

# 지속가능한 유출지하수의 활용을 위한 수처리 로직 구현 - 주요 활용 목적별 수처리 공정 구성 -

윤영한, 임현만, 강정희, 유성수  
한국건설기술연구원 환경연구본부  
e-mail:yoyoon74@kict.re.kr

## Implementation of a Water Treatment Decision Framework for Sustainable Utilization of Discharged Groundwater; Process Configurations by Key End-Use Applications

Younghan Yoon, Hyun-Man Lim, Jeong-hee Kang, Sung-Soo Yoo  
Dept. of Environmental Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

### 요약

본 연구는 중대형 도심지에서 발생하는 유출지하수를 수자원으로 활용하기 위한 수처리 공정 선정 로직을 개발하는 것을 목적으로 한다. 유출지하수의 시·공간적 변동성과 복합오염 특성을 고려하여 탁도, Fe/Mn, 영양염류, TDS, 유기물 등 주요 수질항목을 기반으로 오염유형을 분류하고 이를 기반으로 산화, 응집·침전, 여과, 흡착, 막분리 및 소독공정을 조합한 공정열을 도출하여 활용목적별 목표수질을 반영한 의사결정 로직을 구축하고자 한다. 본 연구는 도심지 유출지하수의 안정적 재이용과 실무 적용성을 제고하는 기술적 기반을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

### 1. 서론

도시 물관리 체계에서 정수 및 하수처리 공정은 각각 안정적인 원수 특성과 비교적 예측 가능한 오염 특성을 기반으로 설계·운영되어 각각 응집·여과·소독 및 생물학적 처리 중심의 공정 특성을 갖는다. 이들 공정은 일정 수준의 수질 변동성을 고려하되 장기적인 평균 특성에 기반해 최적화된다는 공통점을 가진다. 반면 도심지 유출지하수는 강우, 도심지 특성별 비점오염, 관로 누수 등 복합 영향으로 입자상과 용존성 오염물질이 혼재하고 오염정도가 낮은 오염 특성을 보이지만 변동성이 매우 크다. 따라서 기존 공정과 유사한 단위기술을 활용하더라도, 오염유형 기반의 공정 조합과 유연한 운영 전략이 요구된다는 점에서 차별성이 있다. 따라서 유출지하수 대상의 수처리 로직의 구현을 위해서는 원수의 발생 특성 및 오염물질의 유형 분류의 선행이 필요할 것으로 판단된다.

### 2. 유출지하수 대상 수처리 공정 선정

전통적인 정수처리 공정은 하천수 및 호소수와 같은 비교적 저농도 원수를 대상으로 응집·침전·여과 및 소독 등의 물리·화학적 처리를 중심으로 구성된다. 반면, 하수처리 공정은 생활하수 및 산업폐수와 같이 고농도 유기물과 영양염류를 포함한 오염수를

대상으로 생물학적 처리 공정을 핵심으로 한다.

도심지 유출지하수는 강우 침투수, 도로 비점오염, 노후 상·하수 관로 누수, 지하구조물 영향 등이 복합적으로 작용하여 형성된다. 이로 인해 탁도, SS, Fe/Mn과 같은 입자성 오염물질과 함께 질산성질소, 염분(TDS), 유기물, 중금속 등이 혼재된 복합오염 특성을 나타낸다. 또한 강우 이벤트에 따른 수질 변동성이 크게 나타날 수 있고, 오염물질 농도는 전반적으로 낮은 범위에 분포한다. 이러한 특성들로 인하여 고농도 유기물 제거에 최적화된 하수처리 공정과는 근본적으로 다른 접근을 필요로 한다.

### 3. 유출지하수 대상 오염물질 분류

도심지 발생 유출지하수는 자연지하수와는 다른 오염 성상을 나타낸다. 도시 인프라, 교통활동, 비점오염, 노후 관로 누수 등이 복합적으로 작용하면서 다양한 오염물질이 혼입되며, 그 결과 복합오염(complex contamination)이 지배적인 수질 특성으로 나타낸다. 이러한 특성은 기존의 단일 공정 중심 수처리 접근을 어렵게 만들며, 오염유형에 기반한 체계적인 분류와 공정 선정 전략이 필수적이다.

#### 3.1 오염유형별 특성과 처리 방향

토사 및 탁도류는 공사장이나 도로 인접 지역에서 주로 발생하며, 강우 시 급격히 증가하는 특징을 보인다. 입자상 물질이 주요

오염원이므로 응집·침전·여과와 같은 물리적 공정이 효과적이다. Fe/Mn은 지하구조물 배수에서 흔히 나타나며, 용존 상태의 철과 망간이 공기와 접촉하면서 산화·침전되는 특성을 갖으며 물의 이취미 특성을 저하시킬 수 있어서 산화 및 여과 공정이 핵심 처리 기술로 적용된다. 질산성질소 등의 영양염류는 하수관 누수 및 도시 비점오염에 의해 유입되며, 물리·화학적 공정으로 제거가 어려워 재이용 활용에 있어 제한 요소로 작용한다. 염분(TDS) 및 용존성 오염물질은 세정제 사용과 생활오염의 영향을 받아 계절적으로 변동하며, 용존성 오염물질은 특성상 막분리 공정과 같은 고도처리가 요구된다. 또한 석유계 탄화수소 등은 도로 유출, 차량 오염, 인근 주유소로부터 기인하며, 난분해성 유기물 비율이 높아 활성탄 흡착이나 고도산화 공정의 적용이 필요하다. 이와 함께 중금속 오염형은 교통 및 산업활동과 밀접한 관련이 있으며, 응집·침전 기반의 제거가 가능하나 저농도에서도 장기적 환경영향을 고려해야 한다. 미생물 오염형은 하수 누수에 의해 발생하며, 소독공정이 필수적이다. 최근에는 PFAS와 같은 신종 오염물질도 일부 지역에서 검출되며, 흡착 또는 막공정을 포함한 고도처리 필요성이 증가하고 있다.

### 3.2 도심지 특성별 복합오염 기반 처리공정 선정

도심지 유출지하수의 오염 특성은 단일오염보다는 복합오염에 있다. 실제 현장에서는 강우 시 탁도와 유기물이 동시에 증가하거나, 지하수 기원 성분인 Fe/Mn과 토사 성분이 결합되는 등 다양한 오염물질이 상호작용하며 나타난다. 또한 생활오염 영향이 큰 지역에서는 질산성질소와 염분이 함께 검출되고, 하수 누수 구간에서는 유기물과 미생물이 동시에 증가하는 특징을 보인다. 일부 산업지역에서는 중금속과 유기물, 나아가 PFAS와 같은 신종오염물질이 복합적으로 존재하기도 한다. 이러한 복합오염 특성은 개별 오염물질 제거 중심의 단일 공정으로는 대응이 어렵고, 공정 간 연계와 조합을 전제로 한 접근이 필요하다. 단순히 특정 항목의 기준 초과 여부에 따라 공정을 선정하는 방식은 도심지 유출지하수의 변동성과 복합성을 충분히 반영하지 못한다. 대신 주요 오염유형과 오염물질 간 상호작용, 그리고 입자상과 용존성 오염물질의 구분을 기반으로 공정을 선택하는 것이 요구된다. 예를 들어 입자상 오염이 지배적인 경우에는 응집·침전·여과 중심의 물리적 처리가 우선되어야 하며, 용존성 오염물질이 문제인 경우에는 흡착, 이온교환 또는 막분리 공정이 요구된다. 복합오염의 경우에는 전처리·주처리·고도처리로 이어지는 공정열 구성이 필수적이다.

## 4. 통합형 공정과 의사결정 기준의 제안

도심지 유출지하수는 입자상 물질과 용존성 오염물질이 동시에 존재하는 복합오염 특성을 가지므로, 단일 공정으로 모든 오염을

효과적으로 제거하기에는 한계가 있다. 이러한 배경에서 정수처리 공정을 기반으로 하되, 하수처리의 일부 메커니즘을 선택적으로 결합한 통합형 공정(하이브리드 시스템)이 현실적인 대안으로 제안될 필요가 있다. 즉, 응집을 통한 전처리, 여과를 통한 입자 제거, 활성탄 흡착이나 막분리 또는 산화를 통한 용존성 오염물질 제거, 그리고 최종 소독 단계로 구성된다. 여기에 질산성질소와 같은 특정 오염물질이 문제될 경우 생물학적 탈질 공정이나 생물막 공정을 추가함으로써 처리 효율을 보완할 수 있다.

그러나 효과적인 공정 설계를 위해서는 단순히 수질 기준 충족 여부만을 판단하는 접근에서 벗어나야 한다. 우선, 정확한 주요 오염물질과 오염유형의 파악을 기반으로 수질의 시·공간적 변동성과 유량 변화 역시 설계의 핵심 변수로 작용한다. 또한 처리수의 활용목적에 따라 요구되는 수질 수준이 달라지므로, 이를 반영한 공정 구성과 설계가 필요하다. 더불어 에너지 소비와 운영 비용, 그리고 슬러지 및 농축수의 처리 가능성까지 종합적으로 고려해야 한다. 특히 질산성질소, 염분(TDS), PFAS와 같은 용존성 오염물질은 기존 물리·화학적 공정으로 제거가 제한적이므로, 공정 선택 단계에서부터 별도의 처리 전략을 마련하는 것이 필수적이다.

결국 도심지 유출지하수 처리는 기존의 정수처리 또는 하수처리 공정을 단순 적용하는 방식에서 탈피한 정수처리 공정을 기본으로 하면서도 하수처리의 핵심 기능을 보완적으로 결합하는 통합적 접근이 요구된다.

### 감사의 글

본 연구는 환경부 재원으로 한국환경산업기술원의 지원을 받아 수행된 연구(RS-2024-00335526, 도심침수 대응 지하 인프라 유지관리 고도화 기술 개발)로서 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] 김경호 외, "도심지역 유출지하수 활용 및 관리를 위한 제도 개선 연구", 한국환경정책·평가연구원(KEI), 2020
- [2] UK Environment Agency. "Groundwater protection guidance: construction dewatering & discharge permitting" 2020.
- [3] Hsu, C. H., et al. "Integration of ozonation and coagulation for metal removal in groundwater", Chemosphere. 2010.
- [4] Guan, X., et al. "Fe(II)/Mn(II) oxidation kinetics under various oxidants", Chemosphere. 2015.