

서울시 물재생센터의 수질 종합 평가

수질화학팀

김창모 · 길혜경 · 심미희 · 조혜윤 · 박창호 · 이목영 · 어수미

Water Quality and Ecotoxicity Assessment of Sewage Treatment Centers in Seoul

Water Chemistry Team

**Chang-mo Kim, Hae-kyung Gil, Mi-hee Shim, Hye-yoon Cho,
Chang-ho Park, Mok-young Lee and Soo-mi Eo**

Abstract

Sewage treatment centers(STCs) receive both stormwater runoff, and domestic and industrial wastewater. This study was conducted to evaluate the quality of water being released from four sewage treatment centers located in Seoul from March to December 2012. We examined the water quality in terms of both physico-chemical characteristics, and ecotoxicity, and we monitored for correlations between physicochemical properties and ecotoxicity, and treatment efficiencies by various systems in 4 STCs. The contaminant concentrations in the influent water showed increasing trends during winter, and decreasing trends during summer. From the ecotoxicity results, using *Daphnia magna*, the average TU values of the influent and the effluent of the primary sedimentation basin were 1.3 and 1.5, respectively. Especially, $\text{NH}_3\text{-N}$ was the main factor affecting ecotoxicity. However, none of the effluents of the final sedimentation basin exceeded the criteria($\text{TU}<1$) for ecotoxicity. Physicochemical items were not correlated with ecotoxicity. BOD, COD and SS were removed by the STC process by more than 80%. However, the yearly average T-P concentration exceeded the new criteria($\leq 0.5 \text{ mg/L}$) in the effluent of STC. So, a further advanced treatment will be required for the control of phosphorus. The coefficient of stability based on the statistical results of data were stable for 8 items. This result showed that the effluent water quality for 4 STCs has improved increasingly by the introduction of sewage advanced treatment system in recent years.

Key words : sewage treatment center(STC), ecotoxicity, physicochemical property, treatment efficiency

서론

서울시에는 국내에서 대표적인 공공성을 띠고 있는 탄천·중랑·서남·난지 4개 대형 물재생센터가 있으며, 처리용량은 100~200만톤/일로 2011년 12월 현재 총 581만톤/일 규모를 갖고 있다. 하수처리 가동률도 2011년 연평균 기준 64.4~84.3% (4개 센터 평균 73.8%)로 높게 유지되고 있다.

물재생시설(하수처리시설)은 수생태계 순환 과정에서 오염물질을 정화시켜주는 역할을 수행함으로써 환경오염물질 저감 및 하천 수생태계 보전에 기여하고 있다. 이러한 중요성 때문에 국내의 하수관리 정책도 점점 변화하고 있다. 먼저 최근 가장 눈에 띄는 변화는 단일항목 규제 위주의 이화학적 수질관리 중심에서 생태적으로 안전하고 건강한 물환경을 지향하는 통합적 수질관리 체계로 바뀐 점을 들 수 있다. “수질 및 수생태계 보전에 관한 법률”과 “하수도법”을 통해 배출허용기준에 물벼룩을 이용한 생태독성 항목이 추가되어 산업체와 물재생시설(공공하수처리시설)의 방류수에 대해 2011년부터 사업장의 규모·지역·시기에 따라 단계적으로 적용하고 있다(1). 서울시의 4개 물재생센터도 하수도법상의 공공하수처리시설 방류수 배출허용기준에 적용되어 2011년 1월 1일부터 생태독성(TU) 1 이하 기준의 적용을 받고 있다.

이외에도 서울시에서는 부영양화의 주범인 총인·총질소 등과 같은 영양염류를 제거하여 수질을 개선하기 위해 물재생센터에 고도처리공정을 설치하고 있다. 이는 2010년 2월 26일 개정된 하수도법 시행규칙에 의거 물재생센터 방류수의 총인·총질소 수질기준이 강화되었기 때문으로 서울시에서는 약품을 이용한 총인처리설비와 같은 고도처리시설 설치사업을 진행하고 있다. 특히 개정된 수질기준에서 주목해야 할 점은 총인의 수질기준이 2012년 1월 1일부터 0.5 mg/L 이하로 대폭 강화되었다는 점을 들 수 있다. 따라서 물재생센터의 이러한 수질관리 변화기에 물재생센터의 수질을 종합적으로 평가하는 일도 의미있을 것으로 판단된다.

그동안 물재생센터를 대상으로 한 연구과제들은 학계 뿐만 아니라 연구기관에서도 널리 수행되어 왔다. 우리 연구원에서도 물재생센터를 소재로 한

논문을 발표하였다(1~2). 하지만 이는 본격적으로 생태독성제도가 시행되거나 고도처리시설이 운영되기 이전으로 이러한 변화이후 관련된 연구는 아직 보고되고 있지 않다. 이에 따라 본 연구에서는 서울시에 위치한 4개 물재생센터를 대상으로 주요 공정별 수질 현황(이화학 항목, 생태독성) 및 추이를 살피고, 수질 항목간의 관련 여부 및 주요 공정에서의 수질오염물질 처리효율 등을 알아보고자 하였다. 이를 통해 하천 수질에 직접적으로 영향을 미칠 수 있는 물재생센터의 수질을 종합적으로 평가하고, 서울시민이 쾌적하게 생활할 수 있는 수생태계 보전 및 물재생센터 시설운영의 기초 자료를 제공하고자 하였다.

연구방법

1. 시료채수

본 연구는 2012년 3월부터 12월까지 10개월 동안 서울시에 위치한 4개 물재생센터(Sewage Treatment Center, STC)를 대상으로 하였다. 월1회 물재생시설의 주요 공정별로 채수하였으며 채수지점은 원수 저류조, 1차침전지 말단, 2차침전지 말단 및 최종 방류구로 하였다(표 1). 시료채수방법은 “수질오염공정시험기준 ES04130.1 시료의 채취 및 보존방법”을 따랐으며, 일회성 Grab으로 이화학 시험용 시료와 생태독성 평가용 시료를 각각 2L씩 채수하였다. 특히 시료의 산화 방지를 위해 완전히 채우고 4℃ 냉장 상태로 운반하여 36시간 이내에 분석하였다.

2. 수질분석 및 생태독성 평가

이화학 항목은 공정별 수질변화가 뚜렷하여 경향을 파악할 수 있거나 물재생시설의 수질관리 측면에서 중요한 대상이 되는 수질오염물질 중에서 선정하였다. 선정된 항목은 10개로 생물화학적산소요구량(BOD), 화학적산소요구량(COD), 부유물질(SS), 총질소(T-N), 총인(T-P), 음이온계면활성제(ABS), 염소이온(Cl⁻), 황산이온(SO₄²⁻), 수소이온농도(pH), 수온(Temp.)이었다. 대상 항목은 수질오염공정시험기준(3)과 Standard Method(4)에

Table 1. Outline of sampling sites for this study

STC	No. of samples	Sampling sites(No. of samples)
Seonam	3	Influent(1), Effluent(2)
Tancheon	5	Influent(1), PSBE(1) ¹⁾ , FSBE(1) ²⁾ , Effluent(2)
Jungrang	6	Influent(2), PSBE(1) ¹⁾ , Effluent(3)
Nanji	3	Influent(1), Effluent(2)
Sum	17	-

¹⁾ Primary sedimentation basin effluent.

²⁾ Final sedimentation basin effluent.

의해 분석하였으며, T-N과 T-P는 자동분석기(BRAN LUEBBE, Germany)로, Cl⁻과 SO₄²⁻는 이온 크로마토그래프(Metrohm, Swiss)로 측정하였다.

생태독성 평가는 “수질오염공정시험기준 ES04704.1 물벼룩을 이용한 급성독성시험법”에 따라 이루어졌다. 물벼룩(*Daphnia magna*)을 시료에 24시간 동안 노출시킨 후, 물벼룩의 50%가 유영저해를 일으키는 농도인 EC₅₀을 EPA에서 제공하는 통계 프로그램인 TSK(Trimmed Spearman-Kärber) 방법을 이용하여 산정하였다. 생태독성값(TU)은 식(1)을 이용하여 계산하였다.

$$TU = 100/EC_{50}(\%) \quad (1)$$

결과 및 고찰

1. 물재생시설의 주요 공정별 이화학 수질현황

2012년 3~12월까지 10개월 동안 서울시 4개 물재생센터의 이화학적 수질 현황을 표 2에 나타내었다.

4개 물재생센터 유입수의 경우 유기물 지표인 BOD와 COD 연평균 농도는 각각 83.7~118.1 mg/L, 37.4~48.0 mg/L 범위를 보였으며, 갈수기(4~5월, 11월)에 증가하였다가 강우 등의 영향으로 6~10월에 낮아지는 경향을 나타냈다. 부유물질은 38.0~92.8 mg/L 범위를 보였으며 COD와 유사한 농도 경향을 나타냈다. 대표적인 영양염류인 T-N과 T-P 농도도 각각 28.428~33.321 mg/L, 2.635~3.686 mg/L 범위로 7월에 가장 낮은 경향을

보였다. ABS는 0.83~1.08 mg/L 범위로 SS와 매우 유사한 월별 경향을 띠었다. 이는 오염물질 유입농도가 봄과 겨울의 갈수기에 증가하였다가 강우가 집중되는 여름철에는 희석 효과에 의해 낮아지는 경향을 보였다는 이 등(2)의 연구 결과와 유사하였다. 생태독성에 영향을 미치는 것으로 알려진 염소이온과 황산이온은 각각 54.2~80.3 mg/L, 17.6~32.6 mg/L 범위를 보였다. 유입수의 연평균 농도는 BOD, COD, SS, T-N, T-P, ABS, 염소이온 및 황산이온이 각각 102.7 mg/L, 42.2 mg/L, 64.5 mg/L, 31.636 mg/L, 3.142 mg/L, 0.94 mg/L, 67.9 mg/L 및 25.3 mg/L로 나타났다.

물재생시설 공정에서 물리적 처리를 의미하는 1차 침전지 통과수의 경우, 탄천과 중랑 물재생센터 2개소에서 시료를 채취하였다. 1차 침전지 통과수의 연평균 BOD, COD, SS, T-N, T-P, ABS, 염소이온 및 황산이온은 각각 105.9 mg/L, 36.6 mg/L, 53.3 mg/L, 30.262 mg/L, 3.625 mg/L, 0.86 mg/L, 61.3 mg/L 및 34.4 mg/L로 유입수의 수질과 비슷하였다. 2차 침전지 통과수는 방류수의 수질과 유사하였다.

방류수의 연평균 BOD, COD, SS, T-N, T-P, ABS, 염소이온 및 황산이온은 각각 3.0 mg/L, 6.2 mg/L, 1.7 mg/L, 10.452 mg/L, 0.920 mg/L, 0.17 mg/L, 59.4 mg/L 및 37.8 mg/L로 나타났다. 또한 위 항목들의 범위는 각각 1.2~4.2 mg/L, 4.7~7.3 mg/L, 1.3~2.0 mg/L, 7.147~12.866 mg/L, 0.630~1.226 mg/L, 0.15~0.20 mg/L, 36.1~75.4 mg/L 및 14.0~114.7 mg/L로 나타났다. 2010년의 연구 결과(2)와 비교할 때 방류수의

Table 2. Summary of physicochemical water quality of 4 sewage treatment centers in Seoul, 2012

(Unit : mg/L)

STC		BOD		COD		SS		T-N		T-P		ABS		Cl ⁻		SO ₄ ²⁻		pH		Temp.(°C)	
		Mean S.D	Min Max	Mean S.D	Min Max	Mean S.D	Min Max	Mean S.D	Min Max	Mean S.D	Min Max	Mean S.D	Min Max	Mean S.D	Min Max	Mean S.D	Min Max	Mean S.D	Min Max	Mean S.D	Min Max
Seonam	Inf	98.3 29.3	51.0 141.6	42.5 18.9	19.5 71.9	60.9 24.7	34.0 110.4	28.428 7.169	15.750 39.378	2.635 0.635	1.720 3.547	0.90 0.69	0.20 2.47	80.3 18.4	57.4 123.6	32.6 17.1	2.7 60.2	6.9 0.1	6.7 7.2	20.9 4.8	13.6 26.6
	Eff	3.6 2.4	1.0 8.6	4.7 2.6	2.0 11.6	2.0 1.5	0.7 4.8	7.147 3.306	3.680 15.012	1.102 0.377	0.704 1.907	0.19 0.16	0.00 0.52	36.1 27.8	15.9 120.1	14.0 7.1	0.0 24.2	6.6 0.2	6.2 7.0	20.8 4.8	13.5 26.5
Tancheon	Inf	118.1 40.4	78.6 216.6	48.0 22.6	22.0 95.9	92.8 96.6	35.0 358.0	33.279 5.527	28.040 43.214	3.686 0.764	2.550 4.910	1.08 1.08	0.07 3.89	61.0 8.8	49.0 78.9	20.4 11.3	5.8 39.0	7.2 0.3	6.6 7.5	19.6 5.4	13.0 27.9
	1st T	135.0 66.4	58.8 265.2	43.2 29.7	12.3 106.1	82.6 104.1	17.0 348.0	32.947 5.594	24.980 43.390	4.249 1.314	2.630 6.920	0.65 0.39	0.00 1.23	65.4 14.7	51.4 86.5	49.8 85.8	5.1 277.2	7.0 0.3	6.5 7.4	20.3 4.8	13.7 27.6
	2nd T	3.7 2.6	1.2 7.5	6.4 1.7	4.4 10.3	4.9 4.8	1.7 17.0	9.480 1.536	6.884 11.490	0.625 0.344	0.170 1.228	0.15 0.09	0.00 0.30	77.6 28.7	40.0 123.5	25.8 11.6	0.0 37.4	6.6 0.2	6.2 6.8	21.4 4.1	16.1 28.1
	Eff	2.6 1.9	0.5 8.5	6.7 1.8	4.1 9.6	1.9 1.4	0.7 7.0	9.197 1.732	5.056 11.332	0.630 0.360	0.114 1.454	0.17 0.11	0.00 0.38	71.4 28.8	20.5 107.6	26.0 12.2	0.1 40.5	6.5 0.2	6.2 6.7	21.2 4.5	15.4 28.0
Jungrang	Inf	83.7 42.0	11.6 157.8	37.4 18.3	7.7 78.5	38.0 26.2	12.0 93.0	31.517 9.127	17.600 44.663	3.045 0.888	1.780 4.680	0.93 0.71	0.11 2.52	54.2 15.9	31.2 85.7	17.6 11.9	0.0 48.3	7.3 0.1	7.1 7.4	19.1 4.4	13.1 23.9
	1st T	76.8 40.0	18.6 126.6	30.1 9.6	14.5 45.4	24.0 15.7	9.0 46.0	27.578 7.578	16.460 38.180	3.000 0.859	1.800 4.080	1.08 0.65	0.16 2.26	57.1 14.4	33.8 85.9	19.0 11.4	0.0 38.2	7.1 0.4	6.4 7.5	20.4 4.1	12.9 24.2
	Eff2	1.2 0.7	0.3 2.3	5.2 1.1	3.9 7.1	1.3 0.8	0.7 3.0	8.741 2.721	4.962 13.842	0.650 0.533	0.120 1.452	0.20 0.17	0.00 0.44	64.1 19.7	48.9 112.5	27.1 11.6	0.0 39.6	6.4 0.1	6.2 6.5	20.2 4.6	13.1 24.8
	Eff3	3.3 1.8	1.4 6.6	7.3 1.8	4.8 9.8	1.8 1.4	0.7 5.0	12.161 1.392	9.482 13.584	1.226 0.967	0.104 3.070	0.15 0.08	0.05 0.27	75.4 11.2	61.9 99.1	114.7 246.6	0.0 724.2	6.5 0.2	6.3 6.8	20.8 4.2	13.0 24.8
	Eff4	3.0 1.8	0.4 6.3	6.4 1.7	3.9 8.5	1.6 1.2	0.7 4.0	12.866 2.635	10.130 18.652	0.808 0.422	0.186 1.556	0.16 0.15	0.05 0.52	64.9 21.7	28.7 101.6	24.9 12.5	0.0 36.8	6.5 0.2	6.2 6.9	20.5 4.6	13.2 25.6
Nanji	Inf	110.8 46.4	36.3 184.8	40.8 9.3	26.6 58.7	66.4 34.7	26.0 116.0	33.321 9.206	12.960 42.431	3.202 1.045	1.200 4.970	0.83 0.55	0.14 1.69	76.2 19.6	51.3 102.4	30.6 21.5	0.0 66.1	7.1 0.2	6.7 7.3	20.9 5.2	14.0 28.5
	Eff	4.2 3.4	0.5 13.1	6.9 2.7	3.4 16.3	1.8 1.7	0.7 7.3	12.600 5.070	6.234 27.070	1.102 0.758	0.196 3.320	0.15 0.12	0.00 0.40	44.6 25.7	0.0 93.1	20.3 14.5	0.0 49.4	6.7 0.3	6.3 7.0	20.6 5.2	13.0 27.5

수질은 전반적으로 양호하였으나, T-P 농도는 2012년 1월 1일부로 강화된 수질기준인 0.5 mg/L를 상회하였다. 그러나 2009년 이전에는 T-P 연평균 농도가 1.0 mg/L 이상이었으나 2010년부터 1.0 mg/L 미만으로 낮아지는 추세를 보여 2009년부터 4개 물재생센터에서 본격적으로 수행하고 있는 고도처리 개량사업 및 시설 현대화 사업 등의 효과가 나타나고 있는 것으로 판단된다.

2. 물재생시설의 주요 공정별 생태독성 평가

8개월간(2012년 3월~10월) 4개 물재생센터 유입수와 방류수 등에 대한 생태독성 결과를 표 3에 요약하였다.

EC₅₀(%)은 물벼룩의 50%가 유영 피해를 보이는 농도로써, EC₅₀이 낮을수록 독성이 강함을 의미한다. 측정결과 유입수와 1차 침전지 통과수는 각각 63.0~76.5%, 46.2~69.5%를 보였으며, 2차 침전지 통과수와 최종 방류수는 100%를 초과하여 독성을 보이지 않았다. 즉, 독성이 발현되지 않아 EC₅₀ 계산이 무의미한 미적용률도 원수는 약 0~46%, 1차 침전지 통과수는 약 33%를 보였다.

유입수의 경우 측정시료 중 약 84%가 생태독성이 발현하였다. 생태독성(TU) 범위와 평균은 각각 0.9~2.1, 1.3을 나타냈으며, 물재생센터 유입수의 생태독성 월평균이 5월에 2.6으로 측정된 것을 제외하면 0.8~1.5 범위로 뚜렷한 월별 경향을 보이지 않았다. 현재 유입수의 생태독성 수질기준치는 설정되어 있지 않으나, 방류수 기준으로 판단할 경우 50~100% 범위로 TU 1을 초과하였다. 미국의 경우 공공하수처리시설에서 확인할 수 있는 독성물질로 암모니아 등 7가지 물질을 규정하고 있는데, 이 등(1)이 지적인 바와 같이 대부분의 유입수에서 독성이 발현한 이유는 분해 과정에서 암모니아를 발생시키는 고농도의 유기물(BOD와 COD)과 계면활성제(ABS) 등 때문으로 판단된다. 본 연구에서도 유입수의 BOD와 COD 연평균 농도가 각각 102.7 mg/L, 42.2 mg/L로 방류수의 BOD, COD 농도 3.0 mg/L, 6.2 mg/L보다 각각 34배, 7배 높게 나타났다. 특히 유기물의 분해과정에서 발생하는 암모니아는 수중생물에 독성을 유발하는 것으로 알려져 있으며(5~7), 본 실험에서도 유입수의 연평균 암모니아 농도가 27.6

Table 3. Ecotoxicity of 4 sewage treatment centers in Seoul

STC		EC ₅₀ (%)					TU				
		Mean	S.D	Min	Max	EC non-reflection(%)	Mean	S.D	Min	Max	Excess rate(%)
Seonam	Inf	63.0	22.4	37.9	100.0	40.0	1.1	0.9	0.0	2.6	50.0
	Eff	>100	>100	>100	>100	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tancheon	Inf	76.5	10.1	59.5	89.1	40.0	0.9	0.6	0.0	1.7	60.0
	1st T	69.5	20.9	33.0	89.1	33.3	1.2	0.8	0.0	3.0	66.7
	2nd T	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Eff	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jungrang	Inf	64.9	13.2	35.4	72.6	46.2	1.0	0.8	0.0	2.8	53.8
	1st T	46.2	16.3	26.8	66.0	33.3	1.7	1.3	0.0	3.7	66.7
	Eff2	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Eff3	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Eff4	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Nanji	Inf	64.8	22.7	14.9	85.2	0.0	2.1	1.7	1.2	6.7	100.0
	Eff	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

mg/L로 미국의 우려(concern)농도인 5 mg/L보다 약 5배 정도 높았다. 또한 암모니아와 생태독성과의 상관계수도 0.73으로 높게 나타났다. 1차 침전지 통과수는 약 89%의 생태독성 발현율을 보여 1차 침전지까지의 공정에서 유입수의 생태독성을 저감시키지 못하는 것으로 나타났다. 반면 2차 침전지를 통과한 시료에서는 생태독성이 나타나지 않았다.

현재 생태독성은 지역에 따라 달리 규제받고 있는데, 서울의 4개 물재생센터의 경우 나지역에 해당된다. 조사 결과 최종 방류수의 생태독성값(TU)은 전부 0으로 나타나, 2011년 1월 1일부터 적용되고 있는 생태독성 수질기준치 $TU < 1$ 를 만족하였다. 또한 이는 전국 단위의 공공하수처리시설을 대상으로 한 선행 연구의 결과와도 유사하였다(8).

3. 이화학 수질과 생태독성간의 관계

표 4에서는 이화학적 수질항목과 생태독성과의 상관계수(r)를 보여주고 있다.

이화학 항목간의 상관관계를 분석한 결과 BOD, COD, SS, T-N 및 T-P 간에는 $r=0.21\sim0.80$ 범위로 서로 상관성이 높게 나타났다. 반면 이들 항목과 ABS, 염소 이온 및 황산 이온과의 상관성은 $r=-0.03\sim0.35$ 범위를 보이며 매우 낮았다. 또한

ABS, 염소 이온 및 황산 이온 간에도 상관성은 매우 낮게 나타났다.

95% 신뢰수준에서 BOD, COD, SS, T-N, T-P, ABS, 염소 이온 및 황산 이온과 같은 이화학 항목과 생태독성과의 상관계수는 $-0.03\sim0.21$ 범위로 낮게 나타났으며 SS와 ABS 항목만 약한 상관성을 보였다. 또한 이화학 항목과 생태독성값에 대한 회귀분석 결과 $p > 0.05$ 로 나타나 통계적으로도 의미가 없었다. 이 결과는 이화학항목과 생태독성과의 상관관계를 추정하기가 어려웠다는 오 등(9)의 보고 및 윤 등(10)의 선행 연구와도 유사하였다. 따라서 향후 이화학항목과 생태독성간의 상관성이 낮은 이유를 밝히기 위하여 복합독성 및 만성독성 등의 심도 있는 연구가 필요하다고 본다. 또한 유기물과 영양염류 등은 저농도에서는 물벼룩의 영양원이 될 수도 있기 때문에 이들 물질에 대한 내성 조사도 필요하다고 생각된다.

4. 물재생시설의 주요 공정별 처리효율 평가

4개 물재생센터의 유입수와 방류수의 오염물질 농도로 제거효율을 평가하였다(표 5).

BOD, COD와 같은 유기물질 제거에 있어서는 평균 80~90% 이상의 효율을 보였다. BOD와 COD 제거효율은 각각 95.2~97.6%, 80.4~88.2%

Table 4. The correlation coefficients of the physicochemical items and TU

Items	BOD	COD	SS	T-N	T-P	ABS	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	TU
BOD	1								
COD	0.70*	1							
SS	0.71*	0.80*	1						
T-N	0.52*	0.49*	0.21	1					
T-P	0.66*	0.71*	0.61*	0.65*	1				
ABS	0.13	0.35*	0.16	0.13	0.32*	1			
Cl ⁻	-0.01	0.15	0.07	-0.03	-0.03	-0.20	1		
SO ₄ ²⁻	-0.01	0.15	0.07	-0.03	-0.03	0.11	0.02	1	
TU	0.09	0.13	0.17	0.05	0.06	0.21	0.11	-0.03	1

* $p < 0.05$.

Table 5. Comparison of removal efficiency of the physicochemical items on sewage treatment centers in Seoul (unit : %)

Item	Seonam		Tancheon		Jungrang		Nanji	
	Mean±S.D	Min~Max	Mean±S.D	Min~Max	Mean±S.D	Min~Max	Mean±S.D	Min~Max
BOD	96.4±2.4	90.3~98.3	97.6±2.3	91.9~99.2	96.2±1.5	93.1~98.0	95.2±4.4	85.7~99.6
COD	88.2±4.8	80.5~92.9	83.7±6.7	69.3~93.9	80.4±8.8	67.2~89.8	83.0±3.8	77.3~87.5
SS	96.2±3.6	86.8~98.8	96.9±1.9	92.9~99.7	94.5±2.7	89.8~97.9	97.1±2.0	93.3~99.2
T-N	74.2±10.5	54.2~87.7	72.3±5.7	64.0~80.9	59.6±7.7	48.5~74.6	57.6±22.1	6.3~79.0
T-P	57.6±11.2	40.4~75.6	83.6±7.8	66.7~91.8	65.9±21.9	38.8~95.9	60.9±29.8	-8.5~86.3
ABS	73.2±21.6	23.8~98.3	81.2±11.9	56.7~100.0	77.3±12.1	60.0~95.3	81.4±11.7	65.7~100.0
Cl ⁻	53.8±36.1	-45.6~75.9	-19.8±29.6	-53.1~38.8	-18.5±18.0	-55.5~-0.1	42.6±21.0	4.5~67.4
SO ₄ ²⁻	51.4±36.4	-39.6~88.9	-54.9±105.6	-276.7±92.2	-393.2±555.9	-1356.0~-6.3	27.3±23.0	-17.8~56.7

의 높은 효율을 보였다. 반면 영양염류인 T-N과 T-P 제거효율은 각각 57.6~74.2%, 57.6~83.6% 범위를 보였다. SS는 94.5~97.1% 범위로 높은 제거효율을 보였고 ABS는 73.2~81.4% 범위를 보였다. 염소이온과 황산이온은 각각 -19.8~53.8%, -393.2~51.4% 범위를 보여 타 항목에 비해 편차가 큰 제거효율 경향을 보였다. 앞서 기술한 바와 같이 BOD, COD, SS에 비해 T-N과 T-P의 제거효율은 낮았는데, 이는 고도처리공정을 도입하지 않은 하수처리장에서 BOD, COD와 같은 유기물질 제거에 비해 영양염류의 제거 효율이 낮았다는 이등(11)의 보고와 유사하였다. 그러나 2010년의 선행 연구(2)와 비교할 때 T-N의 제거효율이 약 36%, T-P의 제거효율이 약 14% 개선되어 물재생센터에서 추진되고 있는 수질개선 사업 등의 효과가 나타나고 있는 것으로 판단된다.

그림 1에서 물재생시설 주요 공정에서의 오염물질 제거효율을 살펴보았다. 1차 침전지를 통과한 공정에서는 BOD 등 각 수질오염물질의 제거효율이 -18.6~19.3%의 범위를 보여 평균보다 편차가 크고 낮은 제거효율을 나타냈다. 2차 침전지를 통과한 공정의 오염물질 제거효율은 71.1~96.8% 범위를 보여 72.3~97.6%의 범위를 보인 최종 방류수에서의 제거효율과 비슷하였다.

반면 염소이온과 황산이온의 제거효율은 오히려 후단에서 낮아지는 등 공정별 제거효율에 대한 일관성이 없었다. 이는 각 공정에서의 오염물질의 제거효율이 낮고 후단의 농도가 높기 때문으로 향후 이를 명확히 규명할 모니터링이 필요하다고 판단된다. 또한 염소이온과 황산이온은 생태독성에 영향을 미칠 수 있는 잠재적인 영향 인자로 향후 모니터링시 이에 대한 고려도 필요하다고 판단된다.

표 6에 물재생센터 방류수 수질의 안정도 계수를 나타내었다.

안정도 계수란 특정 데이터가 정규 확률분포를 따른다는 가정 아래 처리성능 등의 일관성을 파악하기 위하여 사용하며, 누적확률 그래프에서 보통 P₁₀과 P₈₀의 비로 나타낸다(12). 일반적으로 누적확률에 대한 (P₈₀/P₁₀)비가 2~3 이내이면 자료가 평균치 주위를 크게 벗어나지 않는 양호한 상태로 처리시설의 성능이 안정적임을 의미하며, 3보다 크면 평균치 주위로 큰 분산을 보이며 불안정한 처리가 이루어진다고 해석할 수 있다(13).

본 연구에서도 하수처리장 운전성능을 평가할 때 기준이 되는 누적확률 10%에 해당하는 수질 값과 누적확률 80%에 해당하는 수질 값을 구하여 누적 확률비(P₈₀/P₁₀)를 구하였다. 먼저 표준정규 분포의 누적 확률표를 이용하여 누적확률이 0.1이

Table 6. Ratio between 80% and 10% values from the cumulative distribution of treatments

SPC	Parameter	BOD	COD	SS	T-N	T-P	ABS	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Seonam	P ₁₀	4.18	5.37	2.42	7.97	1.20	0.23	43.09	15.78
	P ₈₀	5.58	6.89	3.31	9.92	1.42	0.32	59.47	19.98
	P ₈₀ /P ₁₀	1.34	1.28	1.37	1.24	1.19	1.40	1.38	1.27
Tancheon	P ₁₀	3.10	7.10	2.21	9.63	0.72	0.19	78.64	29.07
	P ₈₀	4.22	8.14	3.01	10.65	0.93	0.26	95.65	36.29
	P ₈₀ /P ₁₀	1.36	1.15	1.37	1.11	1.29	1.34	1.22	1.25
Jungrang	P ₁₀	2.85	6.68	1.86	11.82	1.05	0.20	72.50	78.13
	P ₈₀	3.69	7.58	2.51	13.15	1.43	0.28	82.84	131.38
	P ₈₀ /P ₁₀	1.29	1.13	1.35	1.12	1.35	1.38	1.14	1.44
Nanji	P ₁₀	5.00	7.53	2.18	13.87	1.29	0.18	51.04	23.91
	P ₈₀	7.01	9.15	3.18	16.86	1.74	0.25	66.20	32.47
	P ₈₀ /P ₁₀	1.40	1.21	1.46	1.22	1.35	1.40	1.30	1.36

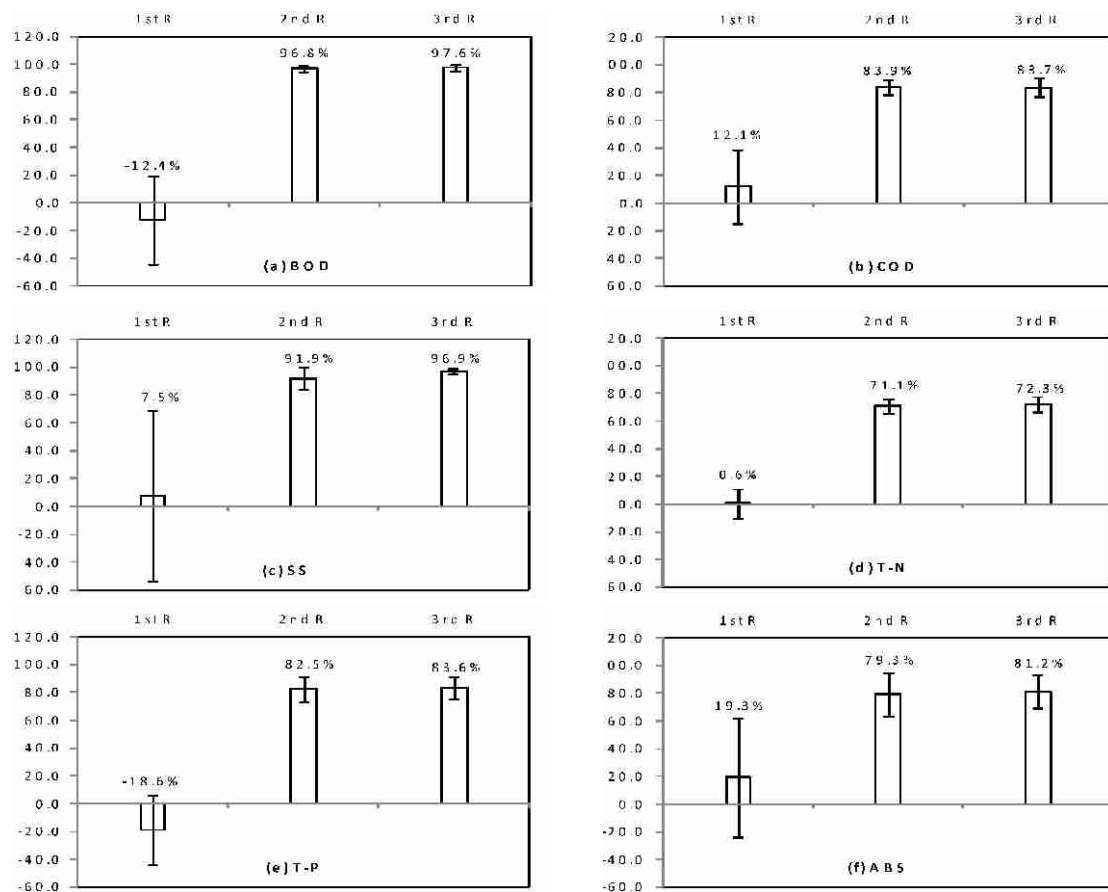


Fig. 1. Comparison of removal efficiency of each items according to major sewage treatment process.

되는 Z_{10} 값을 구한 뒤, 식 (2)을 이용하여 누적확률 10%(P_{10})에 해당하는 수질 값을 계산하였다.

$$X_{10} = \mu + \sigma \cdot Z_{10} \quad (2)$$

여기서 μ 와 σ 는 자료의 평균과 표준편차이다.

계산결과 4개 물재생센터의 BOD와 COD 안정도계수는 각각 1.29~1.40, 1.13~1.28로 모두 안정된 처리를 하고 있는 것으로 나타났다. 그 외 SS, T-N, T-P 및 ABS 안정도 계수도 각각 1.35~1.46, 1.11~1.24, 1.29~1.35 및 1.34~1.40으로 양호하였다. 또한 염소이온과 황산이온 안정도계수도 제거율 평가와는 달리 안정된 처리가 이루어지고 있는 것으로 나타났다.

결론

본 연구에서는 서울시에 위치한 4개 물재생센터의 주요 공정별 수질 현황(이화학 항목, 생태독성)을 파악하고, 수질 항목간의 관련 여부 및 주요 공정에서의 오염물질 처리효율 등을 알아보고자 하였다. 이에 대한 결과는 다음과 같다.

1. 유입수 수질은 봄과 겨울의 갈수기에 증가하였다가 여름철에 낮아지는 경향을 보였으며, 1차 침전지 통과수의 수질은 유입수 수질과 유사하였다. 방류수의 수질은 전반적으로 양호하였으나 연평균 T-P농도는 수질기준을 초과하였다. 2차 침전지 통과수의 수질은 방류수 수질과 유사하였다.
2. 유입수의 생태독성은 시료의 84%가 발현하였으며 TU값이 평균 1.3으로 나타났다. 특히 암모니아와 생태독성간 상관관계수가 0.73으로 높게 나타나 암모니아가 생태독성에 영향을 미치는 것으로 보여진다. 1차 침전지 통과수의 평균 TU값은 1.5였으며, 2차 침전지 통과수와 방류수의 TU값은 0으로 생태독성이 나타나지 않았다.
3. BOD, COD, SS, T-N 및 T-P와의 상관관계수는 0.21~0.80 범위로 서로 상관성이 높게 나타났다. 그러나 BOD, COD, SS, T-N, T-P,

ABS, 염소 이온 및 황산 이온과 같은 이화학 항목과 생태독성과의 상관관계수는 -0.03~0.21 범위로 낮았으며, SS와 ABS 항목만 약한 상관성을 보였다.

4. 4개 물재생센터의 유입수와 방류수의 오염물질 농도로 제거효율을 평가한 결과, BOD, COD, SS는 80~90% 이상의 제거효율을 보였다. 반면 영양염류인 T-N과 T-P 제거효율은 위 항목들에 비해 낮았으나, 물재생센터의 수질개선 사업으로 제거효율이 개선되고 있는 것으로 나타났다.
5. 주요 공정에서의 오염물질 제거효율을 살펴본 결과, 1차 침전지를 통과한 공정의 제거효율은 -18.6~19.3%로 낮았으나, 2차 침전지를 통과한 공정의 오염물질 제거효율은 71.1~96.8% 범위를 보여 72.3~97.6%의 범위를 보인 최종 방류수에서의 제거효율과 비슷하였다.
6. 물재생시설의 처리안정도를 분석한 결과 분석 항목의 안정도계수가 모두 2 이내로 매우 안정된 처리를 보이는 것으로 나타났다.

2012년 말 현재 4개 물재생센터의 고도처리공정 도입 사업 등이 거의 완료 단계에 접어들어 따라 2010년에 비해 방류수 수질이 개선되고 안정되고 있음을 확인하였다. 그러나 아직도 2012년부터 강화된 T-P 방류수수질기준을 만족시키지 못함에 따라 총인처리시설 등의 설치 및 성능시험을 서둘러야 할 것으로 판단된다. 아울러 약품을 사용하는 총인처리시설의 설치가 마무리되면 생태독성 등 수질에 미치는 영향도 검토해야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 이호찬, 김창모, 심미희, 조혜윤, 조석주, 어수미, 이민환, 채영주 : 서울시 소재 물재생센터 방류수에 대한 생태독성 평가. 서울특별시 보건환경연구원보, 47:183~192, 2011.
2. 이지영, 박창호, 오화민, 신도철, 이민환, 엄석원 : 서울시내 물재생센터 방류수의 수질특성 연구. 서울특별시 보건환경연구원보, 46:

- 117~124, 2010.
3. 환경부 : 수질오염공정시험기준, 2011.
 4. APHA, AWWA and WEF : Standard methods for examinations of water and wastewater, 18th edition, 1993.
 5. Hoke RA, Giesy JP and Kreis RG : Sediment porewater toxicity identification in the lower fox river and Green bay, Wisconsin, using the microtox assay. *Ecotoxicology and environmental safety*, 23:343~354, 1992.
 6. Phillips BM, Anderson BS and Hunt JW : Measurement and distribution of interstitial and overlying water ammonia and hydrogen sulfide in sediment toxicity tests. *Marine environmental research*, 44:117~126, 1997.
 7. Ho KT, Burgess RM, Pelletier MC, Serbst JR, Ryba SA, Cantwell MG, Kuhn A and Raczelowski P : An overview of toxicant identification in sediments and dredged materials. *Marine pollution bulletin*, 44:286~293, 2002.
 8. 김상훈, 박우상, 조원실, 이정서, 양형재 : 공공하수처리시설 생태독성 저감을 위한 실태조사 연구. 국립환경과학원, p23~58, 2010.
 9. 오경택, 김지원, 김우근, 이순애, 윤홍길, 이성규 : 산업폐수 방류수의 생태독성 평가. *Journal of korean society on water quality*, 22(1): 37~44, 2006.
 10. 윤종철, 김홍제, 신도철, 이지영, 석은주, 이민환, 엄석원 : 폐수의 물리화학적 수질특성과 생태독성과의 상관성 평가. *서울특별시 보건환경연구원보*, 45:154~160, 2009.
 11. 이두진, 전상운 : 신뢰성에 기초한 하수처리장 운전효율 평가. *대한환경공학회지*, 29(3):348~356, 2007.
 12. Niku S, Schroeder ED and Samaniego FJ : Performance of activated sludge processes and reliability based design. *Journal of water pollution control association*, 51:2841, 1979.
 13. Crities R and Tchobanoglous G : *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. McGraw-Hill, p429~435, 1977.