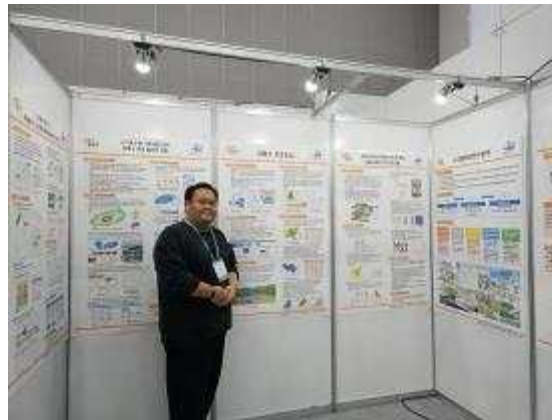
해당사항 없음.

4.4 사회적 성과

4.4.1 홍보 : 0건

5. 기타 성과

5.1 Groundwater Korea 2023 전시참가



제4장

차년도 연구개발계획

1. 연구개발 목표 및 내용

1.1 연구개발 목표 및 예상 성과물

연구개발 최종 목표	샌드댐-지하수댐 하이브리드형 물공급 체계 구축 및 최적 운영을 통한 물공급 신뢰도 99% (이수안전도 100년 빈도) 이상 달성			
연차별 목표	2차년도	샌드댐-지하수댐 연계 운영에 따른 물 공급 증대		
성과지표 (가중치)	목표치	목표치 설정 근거	측정 방법 및 산식	실적목표
2차년도				
WBS. 1 지하댐-샌드댐 연계 물수지 분석 기술 개발				
물공급 증대율 (40%)	120%	샌드댐 단독공급 대비 증가량	하이브리드 공급량/샌드댐 공급량* 100	120%
WBS. 2 현장 및 모형실험 기반 샌드댐 수리해석 기술 개발				
샌드댐-지하수댐 모의실험을 통한 지하수위 변동 해석 수행	모의실험결과와 비교를 통한 $R^2 < 0.7$ 이상	테스트베드 현장 실측치와의 비교를 통한 유사성 분석	실측값과의 비교를 통한 용성 검토 결과	$R^2 < 0.7$ 이상
WBS 3. 산간 고지대 홍수해석 기술 개발				
실측값과 유출해석 결과 비교를 통한 유출해석 모형 검토	유출해석 결과와 비교를 통한 $R^2 < 0.8$ 이상	샌드댐 상류 유출해석체계의 적용 가능성 판단	실측값과의 비교를 통한 용성 검토 결과	$R^2 < 0.8$ 이상

구분	성과항목	성과지표	2024	
			계획	변경
기술 개선 효과	기술혁신	(필수) 기술 성능목표 달성도 (기존기술대비 향상률, %)	5%	
		(필수) 국내·외 논문 (SCI(E)급, 학술발표 제외) 건수		
		(필수) 국내논문 (학술발표 제외) 건수	2	
		(필수) 특허 출원/등록 건수		
	기술적용	시제품 제작 건수		
		(필수) 실증 계획 수립 (1차년도 필수, 수립1 미수립0)		
		(필수) 해당 지역에서의 실증/실험 테스트 베드 구축 건수		
		공인인증 획득 건수		
		시험평가 건수		
기술 확산 효과	기술이전	무상이전 건수		
		(필수) 유상이전 건수		
		기술이전 금액* (단위 : 백만 원)		
	기업지원	(필수) 기술지도 (기업대상 교육, 세미나 등) 건수		
지역 사회· 경제적 효과	인력양성	해당 분야 기술인력 개발 건수		
	기술 활용 효과	매출액 기여 (기존 대비 상승률, %)		
		원가절감 효과 (기존 대비 절감률, %)		
	정책효과	정책 제안 건수		
		기준·제도 개선 건수		
	공공 서비스	지역주민 서비스 만족도 시행 (시행 1, 미시행 0)		
	홍보	(필수) 언론 홍보 (신문, 방송) 건수	1	
(필수) 지역 공무원 등 주민 대상 홍보 (공청회 등) 건수				

○ [성과목표 1]

- 성과지표 1 : 샌드댐-지하수댐 연계 운영에 따른 물 공급 효과 분석 (가중치: 40%)
 - 목표치 설정근거: 하이브리드형 물공급 체계의 구축 및 평가
 - 측정산식: 샌드댐-지하댐 연계 운영을 통한 공급물량 증대
 - 입증방법: 분석결과 보고서

○ [성과목표 2]

- 성과지표 2 : 샌드댐-지하수댐 모의실험 수행을 통한 지하수위 변동해석 수행 (가중치: 30%)
 - 목표치 설정근거: 테스트베드 현장 실측치와의 비교를 통한 유사성 분석
 - 측정산식: $R^2 > 0.7$ 이상
 - 입증방법: 분석결과 보고서

○ [성과목표 3]

- 성과지표 3 : 산간 고지대 홍수해석 기술 개발 (가중치: 30%)
 - 목표치 설정근거: 샌드댐 상류 유출해석체계의 적용 가능성 판단
 - 측정산식: $R^2 > 0.8$ 이상
 - 입증방법: 분석 결과 보고서

2. 국내외 관련 분야 환경변화

해당 없음.

3. 연구개발 추진전략

- (WBS1) 물로리 샌드담-지하수담 연계 운영에 따른 물 공급 효과 분석
 - 지하수담에 저류된 물을 일시적으로 수중펌프를 사용하여 샌드담으로 재주입하는 것이 효과적이며 샌드담내 수위감지 센서를 설치하여 유공관 상단고에서 일정 높이까지 수위가 떨어지면 지하수담을 통해 저류된 물을 자동으로 양수하여 샌드담 제체내로 다시 재주입되도록 하는 순환형 물공급 체계를 구축
 - 샌드담을 통한 무동력 물공급이 우선되고, 샌드담 단독으로 물공급이 충분치 않을 경우에는 하류 지하수담을 통한 동력 물공급이 병행되는 하이브리드형 물공급 운영이라 할 수 있음
 - 통합 수문모형과 지하수 유동해석을 기반으로 한 지하담 - 샌드담 연계 물수지 해석 수행 : 취수원 하부에 모래저류조를 배치하고 기존 취수원에서 공급되는 수량과 취수원 하부를 통해 공급되는 지하수 유동을 반영하여 유공관을 통해 배수되는 물량의 변화를 산정하기 위해 MODFLOW(McDonald and Harbaugh, 1988)을 이용
 - MODFLOW는 주프로그램(main program)과 상호 독립적인 모듈(module)로 구성된 각각의 패키지(package)로 구성

- (WBS2) 현장 및 모형실험 기반 샌드담 수리해석 기술 개발
 - 샌드담, 지하담 설치 전의 평수위 지하수위 유동특성 모의
 - 샌드담 설치에 따른 샌드담 하류부 지하수위 변화 모의
 - 샌드담 설치와 지하담 복합 설치에 따른 샌드담 하류부 지하수위 변화 특성 파악과 샌드담 상류부의 지하수위 상승에 따른 공급량 증대 가능성 분석

- (WBS3) 산간 고지대 홍수해석 기술 개발
 - 샌드담이 설치된 계곡 및 인근 하천은 건기를 제외하고 유량이 상시 존재
 - 돌발홍수 및 집중호우 발생시, 샌드담의 안정성 및 채움재(모래)의 유실 가능성이 높음.
 - 샌드담의 안정적 유지 및 취수를 위해서는 유입량 산정 및 유출량 산정이 필요
 - 샌드담 유입량 산정을 위한 GRM모형 유출해석 체계 구축 및 시나리오에 따른 유출해석 결과 검토 필요

- 유출해석 결과를 통해 샌드댐 설계 기준 및 실내 실험 모형 제작에 활용
- 홍수량 산정을 통해 신규 샌드댐 설치시 기존 차수벽에서 월류되는 유량의 산정이 가능하며 인근 계곡과 배후 지하수에서의 기저유량 계산에 활용

4. 연구개발 일정 및 기대성과

차년도 성과목표	당해년도 성과물	차년도(2024년)												최종성과물
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
물 공급 증대	연계 물수지 모형 구축 및 시범 구동	샌드댐-지하수댐 연계 운영에 따른 물 공급 효과 분석												샌드댐-지하수댐 이브리드형 물공급 체계 구축 및 운영을 통한 물 공급 신뢰도 99% (이수안전년도 100년 빈도) 이상 달성
샌드댐-지하수댐 연계 실험을 통한 지하수위 상승	샌드댐의 지하수 유입, 저류, 유출 특성 규명하기 위한 3차원 실험 모형 제작	테스트베드 현장 실측치와의 비교를 통한 유사성 분석												
실측값과 유출해석 결과의 차이를 줄이기 위한 유출해석 모형 검토	계곡수의 유량과 모의 유량과의 상관성	샌드댐 상류 유출해석체계의 적용 가능성 판단												

5. 연구비 사용계획

5.1 인건비

5.1.1 내부인건비(150,000,000원)

참여형태	성명	참여기간	인건비	예정 참여율 (%)
내부	정OO	2024-01-01~2024~12-31	30,000,000	23.97
내부	김OO	2024-01-01~2024~12-31	18,000,000	17.13
내부	이OO	2024-01-01~2024~12-31	25,000,000	26.25
내부	장OO	2024-01-01~2024~12-31	20,000,000	23.45
내부	이OO	2024-01-01~2024~12-31	10,000,000	11.34
내부	김OO	2024-01-01~2024~12-31	12,000,000	21.42
내부	최OO	2024-01-01~2024~12-31	15,000,000	24.50
내부	최OO	2024-01-01~2024~12-31	10,000,000	9.98
내부	김OO	2024-01-01~2024~12-31	10,000,000	9.61

5.1.2 외부인건비(20,000,000원)

참여형태	성명	참여기간	인건비	예정 참여율 (%)
외부	박OO예정	2024-01-01~2024~12-31	10,000,000	16.99
학생	최OO	2024-01-01~2024~12-31	10,000,000	30.93

5.2 직접비

5.2.1 연구시설·장비비 : 해당사항 없음

세목	실행예산	산출근거

5.2.2 연구재료비 : 3,000,000원(직접비의 3.00%)

세목	실행예산	산출근거
시제품시작품설 비제작비	3,000,000	현장 설치형 강우량계 1개 구입

5.2.3 연구활동비 : 33,350,000원(직접비의 33.35%)

(1) 연구개발서비스활용비 : 20,000,000원(직접비의 20.00%)

세목	품명	필요성 및 용도	금액(원)
연구개발서비스 활용비	지하수위 및 물공급 모니터링 분석	샌드댐 설치 현장의 지하수위 변동과 물공급량 모니터링 등 의 현장 자료수집 및 분석	20,000,000

(2) 국외출장비 : 10,000,000원(직접비의 10.00%)

차수	성명/직급	횟수	산출내역	금액(원)
1	히요 하티아 와레 / UST학생연구원	1	항공료, 육로교통, 부대경비, 식비/ 일비/숙박비, 여행자보험 등 경비 일체	5,000,000
	타레켄 멘기스투 / UST학생연구원	1	항공료, 육로교통, 부대경비, 식비/ 일비/숙박비, 여행자보험 등 경비 일체	5,000,000
	소계			10,000,000
	출장 목적 및 사유	2024 SWAT conferences 논문 발표 및 전문가 회의 참석		
	당해 연구개발과제 관련 내용	본 연구에서 수행하는 수문분석 기법에 대한 연구 결과를 SWAT conferences 발표를 통해 신뢰도에 대한 검증을 받고, 관련 국제기관의 전문가 회의에 참석하여 최신 동향 및 신뢰성에 대한 검증 필요		
	국내에서 관련 정 보를 입수하기 어려운 이유	최근 해외 전문가들의 SWAT 프로그램을 이용한 연구동향 분석을 수행하고, 국내의 연구에서 진행한 SWAT 모델링 에 대한 신뢰성 검증과 연구성과의 우수성을 판단할 수 있 는 계기가 필요하며 국제적인 해당분야 전문가의 자문 및 정보 수집, 의견수렴에 대한 미팅이 반드시 필요		
	출장자	히요 하티아 와레, 타레켄 멘기스투,	출장 목적지 및 기관	프랑스 스트라스브 루
출장기간	('24. 07. 07 ~ '24. 07. 12)			

5.3 위탁연구개발비 : 해당사항없음

6. 성과활용방안

- 지역 맞춤형 하이브리드 저류시설
 - 유관기업 기술이전
 - 물공급 취약지역 지자체에 기술보급 가능

- 과제 종료 후 수탁 또는 국가 R&D 사업 확산 전략
 - 국가 R&D로 지표수와 연계한 지하저류(인공함양)시설의 응용개발이 가능하며, 심정, 계곡 취수보, 샌드담-지하수댐을 모듈화로 연계하는 방식이 가능할 것으로 판단됨

7. 기대효과

가. 과학기술적 파급효과

- 세계 최초 샌드담-지하담 연계 구조물 개발로 건조지역, 도서지역, 계곡지역에 활용 가능
- 특히, 국내의 경우는 유역 상류에 적용하는 기술이지만, 해외 건조지역은 중하류의 경우 샌드담과 지하담의 대규모 연계가 가능함
- 상수도미보급지역 등 물복지 사각지역 맞춤형 물공급 체계 구축 기술력 확보
- 통합 수문해석 기반의 분석 및 수원 연계 통합 물 이용·관리 기술력 확보

나. 사회경제적 파급효과

- 우리나라 상수도 미보급 지역 전체 3%에 해당하며 가뭄시 급수차에 의존하는 산간지역 물부족 해소, 지속가능 수자원 이용에 따른 사회적 비용 절감
- KICT 보유 물순환 해석기술과 샌드담-지하담 설계시공기술의 기술이전 및 보급화를 통한 사회 물문제 해결에 기여
- 유역 상하류간 형평성 있는 물공급 혜택
- 가뭄시 식수 및 생활용수 연속공급으로 지방상수도 구축 비용 절감(수십 킬로미터의 관로 설치 비용 절감)
- 안정적 물공급 체계 마련에 따른 지역경제 활성화(상류 소유역 마을 주민의 경제적 삶의 질 개선)

참고문헌

- 김남원, 정일문, 원유승, 2004a, 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (I) 모형의 개발, 한국수자원학회논문집, 37(6), 499-507.
- 김남원, 정일문, 원유승, 2004b, 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형, (II) 모형의 적용, 한국수자원학회논문집, 37(6), 509-515.
- 김남중, 2005, 지하댐의 개발 방향과 전망, 유신기술회보, 12, 99-112.
- 金森信夫, 小林 勳, 小徳 基, 2000, 中國大連市の地下ダム開發, Jour. JSIDRE, Vol.68, No.11, 1223-1228
- 김종태, 김만일, 정일문, 김남원, 정교철, 2009, 지하댐 건설에 따른 유역 내 지하수위 변화 특성 해석, 지질공학, 19(2), 227-233.
- 부성안, 이기철, 김진성, 정교철, 고양수, 2002, 지하댐 물막이벽 시공법과 해안지역 염수침입 방지기술 개선 방안, 지질공학, 제12권, 제2호, 215-234.
- 신현석, 강두기, 김상단, 2007, 낙동강유역 SWAT 모형 구축 및 물수지 시나리오에 따른 유험분석, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 40(3), 251-263.
- 안용순, 이태식, 1997, 연약지반의 약액주입공법에 대한 시공성 및 경제성 연구, 1-22
- 영덕군, 2009, 가뭄대비 영덕취수장 대체수원개발 보고서, p.278.
- 原郁南, 緒方博則, 當銘俊明, 1996, 米須地下夕鹽水侵入量の檢討, 水と土, 제106호, 62-71
- 이상일, 김병찬, 김수민, 2004, 지표수-지하수를 연계한 수자원의 효율적 이용, 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 37(10), 789-798.
- 장의웅, 정형재, 부성안, 송성호, 2001, 댐 그라우팅 설계 및 시공 실무지침서, p.19
- 赤井浩一, 1983, 中國陝西省富平地下ダム試驗工事について, 土と基礎, Vol.31, No.3, 45-47
- 정교철 역, 1998, 굴착공사와 지하수, 도서출판 엔지니어스, p.240-255

- 천병식, 1998, 최신 지반주입(이론과 실제), 원기술, p.175-300
- 한국건설기술연구원, 2007, 지표수 수문성분 해석시스템 개발, 384
- 환경부, 2023, 다단식 Sand 댐-취수원 연계 활용고도화기술 개발 최종보고서.
- Arnold, J. G., Allen, P. M. and Bernhardt G., 1993, A comprehensive surface-groundwater model., *Journal of Hydrology*, 142, 47-69.
- Eckhardt, K., Haverkamp, S., Fohrer, N. and Frede, H.G., 2002, SWAT-G a version of SWAT99-2 modified for application to low mountain range catchments, *Physical and Chemistry of the Earth, Oceans & Atmosphere*, 27, 641-644.
- Fohrer, N., Hverkamp, S., Eckhardt, K. and Frede, H.G., 2001, Hydrologic response to land use changes on the catchment scale, *Physics and Chemistry of the Earth B: Hydrology, Oceans & Atmosphere*, 26, 577-582.
- Hanson, G. and Nilsson, A., 1986, Groundwater Dams for Rural Water Supplies in Developing Countries, *Groundwater*, 24(4).
- Hanson, G., Nilsson, A., 1986, Ground-Water Dams for Rural-Water Supplies in Developing Countries, *GROUND WATER*, Vol.24, No.4, 497-506
- Hatem, A., 2016, Experimental investigation about the effect of sand storage dams on water quality. *J. Pure Appl. Sci.*, Vol. 28, pp. 485-491.
- Hoogmoed, M., 2007, Analyses of impacts of a sand storage dam on groundwater flow and storage: Groundwater flow modeling in Kitui district, Kenya, Master Thesis, VU University Amsterdam, 20-28.
- Hut, R., Ertsen, M., Joeman, N., Vergeer, N., Winsemius, H., van de Giesen, N., 2008, Effects of sand storage dams on groundwater levels with examples from Kenya, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33(1-2), 56-66.
- Kent, P. G. and Dudiak, T. A., 2001, Wisconsin Water Law - A Guide to

Water Rights and Regulations, 2nd ed.

- Kim, G.B., Chung, I.M., Ha, G.C., 2020, GW-SMART Research project. Water Journal, July, 2020, pp.32-39. (In Korean)
- Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S. and Arnold, G. J., 2008, Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model, Journal of Hydrology, 356, 1-16.
- Kim, S.M., Lee, S.I., Kim, B.C., 2004, Effective use of water resources through conjunctive use-(2) application. Korea Water Resour. Assoc., 37, 799-812. (In Korean)
- Lal, A. M., Belnap, M. and Van Zee, R., 1998, Simulation of overland and groundwater flow in the everglades national park, Proceedings of the international water resources engineering conference in memphis, Tennessee, Volume one, American Society of Civil Engineers, 610-615.
- Seo, J., Lee, D., Lee, G., Kim, J., Kim, K.S., Lim, K.J., 2018, Assessment and improvement of monthly coefficients of Kajiyama formular on climate change. J. Korean Soc. Agric. Eng., 60, 81-93. (In Korean)
- Sophocleus, M. A., Koelliker, J. K., Govindaraju, R. S., Birdie, T., Ramireddygari, S. R. and Perkins S. P., 1999, Integrated numerical modeling for basin-wide water management: the case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas, Journal of Hydrology, 214, 179-196.
- Sudicky, E. A., Therrien, R., Park, Y. J., McLaren, R. G., Jones, J. P., Lemieux, J. M., Brookfield, A. E., Colautti, D., Panday, S. and Guvanasen, V., 2005, On the challenge of integrated surface-subsurface flow and transport modelling at multiple catchment scales, Geological Society of America Abstracts with Program, 37(7), 28.
- Van Griensven, A. and Bauwens, W., 2003, Multiobjective antocalibration for semidistributed water quality models, Water Resources Research, 39, 1348-1356.

Weber, A., Fohrer, N. and Müller, D., 2001, Longterm changes of land use in a mesoscale watershed due to socio-economic factors-effects on landscape functions., *Ecological Modelling*, 140, 125-140.

Xiong, L., Guo, S., 1999, A two-parameter monthly water balance model and its application. *J. Hydrol.*, 216, 111-123.

今成康忠, 戸田完一, 稚野武文, 伊?不二夫, 원위치교반공법을 이용한 지하댐 지수벽의 시공, 토목기술(1998, 번역 기술자료), 제6권 제1호, 31-37

吉田健治, 2000, 地下ダムの技術的特徴と課題について, *JIID연구보고서*, 제21호, 61-74

서지자료

1. 출판물 고유번호	2. 사업분류 주요사업	3. 발행일 2023.12.31	
4. 제목/부제 하이브리드형 지하댐-샌드댐 연계 물공급체계 구축 기술 개발		5. 연구수행기간 2023. 1. 1 - 2023.12.31.	
6. 연구수행기관 한국건설기술연구원			
7. 연구 수행자 정일문, 김경탁, 김철겸, 이정우, 김주훈, 최윤석, 장선우, 이정은, 김길호, 오정선, 최천규, 김민규, 김일환, 히요 하티아 와레, 제노비아 탈푸루, 타레켄 멘기스투, 우소영			
8. 수행기관 주소 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283(대화동)		9. 연구의뢰기관 및 주소 해당없음	
10. 공동 수행기관 해당없음		11. 계약 또는 인가번호 해당없음	
12. 초 록 본 연구는 세계 최초 샌드댐-지하댐 연계 구조물 개발로 건조지역, 도서지역, 계곡지역에서 활용하고, 상수도미보급지역 등 물복지 사각지역 맞춤형 물공급 체계 구축 기술력 확보를 목표로 진행되었다. 또한, 통합 수문해석 기반의 분석 및 수원 연계 통합 물 이용·관리 기술력 확보하고, 우리나라 상수도 미보급 지역 전체 3%에 해당하며 가뭄시 급수차에 의존하는 산간지역 물 부족 해소, 지속가능 수자원 이용에 따른 사회적 비용 절감할 수 있으며, KICT 보유 물순환 해석기술과 샌드댐-지하댐 설계시공기술의 기술이전 및 보급화를 통한 사회 물문제 해결에 기여할 수 있을것으로 판단하였다.			
13. 키워드 샌드댐, 지하댐, 물공급, 물복지, 하이브리드			
14. 기타사항 해당없음			
15. 비밀구분 Unclassified	16. 총면수 〈표지 포함〉	17. 발행부수	18. 가격

Bibliographic Data

1. Report ID	2. Project Classification Internal Research Project	3. Report Date December 31. 2023	
4. Title Development of Hybrid Sand Dam and Underground Dam for Water Supply in Water Shortage Areas		5. Research Period 2023. 1. 1 ~ 2023. 12. 31	
6. Performing Organization Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology			
7. Authors Chung, Il-Moon, Kim Kyung-Tak, Kim, Chul-Gyum, Lee, Jeongwoo, Kim, Joo-Hun, Choi Yun Seok, Chang, Sun-Woo, Lee, Jeong Eun, Kim, Gil-Ho, Oh, Jung-Sun, Choi, Cheon-Kyu, Kim, Min-Gyu, Kim, il-hwan, Hiyaw Hatiya Ware, Zenobia Talpur, Mengistu Tarekegn Dejen, Woo, Soyoung			
8. Performing Organization Address Deahwa-dong, 283, Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Republic of Korea		9. Sponsoring Agency None	
10. Joint Research Organization None		11. Contract or Grant No. None	
12. Abstract This study was conducted to secure technology to establish a customized water supply system for water welfare square areas such as dry areas, islands, and valley areas by developing the world's first sand dam-underground dam-linked structure. In addition, it was determined that it could contribute to solving social water problems through the transfer and dissemination of technology to use and manage integrated water in water supply areas such as integrated hydrological analysis based on analysis and water supply connection, and to secure technology for water supply in water supply areas in Korea, which account for 3% of the total water supply areas that do not supply water in Korea, and reduce social costs by using sustainable water resources in case of drought.			
13. Keywords Sand dam, Underground Dam, Water Supply, water welfare, Hybrid			
14. Supplementary Notes None			
15. Security Class Unclassified	16. No. of Pages 〈표지 포함〉	17. Circulation	18. Price

주의사항

1. 이 보고서는 한국건설기술연구원에서 수행한 주요사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 한국건설기술연구원의 주요사업 연구결과임을 밝혀야 합니다.

KICT 2023-144

하이브리드형 지하댐-샌드댐 연계

물공급체계 구축 기술 개발

- 발행일 / 2023. 12.. 31
 - 발행인 / 정일문
 - 발행처 / 한국건설기술연구원
경기도 고양시 일산서구 고양대로 283번지
TEL : (031) 9100-114
www.kict.re.kr
 - 인쇄처 / ○○출판사
-