J. Soil Groundwater Environ. Vol. 30(5), p. 9~21, 2025 https://doi.org/10.7857/JSGE.2025.30.5.009
ISSN 1598-6438 (Print), ISSN 2287-8831 (Online)

≪ **Field Report** ≫

안성천 지역 강변여과수와 복류수의 수질 특성 비교

배종섬[1] · 진성욱[2,3]* · 이대형[1] · 오동환[4]
[1]한국수자원공사
[2]전북대학교 지구환경과학과 & 지구환경시스템 연구소
[3]전북대학교 환경에너지융합학과
[4](주)인텔리지오

Comparison of Water Quality Characteristics Between Riverbank Filtration and Riverbed Filtration in the Anseongcheon Area

Jong-Soem Bae[1], Sung-Wook Jeen[2,3]*, Dae-Hyoung Lee[1], Dong-Hwan Oh[4]
[1]K-water
[2]Department of Earth and Environmental Sciences & The Earth Environmental System Research Center, Jeonbuk National University
[3]Department of Environment and Energy, Jeonbuk National University
[4]Intellegeo Co. Ltd

ABSTRACT

This study evaluated the water quality characteristics of two widely used indirect water intake methods in Korea—riverbed filtration and riverbank filtration—which have garnered increasing attention in response to recent climate anomalies. Specifically, the study compared water quality data from the Anseongcheon area, where riverbed and riverbank filtration facilities are installed at the same location. Monthly measurements of pH, biochemical oxygen demand (BOD), suspended solids (SS), dissolved oxygen (DO), total coliforms (TC), and fecal coliforms (FC) were conducted from 2016 to 2018. Additionally, five rounds of sampling and analysis of the horizontal wells in the riverbank filtration system were conducted between 2018 and 2019. The results showed that both riverbed and riverbank filtration methods generally produced higher water quality compared to raw river water. While riverbed filtration was particularly effective at removing physical pollutants such as SS and turbidity, riverbank filtration demonstrated superior overall performance by significantly reducing all major water quality indicators. Notably, riverbank filtration exhibited excellent biological treatment efficiency in lowering concentrations of BOD, TC, and FC. This study provides empirical evidence demonstrating the improvement of water quality achieved through indirect water intake methods, offering valuable insights for the selection and management of sustainable water supply strategies in the future.

Key words : Indirect intake method, Riverbank filtration, Riverbed filtration, Water quality, Water resource

1. 서 론

우리나라에서는 강과 저수지가 주요한 상수원으로 사용되고 있으나, 이러한 수자원은 오염에 매우 취약하다(Sim et al., 2025). 최근 기후 위기로 인하여 상수원 정책의 이행과 계획 수립의 불확실성이 전례없이 고조되고 있으며(KEI, 2024), 급격한 기상이변으로 인하여 극한 가뭄이 빈번해짐에 따라 불규칙적인 용수공급이 발생하기도 하였다. 또한, 공장의 화재가 발생하고 이를 처리하는 과정에서 유독물질이 주변 하천으로 흘러 들어가는 수질 사고가 발생하거나, 조류의 이상 증식에 따라 하천 수질이 악화되는 수질 오염 등이 빈번해 짐에 따라 하천수를 상수원수로 사용하고 있는 주민들의 불안감이 커지고 있다. 특히, 낙동강은 중상류에 소재한 다수의 산업단지와 대도시

주저자: 배종섬, 한국수자원공사 차장
공저자: 이대형,한국수자원공사 과장; 오동환,㈜인텔리지오 차장
*교신저자: 진성욱, 전북대학교 지구환경과학과 교수
E-mail: sjeen@jbnu.ac.kr

Received : 2025. 9. 5 Reviewed : 2025. 9. 24
Accepted : 2025. 10. 17 Discussion until : 2025. 12. 31

그리고 광대한 농경지와 수많은 축산농가 등으로부터 배출되는 오염물질로 인해 이를 식수원으로 직접 사용하기에는 적합하지 않다고 할 수 있으며, 낙동강 수계에서 깨끗한 식수원을 얻기 위해 지금까지 많은 노력을 기울여 왔으나 아직까지 성과는 별로 없는 형편이다(Busan Metropolitan Council, 2023). 이로 인해 안정적인 취수원에 대한 요구가 증가하고 있어 간접취수에 대한 관심이 높은 상황이며, 과거와는 달리 맑은 물에 대한 국민의 욕구가 크기 때문에 정부 및 지자체에서는 국민에게 깨끗한 물을 제공하기 위한 방법으로 간접취수에 대해 관심을 기울이고 있다. 안정적 상수원수 확보에 대한 관심이 높아짐에 따라 이에 대한 평가와 연구가 이루어지고 있으나, 전체 상수원수 중 간접취수가 차지하는 비중은 아직까지 미미한 실정이다(Hamm et al., 2002; Kong et al., 2001; Lee et al., 2008).

간접취수는 하천 표류수가 모래나 자갈의 공극을 통과하면서 여과, 흡착, 생화학적 분해 등의 과정을 거쳐 개선된 수질의 물을 취수하는 방식(GRI, 2008)으로, 우리나라에서 많이 이용하고 있는 간접취수 방식에는 강변여과수(Fig. 1(a))와 복류수(Fig. 1(b)) 취수가 있다. 상수원관리규칙에 따르면 강변여과수는 하천, 호소 또는 그 인근지역의 모래자갈층을 통과한 물로 정의하고 있으며, 복류수는 하천, 호소나 이에 준하는 수역의 바닥면 아래나 옆면의 사력층 등의 속을 흐르는 물로 정의하고 있다.

강변여과는 하천의 표층수가 자연스럽게 강변 충적대수층을 통과하며 침투하는 자연적인 수처리 기법으로 대수층을 통과하면서 발생하는 물리적, 화학적, 생물학적 과정이 오염물질을 분해하거나 제거한다(Ibrahim et al., 2024). 강변여과수는 대수층 내 자연여과를 통해 탁도, 미생물 오염물, 유기화합물을 상당히 제거할 수 있으며, 자연토양을 여과 매체로 사용하여 생성되는 수질은 원수인 표층수보다 종종 뛰어나, 실용적이고 비용 효율적인 식수 공급방법이 된다(Elhadary, 2024; Ibrahim et al., 2024). 반면 복류수 취수는 매설 깊이 7 m 이하로 직경 0.6~1.3 m의 콘크리트 유공관을 설치하여 집수정에 연결한 후 유공관에 스며든 여과된 하천수를 집수정으로 모아서 양수하는 방식으로, 인위적으로 치환된 모래나 자갈층을 통과한 하천수를 이용한다.

강변여과수는 1870년대 유럽을 중심으로 본격적으로 사용되기 시작했으며, 특히 공업의 발달로 인한 오염이 극심했던 라인(Rhine)강 유역과 도나우(Donau)강, 엘베(Elbe)강 유역 등에서 개발이 활발히 이루어졌다. 이 지역 국가들은 바이러스 및 유기용제 등의 각종 유해물질로부터 오염된 상수원수가 정수장에 유입되기 이전 단계에서 그 수질을 대폭 개선하고, 수질오염 사고에 대비할 수 있도록 인공함양 방식을 주로 이용하고 있다(K-water, 2008). 미국의 강변여과 공정은 소독부산물(disinfection by-products) 전구물질과 원생동물 병원체, 지아디아(Giardia lamblia)와 크립토스포리디움(Cryptosporidium parvum)과 같은 미생물 오염물질을 감소시킬 수 있는 능력 때문에 사용하기 시작하였으며, 중부지역을 중심으로 오래전부터 활발하게 이용되고 있다(K-water, 2009). 국내에서는 지속적으로 증가하고 있는 용수 수요에 안정적으로 대처하기 위한 원수 확보 방안으로 강변여과에 대한 조사가 1990년대부터 시작되었으며(Lee et al., 2010), 충적층이 두껍게 발달한 낙동강 유역이 개발의 중심이 되었다.

복류수는 하천 아래의 넓은 지역을 활용하기 때문에 생산적 측면에서 강변여과수보다 이점을 제공하지만(Blavier, 2014), 강변여과수에 비해 수질저감 효과가 적은 것으로 알려져 있다. 2022년 상수도통계(MOE, 2022)에 따르면 우리나라 하천에서 간접취수로 사용하고 있는 복류수는 전국 154개 시설이 운영 중이며, 취수량은 431,394,193 m^3/year이다. 해외에서도 복류수에 대한 연구 사례는 매우 드물며, 복류수와 강변여과수의 구분이 국내보다 더욱 모호

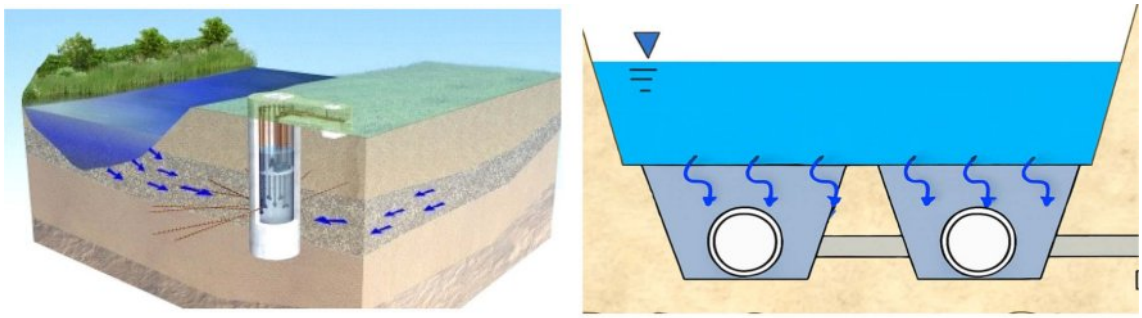

Fig. 1. Conceptual maps of (a) riverbank filtration and (b) riverbed filtration.

하다. 볼리비아 파라페티(Parapeti) 강에서 수행된 복류수 시스템 조사(Blavier, 2014)가 대표적인 복류수에 대한 연구이다. 그 외에 태국 치앙마이의 핑(Ping) 강에서의 연구(Pholkern, 2015), 독일 드렌스덴(Dresden)에서의 연구(Paufler, 2018) 등이 있지만, 우리나라에서 사용 중인 복류수 시설과 차이가 있어, 이들을 복류수에 대한 연구 사례로 분류하기에는 다소 모호한 점이 있다. 국내에서 복류수는 1910년대 초기에 도입되었으며, 1960년대에 들어 수요 증가, 집수 매거 제작 기술의 발달 등으로 수평 집수 매거가 연결된 형태로 변형되어 현재와 같이 진화되었다(Baik, 2012; Kim, 2007). 과거에 복류수 이용과 개발에 관한 연구 및 복류수에서 수처리시설을 이용한 수질 개선을 분석한 연구가 일부 있었으나(Baik, 2012; Na, 2002; Yang, 2000), 이에 관한 연구는 대체로 많지 않다. 국내 복류수에 관한 최근 연구로는 국내 복류수 취수시설 현황과 수질오염물질 제거효율 특성에 대한 기초연구(Kwon et al., 2023) 등이 있다.

복류수는 강변여과수보다 수질이 양호한 하천 상류 지역에서, 강변여과수는 대수층이 두꺼운 하천 하류 지역에서 주로 개발된다. 이러한 특성으로 인해 하천수-복류수 및 하천수-강변여과수의 수질 특성을 비교한 연구는 존재하지만, 하천수-복류수-강변여과수를 직접 비교한 사례는 없었다.

본 연구에서는 하천수에 비해 상대적으로 깨끗하다고 알려진 간접취수 방식인 강변여과수와 복류수의 수질 개선 효과를 비교·분석하고자 하였다. 특히, 국내에서 널리 이용되는 복류수와 강변여과수를 비교하여, 각 간접취수 방식이 수질 개선에 미치는 영향을 항목별로 분석하였다. 이를 위해서 국내·외에서 보고된 바 없는 동일한 하천 인근에 위치한 강변여과수 및 복류수 시설의 수질을 비교·분석하였다. 이를 통해 기존 연구에서 간접적으로만 확인되었던 복류수와 강변여과수의 수질 특성을 보다 명확히 비교 평가하고, 하천수 대비 각 간접취수 방식의 수질 개선 효과에 대한 객관적인 정보를 제공하고자 하였다.

2. 연구 지역

연구 지역은 안성천 유역으로(Fig. 2), 경기도 안성시 공도읍 중복리, 평택시 유천동, 충청남도 천안시 서북구 성환읍 신가리가 인접하고 있다. 안성천을 중심으로 넓은 평야의 전답이 위치하며, 연구지역으로부터 북쪽 약 2 km 지점은 아파트 단지가 발달한 도시로 구성되어 있다. 산계의 발달은 불량하고 100 m 내외의 낮은 구릉성 산지가 분포하고 있다.

지형적으로는 북동부에서 남서부 방향으로 이어지는 칠현산(516 EL.m)-덕성산(515 EL.m)-서운산(538 EL.m)이 동남부 주 산계를 형성하고, 천덕산-덕암산(164 EL.m)으로 이어지는 북동-북서 방향의 산계가 발달하고 있으며, 이들에 둘러싸인 넓은 충적분지가 위치한다(Kim et al., 2015). 안성천은 칠현산에서 발원하여 현암천, 한천, 청룡천, 입장천, 성천과 합류되어 연구 지역을 동부에서 서부 방향으로 흘러 도일천, 진위천과 만나 아산만으로 유입된다(Intellego, 2017).

연구지역의 지질로는 선캠브리아기의 변성암류, 중생대

Fig. 2. Drilling points at the study site (Anseong-Gongdo area).

Table 1. Geological conditions for drilling points at the study site (Panasiawater, 2014) (Unit: GL.m)

Drilling points	Depth of each layer				
	Silt (m)	Sand (m)	Weathered soil (m)	Weathered rock (m)	Total (m)
AS-1	-	8.0	6.0	1.0	15.0
AS-2	-	7.0	8.0	1.0	16.0
AS-3	-	8.0	12.0	-	20.0
AS-4	-	6.0	7.0	-	13.0
AS-5	3.0	3.0	14.0	-	20.0
AS-6	5.0	1.0	11.0	1.0	18.0
AS-7	2.0	5.0	10.0	1.0	18.0
AS-8	4.0	1.0	8.0	-	16.0
AS-9	4.0	4.0	3.5	1.7	13.2
AS-10	5.0	4.5	4.5	1.0	15.0
AS-11	3.0	4.5	9.5	1.0	18.0
AS-12	3.0	5.5	2.0	-	10.5
AS-13	4.0	4.0	7.0	1.0	16.0
AS-14	3.5	7.0	8.5	1.0	20.0
Average	3.7	4.9	7.9	1.1	16.3

쥬라기의 대보화강암류, 백악기의 불국사관입암류 및 퇴적암류, 그리고 제4기 충적층이 분포하고 있다. 중생대 쥬라기 대보화강암류는 선캠브리아기의 호상편마암과 편암을 관입하여 중앙부를 중심으로 북동-남서방향으로 발달하고 있으며, 그 외의 암체들은 소규모로 분포하고 있다(Intellegeo, 2017).

Panasiawater(2014)에서 시행한 시추 결과(Fig. 2, Table 1), 풍화암까지의 평균 심도는 지표면으로부터 15.2 m(지표면으로부터 해당 심도는 GL.m로 표시)이었으며, 상부 실트층은 평균 3.7 m, 주대수층인 모래층은 1.0~8.0 m 범위이며, 평균 4.9 m 두께로 되어 있다.

연구지역의 수리특성을 파악하기 위해 착정공 및 관측정에서 양수시험을 실시하였으며, Theis, Cooper-Jacob 및 Theis recovery method를 이용하여 수리전도도를 산정한 결과 4.25×10^{-5}~1.25×10^{-3} m/sec 범위를 보였고, 평균 4.07×10^{-4} m/sec로 산정되었다(Intellegeo, 2017).

3. 연구방법

본 연구에서는 하천수와 복류수, 그리고 강변여과수의 수질을 비교하였으며, 이 때 강변여과수는 각 수평정으로부터 물이 채수되어 모이는 집수정에서 채수한 시료를 기준으로 하였다. 추가적으로 강변여과 내 수평정별 특성을 확인하기 위하여 각 수평정별로 별도로 시료를 채수하여 이에 대한 특성을 분석하였다.

2016년부터 2018년까지 수소이온농도(pH), 생물화학적 산소요구량(biochemical oxygen demand; BOD), 부유물질(suspended solids; SS), 용존산소량(dissolved oxygen; DO), 총대장균군(total coliforms; TC), 분원성대장균군(fecal coliforms; FC)에 대하여 월별 분석을 실시하였다. Fig. 3과 같이 하천수(river), 복류수(riverbed filtration; rbef) 및 강변여과수(riverbank filtration; rbf) 집수정에서(OW-#) 각각 시료를 채수, 분석하였으며, 북쪽을 기준으로 한 수평정의 각도는 Fig. 4에 나타내었다.

강변여과 수평정별 수질 특성을 파악하기 위해서는 2018년부터 2019년까지 4차례에 걸쳐 pH, BOD, SS, DO, TC, FC, Fe, Mn, 탁도(turbidity), 암모니아성 질소(NH_3-N)를 분석하였으며, 하천수(river), 복류수(rbef), 강변여과수의 집수정(OW-0) 및 수평정(OW-1~OW-8)에서 각각 시료를 채수

Fig. 3. Location map of the study area (Anseong): riverbed filtration (rbef) and riverbank filtration horizontal wells (OW-#).

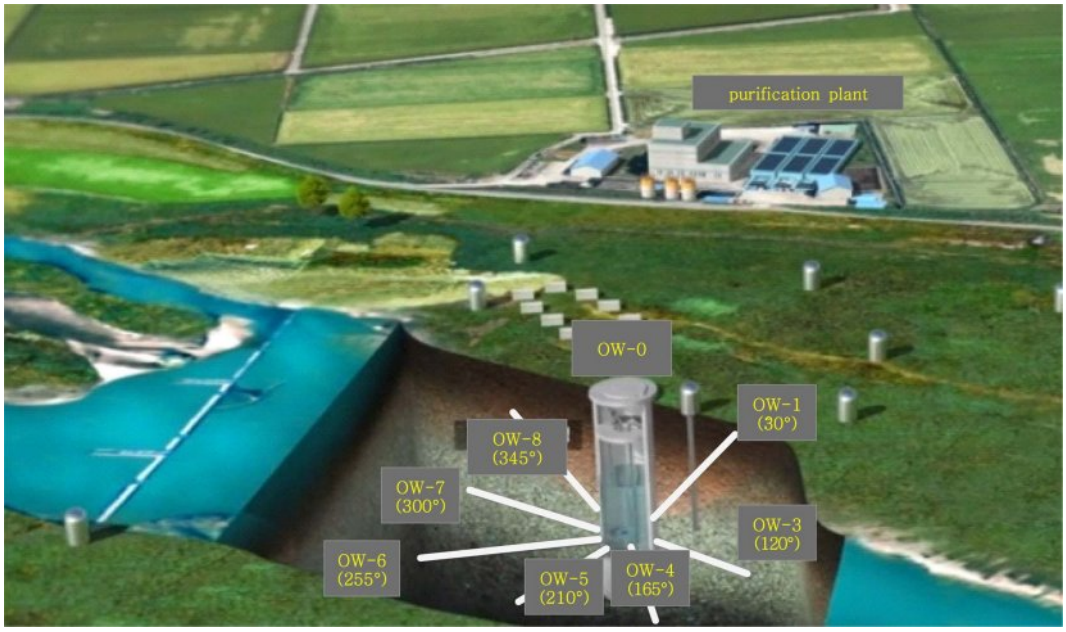

Fig. 4. A conceptual map showing angles of horizontal wells in riverbank filtration along with horizontal well numbers (OW-#).

Table 2. Environmental standards for water quality and aquatic ecosystems of Korean rivers (Basic Environmental Policy Act Enforcement Rules Asterisk 1)

Grade	Standard								
	pH	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	TOC (mg/l)	SS (mg/l)	DO (mg/l)	T-P (mg/l)	Coliform (MPN/100 ml)	
								TC	FC
Ia	6.5~8.5	≦1	≦2	≦2	≦25	7.5≧	≦0.02	≦50	≦10
Ib	6.5~8.5	≦2	≦4	≦3	≦25	5.0≧	≦0.04	≦500	≦100
II	6.5~8.5	≦3	≦5	≦4	≦25	5.0≧	≦0.1	≦1,000	≦200
III	6.5~8.5	≦5	≦7	≦5	≦25	5.0≧	≦0.2	≦5,000	≦1,000
IV	6.0~8.5	≦8	≦9	≦6	≦100	2.0≧	≦0.3		
V	6.0~8.5	≦10	≦11	≦8	no trash floating	2.0≧	≦0.5		
VI		>10	>11	>8		2.0<	>0.5		

MPN: most probable number

및 분석하였다. 하천수, 강변여과수 및 복류수 시료의 각 항목별 수질분석은 수질오염공정시험기준에 따라 이루어졌다. Table 2는 각 시료별 수질의 오염정도를 파악하기 위한 환경기준으로 환경정책기본법 시행령 별표 1의 수질 및 수생태계의 생활환경기준을 나타낸다.

4. 연구결과

4.1. 월별 주요항목 수질 분석

Fig. 5는 2016년 1월부터 2018년 9월까지 월별로 pH, BOD, SS, DO, TC, FC를 분석하여 하천수, 복류수, 강변여과수의 수질을 비교한 결과이다. pH는 하천수의 평균값이 7.6(최대 10.0, 최소 6.9)로 대부분 하천 생활환경기준(Table 2)을 만족하였으나, 일부 기준을 초과하는 경우가 있었으며, 복류수의 pH는 평균 7.8(최대 9.2, 최소 7.3)으로 하천수와 유사한 분포를 보였으나, 역시 일부 초과 사례가 확인되었다. 반면, 강변여과수의 pH는 평균 7.1(최대 7.9, 최소 6.4)로 전 조사기간 동안 기준을 충족하였다(Fig. 5(a)).

하천수와 복류수의 BOD는 각각 평균 5.1 mg/l로 동일하게 나타나, 두 유형 모두 "약간나쁨" 단계에 해당하였

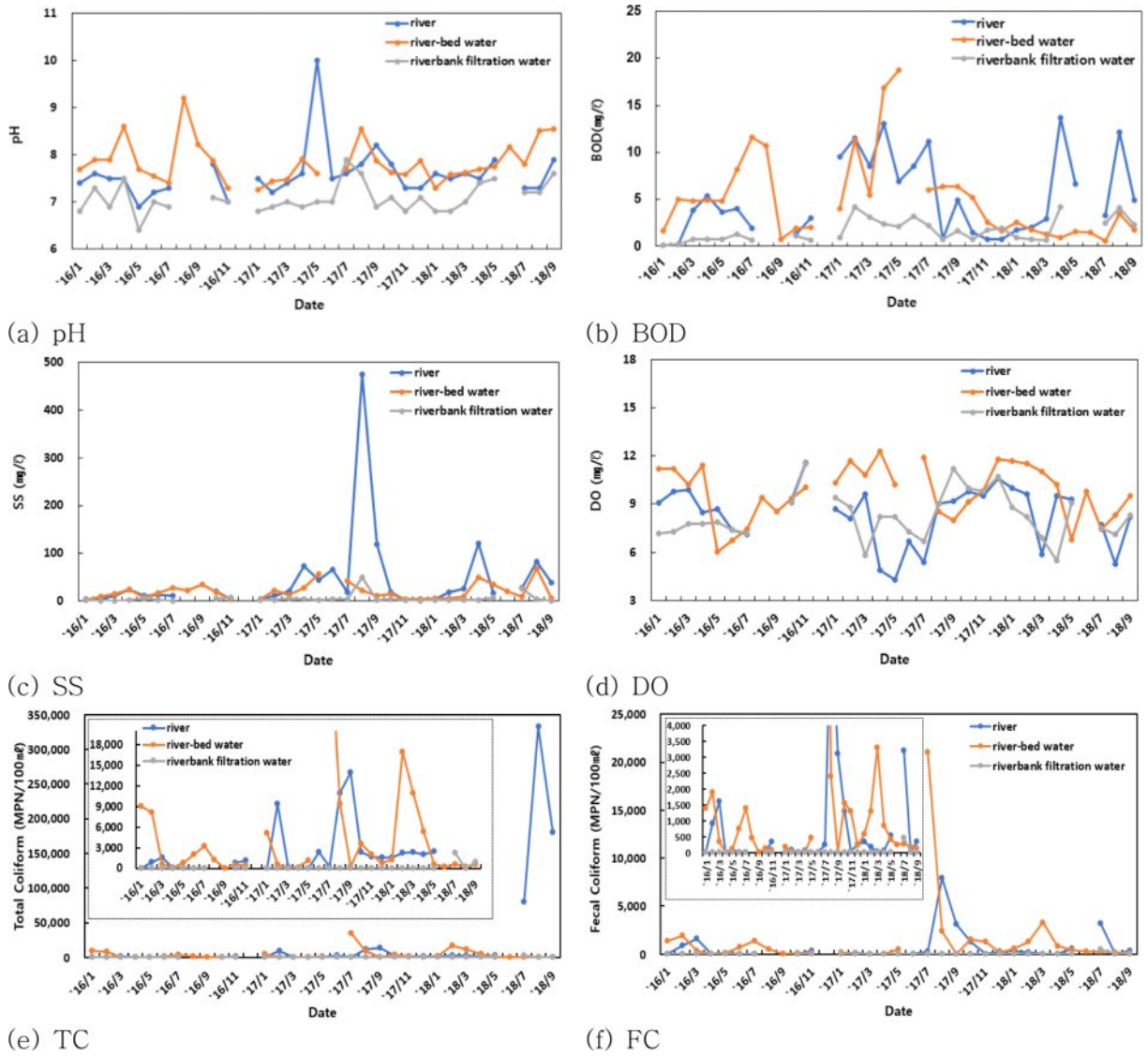

Fig. 5. Monthly water quality analysis results of river, riverbed, and riverbank filtration waters: (a) pH, (b) BOD, (c) SS, (d) DO, (e) TC, and (f) FC.

다. 이는 유기물 부하가 높음을 의미하며, 복류수에서는 충분한 정화가 이루어지지 않았음을 시사한다. 반면, 강변여과수의 BOD는 평균 1.7 mg/l로 유기물 오염도가 현저히 낮아 "좋음" 단계로 평가되었다. 강변여과수의 경우 자연여과층 내 흡착 및 미생물 분해작용이 효과적으로 이루어진 결과라 판단되며, 이는 강변여과가 유기물 제거에 효과적이라는 기존 자료(Yuanchao et al., 2025)와도 일치한다(Fig. 5(b)).

하천수의 SS는 평균 45 mg/l로 "약간나쁨" 단계에 해당하였으며, 복류수는 평균 20 mg/l로 25 mg/l이하의 기준을 충족하여 "보통" 단계로 분류되었다. 강변여과수의 SS는 평균 5 mg/l로 하천수 대비 SS 감소율이 88%에 달해, SS 제거에 매우 효과적인 것으로 나타났다(Fig. 5(c)). 기존 자료에 따르면, 강변여과의 모래여과 층에서 SS와 그에 부착된 오염물질이 체거름 과정을 통해 가장 효과적으로 제거된다(Schelling et al, 2023).

하천수의 DO는 평균 8.4 mg/l로 "매우좋음" 단계에 해당하였으며, 복류수는 평균 9.8 mg/l, 강변여과수는 평균 8.3 mg/l로 모든 유형이 수생생물 서식에 적합한 DO 농도를 유지하고 있다(Fig. 5(d)). 특히 강변여과수에서는 유기물과 부유물질이 크게 저감되었음에도 DO 농도는 안정적으로 유지되었으며, 이는 수질개선과 생태적 기능 유지가 병행할 수 있음을 의미한다.

하천수의 TC는 평균 22,456 MPN/100 ml로 하천 생활

환경기준을 초과하였으며, 복류수는 평균 3,907 MPN/100 ml로 “보통” 단계에 해당하였다. 강변여과수의 TC는 117 MPN/100 ml로 “좋음” 단계를 나타내어 강변여과가 미생물 오염저감에 매우 효과적인 것으로 평가되었다(Fig. 5(e)). 하천수의 FC는 평균 711 MPN/100 ml로 “보통” 단계에 해당하였으나, 복류수는 평균 1,320 MPN/100 ml로 기준을 초과하였다. 강변여과수의 FC는 평균 17 MPN/100 ml로 “좋음” 단계를 나타내어 강변여과수가 분원성 미생물을 효과적으로 제거하는 것으로 나타났다(Fig. 5(f)). 이러한 결과는 강변여과를 통한 미생물 제거 효과가 뚜렷한 것을 나타내며, 이집트에서 강변여과의 미생물 제거 효과를 수치적으로 보여준 연구(Wahaab et al., 2019)와 미국의 뉴햄프셔주에서 네 곳의 강변여과 시설에서 미생물 및 소독부산물의 상당한 부분을 제거한 연구(Partinoudi et al., 2007)와 유사한 결과를 나타낸다.

수질 분석 결과, 대부분의 항목에서 하천수에 비해 복류수와 강변여과수가 더 양호한 수질을 나타냈다. BOD는 일부 기간에는 복류수가 하천수보다 높은 값을 보이기도 하였으나, 강변여과수는 평균 1.7 mg/l, 최대 4.2 mg/l에 불과해 BOD 저감에 매우 효과적인 것으로 나타났다. SS는 하천수에서 최대 475 mg/l였을 때, 복류수는 68 mg/l, 강변여과수는 50 mg/l로 복류수와 강변여과수 모두 SS 저

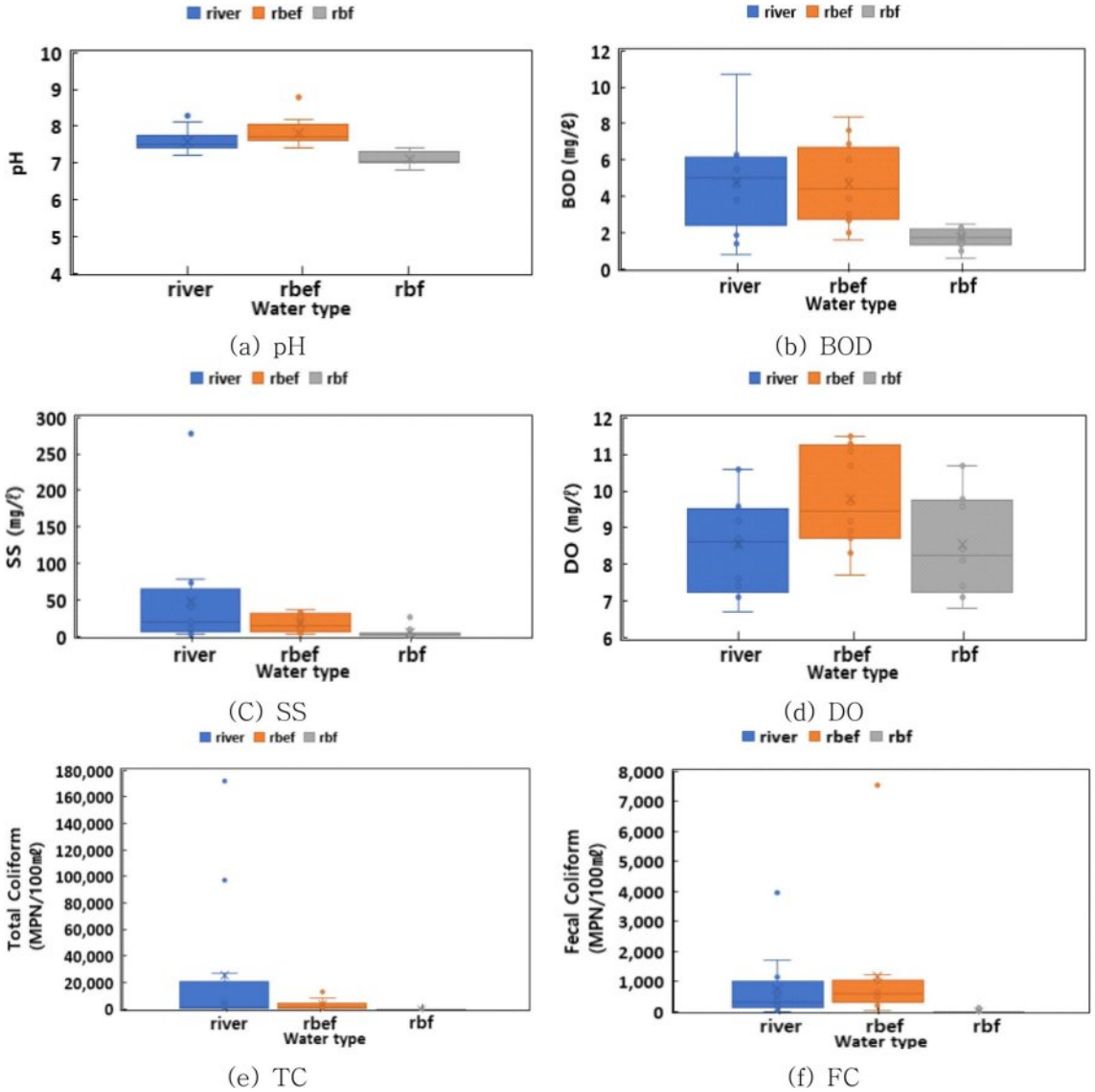

Fig. 6. Monthly average water quality data represented by box-whisker diagrams for river, riverbed filtration (rbef), and riverbank filtration (rbf): (a) pH, (b) BOD, (C) SS, (d) DO, (e) TC, and (f) FC. The values indicated in the box plot represent 5% quantile, 25% quantile, median, 75% qauntile, and 95% quantile, respectively, while open X marks represent the average values.

감에 효과적임을 확인할 수 있었다. 강변여과수의 경우 SS 감소율이 특히 높아 여과, 침전 및 흡착을 통한 안정적인 정화기능이 수행됨을 보여준다. TC는 하천수에서는 평균 22,456 MPN/100 mg가 검출되었으나, 복류수는 하천수의 17% 수준인 3,907 MPN/100 ml, 강변여과수는 0.5% 수준인 117 MPN/100 ml이 검출되었다. 강변여과수는 복류수 대비 약 3%만 검출되어 더욱 우수한 저감 효과를 보였다. FC의 평균값은 하천수에서 711 MPN/100 ml로 나타난 반면, 복류수는 1,320 MPN/100 ml로 더 높은 값을 보였다. 특히, 7월과 8월에는 복류수에서 FC의 농도가 하천수보다 매우 높게 나타났다. 반면, 강변여과수는 17 MPN/100 ml로 지속적으로 낮은 값을 유지해 FC 저감에 매우 우수한 효과를 보였다. 따라서 강변여과 방법이 미생물 저감에 매우 우수한 효과가 있음을 본 연구를 통해서 확인할 수 있었다.

월별 수질 분석 결과, 대체로 강변여과수 > 복류수 > 하천수 순으로 수질이 우수했으며, 복류수는 BOD, TC, FC 항목에서 때때로 하천수보다 나쁜 수질을 보였지만, SS 저감에서는 높은 효율을 보였다. 강변여과수는 복류수보다 전체적으로 우수한 수질 개선 효과가 있었으며, 특히 유기물과 TC, FC와 같은 미생물 제거에 탁월한 수질 개선 효과가 있어 장기적 수질 안정성 확보가 가능함을 시사하였다.

월별 수질 분석 자료를 평균값(Table 3)과 box-plot(Fig. 6)을 이용하여 분석해 보았는데, pH는 하천수, 복류수, 강변여과수 모두 월별 차이가 크지 않았으며, 하천 생활환경 기준인 6.5~8.5에 대부분 포함되었다. BOD는 하천수에서 4월에 10.7 mg/l로 가장 높았고, 복류수는 5월에 8.4 mg/l, 강변여과수는 8월에 2.5 mg/l로 나타났다. SS는 하천수, 복류수, 강변여과수 모두 8월에 가장 높았으며, 각각 279 mg/l, 38 mg/l, 27 mg/l였다. TC 및 FC가 가장 높은 시기는 하천수의 경우 8월로 각각 172,000 MPN/100 ml, 3,950 MPN/100 ml, 복류수는 7월로 각각 12,940 MPN/100 ml, 7,553 MPN/100 ml로 나타났다. 강변여과수도 복류수와 마찬가지로 7월에 가장 높은 값을 보였으며, 각각 774 MPN/100 ml, 154 MPN/100 ml로 나타났다. 전체적으로 하천수 수질이 가장 나쁜 시기는 8월로 SS, TC 및 FC값이 가장 높게 나타났다. 복류수와 강변여과수는 7월에 가장 나쁜 수질을 보였으며, TC 및 FC가 높게 나타났다.

전체적으로 강변여과수는 복류수보다 수질이 우수했고, 복류수는 하천수보다 더 나은 수질을 보였다. 특히 유기물 지표인 BOD와 탁도, 그리고 병원성 미생물 지표인 TC, FC 항목에서 강변여과수의 수질이 가장 우수하게 나타나,

Table 3. Average water quality analysis data for each horizontal well at the study site

Content	River	Rbef[1]	Rbf[2]									
			OW-O	OW-1	OW-3	OW-4	OW-5	OW-6	OW-7	OW-8	Average (SD[3])	Min	Max
pH	7.3	7.3	6.9	6.4	6.5	7.1	7.1	7.3	7.1	6.8	6.9 (0.3)	6.4	7.3
BOD (mg/l)	12.4	1.7	1.0	1.2	1.6	1.1	1.3	1.0	2.6	0.9	1.3 (0.5)	0.9	2.6
SS (mg/l)	292	5	3	5	4	0	1	1	5	3	3.0 (1.8)	0	5
DO (mg/l)	8.3	7.6	7.6	7.7	8.3	7.8	7.9	7.7	7.7	7.6	7.8 (0.2)	7.6	8.3
Total coliform (MPN/100 ml)	3,523	5,550	11	39	33	946	5	16	50	19	140 (305.0)	5	946
Fecal coliform (MPN/100 ml))	368	552	0	0	0	1	1	0	0	0	0.0 (0.4)	0	1
Fe (mg/l)	0.03	0.03	0.10	0.04	0	0.02	0.03	0.02	0.10	0.09	0.05 (0)	0	0.10
Mn (mg/l)	0.06	0.11	0.58	3.35	0.77	0.23	0.25	0.21	0.86	1.74	1.0 (1.0)	0.21	3.35
Turbidity (NTU[4])	21	3	6	17	9	1	1	1	27	10	9.0 (8.6)	1	27
NH_3-N (mg/l)	0.93	0.77	0.33	0.24	0.28	0.27	0.24	0.31	1.06	0.23	0.4 (0.3)	0.23	1.06

[1]Rbef: riverbed filtration, [2]Rbf: riverbank filtration, [3]SD: standard deviation, [4]NTU: Nephelometric turbidity unit

Table 4. Results of independent t-tests comparing water quality parameters between river, riverbed filtration (rbef), and riverbank filtration (rbf)

Parameter	River vs. Rbf		Rbef vs. Rbf	
	t-value	p-value	t-value	p-value
pH	3.58	0.009	3.58	0.009
BOD	56.34	1.46×10^{-10}	1.85	0.107
SS	394.85	1.76×10^{-16}	2.73	0.029
DO	6.32	0.0004	-2.31	0.054
TC	29.35	1.37×10^{-8}	46.93	5.22×10^{-10}
FC	2247.0	9.13×10^{-22}	3371.2	5.34×10^{-23}
Turbidity	3.70	0.0077	-1.85	0.107
NH_3-N	5.64	0.0008	4.03	0.005

자연적 여과 과정을 통해 오염 물질이 효과적으로 제거되고 있음을 확인할 수 있었다.

월별 수질 변화를 살펴보면, 하천수는 8월에 SS, TC, FC의 농도가 가장 높아지며 수질이 악화되었는데, 이는 여름철 집중호우로 인한 토사유입 및 비점오염 유출이 주요 원인으로 추정된다. 수질 등급 측면에서는, 하천수는 대부분 항목에서 하천 생활환경기준상 IV등급 이하로 나타나 오염도가 높은 수준이었으며, 복류수는 FC 항목을 제외하면 대체로 III등급에 해당하였다. 이에 비해 강변여과수는 대부분 항목에서 II등급 수준으로 분석되어 상대적으로 우수한 수질을 유지하고 있어, 강변여과수가 용수 공급에 유용하다는 것을 시사한다.

Table 3은 2018년부터 2019년까지 네 차례에 걸쳐 분석한 하천수, 복류수, 수평관정별 강변여과수의 pH, BOD, SS, DO, TC, FC, Fe, Mn, 탁도, NH_3-N의 평균값, 최대값 및 최소값을 나타낸 것이다. 하천수보다 복류수의 수질이 더 좋았고, 복류수보다 강변여과수의 수질이 더 우수한 것으로 나타났다. 복류수는 SS 및 탁도에서 높은 수질 저감 효과를 보였다. 강변여과수는 철과 망간을 제외한 대부분의 항목에서 높은 수질 개선 효과를 보였으며, 특히 BOD, TC 및 FC에 대한 처리 효과가 월등히 높았다. 수평관정 강변여과수 BOD의 평균값은 1.3 mg/l로, 최소값은 OW-8(0.9 mg/l), 최대값은 OW-7(2.6 mg/l)으로 다소 차이가 있었다. SS의 평균값은 3.0 mg/l이며, 최소값은 OW-6(0.9 mg/l), 최대값은 OW-7(5.0 mg/l)로 나타났다. TC의 평균값은 140 MPN/100 ml로, 최소값은 OW-5(5 MPN/100 ml), 최대값은 OW-4(946 MPN/100 ml)로 다른 분석 항목들에 비해 차이가 크게 나타났다. Mn의 평균값은 1.0 mg/l로, 최소값은 OW-6(0.2 mg/l), 최대값은 OW-1(3.4 mg/l)로 다소 차이가 있었으며, 탁도의 평균값은 9.0 NTU로 최소값은 OW-4(0.8 NTU), 최대값은 OW-7(27.0 NTU)로 분석되었다.

각 수질 항목별로 측정값들이 통계적으로 유의한 차이가 있는지를 검정하기 위해 독립표본 t-검정을 활용하였다. 분석은 비교적 다수의 데이터가 있는 rbf와 river, rbef를 각각 비교하였으며, 파이썬의 scipy.stats.ttest_ind 함수를 사용하여 등분산을 가정하지 않은 Welch's t-test를 적용하였다. River와 rbf 분석에서는 대부분의 수질항목((pH, BOD, SS, DO, T.C, F.C, Turbidity 및 NH_3-N)에서 평균값의 통계적으로 유의한 차이($p < 0.05$)가 확인되었다. Rbef와 rbf간 비교에서는 일부 수질항목(TC, FC 및 NH_3-N)에서 유의한 차이가 확인되었다. 항목별 t값과 p값은 Table 4에 제시되었으며, 하천과 강변여과수 비교에서는 대부분 주요 수질항목에서 통계적으로 유의한 차이가 확인되어 강변여과의 수질이 확실히 좋은 것을 알 수 있으며, 복류수와 강변여과수에서는 일부 항목에서 매우 유의미한 차이가 나타난 것을 알 수 있다.

4.2. 강변여과수 수평정별 주요항목 수질 분석

지금까지 국내에서 강변여과수를 수평정별로 채수하여 이의 특성을 분석한 사례가 없었고, 무엇보다도 분석이 가능한 시설도 없었던 것으로 파악된다. 본 연구에서는 국내에서 처음으로 2018년 11월부터 2019년까지 총 4차례에 걸쳐 pH, BOD, SS, DO, TC, FC, Fe, Mn, 탁도, NH_3-N 항목을 수평정별로 비교 분석하였다.

pH 분석 결과, 전체적으로 하천 생활환경기준인 6.5~8.5 범위에 포함되었으며(Fig. 7(a)), 수평정의 각도나 방향에 따른 큰 차이는 관찰되지 않았다. 일부 제내지 방향에 위치한 OW-1, OW-3 및 OW-8 수평정에서는 다른 지점에 비해 다소 낮은 값을 보여 수평정별로 국지적 환경 차이가

존재할 것으로 판단된다.

BOD는 Fig. 7(b)에서 보듯이 하천수에서 10 mg/l를 초과하는 높은 값이 빈번히 관찰되었으며, 2019년 1월에는 최대 18.5 mg/l에 달하는 값이 기록되었다. 반면, 복류수는 평균 1.7 mg/l, 강변여과수는 1.3 mg/l으로 강변여과수가 복류수보다 유기물 저감 효과가 더 뛰어난 것을 확인하였다. 대부분의 강변여과수 수평정은 1.5 mg/l 이하의 값을 보였으나, 하천과 평행한 방향에 설치된 OW-7(300°)에서는

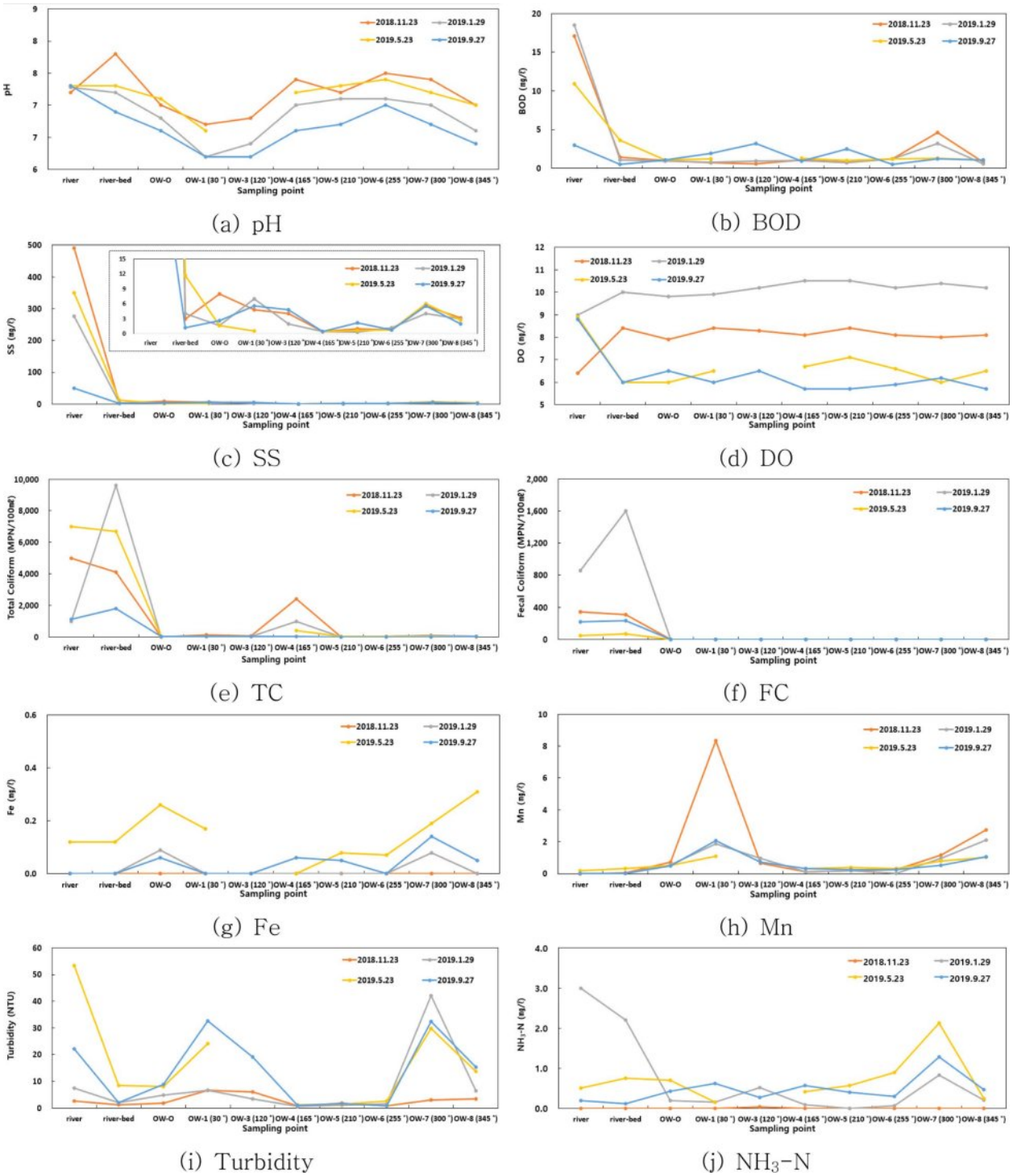

Fig. 7. Water quality analysis results by horizontal wells: (a) pH, (b) BOD, (c) SS, (d) DO, (e) TC, (f) FC (g) Fe, (h) Mn, (i) turbidity, and (j) NH_3-N.

상대적으로 높은 BOD가 나타나, 유입 방향과 수평정 위치가 처리 효율에 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

SS는 Fig. 7(c)에서 보듯이 하천수에서 50~490 mg/l로 매우 높은 값이 관찰되었으며, 복류수(1~12 mg/l)와 강변여과수(0~8 mg/l)에서는 하천수에 비해 현저히 낮아 두 처리 방식 모두 SS제거에 효과적임을 확인하였다. 특히 강변여과수는 대부분의 경우 복류수보다도 더 낮은 SS 농도를 나타내어, 강변여과가 SS 제거에 특히 효과적임을 시사한다. OW-1(30°)과 OW-7(300°) 수평정에서 다른 지점에 비해 상대적으로 높은 SS가 관찰되어, 수평정별 위치에 따른 처리 효율 차이가 있음을 알 수 있었다.

DO는 모든 지점에서 5.7~10.5 mg/l 범위로 일정하게 유지되어(Fig. 7(d)), 수생생물 서식에 적합한 환경임을 보여주었다. 2019년 1월에는 전반적으로 DO 값이 상승하는 경향이 나타났으나, 수평정별차이는 미미하였다.

TC는 Fig. 7(e)에서 보듯이 하천수(990~7,000 MPN/100 ml)와 복류수(1,800~9,600 MPN/100 ml)에서 높은 값을 보인 반면, 강변여과수에서는 평균 140 MPN/100 ml 이하로 현저히 낮은 값을 나타냈다. 대부분의 수평정에서 100 MPN/100 ml 이하를 나타냈으나 OW-4에서는 다른 지점에 비해 상대적으로 높은 값이 검출되어, 수평정 위치에 따른 미생물 제거 효율 차이를 확인할 수 있었다. FC 역시 하천수(50~860 MPN/100 ml)와 복류수(69~1,600 MPN/100 ml)에서 높은 농도가 관찰되었으나(Fig. 7(f)), 강변여과수에서는 1 MPN/100 ml 이하로 거의 검출되지 않아, 강변여과가 분원성 미생물 오염 저감에 매우 효과적임을 보여주었다. OW-4지점에서 TC는 상대적으로 다른 지점보다 높게 나타났으나, FC는 모든 수평정에서 일정한 값을 보여 미생물 종류에 따라 저감 효과가 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

금속류인 Fe와 Mn 모두 수평정별, 계절별로 큰 경향은 없었으나, 강변여과수에서 하천수 및 복류수보다 상대적으로 높은 값이 관찰되기도 하였다(Fig. 7(g), 7(h)). 이는 기준치를 초과하여 강변여과수에서 최대 5 mg/l에 달하는 값이 보고되었던 기존 사례(Kim et al., 2007, Lee et al., 2012)와 같은 결과를 나타냈으며, 강변여과 적용 시 Fe, Mn의 관리가 반드시 필요함을 시사한다.

탁도는 Fig. 7(i)에서 보듯이 하천수(2.50~53.30 NTU)와 강변여과수(0.61~42.00 NTU)에 비해 복류수(1.03~8.33 NTU)에서 가장 낮은 값을 보여, 복류수가 탁도 저감에 가장 효과적임을 확인하였다. 강변여과수 수평정별 비교에서는 OW-7의 평균값(26.8 NTU)이 가장 높은 반면, OW-4(0.8 NTU)가 가장 낮아, 탁도 개선 효과에 공간적 차이가 존재함을 확인할 수 있었다. NH_3-N은 Fig. 7(j)에서 보듯이 하천수(0~3.0 mg/l)와 복류수(0~2.2 mg/l)에서 1월부터 11월까지 점차 감소하는 경향을 보였으나, 강변여과수(0~0.9 mg/l)에서는 뚜렷한 변화 없이 안정적으로 낮게 유지되었으며, 이는 암모니아성 질소의 흡착 및 질산염으로의 산화 과정 등 반응과 연관이 있을 것으로 추정된다.

월별 및 수평정별 분석결과, 강변여과수가 복류수보다 전반적으로 우수한 수질 개선 효과를 보였다. 복류수는 SS, 탁도 저감에 효과를 나타내었으며, 강변여과수는 BOD, TC, FC와 같은 생물학적 처리 항목에서 탁월한 개선 효과를 확인할 수 있었다.

5. 논 의

본 연구는 국내뿐만 아니라 세계적으로도 유일하게 동일 유역에서 운영 중인 복류수와 강변여과수의 수질을 비교 분석한 사례라는 점에서 의의가 크다. 2016년부터 2018년까지 월별 수질 변화를 분석하고, 강변여과수의 수평정별 수질 특성을 분석한 결과 몇 가지 주요 특징을 확인할 수 있었다.

첫째, 강변여과수는 BOD, TC, FC와 같은 유기물 및 병원성 미생물 저감에 탁월한 효과를 보였다. BOD는 하천수에서 최대 10.7 mg/l, 복류수에서 8.4 mg/l로 관찰되었으나, 강변여과수는 2.5 mg/l에 불과하였다. 또한, TC와 FC는 여름철인 7~8월에 하천에서는 172,000 MPN/100 ml, 3,950 MPN/100 ml, 복류수에서는 12,940 MPN/100 ml, 7,553 MPN/100 ml으로 높은 값을 보였으나, 강변여과수에서는 각각 774, 154 MPN/100 ml 수준에 머물러 수질 개선에 탁월함을 보였다. 이는 강변여과 과정에서 지층을 토한 물리적 여과, 침전, 흡착 작용이 효과적으로 작용하고, 미생물 또한 지층 통과 과정에서 안정적으로 제거됨을 의미한다. 강변여과는 자연적 여과 과정을 활용한 상수원 수질 개선에 매우 유용하며, 복류수에 비하여 효율적인 성능을 제공함을 시사한다.

둘째, 부유물질과 탁도의 경우 대체적으로 복류수 및 강변여과수는 모두 큰 저감 효과를 보였으나 때로 복류수가 더 안정적인 결과를 보이는 경우도 있었다. 복류수는 강변여과에 비하여 상대적으로 오염물질이 통과하는 층의 두께가 얇은데 탁도 및 입자성 오염물의 침전효과가 신속하게 반영되며, 강변여과수의 경우 지층의 특성에 따라 변동성이 존재하는 것을 시사한다.

셋째, 강변여과수의 수평정별로 일부 항목에서 수질 차

이가 나타남을 확인하였다. BOD, TC 등 일부 항목은 평균값과 최소·최대값의 편차가 다소 크게 나타난 걸 알 수 있었으며, 특히 미생물인 TC와 FC도 수평정의 위치에 따라 수질 개선 효과가 다르다는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 차이는 수평정의 위치에 따른 지형, 토양특성, 지하수 및 하천수 흐름 등 다양한 지질학적 요인에 의한 것으로 추정된다. 동일 시설내에서도 수평정의 위치에 따라 여과효율과 수질 개선 효과가 달라 질수 있음을 보여준다.

본 연구를 통해 강변여과수가 복류수에 비해 전반적인 수질 개선 효과가 우수한 것을 알 수 있으며, 특히 유기물 및 미생물 저감에서 큰 장점을 가지고 있다는 사실을 확인하였다. 반면, 부유물질과 탁도는 복류수가 효과적인 경우가 일부 확인되었으며, 이는 강변여과와 복류수를 목적에 맞게 운영하는 것이 필요함을 시사한다. 또한, 수평정별 분석을 통해 동일 시설내에서도 다양한 지질학적 요인이 수질 개선 효과에 영향을 줄 수 있다는 점을 통해, 강변여과수 설계 및 운영 시 지질학적 특성과 지하수의 흐름 특성 등의 고려가 필요함을 보여준다.

6. 결론 및 제언

본 연구는 간접취수 방식으로 국내에서 많이 사용하고 있는 복류수와 강변여과수의 수질을 직접 비교하여 시설별 특성을 제시하고자 하였다. 이를 위해 국내에서뿐만 아니라 세계적으로도 유일하게 간접취수 방식인 복류수와 강변여과수가 동일 하천에 설치된 지역인 안양천 인근 지역에 대한 직접적인 수질 비교를 위하여, 2018년부터 2019년까지 강변여과수 집수정 및 각 수평정에서 pH, BOD, SS, DO, TC, FC, Fe, Mn, 탁도, NH_3-N 항목에 대하여 하천수와 복류수의 차이를 비교 분석하였다. 분석결과 대부분의 항목에서 강변여과수 > 복류수 > 하천수 순으로 좋은 수질을 나타냈다. 특히 BOD, SS, TC, FC, 탁도의 경우 하천수는 12.4 mg/L, 292 mg/L, 3,523 MPN/100 ml, 368 MPN/100 ml, 21 NTU 값을 나타냈고, 복류수는 1.7 mg/L, 5 mg/L, 5,550 MPN/100 ml, 552 MPN/100 ml, 3 NTU 값을 보였으며, 강변여과수는 1.3 mg/L, 3 mg/L, 140 MPN/100 ml, 0 MPN/100 ml, 9 NTU 값을 나타냈다.

간접취수 방식인 복류수와 강변여과수는 하천수에 비해 확연히 더 나은 수질을 제공하였다. 특히, 복류수는 SS 및 탁도와 같은 물리적 처리효과가 높았고, 강변여과수는 모든 항목에서 수질 개선효과가 높게 나타났으며, BOD, TC 및 FC와 같은 생물학적 처리효과가 높은 것으로 분석되었다. 한편, 강변여과수 수평정별 수질 분석 결과에 대한 계절별 변화와 수평정 각도에 따른 변화를 비교하였으나, 특별한 경향성은 찾을 수 없었다.

본 연구는 동일 유역에서 복류수와 강변여과수의 수질을 직접 비교하여 각각의 장점을 구체적으로 확인할 수 있었다. 이러한 객관적인 자료는 향후 간접취수 개발을 위한 의사결정에 매우 중요한 정보로 활용될 것이다.

사 사

이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었으며(No. RS-2024-00348441), 또한 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) '고준위방폐물 처분을 위한 부지환경 장기변화 예측기술 개발(RS-2024-00419276)'사업의 일환으로 '시나리오 기반 한반도 생태계 변화 개념모델 개발(RS-2024-00425601)'의 지원을 통해 수행되었습니다.

References

Antoni, M., Carolina, S., Elisabet, E., Josep, S., Pere, S., Irene, C., Mercè, A., Belen, G., M. Rosa, B., Miquel, P., and Jordi, M., 2023, Indirect potable water reuse to face drought events in Barcelona city. Setting a monitoring procedure to protect aquatic ecosystems and to ensure a safe drinking water supply, *Science of The Total Environment*, **866**, 161339.

Baik, M.Y., 2012, A case study on the contaminant removal efficiency along filtration depth in infiltration gallery of Goryeong water works, Department of Environmental Engineering Graduate School Yeungnam University, p. 8 (in Korean with English abstract).

Blavier, J., Verbanck, M.A., Craddock, F., Liegeois, S., Latinis, D., Gargouri, L., Flores Rua, G., Debaste, F., and Haut, B., 2014, Investigation of riverbed filtration systems on the Parapeti river, Bolivia, *Journal of Water Process Engineering*, **1**, 27-36.

Busan Metropolitan Council, 2023, Study on Diversification of Drinking Water Supply Systems in Busan. Busan Metropolitan Council Policy Research Report, p. 1 (in Korean).

ElHadary, M., Salah, A., Mikhail, B., Peters, R.W., Ghanem, A., Elansary, and Mostafa, M.K., 2024, Challenges and Possible Solutions for Riverbank Filtration: Case Studies of Three Sites in Egypt, *Air, Soil and Water Research*, **17**, 11786221241274480.

Gao, Y., Tang, Y., Zhao, M., Zheng, X., and Jin, H., 2025, A comprehensive review of riverbank filtration technology for water treatment, *Water*, **17**(3), 371.

Gyeonggi Research Institute, 2008, A study on the strategies of acquiring water resources by using wells near surface water,

p. 24 (in Korean).

Ibrahim, M., Gad, A., and Aly. O., 2024, Enhanced efficiency of water purification plant by combined riverbank filtration, *Journal of water and Land Development*, **62**, 220-229.

Intellegeo, 2017, Research on the advancement of large-scale indirect water intake construction technology for groundwater along riversides, p. 29, p. 30, p. 66, and p. 316 (in Korean).

KEI, 2024, Developing a Policy Direction of Sustainable Quality of Sources Water in Korea: Source Water Protection Zone and Water Intake, p. 3 (in Korean).

Kim, S.H., 2007, Comparison of riverbank and riverbed filtrations in Korea, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **29**(10), 1154-1162 (in Korean with English abstract).

Kong, M.K. and Yoon, S.Y., 2001, Development of riverbank filtration water as a new water intake method, *Magazine of Korea Water Resources Association: Water for the Future*, **34**(2), 78-84 (in Korean with English abstract).

K-water, 2007, Development of Water Service System Using Aquifer. Ministry of Science and Technology, 21st Century Frontier R&D Program, Sustainable Water Resources Research Center, p. 1373 (in Korean).

K-water, 2008, Technical guidelines for riverbank filtration in preparation for water intake system reorganization, p. 6 and p. 34-50 (in Korean).

K-water, 2009, Design and construction of riverbank filtration for improving practical skills of construction personnel, p. 60 (in Korean).

Kwon, H.J, Kang, M.C., Han, S.Y., Shin, S.W., Jeong, C.W., and Lee, T.G., 2023, A basic study on the status of korea riverbed filtration intake facilities and characteristics of pollutant removal efficiency in water quality, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, **37**(3), 147-154 (in Korean with English abstract).

Lee, D.K., Park, J.H., Park, C.K., Yang, J.S., Nam, D.H., Kim, D.K., Jeong, G.C., Choi, Y.S., and Boo, S.A., 2004, Application of the artificial recharge to reduce the groundwater drawdown of the riverbank filtration, *The Journal of Engineering Geology*, **14**(4), 391-400 (in Korean with English abstract).

Lee, M.J., Park, J.H., and Kim, G.B., 2012, In situ iron-manganese removal by the oxygenized water injection at the river bank filtration site, *Journal of the Geological Society of Korea*, **48**(6), 503-519 (in Korean with English abstract).

Lee, S.I. and Lee, S.S., 2008, Site suitability and developable amount assessment for riverbank filtration in the Han River (I). *Journal of Korea Water Resources Association*, **41**(8), 825-834 (in Korean with English abstract).

Lee, S.I. and Lee, S.S., 2010, Site suitability analysis for riverbank filtration using game theory, *Journal of Korea Water Resources Association*, **43**(1), 95-104 (in Korean with English abstract).

Ministry of Environment (MOE), 2022, Statistics of waterworks (in Korean).

Na, J.Y., 2002, Flood runoff model considering inter flow, Department of Civil & Transportation Engineering Graduate School of Ajou University (in Korean).

Panasiawater, 2014, Research on the advancement of large-scale indirect water intake construction technology for groundwater along riversides (3rd year report), p. 47 (in Korean).

Partinoudi, V. and Colins, R., 2007, Assessing RBF reduction/ removal mechanisms for microbial and organic DBP precursors, *AWWA*, **99**(12). 61-71.

Paufler, S., Grischek, T., Benso, M.R., Seidel, N., and Fischer, T., 2018, The impact of river discharge and water temperature on manganese release from the riverbed during riverbank filtration: a case study from Dresden, *Germany, Water*, **10**(10), 1476.

Pholkern, K., Srisuk, K., Grischek, T., Soares, M., Schafer, S., Archwichai, L., Saraphirom, P., Pavelic, P., and Wirojanagud, W., 2015, Riverbed clogging experiments at potential river bank filtration sites along the Ping River, Chiang Mai, Thailand, *Environmental Earth Sciences*, **73**, 7699-7709.

Schelling, M, KPatil, K., and Boving, T.B., 2023, Sustainable water treatment with induced bank filtration, *Water*, **15**(2), 361.

Sim, W.J., Muambo, K.E., Choi, J., Park, S., and Oh, J.-E., 2025, Occurrence, distribution, and prioritization of unregulated emerging contaminants including battery-related chemicals in drinking water systems across South Korea, *Science of the Total Environment*, **967**, 178799.

Wahaab, R.A., Salah, A., and Grischek, T., 2019, Water quality changes during the initial operating phase of riverbank filtration sites in Upper Egypt, *Water*, **11**(6), 1258.

Yang, J.Y., 2000, Runoff of hillslope with subsurface stom flow and saturated overland flow, Department of Civil Engineering Graduate School of Seoul University (in Korean).