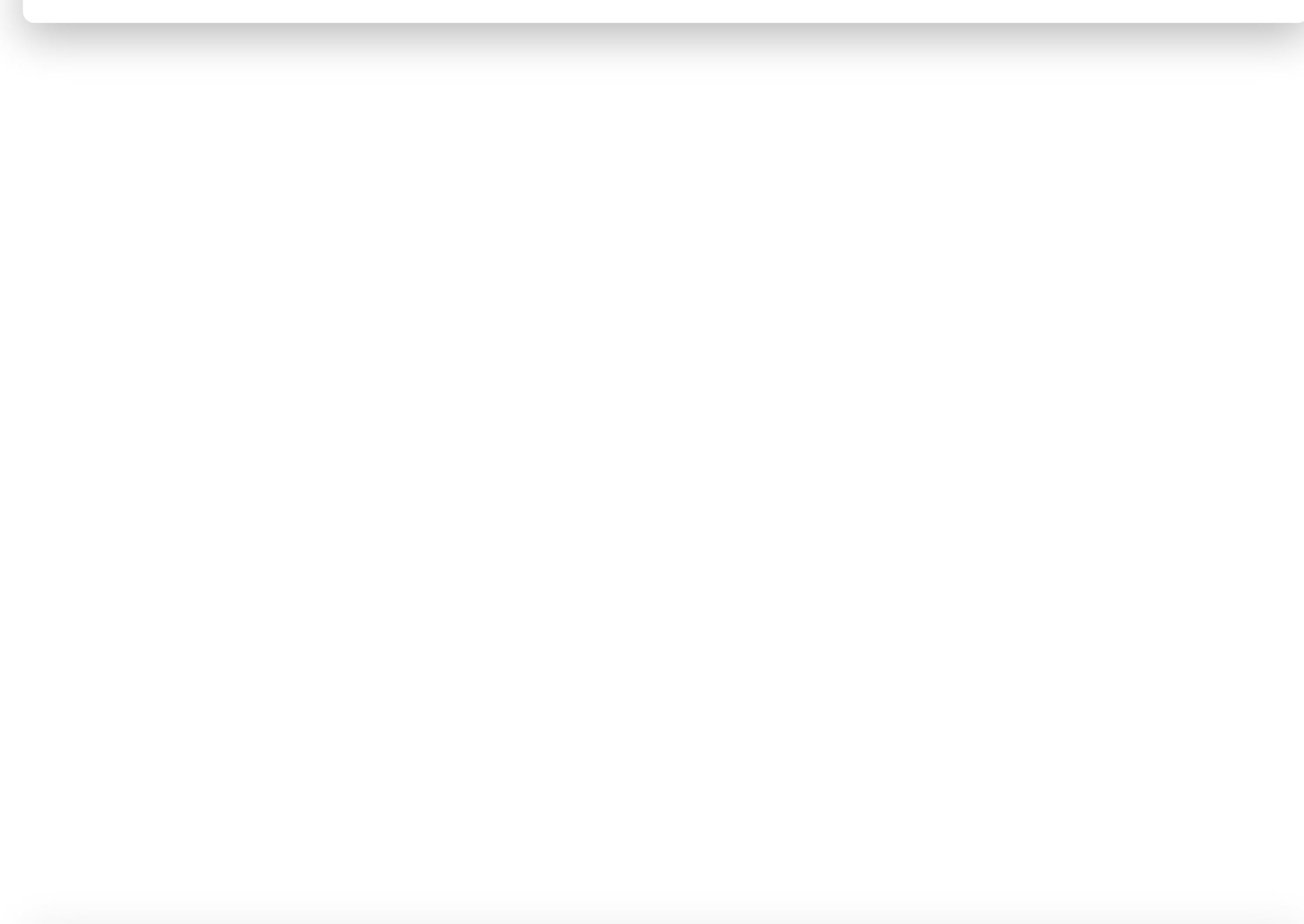


# AI 기반 능동형 하수처리 무인 자동화 시스템 개발

유입수 성상 예측 기반 Feed-forward 제어

2025년 연구개발 기획서



## ✖ 기존 방식: Feedback Control (사후 처방)

방류수 수질 측정 후 대응 → 6~12시간 제어 지연  
과잉 포기로 전력 낭비 발생



## ✓ 혁신 방식: Feed-forward Control (사전 처방)

유입 단계에서 수질/온도/유량 선제 감지  
AI 예측으로 6시간 사전 제어 → 송풍기 최적화

## 국내 현황

- ▶ 전국 4,200개 하수처리시설
- ▶ 일평균 2,700만 톤 처리
- ▶ 지자체 전력의 30~40% 소비
- ▶ 운영 인력 부족 심각

## ⚡ 에너지 절감 잠재력

- ▶ 송풍기: 전력의 40~50% 차지
- ▶ 연간 2.5 TWh 소비
- ▶ 15% 절감 시: 450억 원/년
- ▶ CO<sub>2</sub> 17만 톤/년 감축

수질 안정성

**0회**

방류수 기준 초과

에너지 효율

**15%↓**

전력 소비 절감

예측 정확도

**≤10%**

MAPE 기준

무인 운전

**72시간**

연속 자동운전

투자 회수

**5년**

ROI 목표

자동률

**99%**

시스템 안정성

## 공정 흐름도

유입수 → 유량조정조 → 반응조(PAC) → pH조정조(NaOH) → 응집조(폴리머)  
→ 가압부상조(DAF) → 1차처리수조 → 폭기조(1~4) → **분리막조(MBR)**  
→ 여과수조 → A/C 필터 → 방류조

항목	사양
처리 용량	200~500 m <sup>3</sup> /day
제어 시스템	PLC 기반 REMOTE 자동 제어
터보 브로워	21.7 kW (전력의 50.4%)
분리막	침지형 MBR (4개 프레임)

측정 항목	센서 타입	측정 범위	설치 위치	검증
DO (용존산소)	광학식	0~20 ppm	분리막조	✓
pH	전극식	0~14	pH조정조	✓
차압계	압력 센서	0~100 kPa	분리막조	✓
유량계	전자식	0~500 m <sup>3</sup> /h	방류구	✓
COD/BOD	UV 흡광도	0~200/300 mg/L	유입펌프장	○

## Bidirectional LSTM with Attention

### 입력 (25개 변수)

- 센서 데이터 15개: pH, 수온, SS, COD, BOD, DO 등
- 파생 변수 7개: F/M비, 부하율, HRT, SRT, 송풍기 가동률 등
- 시간 변수 3개: 시간대, 요일, 계절

### 출력 (5개 예측값)

- 6시간 후 방류수 예상 COD, BOD, SS, T-N
- 최적 송풍량 ( $m^3/min$ )

성능 목표: MAPE < 10%,  $R^2 > 0.85$ , 방향 정확도 > 90%

## 고부하 예상

유입 BOD > 200 mg/L

- 송풍기 RPM: +25% 증가
- 반송슬러지: 50%→75%
- 체류시간: 8h→10h
- 예비 반응조 가동 준비

## 저부하 예상

유입 BOD < 80 mg/L

- 송풍기 RPM: -20% 감소
- Eco Mode 전환
- 반응조 일부 대기 모드
- 간헐 포기 운전

## 하이브리드 제어 (Feed-forward 70% + Feedback 30%)

방류수 실측값으로 검증 및 미세 조정 → 이중 안전장치

인터락 타입	조건	동작
수위 기반	분리막조 HHAL	1차처리수 펌프 정지 + 경보
수위 기반	1차처리수조 HH	유량조정조 펌프 정지
시퀀스 연동	유량조정조 펌프 ON	가압부상조 시스템 자동 ON (SOL밸브→순환펌프→약품펌프→교반기)
pH 제어	pH < LOW 설정값	NaOH 펌프 자동 가동
과전류 보호	A 펌프 과전류	A 정지 → B 펌프 자동 기동
분리막 보호	흡입펌프 7분 초과	자동 정지 (막 폐쇄 방지)

## 물환경보전법 완벽 준수

항목	법적 기준	AI 목표값	안전율
BOD	10 mg/L	8 mg/L	20%
COD	40 mg/L	32 mg/L	20%
SS	10 mg/L	8 mg/L	20%

### TMS 연동

10분 단위 실시간 전송  
환경부 표준 포맷 준수

### 4단계 Fail-Safe

70% 경고 → 80% 주의  
90% 긴급 → 100% 위기

단계	기간	주요 내용	마일스톤
1단계	1~4개월	센서 네트워크 구축 데이터 수집 시스템 (기존 데이터 활용)	시스템 구축 완료 (4개월)
2단계	5~8개월	AI 모델 개발 제어 알고리즘 개발 시뮬레이션 검증	MAPE < 10% 절감률 15%
3단계	9~12개월	파일럿 테스트 현장 실증 성능 검증	72시간 무인 운전

Phase별 테스트: 모니터링 모드 (2주) → 반자동 모드 (2주) → 완전 자동 모드 (4주) → 72시간 연속 무인 운전

리스크	현재 운영 방식	AI 개선 방안
분리막 차압 상승	주 1회 고정 역세 (연 104회)	차압 예측 모델 → 동적 스케줄링 (30% 절감)
pH 센서 드리프트	주 2회 수동 점검 리트머스 병행	가상 센서 생성 신뢰도 자동 진단 (실시간 0~100%)
흡입펌프 과가동	고정 7분 타이머	유입량 예측 → 동적 타이머 (5~9분 조절)
수질 기준 초과	사후 대응	4단계 Fail-Safe 자동 모드 해제 관계기관 통보

## 총 투자비 (CAPEX)

- ▶ 연구개발비 (12개월): 10.44억 원
- ▶ 현장 설치비: 2.00억 원
- ▶ 소프트웨어: 1.00억 원
- ▶ 교육/컨설팅: 0.50억 원
- ▶ 예비비 (10%): 1.39억 원

총 15.33억 원

## 연간 절감액 (OPEX)

- ▶ 전력비: 30백만 원/년
- ▶ 약품비: 5백만 원/년
- ▶ 인건비: 30백만 원/년
- ▶ 슬러지: 3백만 원/년
- ▶ 유지보수: 5백만 원/년

총 73백만 원/년  
- 유지비 30백만 원/년  
= 43백만 원/년

ROI: 3.6년 (목표 5년 달성)

대규모 처리장 적용 시 2년 이내 회수 가능

## 전력 소비 분석 (연간)

설비	용량	현재 (kWh)	비중	AI 절감
터보 브로워	21.7 kW	133,000	50.4%	20%↓
여과수조 펌프	7.5 kW	32,850	12.4%	10%↓
기타 펌프/교반기	~30 kW	98,150	37.2%	10%↓
합계	~60 kW	<b>264,000</b>	100%	<b>15%↓</b>

전력비 절감

**4.0**

백만 원/년

약품비 절감

**0.8**

백만 원/년

총 절감액

**4.8**

백만 원/년

## ▣ 국내 최초

- 유입수 기반 Feed-forward 제어
- MBR 분리막 AI 역세 최적화
- 실제 운영 데이터 검증
- PLC 연동 무인 자동화

## ▣ 세계적 수준

- 미국 EPA 연구 단계 기술
- 유럽 선진 기술 수준
- 현재 TRL 3 → 목표 TRL 7
- 선진국 대비 70% → 95%

## 핵심 기술 확보 (특히 5건 이상)

- ▶ 하수처리 전용 AI 예측 모델 (LSTM with Attention)
- ▶ Feed-forward 제어 알고리즘 (Hybrid Control)
- ▶ 센서 데이터 품질 관리 기술 (가상 센서, 신뢰도 진단)
- ▶ 분리막 차압 예측 및 동적 역세 스케줄링

## Transfer Learning 전략

**Step 1:** 기본 모델 배포 (Pre-trained) → 예측 정확도 70~80%

**Step 2:** 현장 데이터 수집 (3개월) → 13만 데이터 포인트

**Step 3:** Fine-tuning (1개월) → 예측 정확도 85~90%

**Step 4:** 성능 검증 및 배포 (1개월) → A/B 테스트

**총 소요 기간: 5개월 (기준 1년 대비 70% 단축)**

## 처리장 규모별 적용

- ▶ 소규모 (< 1,000 m<sup>3</sup>/d)

클라우드 기반

- ▶ 중규모 (1~10,000 m<sup>3</sup>/d)

온프레미스

- ▶ 대규모 (> 10,000 m<sup>3</sup>/d)

분산 처리

## 공정별 적용 가능성

- ▶ 표준 활성슬러지: ★★★★★

- ▶ A2O 공정: ★★★★☆

- ▶ MBR: ★★★★☆

- ▶ SBR: ★★★☆☆

전국 확산 시

**450**

억 원/년 절감

CO<sub>2</sub> 감축

**17만**

톤/년

시장 규모

**500**

억 원 (2030)

## 환경적 효과

- ▶ 방류수 수질 안정화
- ▶ 하천/호수 수질 개선
- ▶ 악취 민원 30% 감소
- ▶ 탄소배출권 20억 원/년

## 사회적 효과

- ▶ 24시간 무인 운전
- ▶ 숙련 인력 부족 해결
- ▶ 지자체 재정 건전화
- ▶ 일자리 200명 창출

국가 정책 부합: 탄소중립 2050, 디지털 뉴딜, 스마트 물관리

역할	인원	주요 업무
연구책임자 (PM)	1	총괄 관리, 의사결정
AI 모델 개발	2	딥러닝 모델 설계/학습
제어 알고리즘	1	제어 로직 설계, SCADA 연동
공정 전문가	2	하수처리 공정 설계/분석
데이터 엔지니어	1	DB 구축, 전처리 파이프라인
시스템 통합 / 현장 엔지니어	2	UI/UX 개발, 센서 설치
연구보조원	2	데이터 수집, 실험 분석

### 협력 기관

- 금강엔지니어링 (실증 테스트베드)
- 국립환경과학원 (법규 자문)
- 한국환경공단 (TMS 연동)

### 성과 목표

- 특허 출원: 5건 이상
- SCI급 논문: 3편 이상
- 기술 이전: 2개소 이상

단계	항목	세부 내역	금액 (백만원)
1단계 (1~4월)	센서/장비	추가 센서 (COD/BOD)	80
	인건비/분석	연구원 5명 × 4개월	110
2단계 (5~8월)	AI 개발 환경	GPU 서버, 소프트웨어	150
	인건비/자문	연구원 6명 × 4개월	150
3단계 (9~12월)	실증 운영	현장 설치, 전력/약품	130
	검증/문서화	인증, 특허, 보고서	170
<b>간접비 (20%)</b>			<b>174</b>
<b>총 연구비 (12개월)</b>			<b>1,044</b>

### ✓ 핵심 강점

- ▶ **실증 기반:** 금강엔지니어링 MBR 시설 실제 운영 데이터 검증
- ▶ **검증된 기술:** LSTM 시계열 예측 + Feed-forward 제어
- ▶ **법규 준수:** 물환경보전법 100% 준수 (안전율 20%)
- ▶ **경제성 확보:** ROI 3.6년, 대규모 시설 2년 회수 가능
- ▶ **확장성:** Transfer Learning으로 5개월 내 적용 가능

### 정부 지원 요청

1. R&D 예산 지원: 총 10.4억 원 (12개월)
2. 실증 처리장 선정 협조 (환경부, 지자체)
3. 규제 샌드박스 적용 (초기 실증 단계)
4. 성과 확산 지원 (기술 이전, 표준화)

국내 하수처리 기술의 패러다임 전환!

