Journal of Environmental Science International
35(6); 507~516; June 2026
pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2026.35.6.507

ORIGINAL ARTICLE

여름철 제주도 공공하수처리시설 내 금속원소 농도 수준과 분포 특성

류 샘 · 박민규*
제주대학교 환경공학과

Concentration and Distribution Characteristics of Metal Elements at Wastewater Treatment Plants in Jeju during Summer Season

Saem Ryu, Min-Kyu Park*
Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

Abstract

In this study, the concentration levels and distribution characteristics of metal elements in influent, effluent, and sludge were comprehensively evaluated at eight public wastewater treatment plants in Jeju. A total of 12 metal elements (Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V, Zn) were analyzed. The average concentrations of heavy metals in the effluent generally met regulatory standards, although Zn exceeded the permissible limit at one site. In the case of sludge, all analyzed heavy metals complied with the relevant criteria, while Cd was found to be close to the permissible threshold. Correlation analysis revealed strong associations among several metals in influent, suggesting common sources, whereas most relationships weakened after treatment. However, several significant correlations persisted in effluent, including Al-Cu ($r = -0.86$, $p < 0.01$), Cd-Pb ($r = 0.76$, $p < 0.05$), Mn-V ($r = -0.74$, $p < 0.05$), and pH-Co ($r = -0.81$, $p < 0.05$), indicating that residual metal behavior was governed by water chemical conditions rather than a common source. These findings enhance the understanding of the fate of heavy metals in wastewater treatment systems and can serve as a scientific basis for ecological risk assessment and the establishment of water quality management standards.

Key words : Metal elements, Influent, Effluent, Sludge, Wastewater treatment plant, Jeju

1. 서 론

금속원소는 환경 중에 다량원소와 미량원소로 존재하며, 그 중 중금속은 자연환경과 인간활동에 의해 발생하는 오염물질로 고농도인 경우 수계 및 해양 생태계에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Mohiuddin et al., 2011). 이러한 금속 오염은 해당 금속의 독성, 지속성 및 생체 내 축적성으로 인해 수생 환경에서 심각한 환경 문제로 인식되고 있다(Aziz et al., 2023). 금속원소는 자연적·인위적 경로를 통해 수계로 유입되며(Piwowarska et al., 2024), 특히 공공하수처리시설은 생활하수, 농업 유출수, 산업계 배출수, 도시 비점오염원 등 다양한 기원의 금속이 집적되는 대표적인 환경 시스템이다(Cheng et al., 2022). 유입수 내 금속의 농도와 조성은 지역 특성과 오염원에 따라 달라지며, 하수처리 과정에서 상당수 금속은 응집·침전 및 슬러지 전이에 의해 제거되거나, 일부는 용존 상태 또는 미세입자로 잔존하여 최종 방류수로 배출될 수 있다(Onchoke and Franclemont, 2022). 특히, 처리수가 해양으로 방류되는 경우, 방류수 내 잔존 금속 농도

Received 12 May, 2026; **Revised** 28 May, 2026;
Accepted 5 June, 2026
***Corresponding author** : Min-Kyu Park, Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea
Phone : +82-64-754-3442
E-mail : mkpark@jejunu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

와 슬러지 내 금속 축적 수준을 평가하는 것은 수환경 관리 및 생태위해성 평가 관점에서 중요하다.

제주특별자치도(이하 제주도)는 산업시설의 규모가 국내 다른 지역에 비해 상대적으로 작고, 농업·관광·서비스업의 비중이 높은 지역적 특성을 지닌다(Choi et al., 2025). 이에 따라 제주지역 공공하수처리시설의 유입수는 대규모 산업시설보다는 생활계 및 농업활동의 영향을 크게 받는다. 특히, 관광객 증가로 인한 숙박시설과 음식점 등에서 발생하는 생활하수는 계절적·공간적 변동성을 확대하는 요인으로 작용한다(Park et al., 2020). 제주도 내 공공하수처리시설 8개소는 일처리량이 1,000 m^3 이상인 시설로 생활하수를 처리하며, 처리수는 해양으로 방류되거나 일부 시설에서는 reverse osmosis (RO) 막 공정을 통해 재이용수로 전환되어 농가에 공급된다(Son et al., 2015). 2023년 기준, 제주도 내 일부 처리시설 또한 처리공정을 통해 탈수된 케이크는 일부 처리시설에서 매립복토재로 재이용 되고 있으나, 대부분 도외로 반출하고 있다. 적절히 처리되지 않은 방류수는 항생제 및 중금속을 포함한 오염물질을 함유할 수 있어 수환경 관리 측면에서 주의가 필요하다(Park et al., 2020).

제주도와 같이 하수처리수가 해양으로 직접 방류가 이루어지는 지역에서는 방류수에 포함된 오염물질이 해양 생태계에 미치는 잠재적 영향을 고려해야 한다(Yakamercan et al., 2021). 국내 공공하수처리시설의 방류수 수질기준은 주로 유기물, 영양염류 및 생태독성 항목에 중점을 두고 있으나, 중금속 항목은 규정되어 있지 않다. 그러나 최종 수용수역이 해양인 경우, 「환경정책기본법 시행령」을 통해 해양생태계 보호를 위한 수질 기준이 제시되며, Cu, Pb, Zn, As, Cd, Cr^{6+} 등의 금속 항목을 관리 대상으로 규정하고 있다. 국외에서도 수생태계 보호를 위해 금속 오염물질에 대한 배출 및 수질 관리 기준을 적용하고 있으며, 미국, 유럽연합(EU), 일본 등에서는 방류수 및 수계 내 Cd, Pb, Cu, Zn, Cr 등의 금속 항목에 대해 배출허용기준 및 환경기준을 설정하여 관리하고 있다(Jeong et al., 2014). 이러한 기준은 금속의 독성과 환경 중 지속성으로 인해 수계 내 축적 가능성이 높다는 점을 고려하여 설정된 것으로, 방류수에 잔존하는 금속 관리의 중요성을 강조한다. 따라서 제주도 공공하수처리시설 내 유입수·방류수·슬러지에 존재하는 오염물질 농도 확인은 해양 생태계 영향 평가와 수질·슬러지 관리 방안 마련을 위한 기초자료로서 중요하다.

이에 본 연구에서는 제주도 내 8개 공공하수처리시설을 대상으로 여름철 유입수, 방류수, 슬러지를 채취하여 총 12종 금속원소의 농도 수준을 비교 분석하였다. 또한, 금속원소 간 상관분석을 통해 공통 기원과 거동 특성을 파악하고, 처리공정 이후 잔존 금속의 분포 특성을 규명하고자 하였다. 이러한 분석을 통해 제주지역 공공하수처리시설에서의 금속 거동 특성을 종합적으로 이해하고, 향후 해양 방류수 관리 및 환경 위해성 평가를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료채취

제주도는 지역별로 주거지역, 상업지역, 관광지역, 농업지역이 혼재되어 있어 처리구역별 하수 발생 특성이 다르게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 제주도 내 공공하수처리시설 8개소를 조사 대상으로 선정하였으며, 조사 지점은 JJ, DB, SS, NW, BM, SD, DJ, SB로 구분하였다. 조사 대상 시설의 처리공정, 시설용량 등 기본적인 시설 정보는 Table 1에 제시하였다. 시료는 관광객 유입과 생활하수 증가로 인한 유입량 증가와 이에 따른 오염부하 증가 등 인위적인 오염원 영향을 고려하여 2024년 8월에 시료를 채취하였다(Fig. 1). 수계 시료는 polypropylene (PP) 채수병을 사용하여 스크린을 통해 큰 부유물질이 걸러진 유입수와 모든 공정을 거친 방류수를 각각 2 L씩 채취하였고, 슬러지 시료는 갈색 PP 용기에 담아 500 g을 수집하였다. 모든 시료는 grab sampling으로 채취하였으며, 채취된 수질시료는 분석 전까지 4°C에서 냉장 보관하였고, 슬러지는 -20°C에서 냉동 상태로 보관하였다. 다항목수질측정기(YSI 556 Multi-Probe System, USA)를 이용하여 수온(Temp., °C), 염분(Sal., psu), 용존산소(DO, mg/L), 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC., S/cm)를 측정하였다.

2.2. 전처리와 기기분석

수질 시료는 분석 전 테프론(PTFE) 추출 용기를 이용하여 습식분해하였다. 추출 과정은 미국 환경보호청(U.S. Environmental Protection Agency, U.S. EPA) 3050 방법에 준하여, 수질 시료 50 g에 왕수(aqua regia, HCl : HNO_3 = 3:1, v/v) 10 mL을 첨가

Table 1. Operational characteristics and treatment capacities of wastewater treatment plants in Jeju

Category	Jeju City			Seogwipo City				
	Jeju (JJ)	Dongbu (DB)	Seobu (SB)	Bomok (BM)	Saekdal (SD)	Daejeong (DJ)	Namwon (NW)	Seongsan (SS)
Site area (m^2)	97,657	27,274	47,589	47,478	23,740	27,687	14,740	25,690
Treatment area (km^2, as of 2023)	40,968	24,351	30,544	18,410	20,119	24,508	15,289	12,108
Population served (persons, as of 2023)	366,234	63,574	95,967	69,628	44,243	46,370	26,524	18,719
Treatment capacity (m^3/day)	130,000	12,000	24,000	30,000	23,000	21,000	16,000	10,000
Treatment method	MLE	SBR ICEAS	SBR ICEAS	KSMBR	MBR, Denipho	SBR ICEAS, MSBR	SBR ICEAS, KIDEA	SBR ICEAS

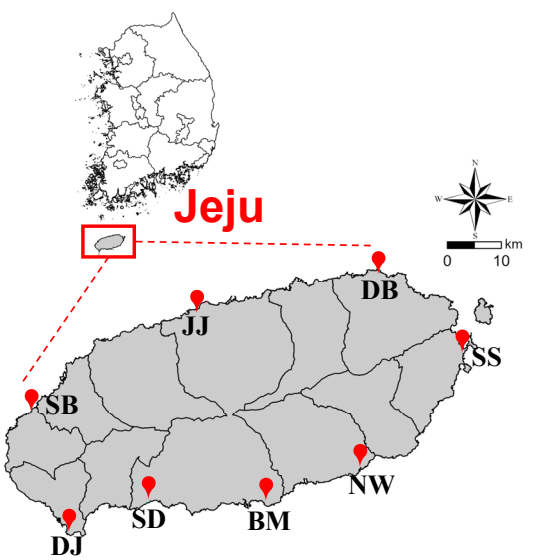

Fig. 1. Location of wastewater and sludge sampling stations in Jeju, Korea. Red points indicate public wastewater treatment plants.

하였다(U.S. EPA, 1996). 이후, 흑연블록 분해장치(ODLAB, OD-98-002P, Korea)를 이용하여 200℃에서 약 4시간 동안 추출하였다. 1 mL로 추출된 시료의 최종 부피가 25 mL가 되도록 1% 질산을 첨가하였다. 슬러지 시료는 약 72시간 이상 동결건조를 진행하였으며, 시료 0.5 g에 왕수(10 mL), 과염소산(3 mL), 과산화수소(3 mL)를 주입하였다. 수질 시료와 동일하게 1 mL까지 추출 후, 총량을 25 mL로 맞추었다. 전처리가 완료된 수질시료와 슬러지는 유도결합 플라즈마 분광분석기(ICP-OES, Agilent 5900, USA)를 이용하여 총 12종의 금속(Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V, Zn)을 분석하였다.

2.3. 정도관리

금속원소 분석방법의 정도관리(quality assurance/quality control, QA/QC)를 위해 바탕시료에 표준물질(multi-element calibration standard 3, PerkinElmer, USA)을 주입하여, 방법검출한계(method detection limit, MDL)를 산정하였다. 시료와 동일한 방법으로 실험하였으며, 7회 반복 분석으로부터 얻은 값의 표준편차에 Student's t값(3.14)를 곱하여 MDL을 산출하였다. 분석된 금속원소 12종의 MDL은 0.03~0.13 μg/L였고, 회수율은 88~101%의 범위로 나타났으며, 모든 항목에서 상대 표준편차(RSD)는 5% 이내로 확인되었다. 이는 「수질오염공정시험기준」의 정도관리 기준에 부합하는 수준으로, 분석 결과의 정밀도 및 정확도를 통해 본 연구의 신뢰성을 확인하였다. 검정곡선의 직선성 결정계수(R^2)는 0.99 이상을 만족하였다.

2.4. 통계분석

제주도 공공하수처리시설에서 측정된 금속원소 데이터의 변수 간 상관성을 평가하기 위해 Origin 2024 (Origin Lab Corporation, Northampton, MA, USA)을 사용하여 상관분석을 수행하였다. 상관분석은 두 변수 간 연관성의 방향과 강도를 정량화하는 방

법으로, Shapiro-Wilk 검정을 실시 후 정규분포 여부를 확인한다. 본 연구에서 정규성 검정(normality test)을 수행한 결과, 대부분의 변수에서 정규성을 만족하지 않는 것으로 확인되었으며($p < 0.05$), 이에 따라 Spearman 상관계수를 적용하여 변수 간 관계를 평가하였다. 변수 간 잠재적 구조를 파악하고 주요 요인을 도출하기 위해 주성분분석(principal component analysis, PCA)을 추가로 수행하였다. 성분 해석의 명확성을 높이기 위하여 Varimax 회전을 적용하였으며, 산출된 성분점수는 성분 공간에서의 분포를 확인하기 위한 산점도 작성과 군집화 분석의 입력자료로 활용하였다. 금속원소 항목에 대한 지역 간 농도 특성의 유사성을 군집화하기 위해 유클리디안 거리(Euclidean distance)와 평균 연결법(average linkage method)을 기준으로 계층적 군집분석(hierarchical cluster analysis, HCA)을 수행하였으며, 주성분분석을 통해 상관 구조를 해석하고 주요 기여 인자를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 하수 슬러지 내 금속원소 농도 수준

시료 채취 지점별 슬러지 내 금속원소 12 종의 금속원소를 분석한 결과, Al, Fe 의 농도는 각각 0.62~2.03%, 0.42~2.34%로 다른 금속원소에 비해 상대적으로 높은 농도 수준을 나타내었다(Fig. 2; Table 2). Al 의 경우, 하수처리 과정에서 총인(T-P) 제거 효율 증대를 위해 투입되는 알루미늄 계열 무기 응집제(poly aluminum chloride, PAC)가 주요 원인으로 판단된다. 응집 과정에서 Al 이 고형물상으로 전이·축적되며, 선행연구에 따르면 PAC 내 알루미늄 이온(Al^{3+})은 수중의 인산염(PO_4^{3-})과 반응하여 불용성인 $AlPO_4$ 및 $Al(OH)_3$ 플록을 형성한다. 이 플록은 수중의 미세 부유물질(suspended solids, SS)과 콜로이드 입자를 흡착 또는 가교하여 거대 입자로 성장하고, 중력에 의해 침전조 하부로 가라앉는다(Choi et al., 2023). 또한, 이러한 결과는 액상에 존재하던 알루미늄이 고형물상으로 전이 및 축적되는 공침 현상과 관련된 것으로 해석되며, 이에 따라 슬러지 내 Al 농도가 증가한 것으로 보고된 바 있다(Suh, 2014).

그 외 금속원소의 평균농도는 각각 Zn (498.75±66.37 mg/kg), Cu (101.28±18.41 mg/kg), Mn (76.65±33.68 mg/kg), Cr (49.45±19.24 mg/kg), V (32.50±9.36 mg/kg), Ni (18.85±7.37 mg/kg), Pb (10.38±4.23 mg/kg), As (5.34±1.27 mg/kg), Co (3.91±2.11 mg/kg), Cd (1.93±0.87 mg/kg) 순으로 나타났다. 지점별 슬러지 내 금속원소 농도 분포는 처리구역별 유입 하수의 특성, 유입 유량 규모 및 계절적 변동에 의해 영향을 받는 것으로 판단된다(García-Delgado et al., 2007). 또한, 제주지역에서는 하계 관광 성수기에 따른 인구 유입 증가가 오염부하 변동을 유발하여 이러한 경향에 추가적으로 작용하였을 가능성이 있다(Jeju Tourism Organization, 2026). 특히, 8~10 월은 제주도의 대표 관광 성수기로, 입도객의 급증이 하수처리구역 내 오염 부하 특성에 직접적인 영향을 미친 것으로 판단된다. Zn 과 Cu 는 생활하수, 차량 통행량에 따른 도로 비점오염원과 상업 시설 등 인위적 배출원에서 기인할 수 있으며(Soltaninia et al., 2022), 하수처리 과정에서 부유물질 또는 유기물과 결합하거나 고형물상으로 전이되어 슬러지에 축적된다(Feng et al., 2023). 슬러지 내 농도 수준은 단순한 오염원 특성 뿐만 아니라 유입 부하와 처리 공정 내 제거·전이 과정이 종합적으로 반영된 결과로 판단된다. 슬러지 내 금속원소 분포 경향성은 그리스, 영국, 브라질, 터키에서 수행된 선행연구와 유사한 경향성을 보였다(Karvelas et al., 2003; Jones et al., 2014; Nascimento et al., 2018; Yakamercan et al., 2021). 이는 슬러지 내 금속 농도가 유입 부하 뿐만 아니라 처리공정 조건 및 약품 투입에 따른 고형물상 전이와 축적 메커니즘에 의해 크게 좌우되기 때문으로 해석된다(Alvarez et al., 2002).

국내 하수 슬러지의 비료 또는 퇴비화를 고려하여, 비료 관리법 관련 「비료 공정규격설정 및 지정」고시 별표 6 에 제시된 중금속 위해성 기준[Cr (300 mg/kg), Cd (5 mg/kg), Ni (50 mg/kg), Cu (300 mg/kg), Pb (150 mg/kg), Zn (900 mg/kg), Hg (2 mg/kg), As (50 mg/kg)]을 적용하였다. 전 지점 하수 슬러지 내 금속원소의 최대 농도는 해당 기준을 모두 충족하여 잠재적 위해성은 낮은 수준으로 판단된다. Zn 은 다른 금속원소에 비해 상대적으로 높은 농도를 보였으나, 기준치 이내로 확인되어 관리 가능한 수준으로 평가된다. 이는 Zn 이 생활계·산업계에서 광범위하게 사용되는 금속으로서 하수 유입부하에 지속적으로 기여하며, 처리 과정에서 고형물과 함께 제거되는 특성

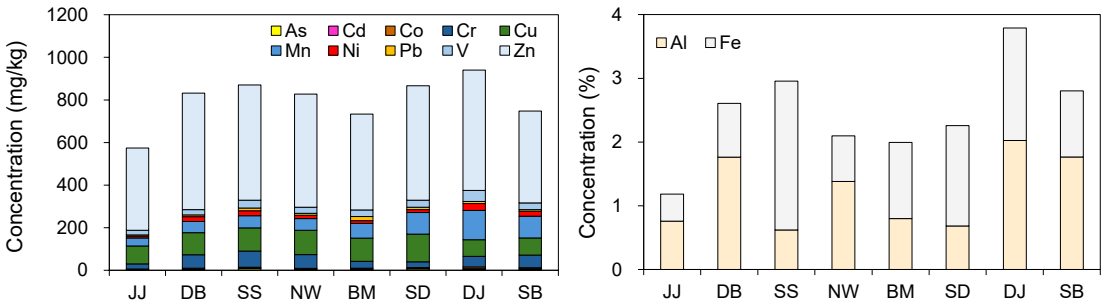

Fig. 2. Metal concentrations in sludge from wastewater treatment plants on Jeju Island: (a) Trace metals; (b) Major metals.

Table 2. Concentration of metal elements in sludge of wastewater treatment plants in August (mg/kg)

	JJ	DB	SS	NW	BM	SD	DJ	SB
As	3.43	4.78	7.60	5.43	5.37	6.47	5.31	4.34
Cd	0.59	1.60	3.51	1.15	2.09	2.07	2.16	2.32
Co	2.05	3.55	3.17	2.39	2.33	4.00	8.38	5.44
Cr	24.01	62.75	75.51	64.53	32.26	27.81	49.36	59.33
Cu	84.00	104.47	109.01	114.26	109.04	130.21	78.61	80.69
Mn	37.81	52.42	58.02	55.11	68.90	100.88	137.67	102.42
Ni	8.71	22.20	22.88	15.97	12.90	13.45	31.41	23.29
Pb	5.676	8.525	12.257	8.805	19.491	10.786	10.414	7.096
V	21.66	24.90	37.05	27.90	31.64	33.64	52.28	30.94
Zn	386.06	547.42	541.12	532.13	449.53	537.33	565.08	431.33
Al	7597.54	17638.35	6206.52	13810.55	7991.29	6835.51	20254.21	17642.56
Fe	4248.72	8448.89	23368.93	7147.42	11954.39	15742.66	17660.83	10412.73

에 기인한 것으로 해석된다(Guo et al., 2023). 이러한 경향은 하수슬러지에서 Zn 이 주요 금속으로 나타난다는 선행연구 결과와도 일치한다(Park et al., 2008).

3.2. 유입수와 방류수 내 금속원소 농도 수준

제주도 내 공공하수처리시설의 유입수 중 12 종의 총 금속 농도는 597.57~1714.91 μg/L (평균 1234.09±424.29 μg/L)로 확인되었고(Fig. 3; Table 3), Fe (48.87±10.40%), Al (38.36±9.52%), Zn (6.54±3.01%), Mn (3.22±1.26%)이 유입수 총 금속 농도의 96.99±1.02%를 차지하여 유입수 내 금속 농도 조성을 대표하는 주요 금속원소로 나타났다. 방류수의 경우, 100.76~286.01 μg/L (평균 164.67±61.07 μg/L)로 나타났고(Table 4), 유입수 대비 방류수의 시료채취 지점별 총 금속 농도의 감소율은 68.89~92.85% (평균 85.13±7.75%) 수준을 보였다.

유입수 중 12 종 금속원소의 총농도는 지점별로 뚜렷한 차이를 보였으며, NW 지점(1714.92 μg/L)에서 가장 높았고, DB 지점(597.57 μg/L)에서 가장 낮아 지점 간 약 2.87 배의 차이를 나타냈다. 초기 농도가 높은 NW (92.85%)와 BM (91.44%) 지점에서 높은 감소율을 보였고, 초기 농도가 낮았던 DB 지점에서 감소율이 68.89%로 가장 낮아 지점별 방류수 농도 차이가 적게 나타났다. 이러한 결과는 지점별 오염원과 유입 특성으로 인해 유입수의 금속원소 농도 차이를 보였으나, 처리과정에서 오염물질이 제거되고 부유물질과 활성 슬러지에 흡착·축적됨에 따라 방류수에서 지점 간 농도 차이가 완화된 것으로 판단된다(Sylwan and Thorin, 2021).

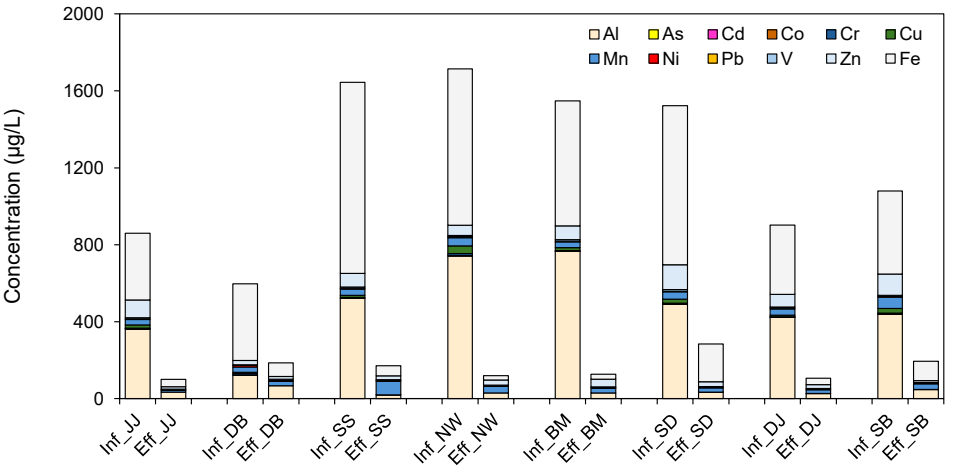

Fig. 3. Metal concentrations in influent and effluent of wastewater treatment plants on Jeju Island.

Table 3. Metal concentrations in influent of wastewater treatment plants in August (μg/L)

	JJ	DB	SS	NW	BM	SD	DJ	SB
Al	362.31	123.14	521.32	742.22	765.24	491.69	422.82	438.96
As	<MDL	<MDL	<MDL	<MDL	<MDL	N.D.*	N.D.	<MDL
Cd	0.21	0.27	<MDL	<MDL	0.35	0.32	0.25	0.25
Co	1.63	0.71	1.39	1.16	1.03	0.74	1.07	1.15
Cr	2.31	7.50	3.96	10.84	3.82	3.98	2.09	4.54
Cu	16.55	6.06	10.81	39.88	14.57	21.54	7.96	23.96
Mn	28.37	26.85	31.58	43.15	30.51	37.82	32.66	59.01
Ni	3.03	8.45	4.01	5.87	2.52	2.91	3.34	3.23
Pb	<MDL	N.D.	<MDL	<MDL	<MDL	N.D.	<MDL	1.82
V	6.74	4.37	6.92	5.57	8.78	8.79	6.52	5.72
Zn	92.09	22.07	71.51	53.47	71.05	129.00	65.21	110.29
Fe	346.55	398.16	992.97	812.75	650.03	826.81	360.87	432.68

*N.D.: Not detected

처리된 방류수의 금속농도는「환경정책기본법 시행령」의 해양생태계 보호를 위한 단기 기준[Cu (3.0 μg/L), Pb (7.6 μg/L), Zn (34 μg/L), As (9.4 μg/L), Cd (19 μg/L), Cr^{6+} (200 μg/L)]에 비해, BM 지점에서 Zn 이 약 1.19 배 기준치를 초과하였고, 그 외 금속원소 농도는 기준 이하임을 확인하였다. 국내 27 개 산업폐수처리시설을 대상으로 조사한 선행연구 결과, 대부분의 금속이 처리공정을 거치면서 유입수 대비 방류수에서 감소하는 경향이 보고되었다(Lee et al., 2015). 이러한 결과는 본 연구에서 유사한 결과를 나타내었으며, 처리 과정에서 금속이 저감 및 감소된 것으로 판단된다. 미국 텍사스 지역 공공하수처리시설에서는 처리 공정별로 Al 과 Fe 농도가 감소하는 경향이 보고되었으며, 이는 금속이 고형물에 흡착된 뒤 침전지에서 분리·제거되는 과정과 관련된 것으로 해석하였다. 이러한 결과는 금속이 용존상에서 고형물상으로 전이되어 제거될 가능성을 시사한다(Onchoke and Franclemont, 2022). 본 연구에서 Al, Fe 은 유입수에서 높은 비율을 차지했으나, 방류수에서는 각각 87.62±17.22%, 87.91±8.48%의 감소율을 보여 선

Table 4. Metal concentrations in effluent of wastewater treatment plants in August (μg/L)

	JJ	DB	SS	NW	BM	SD	DJ	SB
Al	33.86	67.11	19.16	29.86	30.20	32.64	25.75	47.44
As	N.D.	⟨MDL	N.D.	N.D.	⟨MDL	N.D.	N.D.	N.D.
Cd	⟨MDL	⟨MDL	0.24	⟨MDL	⟨MDL	⟨MDL	⟨MDL	0.22
Co	0.71	⟨MDL	0.66	0.59	0.78	N.D.	0.68	⟨MDL
Cr	⟨MDL	⟨MDL	⟨MDL	⟨MDL	⟨MDL	1.13	0.80	0.66
Cu	⟨MDL	⟨MDL	4.82	3.24	4.51	2.26	5.49	2.65
Mn	9.63	23.86	71.58	33.93	25.40	22.89	19.89	28.99
Ni	2.08	3.37	3.05	2.93	1.26	1.95	1.61	4.01
Pb	⟨MDL	N.D.	4.21	⟨MDL	⟨MDL	⟨MDL	N.D.	N.D.
V	4.31	7.26	3.91	3.74	4.01	4.09	4.74	2.87
Zn	12.50	13.88	20.36	26.97	40.50	25.37	19.70	9.20
Fe	37.67	70.45	52.24	21.41	25.78	195.68	33.55	101.07

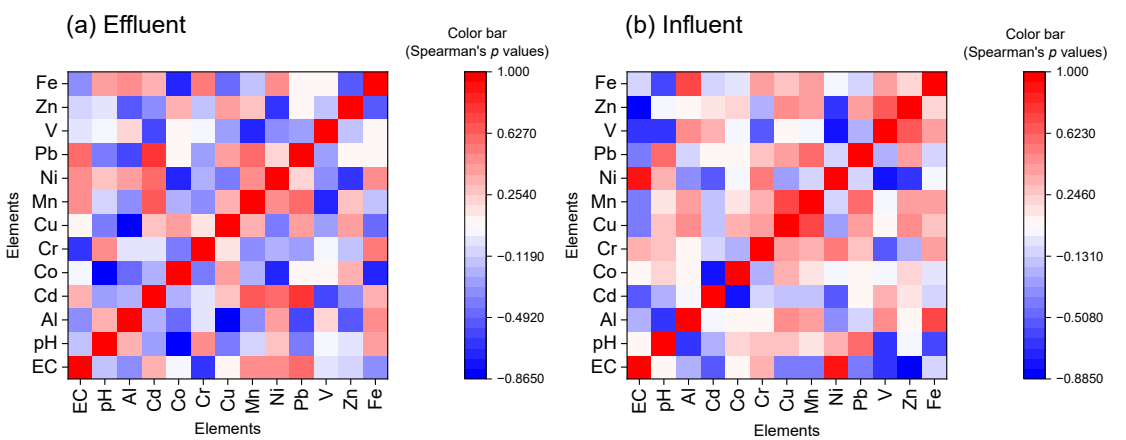

Fig. 4. Correlation matrix heatmap of water quality parameters in wastewater. (a) Effluent ; (b) Influent.

행연구와 유사한 경향을 보였다. 이는 처리공정이 금속 오염 부하를 저감하고 방류수 수질을 균질화하며, 특히 고농도 유입 조건에서도 안정적인 처리능력을 유지하는 것으로 판단된다.

3.3. 수질시료

하수처리장 내 채취된 유입수와 방류수에서 As만 제외(MDL 이하 또는 불검출)하고, EC, pH, 금속원소 11종을 포함한 총 13개 항목 간 상관분석을 수행하였다(Fig. 4). 유입수 내 항목 간 상관계수 분석 결과, EC는 수중 전해질 농도를 반영하는 수질 인자로 Ni와 강한 양의 상관관계(r = 0.88, p ⟨ 0.01)를 나타낸 반면, Zn과는 음의 상관성(r = -0.88, p ⟨ 0.01)을 보였다. 또한, Al-Fe (r = 0.71, p ⟨ 0.05), Cu-Mn (r = 0.74, p ⟨ 0.05)는 금속간 양의 상관성을 보였고, Cd-Co (r = -0.80, p ⟨ 0.05), Ni-V (r = -0.81, p ⟨ 0.05)는 음의 상관성으로 나타났다. 방류수 중 동일한 항목을 대상으로 상관분석을 수행한 결과, EC-Ni (r = 0.48, p = 0.23), EC-Zn (r = -0.10, p = 0.8)으로 유입수에서 확인되었던 뚜렷한 상관관계의 수와 강도가 전반적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 처리공정을 거치면서 수질 인자와 금속 간의 동시 변동성이 약화된 것으로 추정된다. 방류수에서는 Al-Cu (r = -0.86, p ⟨ 0.01)는 강한 음의 상관관계를 나타냈고, Cd-Pb (r = 0.76,

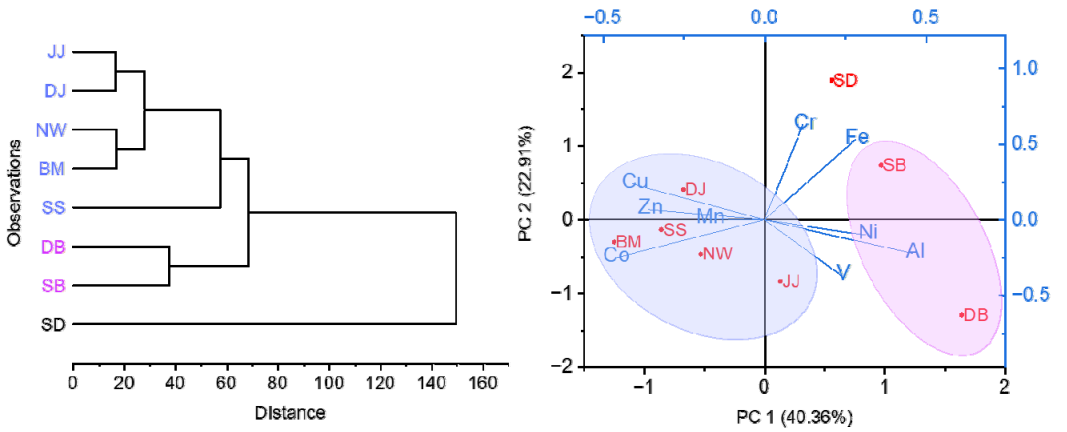

Fig. 5. HCA and PCA biplot of WWTP Effluent according to metal elements.

$p < 0.05$)는 양의 상관관계를 보였다. 또한, Mn-V (r = -0.74, $p < 0.05$)는 음의 상관관계, Co-Fe (r = -0.71, $p < 0.05$) 또한 음의 상관관계를 나타냈다. 수질 인자와의 관계에서는 pH-Co (r = -0.81, $p < 0.05$)가 유의한 음의 상관관계를 보여, 방류수에서 일부 금속의 잔존 농도가 처리 후 수질 조건과 연관될 가능성을 시사한다.

방류수를 대상으로 금속원소 Al, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, V, Zn의 농도를 이용하여 HCA과 PCA을 수행하였다(Fig. 5). HCA 결과, 방류수 시료들은 유사한 농도 특성을 보이는 세 개의 군집으로 구분되는 경향을 보였다. 대부분의 지점(JJ, SS, NW, BM, DJ)은 금속별 상대 조성비가 유사하여 공통된 조성 특성을 보였으나, 일부 지점(DB, SD, SB)은 Al, Fe의 상대적 비율 증가로 인해 다른 지점들과 구분되는 경향을 나타냈다. 특히, SD 지점은 Cr, Fe의 상대적으로 높은 농도에 의해 독립적인 위치에 분포하였고, DB와 SB 지점은 Al, Ni의 영향으로 유사한 경향을 나타내어 동일한 소군집으로 구분되었다. PCA에서 변수의 방향성과 금속 분포를 고려한 결과, 방류수 내 금속은 군집별로 경향성의 차이를 보였다. loading plot에서 Co-Cu-Mn-Zn의 군집은 방류수에서 유사한 변동성을 공유하는 금속군으로 나타났으며, Co, Cu, Mn, Zn은 생활하수 내 일상생활 기원 물질, 배관·배수설비 재질, 생활권 유출수 등과 관련된 금속으로 해석되며(Ruzi et al., 2024), BM, DJ, NW, SS 지점에 집중되는 경향을 보였다. Co는 BM, DJ, SS 지점순으로 높게 나타났고, Cu는 DJ, SS, BM 지점, Mn은 SS, BM, NW 지점, Zn은 BM, NW, SS 지점순으로 높은 수준을 보였다. 특히, Mn은 SS 지점에서 71.58 μg/L로 방류수 중 가장 높은 농도를 보였고, Zn은 BM 지점에서 40.50 μg/L로 가장 높은 수준을 나타내어 Co-Cu-Mn-Zn 군집에 영향을 미쳤음을 시사한다. 반면, Al, Ni과 V는 PC1 양의 방향에서 분포하였으나, 동일한 방향에 위치한 Cr와 Fe는 PC2 축에서 구분되는 양상을 보여 별도의 거동군으로 해석되었다. DB 지점의 Al (67.11 μg/L), Ni (3.37 μg/L) V (7.26 μg/L)가 상대적으로 높게 나타났고, SB 지점의 Al (47.44 μg/L), Ni (4.01 μg/L) 또한 비교적 높은 수준을 보여 Al-Ni 군의 특성이 특정 지점에서 높은 경향성을 확인하였다. 이는 방류수의 금속 조성이 단일 금속에 의한 영향이 아닌, Al-Ni와 Co-Cu-Mn-Zn과 같은 금속군 단위의 변동 구조를 반영하고 있음을 시사한다. 또한, Fe와 Cr은 PCA에서 PC1과 PC2의 양의 방향(2사분면)으로 분리되는 경향을 보여 다른 금속군과 구별되는 변동성을 나타냈다. 농도 수준에서도 Fe는 지점 간 변동이 특히 크게 나타났으며, SD 지점의 Fe (195.68 μg/L)가 다른 지점 대비 현저히 높고, DB (70.45 μg/L)와 SB (101.07 μg/L)에서 비교적 높은 값을 보여 Fe 중심 변동성이 특정 지점 군집을 형성하는 데 영향을 주었을 가능성이 높은 것으로 판단된다. Cr은 전반적으로 낮은 수준이었으나 SD (1.13 μg/L), DJ (0.80 μg/L), SB (0.66 μg/L)에서 검출되어 Fe와 함께 PC2 축 방향의 분산에 일부 기여한 것으로 해석된다. 이러한 결과

는 Fe가 관거, 처리계통 내 금속 재질의 부식이나 관거 내 침적물의 재부유와 관련된 변동성을 상대적으로 크게 반영한 반면, Cr은 생활하수 이외의 배출원이나 금속가공, 전기도금 관련 유입의 영향이 일부 반영된 것으로 판단된다(Akdemir, 2024; Khamis et al., 2025).

4. 결 론

본 연구에서는 제주도 공공하수처리시설의 유입수가 해양으로 직접 방류되는 지역적 특성을 고려하여 여름철 제주도 내 8개 시설을 대상으로 유입수, 방류수 및 슬러지의 금속원소 농도와 분포 특성을 조사하였다. 슬러지의 금속 농도는 전 지점에서 「비료 공정규격설정 및 지정」 중 퇴비 기준 이내의 수준으로 재활용 가능성을 저해할 수준의 위해성은 낮은 것으로 확인되었다.

유입수 내 금속 원소 조성은 Fe, Al, Zn, Mn이 대부분을 차지하였으며, 지점별 농도 차이는 처리구역별 유입 부하와 오염원 특성에 따른 것으로 판단된다. 반면, 방류수에서는 지점 간 금속원소의 농도 차이가 유입수에 비해 감소하여, 처리공정이 금속 농도를 저감할 뿐만 아니라 금속 오염 수준을 일정 범위로 안정화하는 기능을 보여주었다. 그러나 BM 지점에서는 Zn의 농도가 단기 해양생태계 보호기준(34 μg/L)을 초과하여, 일부 금속이 처리 후에도 잔존하며 잠재적 생태위해 요인으로 작용할 수 있음을 시사한다.

처리 전후 금속 조성 변화는 Al과 Fe가 응집 및 침전 과정에서 수산화물 또는 고형물상으로 전이되어 제거되는 메커니즘이 작용했을 가능성을 시사한다. 또한, 유입수에서 확인된 금속 및 수질 인자 간 상관성이 방류수에서 약화된 것은 처리공정 이후 금속 간 공통 변동성이 감소하고, 잔존 금속 농도가 금속별 특성과 수질 조건에 따라 달라지는 것으로 판단된다. 방류수 내 금속은 Co-Cu-Mn-Zn, Al-Ni-V, Fe-Cr으로 서로 다른 거동군으로 구분되었으며, 이는 지점별 유입 특성과 잔존 금속 특성에 따라 차이를 보이는 것으로 판단된다.

본 연구에서 제주 지역 공공하수처리시설은 금속 오염 부하에 대해 안정적인 처리 능력을 보였으나, 일부 금속 및 특정 지점의 잔존 특성에 대한 지속 관리 필요성을 제기하였다. 본 연구는 2024년 8월 여름철 단일 시기의 시료를 기반으로 수행되어 계절 변화에 따른 유입 부하와 금속원소 농도 변동성을 충분히 반영하는 데에 한계가 있다. 특히 제주지역은 관광객 유입, 강우 특성, 하수 발생량이 계절에 따라 달라질 수 있으므로, 향후 해양 방류 수질 관리와 지역 맞춤형 금속 관리 기준 마련을 위해 계절 변동을 고려한 장기 모니터링과 생물 노출 기반 위해성 평가가 수행되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 2024년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

Akdemir, T., 2024, Trace element concentrations in effluent of municipal wastewater treatment plants along the Turkish coasts and assessment of human health risk, Front. Mar. Sci., 11, 1521449.

Alvarez, E. A., Mochón, M. C., Sánchez, J. J., Rodr ígguez, M. T., 2002, Heavy metal extractable forms in sludge from wastewater treatment plants, Chemosphere, 47, 765-775.

Aziz, K. H. H., Mustafa, F. S., Omer, K. M., Hama, S., Hamarawf, R. F., Rahman, K. O., 2023, Heavy metal pollution in the aquatic environment: Efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: A Review, RSC Adv., 13, 17595-17610.

Cheng, X., Wei, C., Ke, X., Pan, J., Wei, G., Chen, Y., Wei, C., Li, F., Preis, S., 2022, Nationwide review of heavy metals in municipal sludge wastewater treatment plants in China: Sources, composition, accumulation and risk assessment, J. Hazard. Mater., 437, 129267.

Choi, I., Choi, K., Park, N., 2025, A Study on Jeju Island's industrial structure diversification policy: A Sustainable development strategy through analysis of success cases, J. Converg. Cult. Technol., 11, 297-310.

Choi, J. H., Yoon, G. G., Lee, C. H., 2023, Evaluation of phosphorus removal efficiency at various coagulation conditions using polyaluminum chloride with different Al contents, J. Environ. Sci. Int., 32, 731-739.

Feng, J., Burke, I. T., Chen, X., Stewart, D. I., 2023, Assessing metal contamination and speciation in sewage sludge: Implications for soil application and environmental risk, Rev. Environ. Sci. Bio/Technol., 22, 1037-1058.

García-Delgado, M., Rodríguez-Cruz, M., Lorenzo, L., Arienzo, M., Sánchez-Martín, M., 2007, Seasonal and time variability of heavy metal content and of its chemical forms in sewage sludges from different wastewater treatment plants, Sci. Total Environ., 382, 82-92.

Guo, S., Nkinahamira, F., Adyari, B., Zhang, Y., Hu, A., Sun, Q., 2023, Fate and spatial–temporal variation of 23 elements at 7 wastewater treatment plants in southeast city of China, Water, 15, 1226.

Jeju Tourism Organization, 2026, Monthly report on Jeju tourist visitation patterns: March 2026, Jeju Tourism Organization, Jeju, Korea.

Jeong, D. H., Choi, I., Cho, Y., Chung, H., Kwon, O., Yu, S., Yeom, I., Son, D., 2014, A Study on the management system improvement of effluent water qualities for public sewage treatment facilities in Korea, J. Environ. Impact Assess., 23, 296-314.

Jones, V., Gardner, M., Ellor, B., 2014, Concentrations of trace substances in sewage sludge from 28 wastewater treatment works in the UK, Chemosphere, 111, 478-484.

Karvelas, M., Katsoyiannis, A., Samara, C., 2003, Occurrence and fate of heavy metals in the wastewater treatment process, Chemosphere, 53, 1201-1210.

Khamis, E., Reyad, T. E., Abd-El-Khalek, D. E., 2025, Corrosion assessment and mitigation in wastewater systems: A Comprehensive review, npj Mater. Degrad. 9, 95.

Lee, W., Park, S. H., Kim, J., Jung, J. Y., 2015, Occurrence and removal of hazardous chemicals and toxic metals in 27 industrial wastewater treatment plants in Korea, Desalin. Water Treat., 54, 1141-1149.

Mohiuddin, K., Ogawa, Y., Zakir, H., Otomo, K., Shikazono, N., 2011, Heavy metals contamination in water and sediments of an urban river in a developing country, Int. J. Environ. Sci. Technol., 8, 723-736.

Nascimento, A. L., Souza, A. J., Andrade, P. A. M., Andreote, F. D., Coscione, A. R., Oliveira, F. C., Regitano, J. B., 2018, Sewage sludge microbial structures and relations to their sources, treatments, and chemical attributes, Front. Microbiol., 9, 1462.

Onchoke, K. K., Franclemont, C. M., 2022, Evaluation and removal efficiencies of a rural WWTP for metals and anions in Lufkin, East Texas (USA), Environ. Monit. Assess., 194, 920.

Park, J. M., Kim, M. J., Kim, J. P., Lee, S. B., Kwon, O. S., Lee, S. H., 2008, Concentration of heavy metals and PAHs in sewage sludge, J. Korean Soc. Environ. Anal., 11(4), 275-281.

Park, J., Kim, S., Kim, Y., Hong, S., Suh, K., 2020, Evaluation of carrying capacity and sustainability of Jeju Island using Onishi model, J. Korean Soc. Rural Plan., 26, 95-106.

Piwowarska, D., Kiedrzyńska, E., Jaszczyszyn, K., 2024, A Global perspective on the nature and fate of heavy metals polluting water ecosystems, and their impact and remediation, Crit. Rev. Environ. Sci. Technol., 54, 1436-1458.

Ruzi, I. I., Ishak, A. R., Abdullah, M. A., Zain, N. N. M., Tualeka, A. R., Adriyani, R., Mohamed, R., Edinur, H. A., Aziz, M. Y., 2024, Heavy metal contamination in Sungai Petani, Malaysia: A Wastewater-based epidemiology study, J. Water Health, 22, 953-966.

Soltaninia, S., Taghavi, L., Hosseini, S. A., Motamedvaziri, B., Eslamian, S., 2022, The effect of land-use type and climatic conditions on heavy metal pollutants in urban runoff in a semi-arid region, Water Reuse, 12, 384-402.

Son, Y. K., Rhee, H. P., Kim, H., Choi, S. W., Kim, J. D., 2015, Safety evaluation of a wastewater reuse for the farmland irrigation in Jeju Island, J. Korean Soc. Agric. Eng., 57, 21-29.

Suh, J. I., 2014, Characteristics of sludge generated from the total phosphorus removal process of domestic wastewater treatment plant, KSWST Jour. Wat. Treat., 22, 111-118.

Sylwan, I., Thorin, E., 2021, Removal of heavy metals during primary treatment of municipal wastewater and possibilities of enhanced removal: A Review, Water, 13, 1121.

U.S. EPA, 1996, Method 3050B: Acid digestion of sediments, sludges, and soils, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

Yakamercan, E., Ari, A., Aygün, A., 2021, Land application of municipal sewage sludge: Human health risk assessment of heavy metals, J. Clean. Prod., 319, 128568.

• Professor. Min-Kyu Park
Department of Environmental Engineering, Jeju National University
mkpark@jejunu.ac.kr
• Doctor's course. Saem Ryu
Department of Environmental Engineering, Jeju National University
ryusaem@stu.jejunu.ac.kr