

## 소하천 하도 내에 설치된 인공함양 전처리시스템의 실증실험을 통한 수질정화 및 취수성능 평가

한일영<sup>1,\*</sup> · 김규범<sup>2</sup> · 최명락<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(주)비룡 기술연구소

<sup>2</sup>대전대학교 건설안전공학과

<sup>3</sup>대전대학교 일반대학원 방재학과

### Evaluation of water purification and water intake performance through test-bed experiment of artificial recharge pretreatment system in small river channel

Il-Yeong Han<sup>1,\*</sup> · Gyoo-Bum Kim<sup>2</sup> · Myoung-Rak Choi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Technical Research Center, Biryong Corporation, Seongnam 13567, Republic of Korea

<sup>2</sup>Department of Construction Safety and Disaster Prevention, Daejeon University, Daejeon 34520, Republic of Korea

<sup>3</sup>Department of Disaster Prevention, Graduate School of Daejeon University, Daejeon 34520, Republic of Korea

#### 요 약

하천을 수원으로 이용하는 인공함양에서 함양원수를 공급하기 위하여, 하천수 수질정화와 취수기능이 일체화된 전처리시스템이 충청남도 홍성군 소하천 하도 내에 설치되었다. 본 연구는 전처리시스템의 성능을 검증하고, 설계인자를 규명하기 위하여 수행되었다. 6개월간의 실증실험 결과, 취수율은 돌망태 보에 설치된 차수벽에 의한 처리수 유출차단과 복류수 유입 효과로 평균 50% 이상을 기록하였다. 갈수기간 중 처리된 하천수와 복류수가 혼합된 유출수의 수질등급은 SS와 BOD는 “매우 좋음”, TP는 “좋음”에 해당하였다. 평균 오염물 제거율은 67.9%로서, 하천유량에 의한 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며, 설계유량 미만의 범위에서 수리학적 체류시간과 상관관계를 보여주었다.

**주요어:** 함양원수, 하천수 수질정화, 전처리시스템, 오염물 제거율, 수리학적 체류시간

**ABSTRACT:** A pretreatment system integrating river water purification and water intake function was installed in the river channel of the small river in Hongseong-gun, Chungcheongnam-do in order to supply raw water for artificial recharge using river as a water source. This study was conducted to verify the performance and identify design factors of pretreatment system. As a result of 6 months of test-bed experiments, the average water intake rate was more than 50% due to the effect of blocking the treated river water leakage and inducing the intermediate effluent inflow by cut off wall installed in rock filled gabion weir. The water quality grade of the mixture of treated water and intermediate effluent was “very good” for SS and BOD and “good” for TP. The average pollutant removal efficiency was 67.9%, which was found to have the greatest effect by river flow rate, and showed a correlation with the hydraulic retention time in the range of less than the design flow rate.

**Key words:** raw water for artificial recharge, river water purification, pretreatment system, pollutant removal efficiency, hydraulic retention time

\*Corresponding author: +82-31-718-5106, E-mail: [iyhan101@naver.com](mailto:iyhan101@naver.com)

## 1. 서론

하천수를 함양원수로 이용하는 인공함양에서 전처리시스템이란 하천수의 수질정화와 취수 기능을 갖춘 시설을 말한다. 함양원수의 수질은 국내외적으로 기준은 없으나, 환경부 물환경보전법에 명시된 하천수 수질환경기준에서 좋음(Ib) 이상의 수질을 사용하는 것이 바람직할 것이다. 좋음 등급은 용존산소가 많은 편이고 오염물질이 거의 없는 청정상태에 근접한 생태계로 여과·침전·살균 등 일반적인 정수처리 후 생활용수로 사용할 수 있는 수준이다. 자연하천에서는 자정작용에 의해 혹은 자정원리를 이용한 수질정화공법에 의해서 이러한 수질을 얻을 수 있다(KICT, 1997, 1998; Shim, 2002; Joe *et al.*, 2004). 하천의 자정작용이란 수중의 고형물이나 용해성 물질이 수로의 형태와 흐름상태, 그리고 그곳에 살고 있는 생물에 의해 희석, 침전, 흡착, 분해, 산화작용이 복합적으로 작용하여 질량이 감소하거나 변화하면서 하천수가 정화되는 것을 말한다(KICT, 1998). 오염물질들은 하상이 깊은 곳이나 자갈과 자갈사이의 유속이 느린 곳에서 침전되며, 수생식물이 밀집된 지역에서는 유속이 느려져 물리적 침전이 이루어져 정화에 기여한다. 하상의 자갈이나 바위 등에 부착하여 성장하는 생물막에 수중의 유기물 또는 무기물이 침전·흡착되어 생물막에 의해 산화·분해된다. 수생식물의 식물체 표면에는 미생물군이 흡착된 물질들을 분해하고, 수생식물의 뿌리에 의해 용해성 물질이 흡수됨에 따라 수중에 있는 질소와 인이 흡수된다. 또한 제방의 흙이나 하상토로부터 여과되어 깨끗해진 복류수가 오염된 표류수에 혼입되면 희석효과를 가져오게 된다(ME, 2004).

이러한 자연형 수질정화공법은 넓은 면적이 요구되기 때문에(Kim and Jeong, 2003) 중상류 소하천 유역에서 인공함양을 계획하는 경우, 절대 공간이 부족하게 된다. 이럴 경우, 시설을 하도 내에 설치하는 것을 고려할 수 있는데, 하도 내에 설치하게 되면 수리학적, 수질학적 부하 변동이 심하여 시설의 효율저하 문제가 발생하고(Cho, 2001), 발생할 상황에 대한 예측이 어려워진다. 따라서 설계단계에서부터 시설에 영향을 미치는 인자들을 규명하는 것이 무엇보다 중요해지고, 조성 후에는 설계인자에 기반한 시설관리가 이루어져야 한다. 수리학적 체류시간

(Hydraulic retention time)이란 일정한 반응조에 일정 유량의 유체가 체류할 수 있는 시간을 말하며, 유입농도와 함께 수질정화시설의 중요한 설계인자이다. 수리학적 체류시간과 오염물 제거율의 관계는 오염물 제거 대상, 하상재료, 흐름상태 그리고 서식생물의 상태 등에 따라 달라지므로, 그에 따른 연구가 필요하다.

이러한 이유로 하천이나 인공습지에서의 수리학적 체류시간과 오염물 제거율에 관하여 실험적 연구를 통한 다수의 경험식이 제시되고 있다. Shin (2000)은 정화식물의 수경재배 실험을 통하여 수리학적 체류시간과 유입농도에 따른 TN, TP 제거율에 관한 경험식을 도출하고, 실제 하천에서의 정화식물에 의한 자연정화량을 추정하였다. Nam *et al.* (2002)은 인공습지에 갈대가 식생된 토양층을 대상으로 수리학적 체류시간과 SS, BOD, TN, TP 등의 제거율에 관한 관계식을 제시하였다. Kim and Jeong (2003)은 하천에 파일럿 규모의 접촉수로를 설치하여 섬유망, 세라믹, 자갈여재별로 수리학적 체류시간과 오염물 유입부하량에 따른 오염물 제거율을 실험하여, SS와 COD 제거율이 극대화되는 수리학적 체류시간과 유입부하량을 제시하였다. Won *et al.* (2012)은 하도 내에서 하천수 수질정화를 위해 실험실 규모의 다단식 토양여과시스템에서 수리학적 체류시간과 오염물 제거율에 관한 연구를 수행하였다. Choi *et al.* (2019)은 바이오스톤볼 여재를 이용한 접촉수로에서 유입유량에 따른 오염물 제거율을 연구하였다. Lee *et al.* (2019)은 박층류 하천의 자갈수로에서 수리학적 체류시간과 BOD, TN, TP, NO<sub>3</sub>-N 제거율의 관계에 관한 경험식을 제시하였다. Han and Kim (2022)은 갈대식생 수로모형실험을 통하여 수리학적 체류시간과 SS, BOD, TP 제거율의 관계에 관한 경험식을 도출하였다. 한편, 인공함양 원수는 갈수기에도 안정적인 수량확보가 가능해야 하기 때문에 하천수의 취수는 일반적인 콘크리트 취수보와 취수관이 사용되고(MOIS, 2020) 있으나, 하천환경개선과 수 생태계 보전을 위하여 돌망태 취수보와 같은 자연 친화적인 방법이 검토될 수 있다(Martins, 1990; Hussein *et al.*, 1998; Han *et al.*, 2020; Shariq *et al.*, 2020).

본 연구는 하도 내에 설치되는 전처리시스템의 성능을 검증하고, 설계인자를 규명하기 위하여 수행

되었다. 본 연구에서 사용된 전처리시스템의 취수시설은 돌망태 취수보 구조에 차수와 집수 기능이 복합적으로 구성되었으며, 수질정화시설은 자갈, 모래, 갈대 식생의 복합적 자연재료로 구성된 다단식 수로이다. 충남 홍성군 갈산면의 소하천 하도 내에 전처리시스템을 설치하고, 취수율과 오염물 제거율을 평가하였다. 취수율은 돌망태 취수보의 차수와 집수 복합구조에 의한 효과를 검토하였으며, 오염물 제거율은 영향인자들과 관계를 분석하고, 수리학적 체류시간에 관한 선행연구 경험식들을 비교하여, 경험식의 적용한계를 검토하였다.

## 2. 연구지역

전처리시스템이 설치된 지역은 충청남도 홍성군 갈산면 운곡마을로서(그림 7a), 북동쪽은 산악지형, 남서쪽은 저지대로 이루어진 분지형태이며, 지질은 신생대 4기 충적층과 화강편마암으로 구성되어 있

다. 토지 이용은 대부분 밭농사 및 논농사의 농경지로 이루어져 있다. 지역 내에는 지표수를 저장할 수 있는 저수지가 존재하지 않을 뿐 아니라, 관정 개발 성공률이 매우 낮아 수원 확보가 어려워, 농번기인 4월부터 6월까지 상시 용수가 부족한 지역이다. 지역 내 신곡천은 총 연장 1.65 km, 하천 폭은 약 5.0 ~ 15.0 m이며, 하상은 강우 시에만 표류수가 흐르고, 평시에는 표류수가 거의 없는 간헐천 특성을 보인다. 이에 따라 복류수 취수를 위해 하천바닥을 관통한 농업용 가시시설물(취수관)이 여러 개소에서 관찰된다. 수질은 하천수질 기준으로 보통 ~ 좋음 등급에 해당된다(Chungcheongnam-do, 2019).

## 3. 연구방법

### 3.1 전처리시스템의 설치

수질정화시설은 오염물질이 채움재와의 접촉시간이 극대화될수 있도록 모래, 자갈, 정화식물인 갈



Fig. 1. A view of research area.



**Table 1.** Design criteria, type and structure of pretreatment system.

	Water purification facility	Water intake facility
Design criteria	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Average removal rate &gt; 57.0%</li> <li>· Water quality rating : Very good (Ia)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- HRT = 4.8 hrs ~ 72.0 hrs</li> <li>- Design flow rate = 140.0 m<sup>3</sup>/day</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Average water intake rate &gt; 50.0% (= Water intake/River water flow rate)</li> </ul>
Type	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Gravel-Soil-Vegetated hybrid type</li> <li>· Multi-stage</li> <li>· Vegetation = Reed</li> </ul>	Rockfill gabion weir with a cut off wall & water collectors
Structure	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Slope = 0.0026</li> <li>· Total length, L = 60.0 (35.0 m+25.0 m)</li> <li>· Average width, W = 4.0 m</li> <li>· Depth, H = 0.7 m</li> <li>· Void volume, Vv = 29.4 m<sup>3</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Length, L = 1.0 m</li> <li>· Width, W = 5.0 m</li> <li>· Depth, H = 1.5 m</li> <li>· Cut off wall, H = 1.5 m</li> <li>· H-beam foundation, H = 2.0 m</li> </ul>
	Vegetative soil particle size = 0.1 cm	Crushed rock particle size = 10~15 cm
	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Drainage soil porosity = 0.30</li> <li>· Drainage soil permeability = 0.066 m/sec</li> <li>· Drainage soil particle size = 0.7 cm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Water collection pipe = Φ200 mm</li> <li>· Water intake pipe = Φ200 mm</li> </ul>

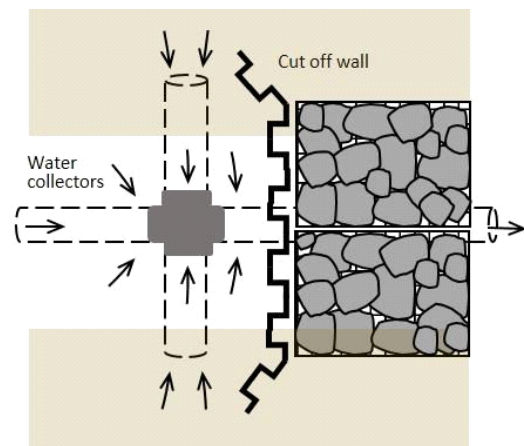
대로만 구성하여 자갈-모래접촉-식생 복합형 수로를 다단식으로 조성하였다(그림 2). 취수시설은 선행연구에서 돌망태 보를 통과하는 유량의 50% 이상이 방류 손실되는 점을 고려하여, 처리된 하천수와 복류수의 흐름이 집수관으로 유도될 수 있도록 돌망태 보 상류부에 쉬트파일 형태의 차수벽을 갖추었다(그림 3). 연구지역 소하천의 평균 갈수량 140.0 m<sup>3</sup>/일을 설계유량으로 하고, 선행 연구결과를 바탕으로 갈수기 평균 오염물제거율 57%와 하천수 수질등급 “매우좋음”을 달성하기 위한 최소 수리학적 체류시간 4.8시간을 고려하였을 때, 식생수로의 공극체적은 29.4 m<sup>3</sup>이 산출되었다. 오염물제거율은 유입농도와 유출농도의 차이를 유입농도로 나누고 백분율로 표시한 값이다. 취수율은 시스템 내에 유입되는 하천유량에 대한 집수조의 취수량을 백분율로 표시한 것으로, 본 시설에서는 하천처리수와 복류수가 혼합되어 취수율은 50% 이상을 목표로 하였고, 이러한 설계기준으로 시설의 재료와 제원을 결정하였다(표 1).

**3.2 모니터링 장치 설치**

그림 4는 수질분석을 위한 하천수 채수 위치와 수위, 유량 측정장치 배치도이다. 전처리시스템의 최상류 유입부에는 하천 표류수의 유입량을 측정하기 위해서 V-notch를 설치하고, 식생수로에는 4개의 수



**Fig. 2.** A view of pretreatment system.



**Fig. 3.** Rockfill gabion weir with a cut off wall and water collectors.

위관측공을 설치하였으며, 하천수 처리수와 복류수가 유출되는 집수조에 전자식 유량계를 설치하였다. V-notch와 관측공에는 수온과 수위를 측정할 수 있는 자동수위계(TD Diver, van Essen Instruments, 네덜란드)를 설치하였다.

수질항목은 하천수 수질의 고형부유물질, 유기물질, 영양염류를 대표하는 SS, BOD, TP를 대상으로 하였다. 수질분석을 위한 유입수 채수는 V-notch 내에 저류된 물을 사용하였으며, 유출수는 집수조로 유출되는 물을 채수하였다. 채수된 물은 SS는 유리섬유여지법(Choi *et al.*, 2016), BOD는 DO meter (HI15421, HANNA Instruments, 미국), TP는 자외선/가시선분광법(Drago, 1992)으로 분석하였다.

4. 연구결과 및 고찰

4.1 취수율

2022년 1월부터 5월 초순까지 5개월간 평균 취수

율은 68.1%를 기록하였다. 1월부터 3월 중순까지는 극심한 가뭄으로 하천유량은 평균 191.0 m<sup>3</sup>/일, 취수량은 평균 96.4 m<sup>3</sup>/일이며 평균 취수율은 50.0%이다. 3월 중순 이후에는 집중강우로 하천유량 2,235 m<sup>3</sup>/일, 취수량은 최대치인 220.0 m<sup>3</sup>/일, 취수율은 최소치인 8.0%을 기록하였다. 다시 5월부터는 극한 가뭄과 주민들의 농번기 하천수 사용으로, 하상은 표류수가 거의 전무한 상태로 5월 5일 하천유량은 17.0 m<sup>3</sup>/일을 기록하였으나, 63.6 m<sup>3</sup>/일을 취수하여 취수율은 최대 374.0%를 나타내었다(그림 5). 취수율이 높게 산출된 것은 차수벽의 효과로 볼 수 있으며, 하천 표류수가 감소하여 처리수가 줄어도 복류수는 일정하게 취수되었기 때문이다.

4.2 오염물 제거율

2022년 1월부터 7월 초순까지 약 6개월간 SS, BOD, TP 제거율을 분석하였다. SS의 최대 유입농도는 227.0 mg/l, 최소 유입농도는 0.2 mg/l, 최대 유출농도는

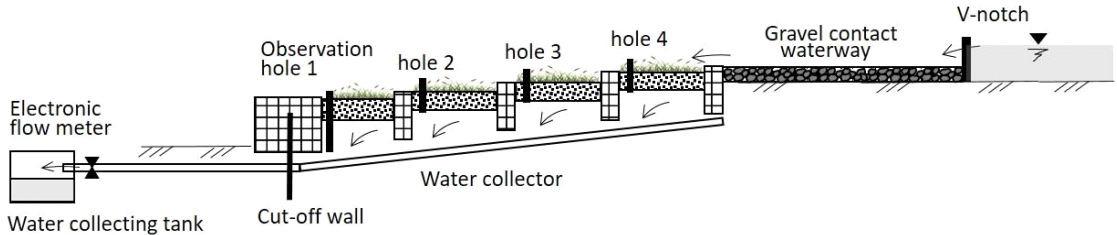


Fig. 4. Placement of measurement facilities.

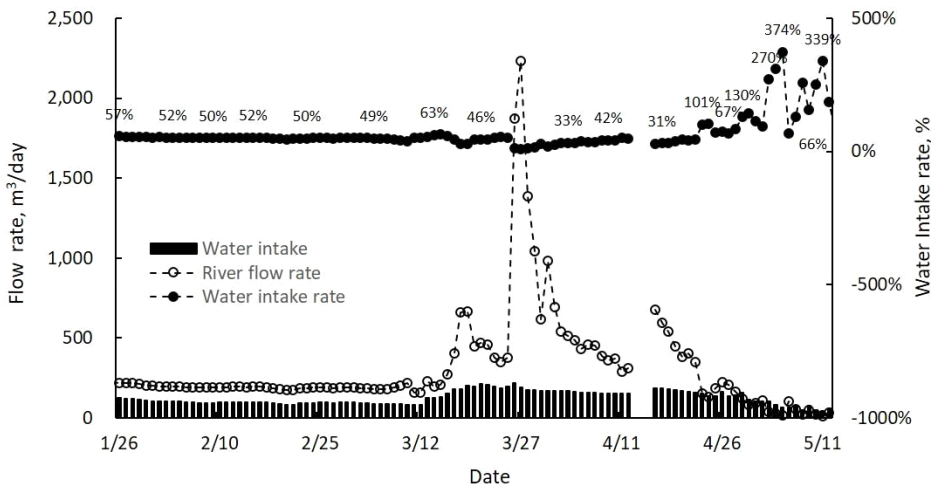
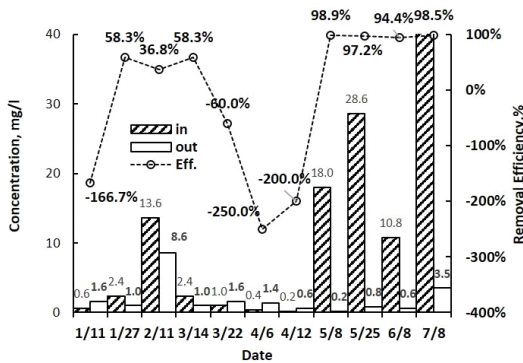


Fig. 5. Water intake and water intake rate with water flow rate.

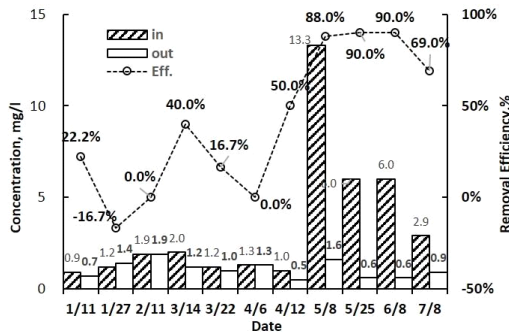
8.6 mg/l 최소 유출농도는 0.2 mg/l이다. SS 제거율은 평균 -12.2%를 기록하였으며, 최대 제거율은 98.5%, 최소 제거율은 -250%이다. 채수기간 중 하천유량은 10 m<sup>3</sup>/일 ~ 455 m<sup>3</sup>/일을 기록하였는데, 하천유량이 설계유량 140 m<sup>3</sup>/일을 훨씬 넘어서는 풍수기간 중에는 SS 유출농도가 유입농도보다 높게 나타났다. SS 제거율은 하천유량에 크게 영향을 받는다(그림 6a).

BOD의 최대 유입농도는 13.3 mg/l, 최소 유입농도는 0.9 mg/l, 최대 유출농도는 1.9 mg/l, 최소 유출농도는 0.5 mg/l이다. BOD 제거율은 평균 40.8%를 기록하였으며, 최대 제거율은 90.0%, 최소 제거율은 -16.6%이다. 하천유량에 의한 영향이 있으나, SS와는 달리, 수온이 상승함에 따라 유입농도가 증가하고, 제거율이 증가하는 경향이 있다(그림 6b).

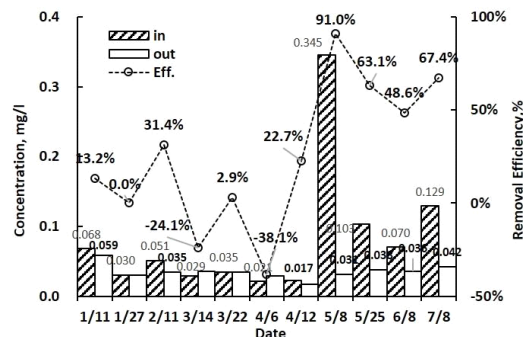
TP의 최대 유입농도는 0.345 mg/l, 최소 유입농도는 0.021 mg/l, 최대 유출농도는 0.059 mg/l, 최소 유출농도는 0.017 mg/l이다. TP 제거율은 평균 25.3%를 기록하였으며, 최대 제거율은 91.0%, 최소 제거율은 -38.1%이며, BOD와 마찬가지로 하천유량과 수온 상승에 비교적 영향을 받는 경향이 있다(그림 6c).



(a) SS



(b) BOD



(c) TP

Fig. 6. Pollutants concentrations and removal efficiency.

### 4.3 갈수기 제거율 및 수질

200 m<sup>3</sup>/일 미만의 갈수기간 중 SS, BOD, TP의 평균 오염물제거율은 각각 89.5%, 75.4%, 49.2%이며, 전체 평균 오염물제거율은 67.9%이다. SS의 평균 유입농도는 57.4 mg/l, 유출농도는 1.2 mg/l로서 하천수 수질등급 기준으로 “조금 나쁨”에서 “매우 좋음”으로 수질이 향상되었으며, BOD의 평균 유입농도는 6.0 mg/l, 평균 유출농도는 1.0 mg/l로서 역시 “조금 나쁨”에서 “매우 좋음”으로 향상되었다. TP는 평균 유입농도는 0.135 mg/l, 평균 유출농도는 0.032 mg/l로서 “보통”에서 “좋음”으로 수질이 향상되었다(표 2).

### 4.4 영향인자

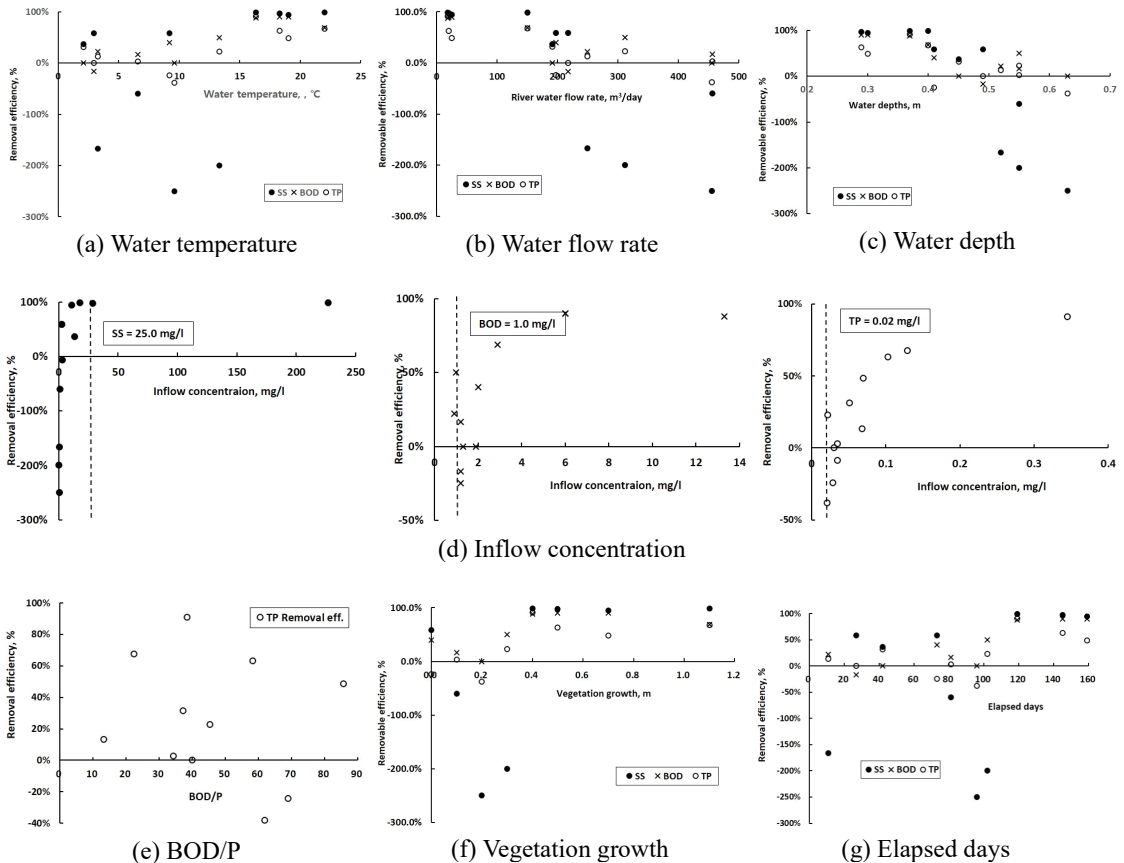
오염물 제거율에 영향을 미치는 것으로 예상되는 수온, 하천유량, 수심, 유입수 농도, BOD/P, 식생, 운영기간 항목에 대해서 SS, BOD, TP 제거율과의 관계를 도식화하여 분석하였다(그림 7). 수온이 증가하면 BOD와 TP 제거율은 증가하는 양상이나, SS 제거율은 수온의 변화와 무관하다(그림 7a). 하천유량이 증가함에 따라 SS, BOD, TP 제거율은 모두 감소하며, 그 중에서 SS 제거율이 가장 크게 영향을 받아, 일정 유량 이상에서는 유출농도가 유입농도보다 크게 나타난다(그림 7b). 수심은 하천유량의 크기에 따라 변하므로 제거율 변화도 하천유량과 동일한 양상을 보인다(그림 7c). BOD와 TP는 유입수 농도가 증가하면 제거율이 증가하며, BOD는 일

정농도를 넘어서 부터는 증가하지 않고, TP는 지속적으로 증가한다. SS 제거율은 유입수 농도 변화에 무관한 것으로 보이는데, 이것은 대부분의 SS는 하

천수 수질등급의 매우좋은 수준인 25.0 mg/l 보다도 낮은 농도가 유입되었고, BOD와 TP는 각각 매우좋은 수준인 1.0 mg/l과 0.02 mg/l 보다도 높은 농도가

**Table 2.** Pollutants concentrations and water quality rating during the dry season.

Date	River water flow rate (m <sup>3</sup> /day)	SS			BOD			TP			Total
		Inflow Conc. (mg/l)	Outflow Conc. (mg/l)	Removal eff. (%)	Inflow Conc. (mg/l)	Outflow Conc. (mg/l)	Removal eff. (%)	Inflow Conc. (mg/l)	Outflow Conc. (mg/l)	Removal eff. (%)	Removal eff. (%)
Mar. 14	197.6	2.4	1.0	58.3	2.0	1.2	40.0	0.029	0.036	40.0	24.1
May. 08	18.8	18.0	0.2	98.9	13.3	1.6	88.0	0.345	0.031	88.0	91.5
May. 25	20.0	28.6	0.8	97.2	6.0	0.6	90.0	0.103	0.038	90.0	80.8
Jun. 08	25.0	10.8	0.6	94.4	6.0	0.6	90.0	0.070	0.036	90.0	74.9
Jul. 08	144.0	227.0	3.5	98.5	2.9	0.9	69.0	0.129	0.042	69.0	68.0
Average	81.1	57.4	1.2	89.5	6.0	1.0	75.4	0.135	0.032	75.4	67.9
Water quality rating		Slightly bad (IV)	Very good (Ia)		Slightly bad (IV)	Very good (Ia)		Normal (III)	Good (Ib)		



**Fig. 7.** Pollutant removal efficiency with influencing factors.

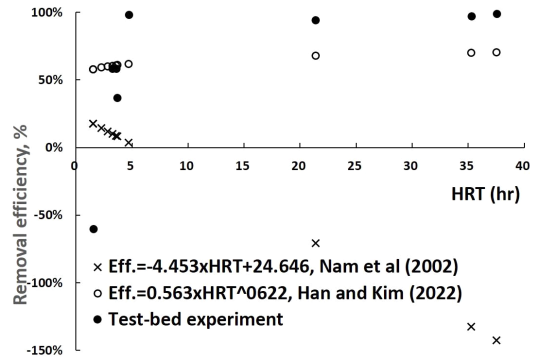


유입되었기 때문이다(그림 7d). 유입수의 BOD/TP 지표는 10~90 범위로 분포하여 국내의 일반적인 도시하수 평균값인 35.4 (Han, 1998)을 고려할 때, 넓은 범위의 값이 유입되었다. 미생물은 BOD의 소비와 더불어 오염수에서 인을 양론적으로 섭취한다 (Kim, 1999). 본 실험에서 BOD/TP는 TP 제거율과는 상관성이 없는 것으로 나타나, TP는 미생물보다는 주로 갈대의 자정작용에 의해 제거된 것으로 추정된다(그림 7e). 식생의 성장은 SS를 제외한 BOD와 TP 제거에 영향을 미치는 것으로 보이며, BOD 제거율은 갈대 높이의 일정한 값 이상에서부터 소폭 감소하며, TP는 소폭 증가하는 양상이다(그림 7f). 시스템의 운영기간이 늘어날수록 SS, BOD, TP 제거율 모두 증가하는 양상이나, 이는 갈대의 성장뿐 아니라 수온의 변화에 따른 영향들이 복합적으로 관련이 있으므로, 좀 더 장기간의 관측이 필요해 보인다(그림 7g).

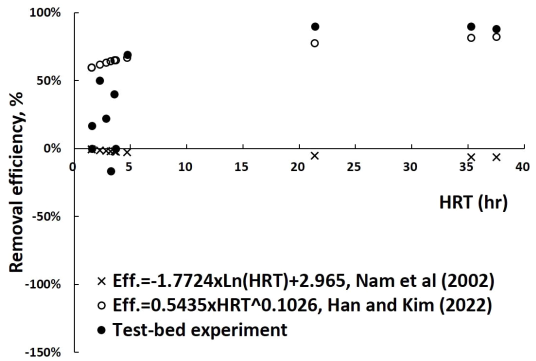
4.5 선행 경험식 비교 검토

선행 경험식들을 적용하여 계산한 오염물 제거율과 실증실험에서 측정된 수리학적 체류시간에 따른 오염물 제거율을 비교한 결과, 모든 경험식에서 측정값과 차이를 보였다(그림 8). 수리학적 체류시간 4.8시간 이상에서 실증실험값은 SS는 94.4% ~ 98.9%, BOD는 69.0% ~ 90.0%, TP는 48.6% ~ 91.0%이다. Nam *et al.* (2002)은 수리학적 체류시간이 증가할수록 SS 제거율이 감소하는 양상을 보이며, BOD는 -0.4% ~ -6.4%의 낮은 값을 보이고, TP는 12% ~ 160% 값을 보여주어, 인공습지를 대상으로 한 경험식은 본 시설에는 적용할 수 없음을 보여준다. Lee *et al.* (2019)는 TP의 최대 오염물 제거율이 20%를 넘지 못한다. 이는 박충류 하도의 자갈층을 대상으로 도출된 경험식이기 때문에 낮은 값이 산출된 것이다. Han and Kim (2022)은 SS는 60.6% ~ 70.5%, BOD는 63.3% ~ 82.2%, TP는 22.7% ~ 33.6%로서, 실증실험값과의 최대 차이는 SS는 36.4%, BOD는 10.2%, TP는 57.4%이다. 이와 같은 이유는 갈대의 자정효과 이외에 자갈접촉수로의 여과작용에 의한 전처리 효과가 추가되었고, 차수벽에 의한 복류수의 다량 합류로 희석효과가 반영되었기 때문이다. 한편, 수리학적 체류시간이 4.8시간 미만에서의 실증실험값들은 하천유량이 설계유량 140 m<sup>3</sup>/일을 초과

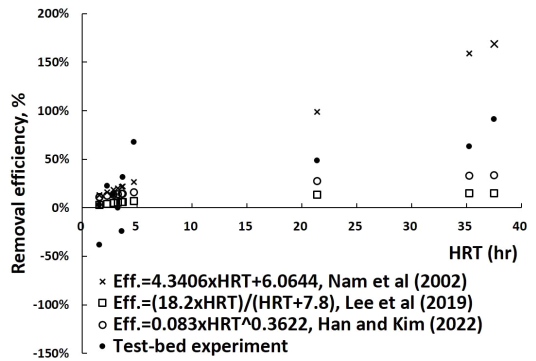
할 때의 오염물 제거율로서, 수리학적 체류시간과 상관성이 없는 것으로 나타난다. 4.8시간 이상은 하천유량이 설계유량 140 m<sup>3</sup>/일 미만일 때의 오염물 제거율로서, 수리학적 체류시간이 증가하면서 측정값과 계산값 모두 증가한다. 이와 같이 경험식은 설계유량 미만의 범위에서 유효함을 알 수 있다.



(a) SS



(b) BOD



(c) TP

Fig. 8. Comparison the removal efficiency of calculated and test-bed experimental values with HRT.



## 5. 결론

전처리시스템 설치 후 약 6개월간의 실증실험 동안, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1) 취수율은 취수보의 차수와 집수 복합형 구조에 의한 처리수 유출차단과 복류수 유입 효과로 평균 50% 이상의 만족할만한 취수율을 기록하였다.

2) 200 m<sup>3</sup>/일 미만의 갈수기간 중 평균 오염물 제거율은 SS는 89.5%, BOD는 75.4%, TP는 49.2%이며, 전체 평균 오염물 제거율은 67.9%이다. 평균 유출농도는 SS는 1.2 mg/l, BOD는 1.0 mg/l, TP는 0.032 mg/l로서 SS, BOD는 하천수 수질등급 기준으로 “매우 좋음”에 해당하며, TP는 “좋음”에 해당한다.

3) SS, BOD, TP 제거율은 하천유량, 유입수 농도, 식생, 운전기간 등의 영향인자들에 의해 큰 변동성을 보였는데, 하천유량이 오염물 제거율에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 평가되었으며, 특히 SS가 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

4) 오염물 제거율은 설계유량을 경계로 다른 양상을 나타내었다. 설계유량을 초과하는 하천 유량에서는 수리학적 체류시간과 오염물 제거율은 상관성을 보이지 않았으나, 설계유량 미만의 범위에서는 수리학적 체류시간이 증가하면 오염물 제거율도 증가하였다. 따라서 하도 내에 설치되는 인공함양 전처리시스템의 가장 중요한 설계인자는 하천유량과 수리학적 체류시간임을 알 수 있다.

5) 수리학적 체류시간을 이용하여 오염물 제거율을 계산하는 경험식은 설계단계뿐만 아니라, 유지관리 단계에서는 설계유량 범위에서 오염물 제거율을 예측하여 시스템을 관리하는 도구로 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

6) 본 연구와는 별도로 하도 내에서 수리학적 수질학적 부하 변동으로 발생 가능한 세굴, 침식, 퇴적으로 인한 구조적 안정성과 수질정화 기능 저하 문제는 향후 지속적인 연구가 필요한 과제이다.

## 감사의 글

본 논문은 환경부(한국환경산업기술원)의 수요대응형 물공급 서비스사업 과제(상시 가뭄지역의 지하수 최적공급 관리를 위한 IoT 기반 인공함양 및 Well network 기술 개발, #146523)의 지원으로 수

행되었습니다.

## REFERENCES

- Cho, J.Y., 2001, A study on the water quality improvement system for small stream. M.S. thesis, Seoul National Polytechnic University, Seoul, 71 p (in Korean with English abstract).
- Choi, G.C., Seong, I.H, Kim, D.W., Kim, Y.H., Kim, T.Y., Yoo, B.R., Lee, S.S., Lee, J.Y. and Lee, H.S., 2016, Notes on Water Pollution Process Test Standards. Donghwa Technology Publishing Company (in Korean).
- Choi, S.h., Kim, H.S. and Chung, S.W., 2019, Estimation of Water Quality Improvement and Reduction of Influent Pollution by Installation of Water treatment System Filled with Bio-stone Ball. Journal of Environmental Impact Assessment, 28, 471-482 (in Korean with English abstract).
- Chungcheongnam-do, 2019, Comprehensive Planning Report for Small River Maintenance in Hoseong-gun. Chungcheongnam-do, 202 p (in Korean).
- Drago, R.S., 1992, Physical Methods for Chemists, 2nd Edition. Saunders College Publishing, 750 p.
- Han, I.Y. and Kim, G.B., 2022, Technical report for securing and pretreatment of raw water for groundwater artificial recharge. Ministry of Environment, 55 p (in Korean).
- Han, I.Y., Lee, J.J. and Kim, G.B., 2020, Experimental study on non-linear throughflow characteristics of rockfill gabion weir. Journal of Korea Water Resources Association, 53, 861-870 (in Korean with English abstract).
- Han, J.Y., 1998, Removal characteristics of nitrogen and phosphorous in sewage by change of operating conditions on SBR process. M.S. thesis, Jeju University, Jeju, 54 p (in Korean with English abstract).
- Hussein, A.K., Morii, T. and Hattori, K., 1998, Determination of discharge flow through rockfill gabion weir. Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering, 195, 123-131.
- Joe, H.M., Joe, S.H. and Kim, D.H., 2004, Application and Performance Evaluation of River Water Purification Facilities. Seoul Development Institute, 414 p (in Korean with English abstract).
- KICT (Korea institute of civil engineering and building technology), 1997, Development of Close-to-nature River Improvement Techniques Adapted to the Korean Streams Vol. II. Korea institute of civil engineering and building technology, 450 p (in Korean).
- KICT (Korea institute of civil engineering and building technology), 1998, A Study on the Natural Water Quality Purification Method, Korea institute of civil engineering and building technology, 50 p (in Korean).

- Kim, G.S., 1999, Technology assessment for BNR processes in sewage and wastewater treatment. ENVEX'99. Korea Environmental Preservation Association, 38-48 (in Korean).
- Kim, I.T. and Jeong, W.S., 2003, Evaluation of processing efficiency of river water purification method using fiber net media. Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference (Abstracts), May 24, 1087 p (in Korean with English abstract).
- Lee, D.H., Kim, M., Gu, J.E. and Kim, W., 2019, Application and evaluation of the sheet flow channel for water quality improvement in the stream. Ecology and Resilient Infrastructure, 6, 208-216 (in Korean with English abstract).
- Martins, M., 1990, Principle of rockfill hydraulics. In: das Neves, E.M. (eds) Advances in Rockfill Structures. NATO ASI Series, Vol 200, Springer, Dordrecht, [https://doi.org/10.1007/978-94-011-3206-0\\_17](https://doi.org/10.1007/978-94-011-3206-0_17).
- ME (Ministry of Environment), 2004, Development of Environment-friendly Technology for Stream Water Quality Management. Ministry of Environment, 414 p (in Korean).
- MOIS (Ministry of the Interior and Safety), 2020, Design Criteria for Small River. Ministry of the Interior and Safety, 124 p (in Korean).
- Nam, G.S., Kim, J.O., Lee, K.S., Joo, G.J. and Lee, S.J., 2002, Purification characteristics and hydraulic conditions in an artificial wetland system. Korean Journal of Limnology, 35, 285-294.
- Shariq, A., Hussain, A. and Ahmad, Z., 2020, Discharge equation for the gabion weir under through flow condition. Flow Measurement and Instrumentation, 74, 101769, <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101769>.
- Shim, J.H., 2002, A study on the environment-friendly purification plan of polluted river. M.S. thesis, Seoul National University of Technology, Seoul, 71 p (in Korean with English abstract).
- Shin, J.Y., 2000, Nitrogen and phosphorus removal potential of phragmites japonica Steudel and Salix gracilistyla Miq. as a function of hydraulic retention time and concentration. Ph.D. thesis, Kyung Hee University, Seoul, 143 p (in Korean with English abstract).
- Won, S.Y., Ki, D.W., Yoon, M.H., Maeng, S.K., Ahn, K.H., Park, J.H. and Song, K.G., 2012, Effects of operation parameters on pollutants removal in a lab-scale multi-layered soil filtration system. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 34, 91-96 (in Korean with English abstract).

---

Received : November 23, 2022

Revised : November 27, 2022

Accepted : January 2, 2023