

서울시내 물재생센터 방류수의 수질특성 연구

수질화학팀

이지영 · 박창호 · 오화민 · 신도철 · 이민환 · 엄석원

Study on the Characteristics of the Effluent from Municipal Wastewater Treatment Plants in Seoul

Water chemistry team

**Ji-young Lee, Chang-ho Park, Hwa-min Oh, Do-chul shin,
Min-hwan Lee and Seok-won Eom**

Abstract

In this study, the effluents discharged from 4 sewage treatment plants in Seoul were surveyed over a period of 1 year. Monthly data obtained at four sewage treatment plants for five water quality items(BOD, COD, SS, T-N and T-P) were used to characterize the water quality. In addition, the treatment stability has also been discussed. Effluent characteristics were as follows; the effluent water quality was dependent on the influent water quality, and the effluent BOD, COD, SS and T-N concentrations showed increasing trends during winter, but decreasing trends during summer. The effluent BOD, COD, SS and T-N concentrations obtained with the A²/O process were lower than via the activated sludge process. The coefficients of reliability based on the statistical results of data were stable for BOD, COD, SS and T-N, but unstable for T-P. Most of the plants are able to meet the new effluent discharge limits, but a further advanced treatment will be required for the control of phosphorus.

Key words : sewage treatment plant, effluent, stability

서론

서울시에는 탄천, 중랑, 서남, 난지 등 4개 물재생센터가 있으며, 처리시설규모는 2000년 12월

현재 일일 설계 처리용량이 약 581만톤에 달하고 있다. 그동안 문민정부와 IMF를 거치면서 하수처리장 설계 및 국가 각 부문에 민영화 정책이 추진되었다. 하수처리장도 예외는 아니었는데 많은

하수처리시설의 관리주체가 지자체의 공무원에서 민간으로 이관되면서 하수처리장 운영 전반에 운전대행회사의 설립으로 민간기술자가 유입되었다. 하수관거 정비사업이 본격적으로 추진된 것도 이 시기였다.

하수처리장 방류수 수질기준은 1995년까지 BOD, COD, SS 등 3개 항목에 대한 기준을 규정하고 있었으나, 1996년부터 총질소 및 총인을 추가하였고(1), 2001년 10월 하수도법 시행규칙 개정안(2)에 따라 팔당호 상수원 수질보전 특별대책지역과 잠실수중보권역, 4대강수계 및 기타지역으로 구분하여 BOD(10 mg/L), SS(10 mg/L), 총질소(20 mg/L), 총인(2 mg/L)로 단계별로 방류수 수질기준을 강화하여 2008년부터는 전지역으로 확대 적용하였다. 또한 향후 2012년부터는 겨울철 총질소 및 총인 방류수수질기준을 대폭 강화하여 T-N 20 mg/L, T-P 0.2~0.5 mg/L기준으로 단일화되는 개정안을 입법예고하였다(3). 따라서 하수처리장 방류수가 공공수역에 미치는 오염부하를 줄이기 위해 하수처리장의 수질에 대한 전반적인 평가와 함께 대폭적인 방류수 수질기준의 강화에 따른 대책마련이 이루어져야 한다.

본 조사에서는 서울시에 위치한 4개 물재생센터를 대상으로 방류수의 수질 농도의 변동 및 계절적 변화 추이를 살피고, 고도처리도입시설과 기존 시설간의 수질 비교 및 각 처리시설의 처리안정도를 평가하여 물재생센터 방류수의 수질향상 및 효율증대와 처리장의 시설개선에 도움을 주고자 한다. 또한 서울시 주민의 쾌적한 생활환경의 조성을 위한 수질환경기준 달성을 위한 수질관리의 기초 자료를 제공하고자 한다.

연구방법

물재생센터 방류수의 실태와 특성을 조사하기 위하여 서울시내 4개 물재생센터 방류수를 대상으로 2010년 1월부터 12월까지 1년간 월 1회 샘플링을 실시하였다.

조사대상 물재생센터는 모두 표준 활성슬러지 공법으로 처리하고 있었으며, 중량 물재생센터는 고도처리공법(A²/O 공법)을 도입하고 있었다. 표 1에 처리시설의 처리용량 등의 주요사항을 요약정리 하였다.

조사대상 물재생센터 방류수의 모니터링 수질항목은 부유물질, COD_{Mn}, BOD₅, TN, TP, SS 등 5개 기본 항목 이외에 NH₃-N, NO₃-N, PO₄-P 등 3개 부가항목에 대하여 조사하였다. 모든 수질항목은 수질오염 공정시험기준(4)과 Standard Method(5)에 의해 측정 분석하였으며, TN과 TP는 BRAN LUEBBE AutoAnalyzer 3로, NH₃-N는 Photo Spectrometer(BECKMAN COULTER DU 800), NO₃-N과 PO₄-P 음이온은 Ion Chromatography(Metrohm CH/Advanced IC System)로 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 유입수질과 방류수질 비교

서남 물재생센터를 대상으로 1년간 유입수와 방류수의 월별 수질농도 변화를 그림 1~4에 나타내었고, 표 2에 유입 및 방류수질을 정리하였다. 하수처리장 유입수량은 평균 843,365m³/day로써

Table 1. Sewage treatment plant used for this study

Plant	Capacity(m ³ /d)	Secondary sewage treatment	Disinfection	Advanced treatment
Seonam	2000,000	Activated Sludge Process	Chlorine	-
Nanji	1000,000	"	"	-
Jungrang	1710,000	"	"	A ² /O
Tancheon	1100,000	"	"	-

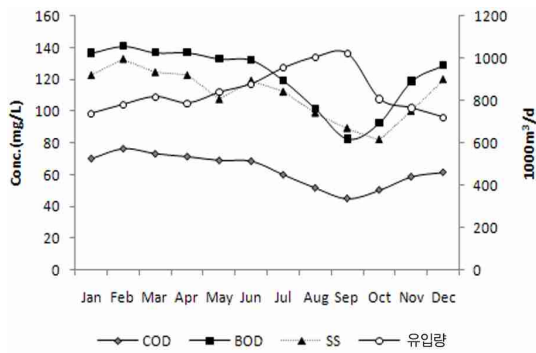


Fig. 1. Monthly concentration of BOD, COD and SS in influent at Seonam sewage treatment plant.

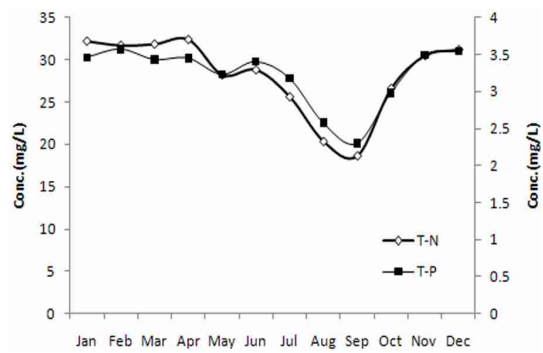


Fig. 2. Monthly concentration of T-N, and T-P in influent at Seonam sewage treatment plant.

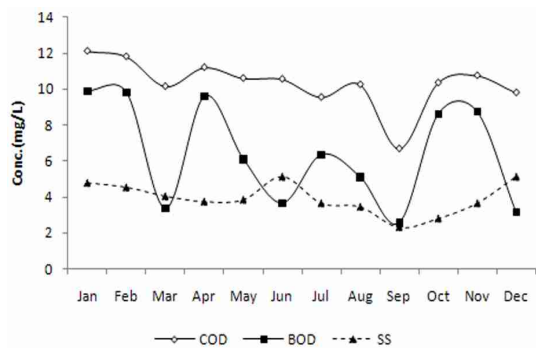


Fig. 3. Monthly concentration of BOD, COD and SS in effluent at Seonam sewage treatment plant.

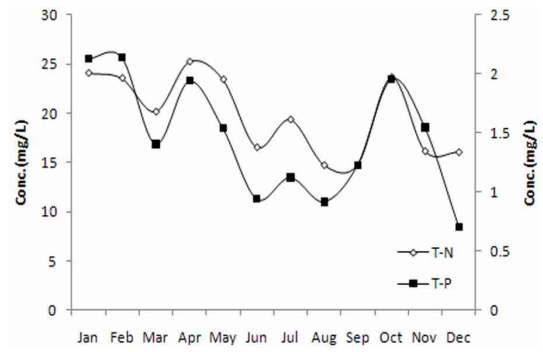


Fig. 4. Monthly concentration of T-N, and T-P in effluent at Seonam sewage treatment plant.

Table 2. Influent and effluent water quality of Seonam sewage treatment (Unit : mg/L)

	Influent				Effluent			
	Mean	Std.	Max.	Min.	Mean	Std.	Max.	Min.
COD	63.0	10.1	76.4	44.9	10.3	1.4	12.1	1.4
BOD	121.8	19.5	141.1	82.5	6.4	2.8	9.9	2.6
SS	111.0	15.6	133.0	82.1	3.9	0.9	5.1	2.3
T-N	28.2	4.6	32.4	18.6	19.8	4.0	25.2	14.7
T-P	3.2	0.4	3.6	2.3	1.5	0.5	2.1	0.7
Inflow (1,000 m ³ /day)	843.3	101.5	1021.5	720.1	-	-	-	-

처리시설용량(2,000,000 m³/day)대비 42.2%를 나타내고 있으며, 겨울에는 높고 여름에는 낮은 유입특성을 나타내고 있다. 강우가 집중되는 7월부터 증가하기 시작하여 8월, 9월에 가장 많이 증가하였다가 갈수기인 봄과 겨울에 점차 감소하여 12월에 가장 적은 양이 발생하는 것으로 나타났다. 반면에 COD, BOD, SS, T-N, T-P의 각 항목별 유입농도는 봄과 겨울의 갈수기에 증가하였다가 강우가 집중되는 여름철에는 희석효과에 의해 낮아지는 경향을 보였다. 유입수의 COD 농도는 44.9~76.4 mg/L 범위의 분포를 보였고, BOD 농도는 82.5~141.1 mg/L, SS 농도는 82.1~133.0 mg/L, T-N농도는 18.6~32.4 mg/L, T-P 농도는 2.3~3.6 mg/L를 각각 나타내었다. 유입수의 평균농도는 COD, BOD, SS, T-N, T-P가 각각 63.0 mg/L, 121.8 mg/L, 111.0 mg/L, 28.2 mg/L, 3.2 mg/L로 나타났다.

방류수의 수질농도변화는 유입수의 농도와 유사한 경향을 나타내 유입수질의 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며, 유입수와 마찬가지로 대체적으로 여름철에 낮아지고 겨울에서 봄까지는 높아지는 경향을 보였다. 방류수의 COD 농도변화는 유입수의 농도와 유사한 변화 양상을 나타내 1월, 2월에 높은 농도를 나타냈고, 9월에 가장 낮은 농도를 나타냈다. 연평균 COD 방류농도는 10.3 mg/L였으며, 농도범위는 1.4~12.1 mg/L로 나타났다. 방류수의 BOD 농도변화는 COD 농도변화와 유사한 양상을 나타내고 있지만 년중 편차는 COD에 비해 높게 나타났다. 연평균 BOD 방류농도는 6.4 mg/L였으며, 농도범위는 2.6~9.9 mg/L로 나타났다. SS의 농도변화는 6월, 12월에 높게 나타났고 9월에 가장 낮은 농도를 나타냈다. T-N과 T-P의 농도변화는 월별로 유사한 형태를 보였으며, 일반적으로 유입수질의 수온저하에 따라 겨울철에는 T-N과 T-P의 제거율이 저하되기 때문에 동절기에 높은 농도를 보였다. 방류수 T-N의 평균농도는 19.8 mg/L였으며, T-P의 평균농도는 1.4 mg/L였다. T-N과 T-P의 농도범위는 각각 14.7~25.2 mg/L, 0.7~2.1 mg/L로 2012년에 적용될 방류수 수질기준을 초과하는 경우도 나타났다.

2. 방류수 수질의 계절별 비교

4개 물재생센터의 COD, BOD, SS, T-N, T-P의 각 항목에 대하여 계절별 농도변화를 그림 5~9에 나타내었다. COD의 농도변화는 4개 조사지점 모두 여름과 가을에 걸쳐 농도가 낮아지다가 겨울과 봄에 농도가 높아지는 일정한 농도 패턴을 보였고, 4개 지점 중 중량 물재생센터가 가장 낮은 농도로 나타났다. BOD의 농도변화는 서남, 중량, 탄천 3개 지점은 동고하저의 경향을 보인 반면, 난지 물재생센터는 예외적으로 여름에 약간 농도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 탄천의 경우 계절의 변동폭이 큰 것으로 나타났다. SS 농도의 경우 4개 물재생센터 모두 비교적 일정한 농도의 변화 패턴을 유지하였으며, 계절에 따른 농도의 변화가 적은 것으로 나타났다. T-N 농도의 경우 서남과 난지에서는 동고하저의 패턴을 보이며 비교적 일정한 농도 변화패턴을 유지하였으나, 탄천에서는 봄에 소폭 증가 후 여름부터 겨울까지 크게 증가하거나 감소하는 경향이 없이 대체적으로 일정한 농도흐름을 보였다. 중량은 4개 지점 중 가장 낮은 농도로 가을에 농도가 높아지는 경향을 나타내었다. 우리나라에서는 대부분의 하수처리장이 하수와 함께 분뇨를 연계처리하기 때문에 질소 농도의 시간적 패턴 변화를 정확히 규명하기는 매우 어렵지만 일반적으로 동절기의 증가요인으로는 동절기 하수처리장 유입량이 하절기 유입하수량이 2/3 수준으로 감소하고 연계수에 함유된 고농도 영양염류가 하수에 의한 희석효과가 감소하기 때문이다. 또한 동절기 온도 저하로 인한 국부적인 질산화와 2차 침전지에서 탈질반응이 크게 둔화되었기 때문이다(6~8). 질소와 함께 영양염류로 구분되는 인의 경우 조사지점별로 다른 경향을 나타내었다. 서남과 탄천은 기온저하로 인해 처리효율이 떨어지는 동절기에 높게 나타났다. 그러나 일반적인 하수처리장 방류수의 동고하저의 경향과는 달리 난지와 중량은 겨울철에 농도가 감소하는 경향을 보였다.

총질소 농도를 살펴보면 서남과 난지에서 봄과 겨울철에 강화된 질소기준 20 mg/L를 초과하는 것을 볼 수 있는데 강화된 방류수 수질기준을 만족시키기 위해서는 2차 처리 후 남아있는 미처리

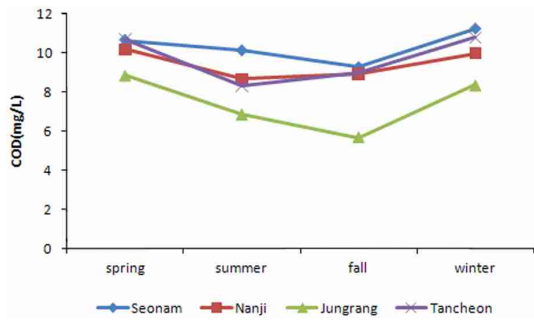


Fig. 5. Seasonal variation of COD in effluent by each plant.

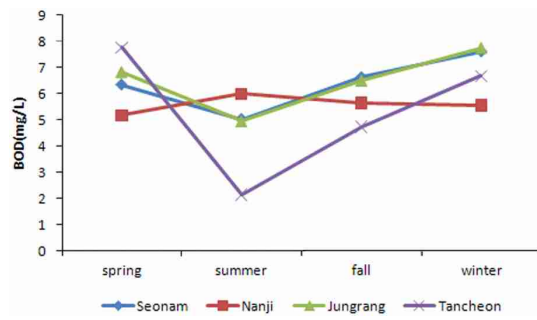


Fig. 6. Seasonal variation of BOD in effluent by each plant.

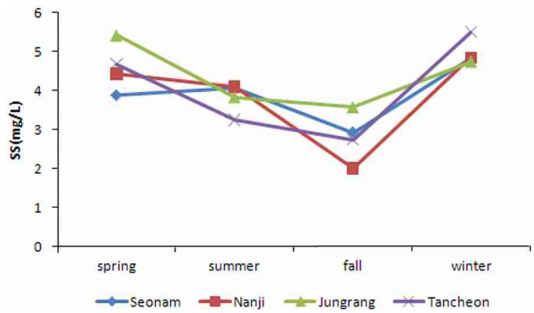


Fig. 7. Seasonal variation of SS in effluent by each plant.

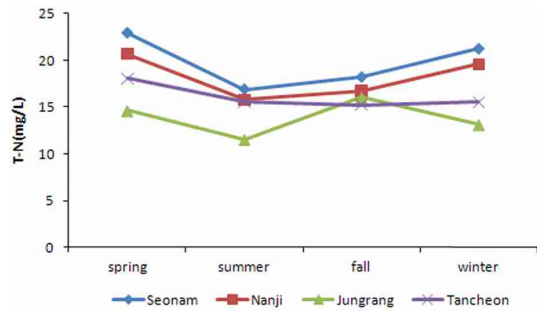


Fig. 8. Seasonal variation of T-N in effluent by each plant.

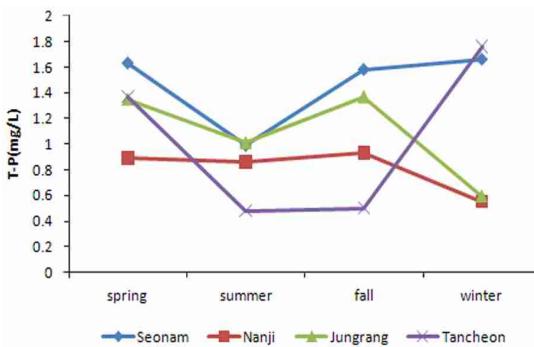


Fig. 9. Seasonal variation of T-P in effluent by each plant.

유기물질 및 영양염류의 제거를 위한 고도처리시설의 조속한 확충과 처리장의 효율적인 운영관리를 통한 방류수질의 개선이 필요하다.

3. 고도처리도입유무에 따른 수질 비교

처리공법에 따른 방류수 수질 차이를 알아보기 위하여 활성슬러지처리를 하는 시설과 고도처리를 하는 시설로 구분하여 비교한 결과를 표 3에 나타내었다. 유기물 지표인 COD와 BO의 평균농도를 비교해 보면, 활성슬러지 처리시설의 경우 9.4 mg/L, 5.5 mg/L, 고도처리시설의 경우 6.6 mg/L, 2.4 mg/L로 고도처리시설의 농도가 낮은 것을 알 수 있다. 그러나 SS의 평균농도는 고도처리시설이 활성슬러지처리시설보다 1 mg/L 높게 나타났다. 영양염류인 질소와 인의 방류수 평균농도를 비교해 보면, T-N의 경우 활성슬러지처리시설이 17.4 mg/L, 고도처리시설이 10.8 mg/L로 고도처리시설에서 T-N의 농도가 월등히 낮은 것을 알 수 있다. T-P의 경우 활성슬러지처리시설이

Table 3. Comparison of effluent water quality in Activated sludge process and A²/O process

	Activated sludge process				A ² /O process			
	Mean	Std.	Max.	Min.	Mean	Std.	Max.	Min.
COD	9.4	1.8	14.2	6.5	6.6	1.8	8.8	4.2
BOD	5.5	4.2	19.2	0.4	2.4	1.9	6.4	0.8
SS	3.9	1.1	6.5	1.6	4.9	1.8	9.0	3.3
T-N	17.4	4.4	28.2	8.6	10.8	4.7	21.5	5.9
T-P	1.0	0.8	3.9	0.1	1.1	0.7	2.3	0.3
NH ₃ -N	11.3	6.8	25.0	0.0	2.4	2.2	5.8	0.3
NO ₃ -N	4.0	3.3	11.7	0.1	6.5	2.2	10.6	0.3
PO ₄ -P	1.0	1.1	7.7	0.0	0.8	0.5	1.8	0.3

1.0 mg/L, 고도처리시설이 1.1 mg/L로 두 처리시설 사이의 차이가 없었다. NH₃-N의 평균농도는 활성슬러지처리시설이 고도처리시설보다 월등히 높게 나타났고, NO₃-N의 평균농도는 고도처리시설이 높은 것으로 나타났다. 이는 고도처리(A²/O 공법) 질소제거 메커니즘이 암모니아성 질소가 호기조에서 질산화된 후 무산소조로 반송되어 탈질 반응을 거쳐 제거되는 것으로 암모니아성 질소 농도가 감소되고 질산성 질소의 농도가 증가하기 때문인 것으로 판단한다.

4. 처리 안정도 평가

방류수 자료가 정규 확률분포를 따른다는 전제 하에 안정도(stability)란 처리시스템에서 처리 성능의 일관성을 파악하는데 사용되는 인자로서 누적확률 그래프에서 보통 P₁₀과 P₈₀의 비를 말하며 이것을 안정도 계수라고 한다(9~11).

처리수의 수질이 평균치와 많이 떨어져 있어 하수처리장 운전성능을 평가할 때 기준이 되는 누적확률 10%에 해당하는 수질 값과 누적확률 80%에 해당하는 수질 값을 구하여 누적 확률비(P₈₀/P₁₀)를 분석하였다(12). 누적확률 10% 및 80%에 해당하는 수질 값을 자료가 정규분포를 따르고 있다고 가정하였으므로 정규분포 누적확률식인 다음과 같은 식 (1)에 의해 구할 수 있다.

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2}} \int^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (1)$$

식 (1)에서 F(x)가 0.1이 될 때의 X값을 구하면 누적확률 10%에 해당하는 수질 값이 된다. 그러나 식 (1)은 해석적인 적분이 불가능하므로 표준정규분포의 누적 확률표를 이용하여 누적확률이 0.1이 되는 Z₁₀ 값을 구하여 식 (2)를 이용하여 누적확률 10%(P₁₀)에 해당하는 수질 값을 얻을 수 있다(14).

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

여기서 μ 와 σ 는 자료의 평균과 표준편차이다. 이와 같이 구한 4개 하수처리장 처리수의 각 수질 항목 당 누적확률 10% 및 80%에 해당하는 수질 값과 이들의 비(P₈₀/P₁₀)를 표 4에 나타내었다.

일반적으로 누적확률에 대한 (P₈₀/P₁₀)비가 2~3 이내이면 자료는 평균치 주위로 크게 벗어나지 않는 양호한 상태를 나타내고, 이는 곧 처리시설의 성능이 안정적임을 의미하며 3보다 크게 되면 평균치 주위로 큰 분산을 보여주어 불안정한 처리가 이루어지는 상황이라고 볼 수가 있다(13).

표 4를 보면 4개 물재생센터의 COD 안정도계수는 각각 1.38~1.83로 모두 안정된 처리를 보여 주었고, BOD의 안정도계수가 3.21인 서남 물재생센터를 제외한 나머지 3곳은 1.63~2.57로 안

Table 4. Ratio between 80% and 10% values from the cumulative distribution

Plant	Parameters	COD	BOD	SS	T-N	T-P
Seonam	P ₁₀	8.051	2.562	2.555	14.238	0.495
	P ₈₀	11.122	8.248	4.608	22.739	1.839
	P ₈₀ /P ₁₀	1.381	3.219	1.803	1.597	3.716
Nanji	P ₁₀	6.655	5.000	2.734	12.892	0.115
	P ₈₀	11.270	8.537	5.318	21.012	1.505
	P ₈₀ /P ₁₀	1.693	1.707	1.944	1.629	13.087
Jungrang	P ₁₀	4.981	2.96	2.703	7.795	0.219
	P ₈₀	9.143	7.602	5.638	17.293	1.803
	P ₈₀ /P ₁₀	1.835	2.568	2.085	2.218	8.224
Tancheon	P ₁₀	7.184	5.289	2.158	8.704	0.371
	P ₈₀	10.560	8.629	4.702	20.254	1.482
	P ₈₀ /P ₁₀	1.469	1.631	2.178	2.326	3.996

정된 처리를 하고 있는 것으로 나타났다. SS와 T-N의 경우 4개 물재생센터 모두 2~3 이내로 나와 매우 안정된 처리를 보였다. 그러나 TP의 경우 안정도계수가 모두 3 이상으로 불안정한 처리가 이루어지고 있는 것으로 나타났다.

결론

본 연구에서는 서울시내 위치한 4개 물재생센터 대상으로 2010년 1월~2010년 12월까지 방류수 수질을 조사하여 계절별 변화 추이와 고도처리 도입 유무에 따른 수질을 비교하고 처리 안정도를 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 서남물재생센터를 대상으로 유입수질과 방류수질을 비교한 결과 COD, BOD, SS, T-N, T-P의 각 항목별 유입농도는 봄과 겨울의 갈수기에 증가하였다가 강우가 집중되는 여름철에는 희석효과에 의해 낮아지는 경향을 보였다. 방류수의 수질은 유입수질의 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며, 유입수와 마찬가지로

로 대체적으로 여름철에 낮아지고 겨울에서 봄까지는 높아지는 경향을 보였다. 방류수 평균농도는 BOD 6.4 mg/L, COD 6.4 mg/L, SS 3.9 mg/L, T-N 19.8 mg/L, T-P 1.5 mg/L로 수질기준치를 모두 만족하는 것으로 나타났다.

2. COD, BOD, SS, T-N, T-P의 계절적인 변화 추이를 조사한 결과 COD, BOD, SS, T-N의 경우 4개 물재생센터 모두 동고하저의 농도패턴을 보이며 유사한 계절변동을 나타내었으나 T-P는 4개 조사지점별로 다른 경향을 나타내었고 계절별 농도 변동폭도 큰 것으로 나타났다.
3. 고도처리도입 유무에 따른 수질을 비교한 결과 유기물과 영양염류 제거 면에 있어 모두 고도처리시설의 방류수질이 뛰어난 것으로 나타났다. 그러나 T-P의 경우 두 처리시설간의 차이가 없는 것으로 나타났다.
4. 4개 물재생센터 방류수의 각 수질 항목 당 누적확률 10% 및 80%에 해당하는 수질 값과 이들의 비(P₈₀/P₁₀)를 구하여 각 하수처리장

의 처리안정도를 분석한 결과 COD, BOD, SS, 그리고 T-N 의 경우 안정도계수가 모두 2~3 이내로 매우 안정된 처리를 보이는 것으로 나타났고, T-P의 경우 4개 시설 모두 안정도계수가 3이상으로 불안정한 처리가 이루어지는 것으로 나타났다.

하수처리장의 지속적인 시설과 공정개선 노력으로 2008년 1월부터 강화된 방류수 수질 기준치를 만족하는데 고도처리방법이 적용되고 있는 시설은 물론 고도처리공법이 적용되고 있지 않는 기존 하수처리장의 경우도 크게 문제는 없었으나 2012년부터 하수처리장의 겨울철 T-N, T-P의 방류수수질기준이 대폭 강화됨으로써 강화된 배출허용기준치를 만족시키기 위한 적절한 방안이 요구된다.

참고문헌

1. 환경부, 수질환경보전법 제32조 제2항, 1995.
2. 환경부, 하수도법 시행규칙 제6조 제1항, 2001.
3. 환경부, 하수도법 시행규칙 제3조 제1항, 2010.
4. 환경부, 수질오염 공정 시험기준, 2008.
5. APHA, AWWA and WEF : Standard Methods for Examinations of Water and Wastewater, 18th edition, Washington D.C., USA, 1993.
6. 김영철, 안익성, 강민기 : 우리나라 하수처리장 방류수 수질현황 및 특성, 한국물환경학회지, 21(2):158~168, 2005.
7. 강민기, 안익성, 김영철 : 하수처리장 방류수 재이용 잠재성 평가와 향상방안, 대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집, p898~902, 2005.
8. 김영철, 이재수, 안익성 : 하수처리장 운전관리를 위한 방류수 샘플링 빈도 결정에 관한 연구, 대한환경공학회지, 26:102~110, 2004.
9. 이두진, 선상운 : 신뢰성에 기초한 하수처리장 운전효율 평가. 대한환경공학회지, 29(3):348~356, 2007.
10. 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.
11. Crities R and Tchobanoglous G : Small and Decentralized Wastewater Management Systems, McGraw-Hill, p429~435, 1997.
12. Franz A, Nowak O and Kroiss H : Modeling WWTP-treatment efficiency and relationship to receiving water quality. Water Sci. Technology, 33:47~55, 1996.
13. Hogg RV and Craig AT : Introduction to Mathematical Statistics, Macmillan Publishing Company, p438~440, 1978.