

# 실 규모 물 처리 공정 및 후속 흡착 처리에 의한 오염원 제거 잠재성 평가\*

## Potential of Contaminant Removal Using a Full-Scale Municipal Water Treatment System with Adsorption as Post-Treatment

변해일\*\* · 여건희\*\* · 응우옌 홍안\*\*\* · 김영웅\*\*\*\* · 김동건\*\*\*\* · 이태훈\*\*\*\* · 정설화\*\*\*\*\* · 최영희\*\*\*\*\* · 오승대\*\*\*\*\*

Haeil Byeon\*\* · Geonhee Yeo\*\* · Anh-Hong Nguyen\*\*\* · Youngwoong Kim\*\*\*\* · Donggun Kim\*\*\*\* · Taehun Lee\*\*\*\* · Seolhwa Jeong\*\*\*\*\* · Younghoa Choi\*\*\*\*\* · Seungdae Oh\*\*\*\*\*

### Abstract

This study aimed to assess the efficacy of an adsorption process in removing organic matter and micropollutant residuals. After a full-scale water circulation system, the adsorption process was considered a post-treatment step. The system, treating anthropogenically impacted surface waters, comprises a hydro-cyclone, coagulation, flocculation, and dissolved air flotation unit. While the system generally maintained stable and satisfactory effluent quality standards over months, it did not meet the highest standard for organic matter (as determined by chemical oxygen demands). Adsorption experiments utilized two granular activated carbon types, GAC 830 and GCN 830, derived from coal and coconut-shell feedstocks, respectively. The assessment encompassed organic materials along with two notable micropollutants: acetaminophen (APAP) and acid orange 7 (A07). Adsorption kinetics and isotherm experiments were conducted to determine adsorption rates and maximum adsorption amounts. The quantitative findings derived from pseudo-second-order kinetics and Langmuir isotherm models suggest the effectiveness of the adsorption process. The findings of this study propose the potential of employing the adsorption process as a post-treatment to enhance the treatment of contaminants that are not satisfactorily treated by conventional water circulation systems. This enhancement is crucial for ensuring the sustainability of urban water cycles.

**Keywords:** Urban Water Cycle, Water Circulation, Adsorption, Micropollutant, Acetaminophen, Acid Orange 7

\*본 연구는 환경부(MOE)의 재원으로 한국환경산업기술원(KEITI)의 녹색혁신기업 성장지원 프로그램(R&D) 사업의 지원을 받아 수행되었음(Grant No. 2022003160004).

\*\*경희대학교 사회기반시스템공학과 환경공학연구실 석사과정(주저자: dygks7549@khu.ac.kr)

\*\*\*경희대학교 사회기반시스템공학과 환경공학연구실 석박사과정

\*\*\*\*경희대학교 사회기반시스템공학과 학사과정

\*\*\*\*\*블루그린링크 부장

\*\*\*\*\*블루그린링크 대표이사

\*\*\*\*\*경희대학교 사회기반시스템공학과 부교수(교신저자: soh@khu.ac.kr)

Received: January 9, 2024 / Revised: March 11, 2024 / Accepted: March 19, 2024

## 1. 서론

물순환(water circulation) 기술은 기후 위기 시대, 홍수, 가뭄 등 이상기후, 도시화로 인한 자연 물순환 저해, 물 수요의 증가 등에 대응하여 안전한 물 공급, 물 재해 예방, 수질 개선, 수 생태계 건강성 향상을 위한 기술로 주목받고 있다. 물순환 기술은 도시 인구 증가에 따른 물 소비·수요 증가에 대비하여, 지속 가능한 친환경 수자원을 확보할 수 있어서, 도시 지역 내 친수 용수 등 안전한 물 서비스 공급 및 관리에 효과적으로 이바지하는 방안으로 여겨지고 있다 (Silva, 2023; He et al., 2021). 물순환 시스템에 의해 안전하게 처리된 우수, 하수 방류수 및 월류수 등은 신도시 등의 녹지 공간 조성 시 필요한 친수 용수의 공급원으로 사용하여, 시민의 삶의 질과 도시 생태계의 건강성을 증진할 수 있다.

도시에서는 가정하수, 생활하수, 우수(빗물), 건물 잡배수, 산업활동에 따른 폐수 등이 발생한다. 해당 원수의 처리를 위해 개발된 도시 물순환 및 물 처리 공정은 물리·화학적 처리(침전, 여과, 막 분리, 산화, 흡착, 소독 공정 등)와 생물학적 처리(혐기, 무산소, 호기 공정 등) 공정 등이 있다(Oh and Choi, 2020; Oh et al., 2019; Grady et al., 2011). 처리 원수에는 매우 다양한 오염원들이 포함되어 있어서, 단일 공정보다는 여러 단위 공정이 결합한 조합공정이 적당하다. 최근 하이드로사이클론(Hydrocyclone), 응결/응집(Coagulation/Flocculation), 용존공기부상(Dissolved air flotation)이 결합한 조합공정(HCFD: Hydrocyclone+Coagulation/Flocculation+Dissolved air flotation)이 도시 물순환 시스템의 유용한 수질관리 공정으로 제안된 바 있다(Gunawardhana et al., 2023). 하이드로사이클론은 입자가 큰 부유물질을 빠르게 분리할 수 있고, 운전 및 유지관리비가 적게 소요되어 공정 운영 시 경제성이 높다(Liu et al., 2015; Radman et al., 2014; Bergstrom and Vomhoff,

2007). 응결/응집공정은 침전되기 어려운 작은 크기의 부유물질 및 용존 물질을 응집시키고, 이와 연계한 용존공기부상 공정은 입자에 기포를 함침시켜 응집된 오염원을 고속으로 부상시켜 빠른 제거가 가능하다(Haarhoff and Edzwald, 2013; Edzwald, 2010). HCFD 조합 공정은 유입 원수의 수질 및 수량 변동성에 유연하게 대응할 수 있지만 상대적으로 용존성 유기물 처리 효율이 낮아 이에 대한 기술적 보완이 필요한 것으로 보고 되었다(Gunawardhana et al., 2023).

도시의 고령화 및 산업화에 따라, 처리 원수에는 수질 규제 기준 항목 외 의약품물질 및 산업 화학물질 등의 다양한 미량오염물질이 포함되어 있다(Murray et al., 2010). HCFD 조합공정을 포함한 기존 물순환 처리시스템의 설계 및 운전 방안에는 미량오염물질 제어가 반영되어 있지 않기 때문에(Sher et al., 2021; Park and Oh, 2020a; Tewari et al., 2013), 기존 공정의 개량 및 보완 시 이에 대한 고려가 필요하다.

본 연구에서는 HCFD 조합공정 실 규모 물순환 시스템 공정의 수질 처리 성능을 평가하고, HCFD 시스템의 방류수 수질을 더욱 향상할 수 있는 후속 공정으로서 흡착공정의 잠재성 평가를 수행하였다. 흡착은 수중의 다양한 오염원을 활성탄 등의 흡착제 표면에 고정하는 물리화학적 반응이며, 흡착 공정은 이온성 및 용존성 물질을 빠르게 제거할 수 있는 장점이 있으므로, HCFD 조합공정의 후속 공정으로 선택하였다. 수질 향상 잠재성 평가를 위한 대상 오염원으로는 코로나19 등으로 생산 및 사용량이 증가하여, 수계에서 높은 농도로 널리 검출되고 있는 해열진통제 계열 의약품물질인 아세트아미노펜(acetaminophen, APAP)(Pashaei et al., 2022)과 산업용 화학물질인 산성염료7(Acid orange 7, A07)을 흡착 공정의 처리 대상 오염원 물질로 사용하였다. APAP는 전 세계적으로 널리 사용되는 대표적 해열진통제 의약품물질이다. 수계 환경에서 쉽게 검출되며, 하천수 및 호수

에서 최대 78µg/L 농도로 확인된 바 있으며, 다양한 수생생물의 기관·기능 장애를 유발할 수 있는 것으로 보고된 바 있다(Park and Oh, 2020a; Wilkinson et al., 2017; Grujic et al., 2009). A07은 식물, 섬유 등의 염색 산업에 널리 사용되는 대표적인 합성염료 물질로, 인간 및 수생태계에 노출 시 발암물질로서 건강에 큰 위협이 될 수 있다(Perera, 2019). 따라서, 본 연구에서는 활성탄 흡착제의 유기물 및 미량오염 물질(APAP 및 A07)의 흡착 특성 결과를 도출하여, 실 규모 HCFD 시스템 방류수의 후속 고도 처리 공정 흡착 공정의 잠재성을 평가하고자 하였다.

## 2. 실험 재료 및 방법

실 규모 HCFD 공정의 수처리 성능 평가를 위해 2022년 7월부터 2022년 9월까지 3개월간 경기도 내 신도시 인근에 있는 해당 공정의 유입수 및 최종 방류수에 대한 수질 모니터링을 진행하였다. 측정된 수질 지표로는 환경부 하천 수질 생활환경 기준 규제 항목인 생물화학적 산소 요구량(BOD), 화학적 산소 요구량(COD), 부유 물질량(SS), 총인(TP) 등을 수질 항목 측정 표준방법(American Public Health Association, 2005)에 따라 측정하였다.

흡착 공정의 오염원 제거 평가 실험을 위해 입상 활성탄 GAC 830(GAC)과 GCN 830(GCN)(Norit, The Netherlands)을 사용하였고, 대표 유기물질로는 휴믹산(Merck KCaA, Germany), 의약품질과 산업용 화학물질로는 APAP(Merck KCaA, Germany)와 A07(Tokyo Chemical Industry Co, Japan)을 사용하였다. GAC와 GCN의 흡착 성능 및 특성을 평가하기 위해, 흡착동역학(kinetic) 및 등온(isotherm) 실험을 진행하였다.

흡착동역학 실험을 위해 250mL 부피의 갈색병에 휴믹산 21mg/L 용액, APAP 1mg/L, A07 1mg/L 용액 100mL를 준비하였다. 흡착실험을 위한 갈색 병

에는 입상 활성탄 100mg을 투입하였고, 흡착반응을 위해 자성 교반기를 통해 200rpm의 속도로 약 5시간 동안 교반하였다. 흡착반응 중 추출한 물 시료는 0.45µm 필터를 이용해 여과한 후, 자외-가시선 분광광도계(Qvis 5000H)를 통해 각각 254nm, 483nm, 291nm 파장에서의 휴믹산, A07, 및 APAP의 농도를 측정하였다. 조건 별로 3회의 동일한 실험이 수행되었으며, 측정된 값의 평균 및 표준편차를 계산하였다. 흡착물과 흡착제의 단위 질량당 시간에 따라 흡착되는 흡착물질의 양(mg/g)은 각각 식 (1)을 통해 계산하였다.

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{W} \quad (1)$$

여기서,  $C_0$ 는 흡착질의 초기 농도(mg/L),  $C_t$ 는 시간  $t$ 에서의 흡착질의 농도(mg/L),  $W$ 는 사용된 흡착제의 양(g),  $V$ 는 용액의 부피(L)이다.

흡착제에 대한 흡착질(휴믹산, A07, APAP)의 흡착 반응속도를 정량적으로 분석하기 위해, 유사 1차 반응속도 모델(pseudo-first-order; PFO) 및 유사 2차 반응속도 모델(pseudo-second-order; PSO)을 사용하였다(Kim et al., 2020; Park and Oh, 2020b). 유사 1차 및 2차 반응속도 모델은, 수용액 및 고체상에서의 흡착제와 흡착질 간의 흡착 반응속도와 평형 상태에서의 흡착량 간의 관계를 위한 반응 속도식으로, 각각 다음 식 (2), (3)와 같다.

$$\frac{dq}{dt} = k_{a1}(q_e - q) \quad (2)$$

$$\frac{dq}{dt} = k_{a2}(q_e - q)^2 \quad (3)$$

여기서,  $q_t$ 와  $q_e$ 는 각각 시간  $t$ 와 평형상태에서 흡착제의 단위 질량(g) 당 흡착된 흡착질의 양(mg/g),

$k_{a1}$ 와  $k_{a2}$ 는 각각 유사 1차 반응속도상수( $\text{min}^{-1}$ )와 유사 2차 반응속도상수( $\text{mg/g} \cdot \text{min}$ )이다.

흡착등온실험에서는 흡착질의 농도를 각각 50, 100, 200, 400, 800mg/L의 경우로 설정하여 진행하였고(Keerthisinghe et al., 2019), 물 시료는 각각 24시간 후에 3mL씩 추출되었다. 흡착질에 대한 흡착제의 흡착 평형 특성은 Langmuir와 Freundlich 흡착 등온 모델을 적용하여 평가하였다(Oh and Kim, 2022). 두 모델은 각각 다음 식 (4), (5)으로 표현된다.

$$q_e = q_{\max,L} \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (4)$$

$$q_e = K_F C_e^n \quad (5)$$

여기서,  $C_e$ 는 흡착질의 평형 농도( $\text{mg/L}$ ),  $q_e$ 는 흡착제 단위 질량당 흡착된 흡착질의 양( $\text{mg/g}$ ),  $q_{\max,L}$ 는 Langmuir 모델을 통해 추정된 최대 흡착 용량

( $\text{mg/g}$ ),  $K_L$ 는 Langmuir 흡착등온식 상수이다.  $K_F$ 는 Freundlich 상수로, 흡착의 용이성을 나타내며 상수의 값이 클수록 흡착이 강하게 일어나는 경향이 있으며,  $n^{-1}$ 은 무차원 상수로서 기울기 값으로, 0~1의 범위 내에서 흡착강도 및 표면 불균일성을 나타내며, 불균일성이 높아질수록 0에 가까워진다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 실 규모 물순환 공정의 수처리 성능 평가

본 연구에서의 실 규모 물순환 시스템(HCFD)은 하이드로사이클론, 응결조 및 부상조를 이용한 고속 부상분리공법으로, 고속 응집을 통해 응집된 플록 내에 기포를 함침시켜 입자성 오염물질들을 고속으로 부상·분리시켜 제거하는 공정이다. 해당 시스템의 공정도는 Fig. 1에 나타내었다. 해당 공정의 일수 처리 용량은  $5,000\text{m}^3/\text{일}$ 이며, 주요 단위 공정은 하이드로사이클론, 응결/응집조, 및 용존공기부상조를 포함하며, 개별 공정의 규모와 특성을 Table 1에

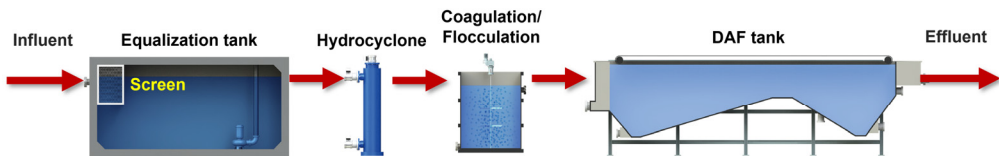


Fig. 1. Schematic Description of the Wastewater Treatment Processes of the HCFD System

Table 1. Specification and Operational Function of Unit Processes of HCFD System

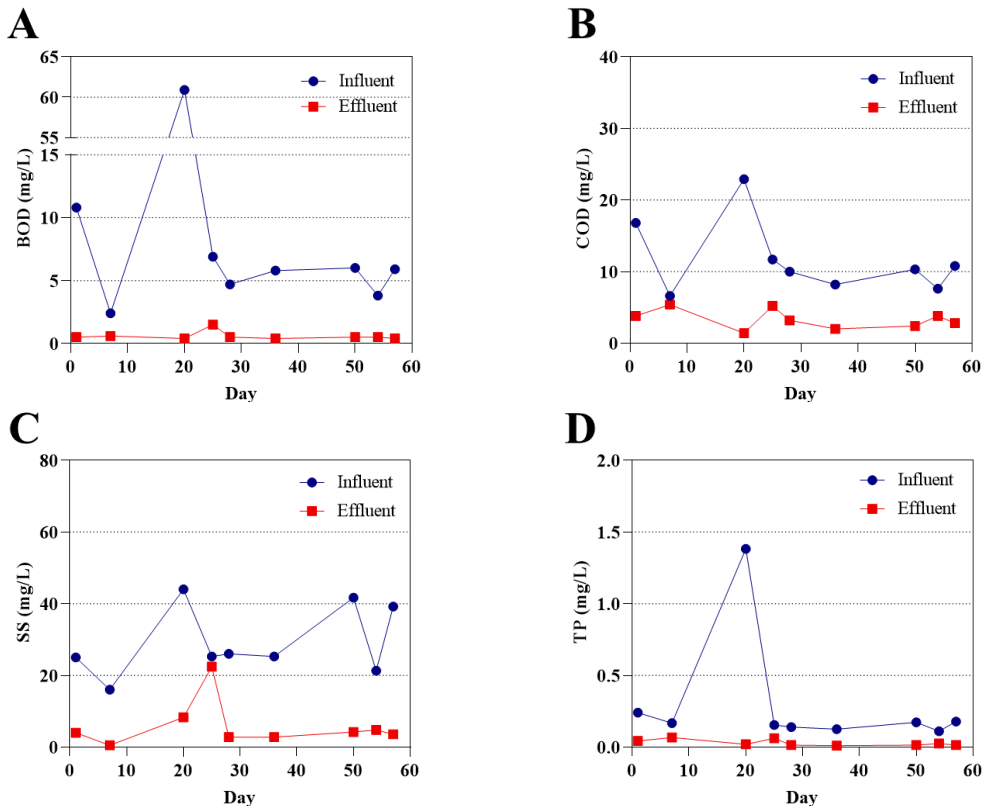
| Unit Process             | Specification                   | Operational Function   |
|--------------------------|---------------------------------|--|
| Equalization Tank        | 1 m <sup>3</sup> of square tank | In-flow control for stable operation of HCFD system                            |
| Hydrocyclone             | D60 mm × H508 mm                | Separation of coarse matters with high-specific gravity                        |
| Coagulation/Flocculation | L1080 mm × W540 mm × H1000 mm   | Addition of polymer for floc formation and stirring                            |
| Dissolved Air Flotation  | L350 mm × W900 mm × H950 mm     | High-speed flotation and separation with bubble impregnation in cohesive flocs |

나타내었다. 해당 공정의 운전과정은 먼저, 원수가 스크린을 통해 걸러진 후 유량조정조로 유입되고, 유입된 원수에 550ppm의 응집제(폴리염화알루미늄, (주) 이우화학)를 투입한 후, 하이드로사이클론에서 350rpm 속도의 고속 교반을 통해 응집 플록을 형성시켜 고비중(1.1 이상의 비중)의 협잡물을 분리 및 제거하였다. 그 다음, 응결/응집조에서는 1ppm

의 응집보조제(폴리머, (주) OCI-SNF)를 투입하고, 저속 교반을 통해 입자성 오염물질들의 응집플록을 형성하며, 최종적으로 용존공기부상조에서 형성된 응집플록에 기포를 합침시켜 입자성 오염물질을 고속으로 부상·분리시킨 후, 상부의 스크래퍼를 통해 제거하였다. HCFD 시스템은 하천수 및 호소수 수질의 수질 처리 공정으로 사용될 수 있고, 우천시 오염부

**Table 2.** Influent and Effluent Water Quality Parameters, on Average, of HCFD

| Water Quality Parameters | Influent (mg/L) | Influent Water Quality Grade | Effluent (mg/L) | Effluent Water Quality Grade | Removal Rate (%) |
|--------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------|
| BOD                      | 11.91±18.51     | Very poor                    | 0.59±0.34       | Very good                    | 89.1±7.90        |
| COD                      | 11.66±5.15      | Very poor                    | 3.33±1.36       | Good                         | 65.5±21.9        |
| SS                       | 29.31±9.81      | Slightly poor                | 5.93±6.51       | Very good                    | 78.9±25.9        |
| TP                       | 0.30±0.41       | Slightly poor                | 0.02±0.02       | Very Good                    | 82.7±14.3        |



**Fig. 2.** Concentration Changes in the Influent and Effluents of HCFD: (A) BOD, (B) COD, (C) SS, and (D) TP

하에 대응하기 위한 초기 우수 및 월류수 대응 처리 시설로도 활용될 수 있다.

2022년 7월부터 2022년 9월까지 3개월간 실 규모 HCFD 공정의 유입수 및 방류수의 수질을 Table 2 및 Fig. 2에 나타내었다. 해당 기간 유입수의 평균 BOD 및 TP의 농도는 각각  $11.91 \pm 18.51 \text{ mg/L}$ ,  $0.3 \pm 0.41 \text{ mg/L}$ 였으며(Table 2), BOD 및 TP 유입 수질의 큰 변동(Day 20)은 외부 환경적 요인(강우 등으로 인한 오염 부하 변화)으로 인한 일시적 변화로 사료된다(Fig. 2A, 2D). 유입수 COD 및 SS는 각각  $11.66 \pm 5.15 \text{ mg/L}$ 와  $29.31 \pm 9.81 \text{ mg/L}$ 로 측정되었으며(Table 2), 유입 수질의 변화는 유의미하게 관찰되었지만, BOD 및 TP와 비교하여 수질 변동 범위는 상대적으로 좁게 관찰되었다(Fig. 2B, 2C). 환경부 하천 생활 환경 수질기준에 근거하여(Table 3), 유입 원수 수질은 등급은 매우 나쁨(V) 혹은 약간 나쁨(IV) 수준이었다. HCFD 시스템에 의해 처리된 방류수는 다소 큰 유입수 수질 변동이 있었음에도, 수질이 크게 향상된 방류수를 안정적으로 방류하고 있었음을 확인하였다. HCFD 시스템의 도시 물 처리 및 물순환 공정으로서의 오염원 부하 변동 대응 및 방류수질 안정성은 기존 문헌에서도 보고된 바 있다(Gunawardhana et al., 2023). 본 연구에서, 유입수에서 낮은 수질기준을 보였던 BOD(매우 나쁨), SS(약간 나쁨), TP(약

간 나쁨)의 경우, 처리 후 방류수 수질은 모두 매우 좋음 수준으로 향상되었다. COD 수질은 매우 나쁨( $11.66 \pm 5.15 \text{ mg/L}$ ) 수준에서 처리 후, 좋음 수준( $3.33 \pm 1.36 \text{ mg/L}$ )으로 향상되었다(Table 2). BOD, COD, SS, TP 수질기준 항목의 3개월간 평균 제거율은 각각 약 89%, 65%, 78%, 82%로 확인되었다(Table 2). 유입수 수질 대비 측정된 방류수의 수질 변화를 고려할 때, 실 규모 HCFD 물순환 시스템에서 수질 변동이 큰 유입수를 대상으로, 대체적으로는 안정적이고 효율적인 수처리 성능을 보였으며, 용존성 유기물질을 대표하는 COD의 방류수 수질은 최고 수질 등급(2mg/L 이하)을 만족시키기 위해서는 후처리 공정이 고려될 필요가 있다고 판단되었다.

### 3.2 후처리 흡착 공정에 의한 유기물 오염원 제거 잠재성 평가

후처리 공정으로서 흡착 오염원 처리 가능성을 평가하기 위해, 입상 활성탄(GCN)을 이용한 유기물(휴믹산) 흡착실험을 실 규모 흡착공정 조건(공상접촉시간 등)을 고려하여 실험실 환경에서 수행하였다. 유기물 흡착동역학 실험의 결과 초기에는 비교적 빠른 흡착반응이 관찰되었으나, 이후 반응은 점차 느려지는 양상으로 나타났다(Fig. 3A). 최종 유기물 흡착량(4시간 기준)은  $0.65 \text{ mg/g}$ 를 보였다(Table

**Table 3.** Water Quality Standards for Stream/river in Korea

| Water Quality |       | BOD (mg/L) | COD (mg/L) | SS (mg/L)            | TP (mg/L)   |
|---------------|-------|------------|------------|----------------------|-------------|
| Index         | Grade |            |            |                      |             |
| Very Good     | Ia    | $\leq 1$   | $\leq 2$   | $\leq 25$            | $\leq 0.02$ |
| Good          | Ib    | $\leq 2$   | $\leq 4$   | $\leq 25$            | $\leq 0.04$ |
| Slightly Good | II    | $\leq 3$   | $\leq 5$   | $\leq 25$            | $\leq 0.1$  |
| Normal        | III   | $\leq 5$   | $\leq 7$   | $\leq 25$            | $\leq 0.2$  |
| Slightly Poor | IV    | $\leq 8$   | $\leq 9$   | $\leq 100$           | $\leq 0.3$  |
| Poor          | V     | $\leq 10$  | $\leq 11$  | No floating objects* | $\leq 0.5$  |
| Very Poor     | VI    | $> 10$     | $> 11$     | -                    | $> 0.5$     |

Note: \*No trash floating on the river.

4). 동역학 실험 결과를 PFO와 PSO 모델로 평가한 결과, PSO 모델이 측정값을 더욱 정확하게( $R^2$  기준) 모사할 수 있는 것으로 확인되었다. GCN의 유기물 흡착 등은 실험 결과는 각각 Langmuir와 Freun-

dlich 모델링으로 해석하였으며, 모델 정확도  $R^2$  값은 Langmuir의 경우 0.99, Freundlich의 경우 0.98이었다(Table 4). 흡착동역학 실험 결과에서, 실 규모 흡착 공정의 15-30분 후 유기물 흡착제거율은

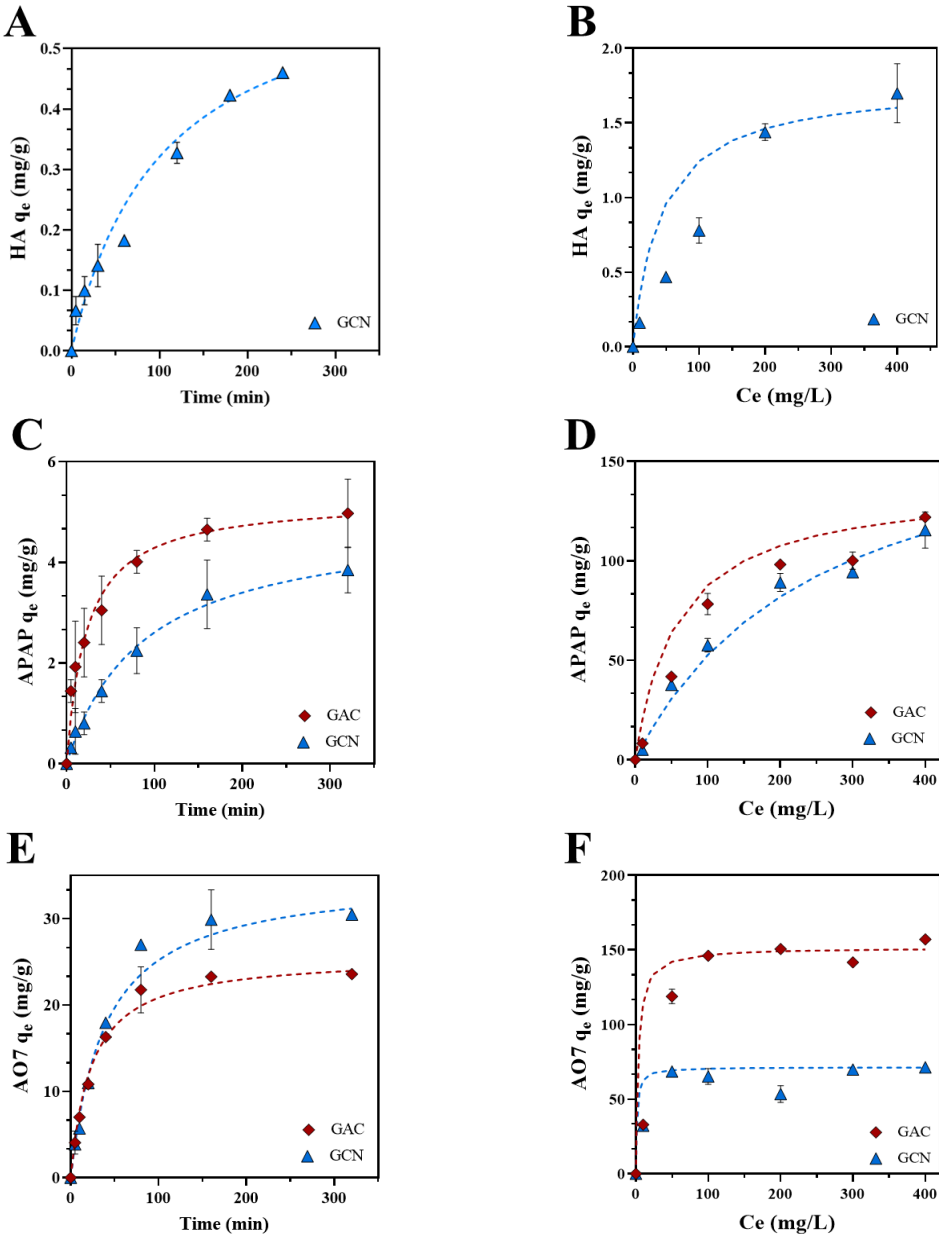


Fig. 3. Adsorption Kinetics (A, C, E) and Isotherm (B, D, F) Characteristics of Humic Acid (A, B), APAP (C, D), and AO7 (E, F). The Line Represents the PSO (A, C, E) and Langmuir (B, D, E) Model Fitted Values, Respectively



**Table 4.** Summary of Adsorption Kinetics and Isotherm Model Parameters

| Model                    | Parameter                           | Adsorbent   |             |             |             |             |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                          |                                     | GCN         | GAC         | GCN         | GAC         | GCN         |
|                          |                                     | Adsorbate   |             |             |             |             |
|                          | Humic Acid                          | A07         | A07         | APAP        | APAP        |             |
| <b>Kinetic Modeling</b>  |                                     |             |             |             |             |             |
| PFO                      | $k_{a1}$ (min <sup>-1</sup> )       | 0.014       | 0.021       | 0.025       | 0.012       | 0.012       |
|                          | $q_e$ (mg/g)                        | 0.55        | 16.44       | 31.11       | 4.21        | 4.39        |
|                          | $R^2$                               | 0.96        | 0.98        | 0.99        | 0.987       | 0.99        |
| PSO                      | $k_{a2}$ (mg/g·min)                 | 0.015       | 0.002       | 0.0007      | 0.008       | 0.002       |
|                          | $q_e$ (mg/g)                        | 0.65        | 25.71       | 34.97       | 5.26        | 4.88        |
|                          | $R^2$                               | <b>0.99</b> | <b>0.99</b> | <b>0.99</b> | <b>0.99</b> | <b>0.99</b> |
| <b>Isotherm Modeling</b> |                                     |             |             |             |             |             |
| Langmuir                 | $k_L$ (L/mg)                        | 0.024       | 0.303       | 0.697       | 0.017       | 0.004       |
|                          | $q_{max}$ (mg/g)                    | 1.77        | 151.52      | 71.43       | 138.89      | 185.19      |
|                          | $R^2$                               | <b>0.99</b> | <b>0.99</b> | <b>0.99</b> | <b>0.99</b> | <b>0.99</b> |
| Freundlich               | $K_F$ (mg/g·[L/mg] <sup>n-1</sup> ) | 0.067       | 34.26       | 35.54       | 3.86        | 0.823       |
|                          | 1/n                                 | 0.66        | 0.273       | 0.131       | 0.623       | 1.016       |
|                          | $R^2$                               | 0.98        | 0.98        | 0.81        | 0.98        | 0.96        |

21-30%으로 관찰되었으며, 이는 후처리 공정으로서의 흡착 공정의 유기물 제거의 높은 잠재성을 시사한다. 다만, 유기물 방류수 최고 수질 등급을 만족시키기 위해서는 본 실험 조건 대비(약 33%) 흡착제 충전률 혹은 공상접촉시간을 상향해야 할 필요가 있다고 판단된다.

### 3.3 후처리 흡착 공정에 의한 미량오염물질 제거 잠재성 평가

수중 유기물 외에 대표 미량오염물질로서 APAP와 A07 오염원의 흡착 특성을 입상활성탄을 사용하여 평가하였다. 흡착제 종류에 따른 개별 화학물질의 흡착 특성 차이가 있을 수 있으므로, GCN(야자계)과 GAC(석탄계) 입상활성탄 2종류를 사용하여 평가하였다(Fig. 3 및 Table 4). APAP의 흡착동역학 실험을 시행하였다(Fig. 3C, 3D). 모델 정확도 계수에 근

거하여, PSO 모델이 PFO 모델보다 실제 흡착 결과값을 보다 더 잘 모사할 수 있는 것으로 확인되었다. PSO 모델에 근거한 GCN과 GAC의 APAP 흡착량은 각각 4.88mg/g, 5.26mg/g이었다. 등온흡착실험에서는, Langmuir 모델의 정확도가 Freundlich 모델보다 높았으며, APAP의 등온 흡착 특성을 더욱 잘 반영할 수 있는 것으로 확인되었다. Langmuir 모델의 결과로 GAC와 GCN의 흡착 특성을 비교할 때, 최대 흡착량은 각각 138.89mg/g, 185.19mg/g으로, GCN이 GAC보다 더 큰 APAP 흡착량을 보였음을 확인할 수 있었다. 흡착 결과를 종합하면, GAC 흡착제는 흡착속도 측면에서 우수하였으며, 최대 흡착량 기준으로는 GCN 흡착제가 미량오염물질 APAP 제거 잠재성이 높은 것으로 확인되었다. APAP의 하수 방류수 검출 농도(리터당 수십 µg 이내), 본 실험에서 확인한 30분 기준 활성탄 흡착제거율(약 70% 이상), 문



헌에 보고된(Zur et al., 2018) 생태 독성 농도 수준 (0.02-0.4mg/L)을 종합적으로 고려할 때, 활성탄 흡착 공정은 APAP 물질을 생태 독성 농도 이하로 제어할 수 있음을 시사한다.

입상 활성탄을 이용한 목표 흡착질 A07에 대한 흡착실험을 진행하였다(Fig. 3E, 3F). 흡착동역학 실험 결과의 PSO 모델링에 근거한 GAC와 GCN의 A07 흡착량은 각각 25.71mg/g, 34.97mg/g이었다(Table 4). GAC와 GCN의 A07 흡착등온실험 결과를 Langmuir와 Freundlich 모델을 이용해 해석하였다. Langmuir 모델 해석에 따른 GAC의 최대 흡착량은 151.52 mg/g이었고, GCN은 71.43mg/g이었다. A07 오염물질의 경우, 각각 GCN 흡착제는 흡착속도 측면에서, 그리고 GAC 흡착제는 최대 흡착량 측면에서 우수한 잠재성을 나타내었으며, 이러한 결과는 오염원 처리 공정 목적의 우선순위(처리 속도, 수리학적 체류시간 및 흡착제 재 등)에 따라 공정 설계 및 운전인자에 반영될 수 있는 유용한 결과로 사료 된다.

본 실험에서는 대표적 활성탄 전구체인 석탄 및 야자로 제조된 GAC 및 GCN의 미량오염물질 제어 특성을 평가하였다. 두 활성탄 흡착제는 대표적 EBCT (30분) 조건에서 미량오염물질의 높은 흡착 제어 잠재성을 확인하였다. 두 흡착질의 흡착반응은 Langmuir 모델에서 더욱 잘 묘사되었다. Freundlich 흡착등온식은 흡착제 표면이 불균일한 표면에너지를 가지고, 흡착 표면에 다분자층 흡착반응을 잘 묘사하는 것으로 보고 된 바 있다. Langmuir 흡착 등온 모델은 흡착질 표면에 흡착질이 단분자층을 형성하며 진행되는 흡착반응을 잘 설명하는 것으로 알려져 있다(Bergaoui et al., 2018). 따라서, 본 실험에서 Langmuir 흡착 등온 모델이 높은 흡착반응 정확도를 보였는데, 이는 실험에 사용된 단일 흡착질의 흡착제 표면에 단분자층으로 비교적 균질(Homogenous)하게 일어나서 포화상태에 도달함을 의미한다(Nworie et al., 2019).

#### 4. 결론

본 연구에서는 하이드로사이클론, 응결/응집, 용존공기부상 단위 공정이 결합한 실 규모 물순환 공정시스템(HCFD)의 수질 처리 성능 평가를 수행하였다. 수질 분석 결과, 해당 물순환 시스템은 유입 수질 변동에 유연하게 대응할 수 있고, 높은 방류수 수질을 보였다. 물순환 처리시스템의 후속 수처리 공정으로서 활성탄 기반 흡착 공정의 오염원 처리 잠재성이 평가되었다. 오염원의 입상 활성탄 흡착 특성은 흡착동역학 및 등온 흡착실험과 다양한 흡착반응 모델링 기법을 이용하여 평가되었다. 오염물질과 흡착 특성 기준(속도 및 최대 흡착량) 별로 GAC와 GCN의 흡착 특성이 다소 달랐지만, 두 가지 대표적 입상 활성탄은 유기물 및 대표적 미량오염물질(의약 및 산업용 화학물질)의 우수한 흡착제거 잠재성을 보여주었다. 따라서, 이러한 결과는 흡착 공정은 기존 물순환 시스템(HCFD)의 방류수 수질(용존성 유기물 등)을 더욱 향상할 수 있고, 도시화, 산업화, 고령화에 따라 더욱 생산 및 사용이 증가하고 있는 미규제 미량 잔류오염물질의 높은 처리 잠재성이 있음을 시사한다.

#### 참고문헌

1. American Public Health Association (2005), *Standard Methods for the Examination of Water and Sewage*, Washington, D.C.
2. Bergaoui, M., A. Nakhli, Y. Benguerba, M. Khalfaoui, A. Erto, F. E. Soetaredjo, S. Ismadji and B. Ernst (2018), "Novel Insights into the Adsorption Mechanism of Methylene Blue Onto Organo-bentonite: Adsorption Isotherms Modeling and Molecular Simulation", *Journal of Molecular Liquids*, 272: 697~707.
3. Bergstrom, J. and H. Vomhoff (2007), "Experimental Hydrocyclone Flow Field Studies", *Separation and Purification Technology*, 53: 8~20.

4. Edzwald, J. K. (2010), "Dissolved Air Flotation and Me", *Water Research*, 44(7): 2077~2106.
5. Grady, C. P. L., G. T. Daigger, N. G. Love and C. D. M Filipe (2011), *Biological Wastewater Treatment (3rd ed.)*, London: IWA Publishing, CRC Press.
6. Grujic, S., T. Vasiljevic and L. Mila (2009), "Determination of Multiple Pharmaceutical Classes in Surface and Ground Waters by Liquid Chromatography-Ion Trap-Tandem Mass Spectrometry", *Journal of Chromatography A*, 1216(25): 4989~5000.
7. Gunawardhana, T., J. G. Hong, Y. Choi, S. I. Siddiqui, H. T. Nguyen and S. Oh (2023), "Water Quality Characteristics and Reuse Potential Using Adsorption as a Post-treatment Option for a Full-scale Hydrocyclone, Coagulation, Flocculation, and Dissolved Air Flotation System", *Environmental Geochemistry and Health*, 45(11): 8585~8598.
8. Haarhoff, J. and J. K. Edzwald (2013), "Adapting Dissolved Air Flotation for the Clarification of Seawater", *Desalination*, 311: 90~94.
9. He, C., Z. Liu, J. Wu, X. Pan, Z. Fang, J. Li and B. A. Bryan (2021), "Future Global Urban Water Scarcity and Potential Solutions", *Nature Communications*, 12(1): 4667.
10. Keerthisinghe, T. P., L. N. Nguyen, E. E. Kwon and S. Oh (2019), "Antiseptic Chlorhexidine in Activated Sludge: Biosorption, Antimicrobial Susceptibility, and Alteration of Community Structure", *Journal of Environmental Management*, 237: 629~635.
11. Kim, D. G., D. Choi, S. Cheon, S-O. Ko, S. Kang and S. Oh (2020), "Addition of Biochar into Activated Sludge Improves Removal of Antibiotic Ciprofloxacin", *Journal of Water Process Engineering*, 33: 101019.
12. Liu, Y., Q. Cheng, B. Zhang and F. Tian (2015), "Three-Phase Hydrocyclone Separator: A Review", *Chemical Engineering Research and Design*, 100: 554~560.
13. Murray, K. E., S. M. Thomas and A. A. Bodour (2010), "Prioritizing Research for Trace Pollutants and Emerging Contaminants in the Freshwater Environment", *Environmental Pollution*, 158(12): 3462~3471.
14. Nworie, F. S., F. I. Nwabue, W. Oti, E. Mbam and B. U. Nwali (2019), "Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution Using Activated Rice Husk Biochar: Adsorption Isotherms, Kinetics and Error Analysis", *Journal of the Chilean Chemical Society*, 64: 1.
15. Oh, S., D. Choi and C. J. Cha (2019), "Ecological Processes Underpinning Microbial Community Structure during Exposure to Subinhibitory Level of Triclosan", *Scientific Reports*, 9(1): Article 1.
16. Oh, S. and D. Choi (2020), "Emerging Investigator Series: Activated Sludge Upon Antibiotic Shock Loading: Mechanistic Description of Functional Stability and Microbial Community Dynamics", *Environmental Science: Water Research & Technology*, 6(5): 1262~1271.
17. Oh, S. and Y. Kim (2022), "Biochar Enhance Functional Stability of Ammonia-oxidizing Bioprocess Against Toxic Chemical Loading", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2): 107289.
18. Park, S. and S. Oh (2020a), "Activated Sludge-Degrading Analgesic Drug Acetaminophen: Acclimation, Microbial Community Dynamics, Degradation Characteristics, and Bioaugmentation Potential", *Water Research*, 182: 115957.
19. Park, S. and S. Oh (2020b), "Inhibitory Mechanisms and Fate of the Analgesic Drug Acetaminophen in Nitrifying Activated Sludge", *Journal of Hazardous Materials*, 399: 123104.
20. Pashaei, R., R. Dzingelevičienė, A. Bradauskaitė, A. Lajevardipour, M. Mlynska-Szultka, N. Dzingelevičius, S. Raugelė, A. Razbadauskas, S. Abbasi, R. M. Rees and B. Buszewski (2022), "Pharmaceutical and Microplastic Pollution before and during the COVID-19 Pandemic in Surface Water, Wastewater, and Groundwater", *Water*, 14(19): Article 19.
21. Perera, H. J. (2019), "Removal of Acid Orange 7 Dye from Wastewater: Review", *International Journal of Waste Resources*, 9: 367.
22. Radman, J. R., R. Langlois, T. Leadbeater, J. Finch, N. Rowson and K. Waters (2014), "Particle Flow Visualization in Quartz Slurry Inside a Hydrocyclone

- using the Positron Emission Particle Tracking Technique”, *Minerals Engineering*, 62: 142~145.
23. Sher, F., K. Hanif, A. Rafey, U. Khalid, A. Zafar, M. Ameen and E. C. Lima (2021), “Removal of Micropollutants from Municipal Wastewater Using Different Types of Activated Carbons”, *Journal of Environmental Management*, 278: 111302.
24. Silva, J. A. (2023), “Water Supply and Wastewater Treatment and Reuse in Future Cities: A Systematic Literature Review”, *Water*, 15(17): Article 17.
25. Tewari, S., R. Jindal, Y. L. Kho, S. Eo and K. Choi (2013), “Major Pharmaceutical Residues in Wastewater Treatment Plants and Receiving Waters in Bangkok, Thailand, and Associated Ecological Risks”, *Chemosphere*, 91(5): 697~704.
26. Wilkinson, J., P. S. Hooda, J. Barker, S. Barton and J. Swinden (2017), “Occurrence, Fate and Transformation of Emerging Contaminants in Water: An Overarching Review of the Field”, *Environmental Pollution*, 231(1): 954~970.
27. Żur, J., A. Piński, A. Marchlewicz, K. Hupert-Kocurek, D. Wojcieszynska and U. Guzik (2018), “Organic Micropollutants Paracetamol and Ibuprofen: Toxicity, Biodegradation, and Genetic Background of Their Utilization by Bacteria”, *Environmental Science and Pollution Research*, 25: 21498~21524.

## 요약

본 연구에서는 하이드로사이클론, 응결/응집, 용존공기부상 단일 공정이 결합한 실 규모 물순환 조합공정(HCFD)의 오염 지표수 처리 성능을 평가하였다. 실 규모 물순환 공정은 수질 변동이 큰 유입 원수를 대상으로 안정적인 수처리 효율을 보였으며, 유입수의 주요 수질 지표가 매우 나쁨(BOD, TP, COD) 혹은 약간 나쁨(SS)이었으나, 방류수는 매우 좋음(BOD, SS, TP) 혹은 좋음(COD) 수준으로 향상되었다. 물순환 시스템 방류수의 후속 고도 처리를 위해 활성탄 기반 흡착 공정의 용존성 유기물 및 미량오염물질(잔류의약품 APAP 및 산업 화학물질 A07) 처리 잠재성을 평가하였다. 오염원 흡착 특성은 흡착동역학 및 등온 흡착실험과 관련된 모델링 기법을 이용하여 관찰하였다. 실험 결과, 후처리 활성탄 흡착은 잔류 유기물, APAP, A07 유기물에 대한 높은 오염원 제거 잠재성이 있음이 확인되었으며, 오염원 흡착속도 및 최대 흡착량 값은 유사 2차 반응속도 모델과 Langmuir 등온흡착 모델에 의해 결정되었다. 본 연구 결과, 활성탄 기반 흡착 공정은 기존의 물순환 조합공정과 연계시 수처리 효율을 상호 보완적으로 높이고, 흡착 공정은 전단의 입자 분리 공정으로 제거가 어려운 용존성 오염원의 후속 처리에 대한 높은 잠재성이 있음을 시사한다.

**주제어:** 도시 물순환, 물순환 공정, 흡착, 미량오염물질, 아세트아미노펜, 산성염료7