

| | | | |
|---|---|---|--|
| 제안과제명 | 부산시 안전한 먹는 물 추가 확보 가능성 타진을 위한 회동수원지 장기유출 분석 | | |
| 연구기간 | 2024년 3월 ~ 2024년 11월 (9개월) | | |
| 연구비 | 30,000천원 | | |
| 연구사업 구분 | 연구분야 및 세부연구분야(해당사항 1군데 ■표) | | |
| | 하폐수 처리 | 상수도 및 정수 | 수질관리 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 정책연구 <input type="checkbox"/> 조사연구 <input type="checkbox"/> 기술개발연구 <input type="checkbox"/> 산학연협력연구 (해당사항 1군데 ■표) | <input type="checkbox"/> 물리화학적 처리 <input type="checkbox"/> 생물학적 처리 <input type="checkbox"/> 막처리 및 재이용 <input type="checkbox"/> 하수처리 시스템 <input type="checkbox"/> 질소 및 인 제거 <input type="checkbox"/> 하폐수 처리 기타 <input type="checkbox"/> 축산폐수 처리 <input type="checkbox"/> 기타 | <input type="checkbox"/> 막분리 <input checked="" type="checkbox"/> 정수처리 및 수질관리 <input type="checkbox"/> 고도정수처리 <input type="checkbox"/> 상수관망 <input type="checkbox"/> 기타 | <input type="checkbox"/> 수질오염 <input type="checkbox"/> 수질모델 <input type="checkbox"/> 수질관리기타 <input type="checkbox"/> 기타 |
| | 자연환경분야 | 폐기물관리 | 대기관리 |
| | <input type="checkbox"/> 환경정책 <input type="checkbox"/> 생활환경 <input type="checkbox"/> 건강위해성 <input type="checkbox"/> 생태관리 <input type="checkbox"/> 환경오염사고대비 <input type="checkbox"/> 소음관리 <input type="checkbox"/> 청정기술개발 <input type="checkbox"/> 기타 | <input type="checkbox"/> 매립 및 침출수 처리 <input type="checkbox"/> 슬러지 처리 <input type="checkbox"/> 소각 및 열분해 <input type="checkbox"/> 재활용 및 자원화 <input type="checkbox"/> 음식물 쓰레기 처리 <input type="checkbox"/> 폐기물 관리 기타 | <input type="checkbox"/> 대기오염측정 및 관리 <input type="checkbox"/> 대기오염모델링,위해도 <input type="checkbox"/> 대기오염 처리기술 <input type="checkbox"/> VOCs 및 악취 처리 <input type="checkbox"/> 기타 |
| | 토양지하수오염 | 기후변화대응분야 | 기타환경분야 |
| | <input type="checkbox"/> 오염토양처리관리 <input type="checkbox"/> 폐광토양오염,지하수처리 <input type="checkbox"/> 지하수 환경관리 <input type="checkbox"/> 기타 | <input type="checkbox"/> 온실가스배출량산정 <input type="checkbox"/> 온실가스배출량감축연구 <input type="checkbox"/> 배출권거래 <input type="checkbox"/> 기타 | <input type="checkbox"/> 기타 |
| 연구의 목적 및 필요성 | ○ 연구 배경 및 필요성 - 회동수원지는 부산시의 유일한 자체 취수원이며, - 2021년 6월 24일 낙동강 유역 물관리위원회에서는 낙동강 취수원 다변화의 일환으로, 부산시의 맑은 물 공급을 위해 회동수원지를 계량하여 10만㎥/일을 확보하는 것으로 의결 - 그러나 회동수원지에 유입되는 수량이 부족하여 10만㎥/일을 안정적으로 취수하기는 어려우며, 현재도 갈수기에는 낙동강 원수를 50% 이상 도수하여 부족한 저수량을 보완 중 | | |

| | |
|------------------------------|--|
| <p>연구의 목적 및 필요성 (계속)</p> | <ul style="list-style-type: none"> - 2023년 부산시는 회동수원지의 중요성을 인식하여, 회동수원지를 대상으로 [강변여과수 타당성 조사 및 기본계획 수립 용역] 및 [회동상수원보호구역 관리대책 수립 용역] 등을 발주하여 회동수원지에 대한 관리 강화를 시도하고 있음. - 그러나 회동수원지 자체 유역에서 흘러 들어오는 유입 수량에 관한 연구가 부족함에 따라 기후 변동에 따른 계절 및 연간 유입량 수준이 아직 명확히 밝혀지지 않아, 수질관리를 비롯한 회동수원지의 다양한 관리정책 수립뿐만 아니라 회동수원지가 부산시의 안전한 먹는 물 추가 확보에 도움이 될 수 있을지에 대한 기본적인 정보가 부족한 실정 <p>○ 연구의 목적</p> <ul style="list-style-type: none"> - 회동저수지의 과거 장기간 일 유입량 추정 - 회동저수지의 월별 유입량 및 연간 변동성 추정 - 주요 가뭄 시의 취수 가능량 추정 <p>○ 국내외 선행연구 및 동향 기술</p> <ul style="list-style-type: none"> - 회동수원지와 관련된 선행연구는 주로 수질관리에 관한 연구가 많이 진행되었음; 부산시 회동저수지 집수 분지 내 국도 도로변 퇴적물의 중금속 오염평가(자원환경지질, 2006), 부산시 회동저수지 집수 분지 내 국도 도로변 퇴적물의 미량원소 오염 및 존재 형태(한국지하수토양환경학회지, 2006), 회동저수지 호저 퇴적물의 미량원소 오염 및 수직적 분산 특성(자원환경지질, 2007) 등. - 회동수원지를 대상으로 수량과 관련된 연구가 진행된 바는 없으며, 이는 회동수원지 유입량에 대한 수문자료가 부족하여 연구 자체가 불가능한 것도 하나의 원인이 될 수 있음. - 그러나, 최근 인공위성 자료의 접근성 향상 및 인공지능의 도입 등으로 회동수원지와 같은 미계측 유역의 유입량을 추정할 수 있는 토대가 마련되고 있음; Ecohydrologic model with satellite-based data for predicting streamflow in ungauged basins (Science of The Total Environment, 2023), Streamflow predictions in ungauged basins using recurrent neural network and decision tree-based algorithm: application to the southern region of the Korean peninsula (Water, 2023) 등. |
|------------------------------|--|

○ 연구 목표

Key Point

- 회동저수지의 과거 장기간 일 유입량 추정
- 회동저수지의 월별 유입량 및 연간 변동성 추정
- 주요 가뭄 시의 취수 가능량 추정

○ 연구의 추진 전략 및 방법

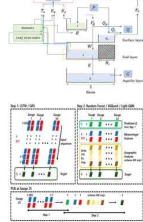
연구 추진 핵심 전략

- 실증 적용 전략: 불확실성을 고려하여 최소 3개 이상의 장기 유출 모형 적용 (PEHM, TANK, AI-model 등)
- 성과 연계 전략: 현재 진행 중인 용역팀과 연계하여 성과 활용 체계 구축

주요 연구내용

실증 적용 전략

미계측 유역의 불확실성을 고려한 multi-model 앙상블 적용



Parsimonious Eco-Hydrologic Model

- 위성 정보를 이용하여 미계측 유역의 일 유출 정보를 추정
- Choi, J., Kim, U. and Kim, S. (2023) Ecohydrologic model with satellite-based data for predicting streamflow in ungauged basins, Science of the Total Environment, 166617, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166617>

TANK

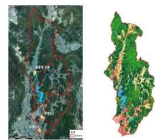
- 인근 지역(밀양댐 유역) 매개변수 전이를 이용한 일 유출 정보 추정
- 김령은, 원정은, 최정현, 이육정, 김상단 (2020) TANK 모형의 매개변수 추정을 위한 베이지안 접근법의 적용: MCMC 및 GLUE 방법의 비교, 한국물환경학회지, 36(4), pp. 300-313.

AI-model

- multi-basins learning을 통한 미계측 유역의 일 유출 정보 추정
- Won, J., Seo, J., Lee, J., Choi, J., Park, Y., Lee, O. and Kim, S. (2023) Streamflow predictions in ungauged basins using recurrent neural network and decision tree-based algorithm: application to the southern region of the Korean peninsula, Water, 15(13), 2485, <https://doi.org/10.3390/w15132485>



성과 연계 전략



- 강변여과수 타당성 조사 및 기본계획 수립 용역 (안정적 청정원수에 대한 타당성을 검토하여 사업의 기본계획을 수립)
→ 지형고도, 토양도, 토지이용도 등 회동수원지 유역특성 GIS 자료 연계
- 회동 상수원 보호구역 관리대책 수립용역 (회동수원지 수질관리대책을 수립하여 상수원보호구역 단계적 조정안 마련)
→ 지상관측자료 연계 및 수질모델링을 위한 기상조건별 수문모의자료 제공



연구 추진 방법

단계별 수행 계획

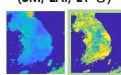
기초자료 수집 및 정리

기상 자료
강수량 / 기온
상대습도 / 풍속
일사량 / 이슬점 등

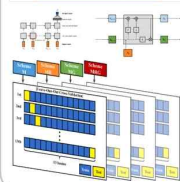
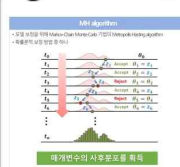


지형 자료

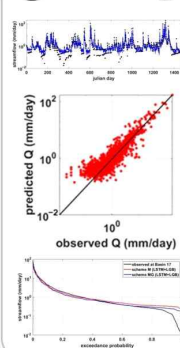
DEM / 토양도
토지이용도
위성자료
(SM, LAI, ET 등)



모델 매개변수 추정 및 학습



장기간 유출 모의



유입량 변동성 분석

다양한 기후 조건에 대한 유입량의 월간/연간 변동성 분석

| | |
|------|--------------------|
| 지점 | 회동 수원지 |
| 기후조건 | 평년 / 다우해 / 과우해 |
| 모의기간 | 1983 ~ 2023년 (40년) |
| 계산간격 | 1-day |
| 취수 | 이수안전도 고려 |

회동 수원지 장기간 유출분석
↓
부산시의 안전한 먹는 물 추가 확보 가능성 타진

주요 연구내용
(계속)

○ 주요 연구내용

- 미계측 유역인 회동수원지의 유입량을 예측하기 위한 기본 체계

- 회동수원지는 장기간의 수문자료가 갖춰져 있지 않은, 소위 말하는 미계측 유역임.
 - 따라서, 전통적으로 사용되는 모형화 과정을 진행할 수 없으므로, 지역화 과정이라는 절차를 이용하여 유입량을 모의
- 지역화 과정
 - 장기간의 수문자료를 이용할 수 있는 인근 유역(예: 밀양댐 유역)을 대상으로 수문모형의 매개변수를 추정
 - 추정된 매개변수는 회동수원지를 대상으로 하는 수문모형의 매개변수와 같다고 가정
 - 회동수원지의 기상자료와 유역 특성 자료, 그리고 상기 전이된 매개변수를 이용하여 회동수원지의 장기간 유입량 추정
- 인공위성자료를 이용한 미계측 유역의 유출량 추정
 - 최근 Choi et al. (2023)은 우리나라 유역을 대상으로 기상관측자료와 인공위성자료만을 이용하여 미계측 유역의 유출량을 추정할 수 있는 생태수문모형인 PEHM을 제안
 - ※ Choi, J., Kim, U. and Kim, S. (2023) Ecohydrologic model with satellite-based data for predicting streamflow in ungauged basins, Science of The Total Environment, 166617, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166617>
 - 전통적인 지역화 과정과 비슷한 유출 예측 정확도를 구현하였으며, 특히 갈수기 때의 유량 예측은 전통적인 지역화 과정보다 더 우수한 성능을 보임.
- AI를 이용한 미계측 유역의 유출량 추정
 - 최근 Won et al. (2023)은 미계측 유역의 유출량 추정을 위하여 딥러닝과 기계 학습을 연계한 mulit-basin learning 기법을 제안
 - ※ Won, J., Seo, J., Lee, J., Choi, J., Park, Y., Lee, O. and Kim, S. (2023) Streamflow predictions in ungauged basins using recurrent neural network and decision tree-based algorithm: application to the southern region of the Korean peninsula, Water, 15(13), 2485. <https://doi.org/10.3390/w15132485>
 - 계측된 다양한 유역으로부터의 자료를 모두 이용하여 AI-모형을 학습한 후 미계측 유역에 적용한 결과, 경쟁력이 있는 유출 예측 성능을 보임.
- 이에 본 연구에서는 1) 전통적인 지역화(TANK 모형), 2) 위성자료를 이용한 지역화(PEHM), 3) AI를 이용한 지역화(AI-모형)을 각각 적용하여 회동수원지의 장기간 유입량을 모의
 - 모의 결과로부터 회동수원지 유입량의 월간/연간 변동성 및 과거 주요 가뭄 사상에 대한 회동수원지 저수량의 취수 가능량을 분석

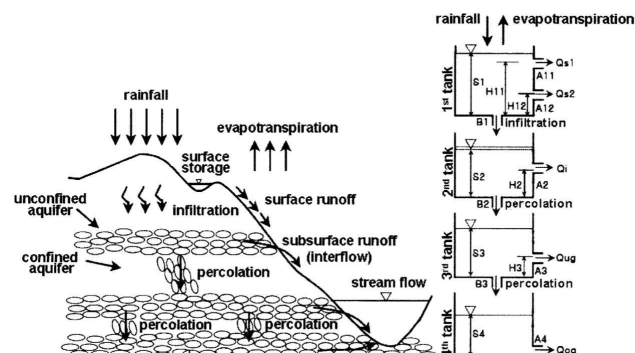
주요 연구내용
(계속)

- 기초자료 수집 및 정리

- 본 연구에서는 하천 유출자료가 있는 다양한 유역(20개 이상)을 선택
 - 모형 매개변수 추정 및 훈련/테스트를 위해 최소 10년 이상의 기상 자료와 하천 유출 자료를 확보
 - 기상청으로부터 각 유역에 영향을 미치는 관측된 일-단위 강수 및 기상요소들을 수집(최저 및 최고기온, 풍속, 이슬점)하여 티센망을 이용하여 유역 공간 평균 시계열을 산출
 - 모형 입력을 위한 잠재증발산은 일 기상요소들로부터 Penman & Monteith 방법을 이용하여 산정
- 연구 유역들의 curve number, 포화투수계수, 불투수율 등을 추출하기 위해 농촌진흥청과 환경부로부터 DEM, 토양도 및 토지이용도를 수집할 계획
- 본 연구에서는 수문 프로세스 모형화와 관련된 매개변수 보정에 큰 영향을 미치는 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)의 LAI(엽면적지수)를 선택
 - LAI는 Land Processes Distributed Active Archive Centre(LP DAAC)에서 제공되는 Level-4 MODIS global LAI(MOD15A2H) 제품을 이용
 - MODIS 자료의 공간해상도는 500m이며, 시간해상도는 8일
 - 위성 영상의 픽셀값을 관심 유역에 할당하기 위해 유역 경계를 교차하는 픽셀에 대해 면적 가중 평균을 사용

- TANK 모형

- 다양한 연구자들이 제안한 수많은 형태의 TANK 모형이 있음.
 - 4개의 저장 탱크와 5개의 유출공, 3개의 침투공이 있는 4단 탱크로 구성된 모형을 적용(환경부 수자원장기종합계획에 적용된 모형)

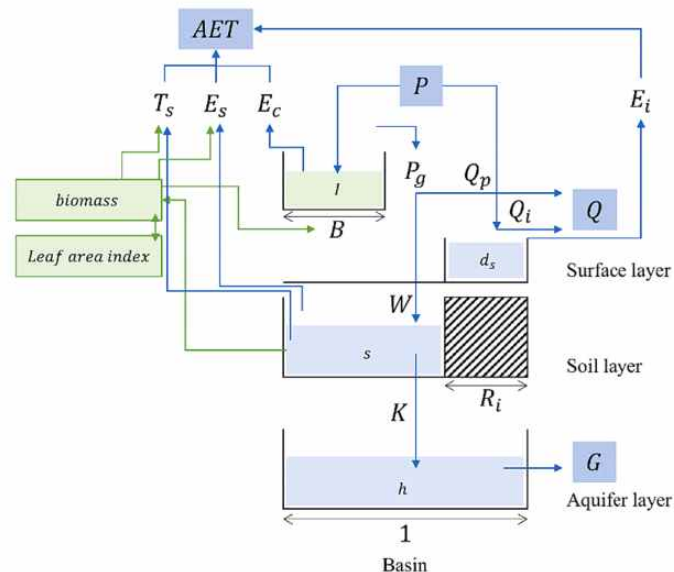


<그림> TANK 모형의 개념도

주요 연구내용
(계속)

- 간결한 생태수문모형(PEHM)

- 본 연구에서는 수직 1차원 soil water balance process를 반영한 Choi et al.(2023)에 의해 제안된 개념적 생태수문모형을 이용
 - 이 모형은 유역이 표면층(또는 차단층), 토양층 및 대수층의 세 층으로 구성된 것으로 가정
- MODIS LAI를 보정에 이용하기 위해서는 식생 모의가 필요
 - LAI는 단위 지표면당 잎의 면적으로 정의되며,
 - 식생과 증발산 사이의 상호작용을 고려하기 위해 도입
 - 식생의 성장은 에너지, 물, 영양소에 따라 달라지지만, 이 모형은 물 사용 효율 개념을 기반으로 구성



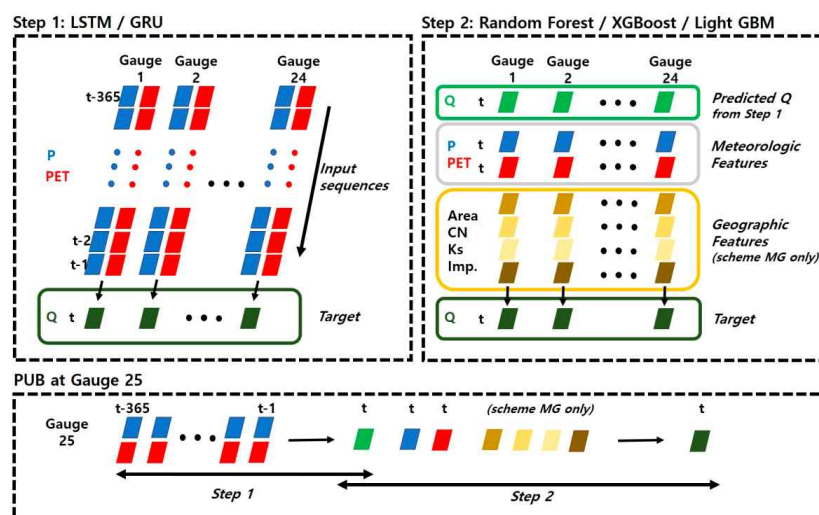
<그림> PEHM의 구성도

- AI-모형

- 본 연구의 목적은 자료 기반 모델을 이용하여 미계측 유역인 회동수원지의 유입량을 예측하는 것임.
 - 미계측 유역의 경우에는 관측자료가 없으므로 그 유역에 대한 맞춤형 학습이 불가능
 - 자료 기반 모델은 훈련 데이터로부터 전체 수문 프로세스를 학습
 - 방대한 훈련 데이터 세트는 모델이 더 일반적이고 추상적인 패턴을 보이는 입출력 관계를 학습하는 데 도움이 됨.
 - 따라서 모델이 강우-유출 프로세스를 더 명확하게 학습하기 위해서는 사용할 수 있는 모든 유역으로부터의 데이터를 모두 이용하는 것이 바람직

주요 연구내용
(계속)

- Leave-one-out cross-validation(LOOCV) 검증 방법
 - 적용할 수 있는 모든 유역의 자료를 통합하여 하나의 자료 기반 모델을 학습시키는 전략
 - 적용할 수 있는 유역 중 특정 한 개 유역을 미계측 유역으로 가정한 후, 나머지 유역들로부터의 자료를 이용하여 모델을 학습
 - 학습된 모델을 이용하여 가정된 미계측 유역의 하천 유출 예측성능을 조사
 - 이러한 절차를 모든 유역이 검증될 때까지 반복
- Recurrent Neural Networks(RNN)와 Decision Trees(DT) 기반 알고리즘이 결합한 2단계 모형화 전략
 - 먼저 RNN 모델 단계에서는 예측하고자 하는 관측 site i 에서 t -day의 하천 유출 자료 Q_t^i 를 target으로 두고, $Q_{t-1}^i, Q_{t-2}^i, \dots, Q_{t-365}^i$ 를 입력자료로 하는 네트워크를 구성
 - 즉, $Q_t = f(Q_{t-1}, Q_{t-2}, \dots, Q_{t-365})$
 - 다시 말하면, 1단계인 RNN 모델 단계는 하천 유출의 시간적 패턴을 학습하는 단계
 - 2단계에서는 하천 유출의 시간적 패턴만 훈련함으로써 발생하는 오류를 줄이기 위해, t -day의 기상자료와 1단계 모델의 출력, 그리고 지형정보 및 가능하다면 토양수분과 같은 위성정보까지 이용하여 t -day의 유출자료를 예측하는 DT 기반 모델을 구성



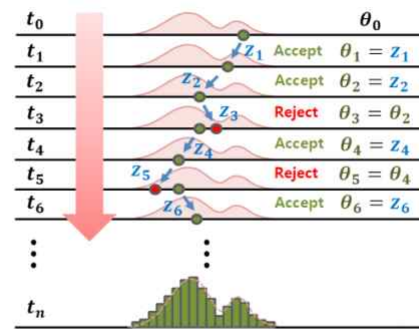
<그림> AI-모형의 개념도

주요 연구내용
(계속)

- TANK 및 PEHM의 매개변수 추정

- 수문모형인 TANK 모형과 생태수문모형인 PEHM의 매개변수는 Markov Chain Monte Carlo 표본 추출을 위한 알고리즘 중 하나인 Metropolis-Hastings 알고리즘을 이용

- 모델 보정을 위해 Markov-Chain Monte-Carlo 기법의 Metropolis-Hasting algorithm
- 확률론적 보정 방법 중 하나



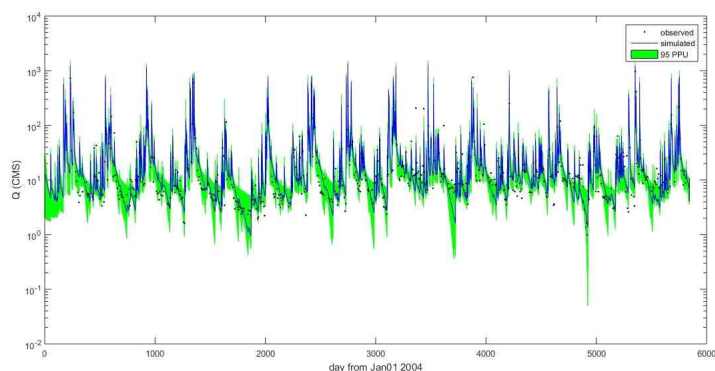
매개변수의 사후분포를 획득

<그림> MH 알고리즘의 개념도

- 불확실성 분석
 - MH 알고리즘을 이용하여 생성된 매개변수의 사후 확률분포를 이용하여 최종적으로 모의된 회동수원지 유입량의 불확실성을 분석

- 장기 일 유출 모의

- 회동저수지 과거 장기간 일 유입량 추정
 - 회동저수지의 월별 유입량 및 연간 변동성 추정
 - 주요 가뭄 시의 취수 가능량 추정



<그림> 장기간 유입량 모의 및 불확실성(95% 신뢰구간) 예시

| | |
|-------------------------|---|
| <p>주요 연구내용 (계속)</p> | <p>○ 연구 결과의 기대 및 파급효과</p> <ul style="list-style-type: none"> - 회동수원지의 자체 유입량을 정량화함으로써 얻게 되는 기대효과는 아래와 같음. - 회동수원지의 유입 부하량 산정 시 유량 불확실성이 줄어들어 상수원보호구역 관리대책 수립 시의 정확성 확보 - 회동수원지 유역으로부터의 자체 유입량의 불확실성이 줄어들어 강변여과수를 포함한 회동수원지에서의 상시적인 안정적인 청정원수 취수에 대한 다양한 대안 검토 시에 정책 수립의 정확성 확보 |
|-------------------------|---|

연구성과
활용방안

○ 연구 성과 지표 및 목표

| 성과 지표 및 목표 |
|--|
| 1. 지역 현안 환경문제 해결 근거 제시 (회동수원지 자체 유입량 정량화) |
| 2. 국내 학술지 논문 출판 |
| 3. 국내 학술대회 발표 |

○ 연구성과 활용내용(계획)

| 활용내용(계획) |
|---|
| <div> <div>- 지자체 활용부서</div> <div> <div>1) 부산광역시 맑은물정책과</div> <div>강변여과수 타당성 조사 및 기본계획 수립에 활용</div> <div>부산시 취수원 다변화 정책 대안 마련에 활용</div> </div> <div>2) 부산광역시 상수도사업본부</div> <div>회동상수원보호구역 관리대책 수립에 활용</div> </div> <div> <div>- 활용 대상 지역</div> <div>부산시 회동수원지 상류 유역 및 명장정수장 급수 지역</div> </div> <div> <div>- 활용 가능 기간</div> <div>기후 변화 등을 고려하여 2030년까지는 연구에서 제시된 수치적인 결과를 직접 활용할 수 있을 것으로 전망</div> </div> |