

개방형 혁신 R&D 연구주제 제안서

[연구개발계획서 요약]

사업명	K-water 2기 1차 개방형 혁신 R&D							
과제유형	<input checked="" type="checkbox"/> 사업화 과제 <input type="checkbox"/> 기술이전 과제							
개발분야	<input type="checkbox"/> 초격차기술 <input checked="" type="checkbox"/> 글로벌선도기술 <input type="checkbox"/> 미래기술 <input type="checkbox"/> 현안·고유기술							
개발기술群	<input type="checkbox"/> 물관리 DT <input type="checkbox"/> AI 정수장 <input type="checkbox"/> 스마트관망관리(SWNM) <input type="checkbox"/> 해수담수화 <input type="checkbox"/> 초순수 <input type="checkbox"/> 수열 <input type="checkbox"/> 그린수소 <input checked="" type="checkbox"/> 조력 <input type="checkbox"/> 수상태양광 <input type="checkbox"/> 지하수저류댐 <input type="checkbox"/> 수자원위성 <input type="checkbox"/> 수도 자산관리 <input type="checkbox"/> 기후위기 안정적 대응 <input type="checkbox"/> 디지털 기술 고도화 <input type="checkbox"/> 물인프라 혁신 <input type="checkbox"/> 수원확보 <input type="checkbox"/> 첨단용수 <input type="checkbox"/> 물에너지 <input type="checkbox"/> 용수공급망 <input type="checkbox"/> 물환경 <input type="checkbox"/> 친수도시							
과제명	조력발전소의 최적 운영 및 누적 발전량 극대화를 위한 AI 기반 통합 프로그램 개발							
연구기관	한양대학교 산학협력단							
연구책임자	성명(한문)	정 면 걸 (鄭勉杰)						
	소속 및 부서명	의류학과(컴퓨터소프트웨어학부 겸직)			직위	조교수		
	연락처	전화	02-2220-1192		휴대폰	010-2867-2717		
		E-mail	wjdausrjf@hanyang.ac.kr		Fax			
공동연구기관	라온프렌즈				참여기업			
연도별 연구개발비 소요 예상액 (단위 : 천원)								
구분	공사 지원금	기업부담금			공사외 지원금	상대국 부담금	합계	참여 연구원수
		현금	현물	소계				
1차년도	171,000	5,700	51,300	57,000	-	-	228,000	12
2차년도	171,000	5,700	51,300	57,000	-	-	228,000	12
보증목표 달성기간	38,000	1,267	11,400	12,667	-	-	50,667	12
총계	380,000	12,667	114,000	126,667	-	-	506,667	

요약서 (연구개발목표 및 내용)

연구개발 개요	<p>1. 기술적 배경</p> <p>전 세계적으로 탄소중립 실현을 위한 해양에너지 등의 신재생에너지 개발이 가속화되고 있으며, 그중 조력발전은 대규모 발전이 가능하고 예측 가능한 신재생에너지원으로 주목받고 있음. 조력발전은 바다와 인접한 저수지에 조석간만의 차를 이용한 수차발전기를 설치하여 전력을 생산하는 방식으로, 해수위(조위) 변화와 저수지의 체적 및 수위 변화가 발전량에 직접적인 영향을 받음. 국내에서는 세계 최대 규모의 시화조력발전소(254MW)를 운영 중이며, 해외에서도 영국의 Mersey강, Swansea만, 호주 Derby만 등에서 대규모 조력발전 프로젝트를 계획.</p>
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>그림1. 시화조력발전 단지 전경</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>그림2. 시화조력발전 위성사진</p> </div> </div>

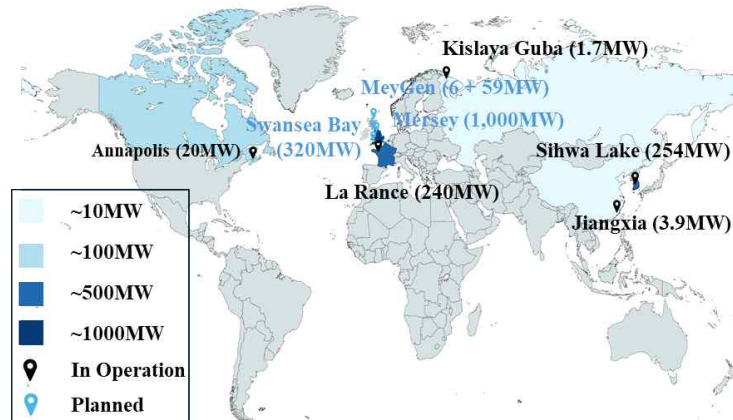


그림 3. 세계 조력발전소 현황 및 계획

2. 필요성

시화호 **조력발전 운영**을 통해 해수-호수 간 수위 변동과 발전량 관계에 대한 풍부한 실증자료가 축적되었으나, 시화호는 단류식/창조식 발전이기에 낙조식, 복류식 발전에 대한 데이터는 미흡하고, 매년 퇴적 등으로 인해 변화하고 있는 **호수 내 체적**을 조력발전 운영에 반영하지 않고 있음. 현재까지는 이러한 조건을 고려하지 않고 수위 및 발전량 예측을 진행하였으며, 운전조건 및 **조력발전소의 운전 특성**을 종합적으로 고려하여 최적화된 전략을 도출하는 소프트웨어 및 체계는 부재한 상황임. 조력발전은 최적 운전에 따른 발전량에 따라 효율 편차가 크기에, 최적 운전점에서 발전이 이루어지지 않으면 기대보다 적은 발전이 이루어질 수 있음.

이에 따라 실 운영 데이터 및 환경적 요인 등을 고려한 **AI 기반 분석**을 활용하여 **호수 내 체적** 및 **최적 발전 운영**, 운전방식 등을 고려하여 **누적 발전량을 극대화**하는 AI 기반 통합 프로그램을 개발할 필요가 있음.

최종목표



그림 4. 연구개발 개요

	<p>수위와 저수지 체적 변동을 모두 고려하여 조력발전소의 최적 운용전략과 누적 발전량을 극대화할 수 있는 기술을 개발. 해수의 조석 변동과 방조제 내부 호수의 수위 변화를 연계 모사하고 발전기 작동 특성을 반영하는 조력발전 설계 프로그램을 구축. 해당 프로그램에는 창조식/낙조식/복류식 등 다양한 운전방식과 양수 기능을 고려한 모델링 기능이 포함되며, AI 기반의 발전량 최적화 알고리즘을 구현하여 주어진 조건에서 최대 누적 발전량을 얻을 수 있는 운전 제어전략을 자동으로 도출. 최종적으로 설계 프로그램과 알고리즘을 검증하여 조력발전 설계용 소프트웨어 시제품 및 매뉴얼을 완성하고, 향후 실증 및 사업화에 활용할 기반을 마련.</p> <p>※ 과제유형: 사업화 과제</p> <p>※ 보증목표:</p> <p>1차년도: 특허출원 1건(조력발전 운전 최적 운영 알고리즘 기반 시스템)</p> <p>2차년도: 특허등록 1건(1차년도 출원 연계), 기술이전협약 1건</p> <p>종료 후 2년 이내: 기술이전 기반 사업화(기술료 납부) 1건</p>
<p>연구내용 및 범위</p>	<p>1. 운전조건 변화에 따른 수위 및 발전 특성 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> - 조력발전은 해수위 변화와 저수지의 체적/수위 변화가 직접적으로 발전량에 영향을 미치는 구조이므로, 발전기 운전 상황에 대한 수위 변화 검토 및 분석을 위해서는 운전조건 변화에 대한 상관관계 분석이 필요함. 이를 위해 본 연구는 해수위 주기와 방조제 내부 저수지의 체적 및 수위 사이의 관계를 분석. - 기존에 강우로 인한 호수 내 수량 증가를 호수위 변동량으로 변환하여 반영하는 COSFIM(홍수유출모형)이 호수위-해수위 예측과 연계되어 사용되고 있으며, 이를 확장하여 추가적인 외부 요인을 고려한 호수 내 체적 분석. - 부유물 퇴적 등으로 인해 발생하는 저수지 내 체적 변동은 위성사진을 활용한 AI 기법인 CNN 기반의 이미지 분석이나 연도별 해수/호수위 데이터로 저수지의 저장용량을 역산하는 방법으로 호수 내 체적의 변동을 검토. - 모델은 시화호 실측 데이터를 바탕으로 해수위-호수위-유량-시간 관계에 따른 발전기 운전(발전기 대수 운전, 부분부하 운전 등) 특성을 분석. 동일한 총 발전 용량을 목표로 할 때, 발전기의 운전 전략에 따라 효율과 발전량은 다르게 나타날 수 있으며, 특히 부분부하 운전과 다수기 병렬 운전의 경우 효율 차이가 발전량 및 경제성에 큰 영향을 미침. 따라서 발전기 운전 특성과 수차의 특성 곡선(효율-유량-낙차)을 고려하여 해수위 및 호수위 낙차-유량에 따른 발전 가능 에너지를 모델링 및 이를 통해 시간당 발전량, 시간별 유효낙차, 수위의 작동 가능 범위, 다양한 운전 대수 및 부하 조합에 대한 시나리오별 발전량, 발전 효율 등을 정량적으로 평가. - 조력발전 특성 분석 과정에서, 실제 조력발전 운전 과정에서 발생하는 비정상 운전조건(캐비테이션, 진동, 수위 부족 등)을 함께 고려하여 발전 가능 시간대 및 수위 범위를 제시하며, 이상 조건에 대한 정량적 판단을 위해 CFD 해석과 같은 방법을 외부 자문이나 전문기관의 협력을 바탕으로 진행할 예정. - 향후 신규 부지에 대한 해수위/조석 특성에 따라 달라지는 수위 특성 및 호수 내 체적 특성 등을 활용할 수 있도록 기존 조력발전의 국한되지 않고 범용적으로 개발.

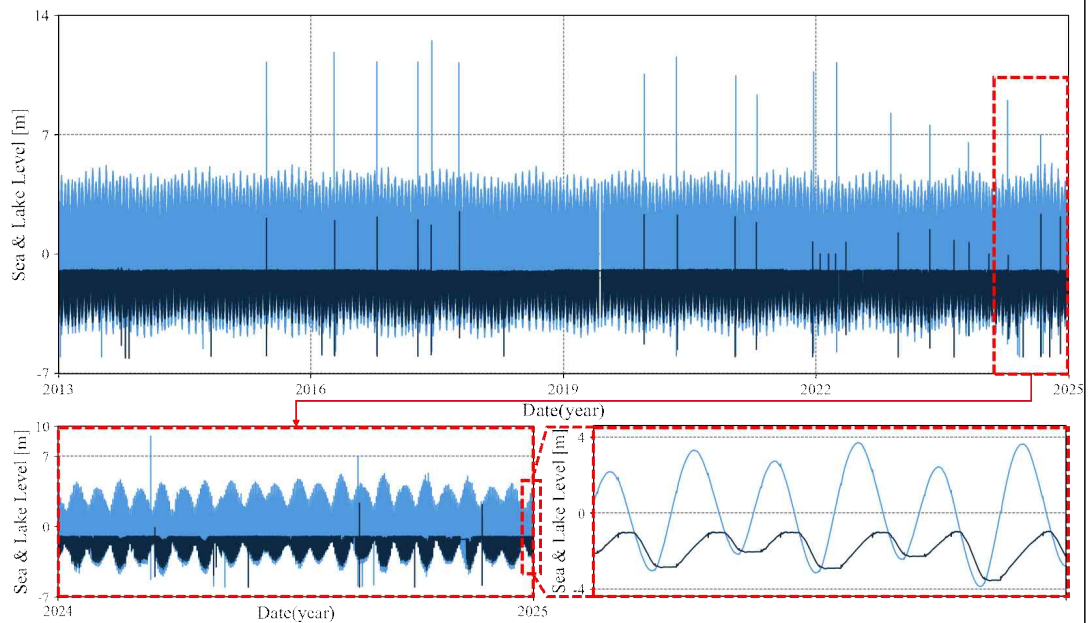


그림 5. 시화호 조력발전소 SCADA 데이터 기반 해수위-호수위 그래프

2. 운전방식 및 양수 기능 도입에 따른 효과 분석

- 조력발전의 효율성과 경제성은 동일한 입지 조건에서도 창조식(밀물 시), 낙조식(썰물 시), 복류식(양방향) 등 운전방식에 따라 발전 가능 시간대, 수위 사이클, 설비 부하 등에서 서로 다른 결과가 산출되기 때문에, **각 운전 방식별** 수위 변동 패턴, 발전 가능 시간, 연간 발전 가능 에너지, 운전 안정성 등을 **비교분석** 시행.
- 국내에서 시행되는 시화호 조력발전소는 창조식 운전방식을 사용하고 있으며, 낙조식과 복류식 발전 데이터는 미흡함. **다양한 운전방식**에 대한 **모델링** 및 결과 산출을 위해, 시화호 조력발전 데이터를 기반으로 낙조식, 복류식에 대한 수위-시간 응답 및 발전량 데이터 가공, 비선형 회귀식을 활용한 구현, 해외 조력발전 사례 데이터(영국, 프랑스 등)의 데이터 포털 탐색, 발전기 모델 설계 자료 등 참고, 효율-유량-낙차를 통한 공식을 활용한 발전량 산정 등을 통하여 구현.
- 양수 기능 도입 시, 부하 불균형 해소 및 설비 이용률 제고를 위한 수요 응답 전략에 대한 연계 가능성 분석을 통한 피크 부하 시간 외 활용성 검토. 이를 확장하여 조력발전소의 에너지 저장 기능으로 간주하여 타 에너지 저장 설비와의 비교 분석.
- 호수위 및 해수위 예측 정확도, 경제성 및 안정성, 발전 시간, 발전량 변화 등 각 **운전 방식에 따른 발전 특성 비교분석** 및 발전 방식 적정성을 검토 예정.

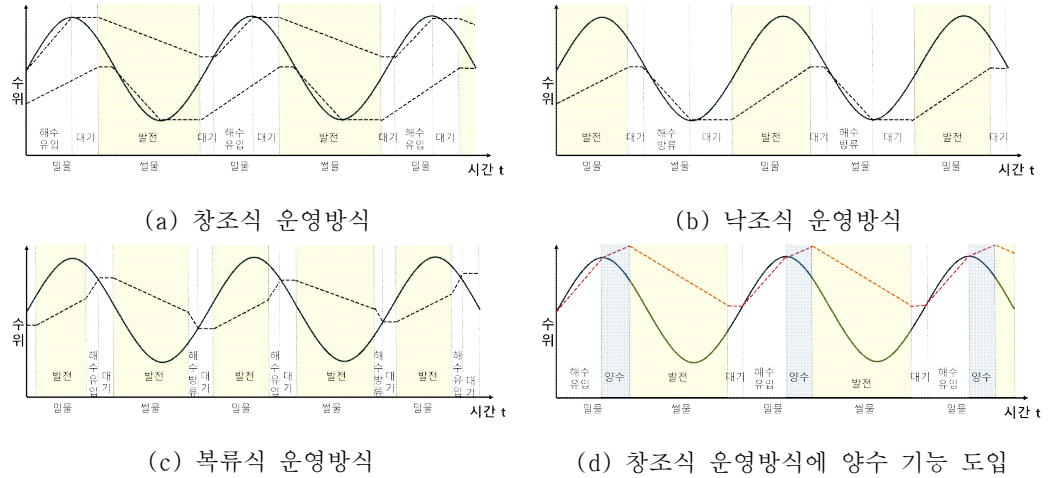


그림 6. 각 운영방식에 따른 발전량 예시

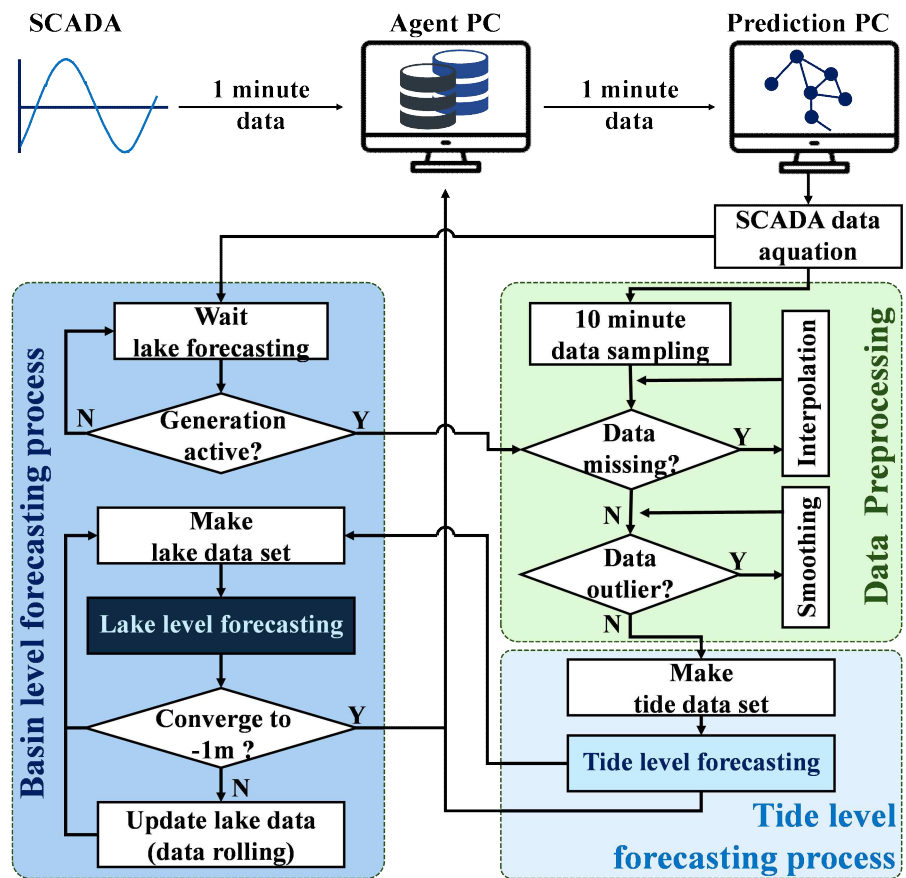


그림 7. 발전운영 최적 알고리즘 개요

3. 누적 발전량 극대화를 위한 최적 운전 전략 도출

- 조력발전은 해수위 패턴, 조석 주기, 저수지 체적, 설비 효율 등 다양한 변수의 영향을 받기 때문에, 고정된 방식으로 운전하는 것보다 변수별로 **전략을 최적화**하여 운전하는 것이 효율적임. 본 연구에서는 조력발전기의 **운전조건을 다변화**하여 시나리오를 구성하고, 각각의 전력 따른 **연간 누적 발전량을 정량적으로 비교 분석**하여 **최적 운전 전략**을 도출.
- 운전 시나리오는 해수위 패턴, 조석 주기, 저수지 체적, 설비 효율을 주요 변수로 발전

기 가동 대수, 운전 시점, 부분부하 운전 여부, 양수 기능의 병행 유무 등을 추가 구성하며, 실제 운전 사례 및 시화호 데이터 기반으로 축적된 데이터를 활용하여 시나리오를 구성함. 이를 통해 발전량, 평균 효율, 수위 변동 폭, 설비 이용률 등의 결과값을 산출함.

- 운전 전략에 대한 발전량 산정은 수차 특성 곡선 및 기존 발전량 산정 방식을 기반으로 하며, 수위 낙차의 범위 내에서 산정된 발전량을 출력값으로 삼아 최적 운전 조합을 계산함. 평균 발전량을 포함하여, 필요시 계절별, 주기적 해수위 변화, 비상상황 등을 추가로 고려함.
- 또한 SCADA 데이터 기반 실시간 발전 Tracking을 위해 **AI 기반 예측 방법**이 도입되며, 시화호 조력발전 데이터 및 추가로 구현 및 탐색한 낙조식/복류식/양수발전 데이터를 학습 데이터로 활용함. 사용 AI 기법은 시계열 예측에 우수한 성능을 보이는 LSTM, CNN-LSTM, PatchTST, PatchMixer 등의 **딥러닝 모델**을 예측에 적용하고, 추후 시스템 구동 시에는 예측만 가능하게 구현하여 불필요한 시간 소모 없이 최적화 알고리즘과 연계될 수 있도록 적용.

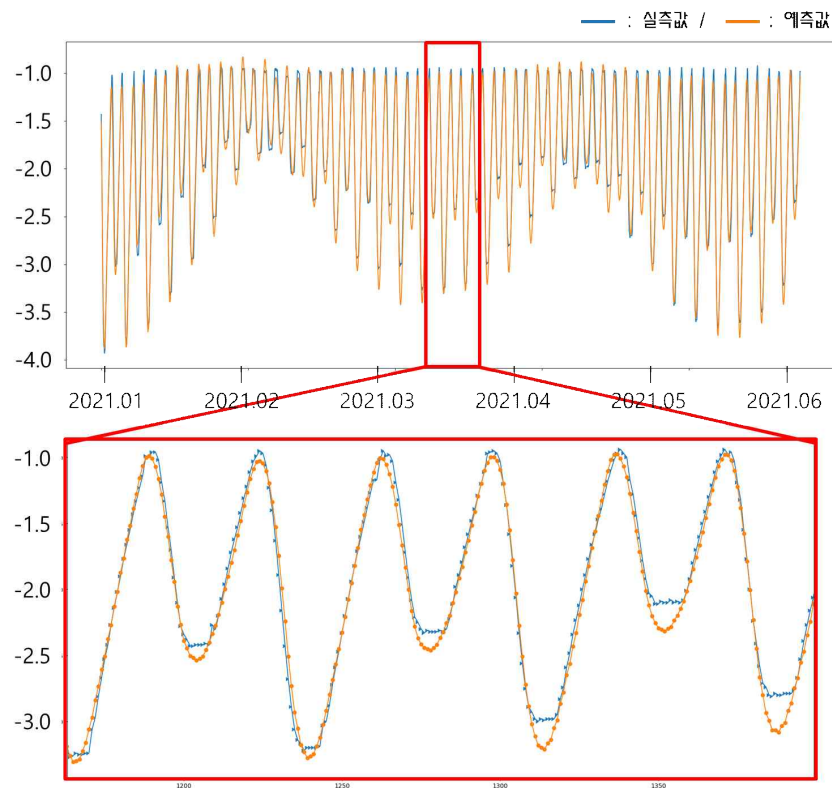


그림 8. 시화호 조력발전 호수위 예측 개요

- 운전 전략 자동 탐색을 위해 유전 알고리즘(Genetic Algorithm), 조건부 최적화 탐색 등의 고전 최적화 기법도 함께 적용하며, 특정 운전조건 하에서의 출력 기댓값, 효율 극대점, 설비 부하 조건 등의 제한 조건을 포함한 다중 목적 최적화 문제로 모델을 정식화.
- 최종적으로 사용자가 입력한 “운전조건(저수지 체적 등) +해수위 패턴”에 따라 프로그램이 가능한 운전 조합 중 누적 발전량이 가장 큰 전략을 자동으로 산출할 수 있도록 구성하며, 이는 기존의 K-TOP 시스템이 제공하는 해수위 예측 기능을 포함하여 발전량 시뮬레이션 및 전략 자동화 측면에서 다각적 활용이 가능한 시스템을 구현.

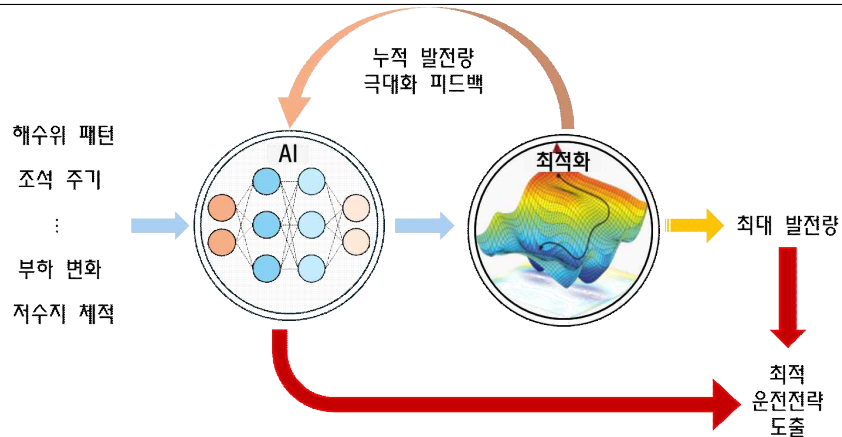


그림 9. 누적 발전량 극대화를 위한 최적 운전전략 도출 구조

4. 조력발전 설계 프로그램 개발 및 통합

- 앞서 개발된 수치 해석 모델, 운전 전략 최적화 알고리즘, 시계열 예측 기술 등을 통합하여, 실제 조력발전 설계와 운용전략 수립에 활용 가능한 **통합 설계 프로그램 개발**. 본 프로그램은 단순한 해수위 예측 시스템이 아닌, 다양한 운전조건을 반영하고 발전량을 정량 예측할 수 있는 기능을 포함하며, **GUI 기반**의 사용자 친화적 환경을 제공하는 시제품 수준의 독립 실행형 소프트웨어 형태로 구축됨.
- 본 프로그램은 설계자 및 운영자가 조력발전 대상지의 조건(조석 주기, 저수지 체적 및 형상, 발전기 구성 등)을 입력하면, 수치 모델과 AI 기반 전략 산정 엔진이 자동으로 발전 가능 에너지, 수위 변화 곡선, 최적 운전 전략 등을 산출하는 구조로 구성되며, 주요 기능은 다음과 같음:
 - 1) 입력 모듈: 조위 패턴 데이터, 저수지 형상 및 체적 파라미터, 수차 성능 곡선(출력-유량-효율 곡선), 발전기 용량 및 대수, 운전 전략 옵션(창조식/낙조식/복류식/양수 포함) 등을 **GUI를 통해 입력** 가능하게 구현.
 - 2) 운영 엔진: **해수위-수위-체적** 간 전달함수 기반 **수치 모델**, **발전량 계산 알고리즘**, CNN/LSTM/Transformer 기반 **딥러닝 예측 모델**, 유전 알고리즘 기반 전략 탐색기 등으로 구성된 시뮬레이션 핵심 엔진이 내장.
 - 3) 출력 모듈: 시간대별 **발전량 및 누적 발전량**, 수위 곡선, **발전 효율**, 전략 시나리오별 비교표, 추천 운전 전략 요약 리포트 등의 결과가 시각적으로 제공되며, 자동 보고서 생성을 지원.
 - 4) UI/UX 기능: 시나리오 저장 및 불러오기 기능, 운전조건별 시뮬레이션 비교 기능, 추천 전략 실시간 출력 기능 등을 포함하여, 실무자가 손쉽게 비교·평가할 수 있는 환경을 제공.
- 본 프로그램은 단일 대상지에 한정되지 않고, 다양한 입지 조건에 적용 가능하도록 **모듈화된 구조**로 개발되며, 특히 조위 주기, 낙차 조건, 저수지 특성 등만 변경해 입력하면 다른 부지(예: 새만금, 가로림만 등)에서도 동일한 분석이 가능하도록 **범용성을 겸비**하며, 향후 설계 및 타당성 검토 단계에서 비교·검증 도구로 활용.
- 검증은 시화호 실측 데이터를 기반으로 수행하며, 발전량 예측에 있어 MAE, MAPE, MSE 등의 정량적 오차 지표를 활용하여 모델 정확성을 검토하고, 결과가 실측 발전량 및 수위 변동과 어느 수준 이상 일치하는지를 평가. 최종적으로는 조력발전 설계용 소프트웨어, 운용 매뉴얼, 예제 데이터 세트 등을 포함한 SW 패키지 형태로 완성되며, 향

후 기술이전 및 현장 적용을 위한 실증 기반 자료로 활용 가능.

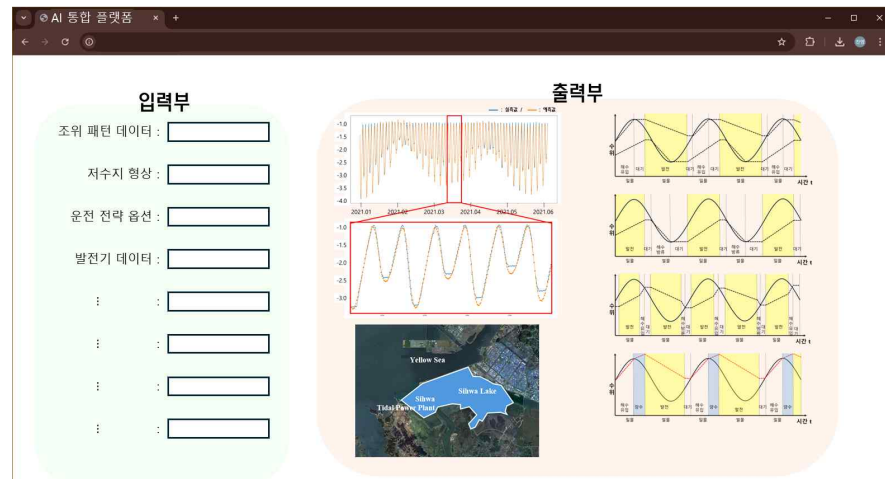


그림 10. 소프트웨어 구현 예시

- 결과 출력 시 사용자 지정 조건에 따라 필요한 내용을 선택하여 보고서 형식의 결과물을 생성하는 템플릿 제공 기능 포함. 사용자의 필요에 따라 결과 요약, 상세 분석 등의 결과를 Excel 등의 형식으로 산출. 구조는 다음과 같음:
 - 1) 개요
 - 2) 입력 데이터 요약
 - 3) 선택한 운전 시나리오 설명
 - 4) 시뮬레이션 결과 그래프 및 표
 - 5) 최적 운전 전략
 - 6) 예측 정확도(MAE, MSE 등)
- Python 내부 라이브러리인 matplotlib, seaborn 등을 활용한 고해상도 그래프를 포함. 시뮬레이션 결과 기반 다이어그램, 비교차트 등 삽입, 보고서 내 각 그림에 대해 자동 캡션 및 번호 삽입 지원

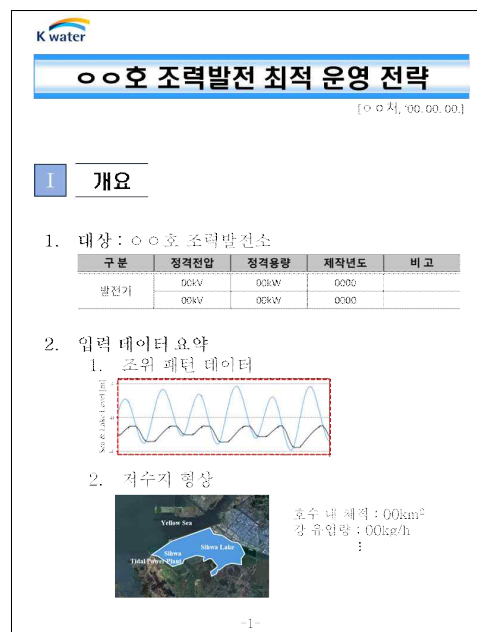


그림 11. 보고서 산출 예시

요약서 (연도별 주요 내용)		
구분	연구개발목표	연구개발내용 및 방법
1차년도	<ol style="list-style-type: none"> 1. 조력발전 운전 원리 및 해수위-호수위-체적 간 연계관계 탐색 2. 다양한 운전 조건에서의 발전 특성을 해석할 수 있는 기초모델 구성 3. 창조식, 낙조식, 복류식 등 다양한 운전방식에 따른 수위 변화와 발전량 특성을 분석하고, 양수 기능 도입 효과를 예비 검토 4. 다양한 조석 조건 및 수위 변동 시나리오에 대응 가능한 최적 운전 전략 도출 후 AI 기반 알고리즘으로 구현 <p>보증목표 : 특허출원 1건(조력발전 운전 최적 운영 알고리즘 기반 시스템)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 시화호 운영 데이터 및 관련 자료 수집 및 정제 2. 해수위-호수 체적 변화 모델 수립 3. 발전기 출력 및 효율 모델링 4. 운전 모드별 수위 및 발전량 특성 분석 5. 수위-체적 변화에 따른 이상 운전조건 (Cavitation, 진동 등) 발생 가능성 검토(외부 자문) 6. CFD 및 모델 수차 성능시험을 통해 운전조건 안전성 검토(외부 자문) 7. 수치모델 적합성 검증을 위한 실측 데이터 비교 분석 8. 발전기 대수 운영, 부분부하 운전, 계절별 조석 패턴 등을 고려한 발전전략 분석 9. 장주기 누적 발전량 극대화를 위한 운전 스케줄 최적화 10. AI 기반 발전량 예측 모델 학습 및 검증 11. AI 기반 최적 운전제어 알고리즘 구현
2차년도	<ol style="list-style-type: none"> 1. 알고리즘 고도화 및 성능 검증을 통한 프로그램 구축 2. 최종 설계/운전 통합 프로그램 개발 후 사용자 매뉴얼과 함께 시제품 수준의 소프트웨어로 완성 <p>보증목표 : 특허등록 1건(1차년도 특허 연계), 기술이전협약 1건(특허 연계)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 다양한 운전 전략에 대한 예측 결과 및 발전량 비교표 분석 기능 구현 2. GUI 기반 설계 프로그램 개발 3. 프로그램 성능 검증 및 사용자 매뉴얼 작성
연구종료후 (보증목표 달성기간)	<ol style="list-style-type: none"> 1. 테스트 및 소프트웨어 수정 2. 2차년도 완료된 설계 프로그램의 기술이전 대상 기관과 협약 체결 추진 및 기술이전 3. 사업화 성과 완성 후 활용사례 확보 및 성과추적 <p>보증목표 : 기술이전 기반 사업화 1건</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 현장 테스트 적용 및 시운전, 실증 검증 2. 사업화 대상 기관과 기술료 계약 체결 3. 총 4천만원 기술이전/기술료 기반 사업화 추진

요약서 (파급효과 및 활용방안)		
연구성과	기술적 파급효과	본 과제의 통합 설계 프로그램은 기존 예측 도구(K-TOP 등) 대비, 1. 발전량 예측 적용범위 확대 2. 해수위 및 조력발전 예측 성능 15% 향상 3. 운전전략에 따른 발전량 개선율: 최대 10% 이상 증가 4. 조력발전 시나리오 탐색 범위 확대 및 자동화 5. 벌브형 수차 적용 수력발전소에도 적용 가능
	사회,경제적 파급효과	운전전략 최적화 및 설계 정밀도 향상을 통해 1. 투자대비 내부수익률(IRR) 개선 효과: 약 1.5~2.0%p 상승 예상 2. 기술이전 및 유지관리 계약 기반 기술이전료 수입 예상: 약 1억~1.5억원 수준 (기술이전 1건 기준) 3. 프로그램 도입기관 3개 이상 확보 시, 초기 3년간 약 5억 원 이상의 기술확산 매출 기대 해외 조력발전 시장(영국, 프랑스, 호주 등) 진출 시, 1. 글로벌 설계 SW 라이선스 수출 기회 확보 2. 초기 시장 진입을 통한 기술력 제고 및 글로벌 조력 시장 사업 선도
	환경적 파급효과	1. AI 최적화 기반 조력발전 설계에 따라, 발전 효율 개선으로 연간 발전량 증가 시 온실가스 감축 효과 기대 2. 조위 변화폭 제어 가능 3. 염분 및 용존산소(DO) 개선
최종성과물		1. 조력발전 설계 프로그램(GUI 기반) 2. AI 최적운전 알고리즘 모듈 3. 사용자 매뉴얼 1종 4. 특허등록증 1건 5. 기술이전협약서 1건 6. 사업화 계약서 1건 (기술료 포함)
활용방안		국내 활용: 1. 새만금, 가로림만 등 신규 조력발전소 신규 운영 시 가이드라인 적용 가능 2. 시화호 증설사업 또는 재설계 단계에서 최적 운전전략 수립 도구로 활용 3. 타 업체 등에 라이선스 배포 국외 활용: 1. Mersey, Swansea 등 해외 대규모 조력발전소 설계 참여 시 활용 가능 2. 글로벌 기술박람회, 녹색기술 인증 등을 통한 기술 수출 추진 기타 파생 활용: 1. 수력발전 중 벌브형 수차 시스템 설계 최적화 도구로 확장 2. 환경영향평가(EIA) 시뮬레이션 도구, 수생태 영향 분석 시스템과 연계

중복성 검토				
(단위 : 억원)				
부처명	사업명	과제명	예산	비 고

요약서 (핵심어)					
핵심어	핵심어1	핵심어2	핵심어3	핵심어4	핵심어5
국문	조력발전	최적설계	시뮬레이션	해수위예측	인공지능
영문	Tidal Power	Optimal Design	Simulation	Sea Level Prediction	Artificial Intelligence