

하·폐수처리시설 방류수내 유기물질 및 NOD 분포 특성

김호섭^{1,*} · 김석규²

¹KE컨설팅 · ²국립환경과학원

Distribution of Organic Matter and Nitrogenous Oxygen Demand in Effluent of Sewage and Wastewater Treatment Plants

Ho-Sub Kim^{1,*} · Seok-Gyu Kim²

¹Korea Environmental Consulting, ²National Institute of Environmental Research

(Received 27 November 2020, Revised 27 January 2021, Accepted 28 January 2021)

Abstract

In this study, an analysis of the characteristics of organic matter and nitrogenous oxygen demand (NOD) of 17 sewage effluent and wastewater treatments was conducted. High COD_{Mn} and carbonaceous biological oxygen demand (CBOD) concentrations were observed in the livestock treatment plants (LTP), wastewater treatment plants(WTP), and night soil treatment plants (NTP), but the highest NOD concentration and contribution rates of NOD to BOD₅ were found in sewage treatment plants (STP). There was no significant difference in the CBOD/COD_{Mn} ratio for each of the six pollution source groups, but the LTPs, WTPs, and NTPs all showed relatively high COD_{Mn} concentrations in their effluent samples, indicating that they are facilities which discharge large amounts of refractory organic matter. The seasonal change of NOD in all facilities' effluent was found to be larger than the seasonal change of CBOD, and data results also revealed an elevation of NOD and NH₃-N concentration from December to February, when the water temperature was low. There was no significant difference in NH₃-N concentration in relation to pollution source group ($p=0.08$, one-way ANOVA), but the STP, which had a high NOD contribution rate to BOD₅ of 48%, showed a high correlation between BOD₅ and NOD ($r^2=0.95$, $p<0.0001$). These results suggest that the effect of NOD on BOD₅ is an important factor to be considered when analyzing STP effluent.

Key words : Ammonia nitrogen, BOD₅, CBOD/COD_{Mn}, Nitrogenous oxygen demand, Organic matter

¹ Corresponding author, 이사(Director), kimhosub1022@naver.com, https://orcid.org/0000-0001-7512-8170

² 전문연구원(Researcher), ksg8493@korea.kr, https://orcid.org/0000-0001-6751-1516

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.

1. Introduction

유기물은 하천이나 호소 및 처리시설의 수질관리를 위한 핵심적인 관리 지표중의 하나로 존재형태에 따라 용존성과 입자성유기물로 구분하며 생물학적 분해가능 여부에 따라 생분해성 유기물과 난분해성 유기물로 구분할 수 있다(Jang et al., 2008; Kim et al., 2017; Kim, Shin et al., 2007; Lee et al., 2010; Seo et al., 2010). COD와 TOC는 총 유기물량을 나타내는 지표항목으로 사용되고 있으며, 생물학적으로 분해 가능한 유기물량은 미생물에 의한 분해실험이 장시간 소요되기 때문에 탄소BOD (carbonaceous oxygen demand, CBOD)로 인식되고 있는 BOD농도로 추정하고 있다. 그러나 BOD농도는 수체 내 유기물 농도 뿐 만 아니라 NH₃-N 농도가 높을 경우 질산화에 의한 산소소모(nitrogenous oxygen demand, NOD)에 영향을 받을 수 있어 생물학적 분해 가능한 유기물에 대한 지표로서의 한계점이 있다.

질산화로 인한 산소소모를 야기하는 질산화 박테리아(Nitrifying bacteria)는 성장속도가 느려 배양하는 5일 동안 BOD에 미치는 영향이 적으나, 생물학적 처리에 의존하는 처리수가 유입되거나 수체 내 충분한 질산화세균이 분포하는 경우 5일 동안 질산화 세균에 의한 산소소모가 BOD에 상당부분 영향을 줄 수 있다(Jang et al., 2007; Khorsandi et al., 2014; Min et al., 2011; Nam et al., 2017; Yang et al., 2015). 배출원에 대한 수질기준이 강화되면서 고도처리시설 설치 확대로 방류수 수질이 전반적으로 개선됨에도 불구하고 처리시설 공정 운영 조건이나 공정 특성에 따라 질소에 의한 산소소모(Nitrogenous oxygen demand, NOD)가 발생할 수 있는 것으로 보고되고 있다(Han et al., 2015; Jang et al., 2007; Jeong et al., 2009; Kang, 2009; Khorsandi et al., 2014; Kil and Kang, 2016; Min et al., 2011). 미국 Standard method에서는 BOD 측정 시 질산화균 억제제를 통해 질소에 의한 산소소비량을 배제하도록 하고 있으나 국내에서는 질산화억제제를 투입하지 않고 측정된 BOD를 법적기준 농도로 사용하고 있어, NOD의 영향으로 BOD 방류수 기준을 초과하는 경우 부과금 등의 행정 처분 뿐만 아니라 불필요한 시설개선 등에 따른 경제적 손실을 야기할 수 있다(Yang et al., 2015). 또한 배출원에 대한 의존도가 높은 하천에서는 방류수를 통해 유입되는 NH₃-N로 인해 NOD가 발생하는 경우 유역 내 BOD배출량 관리에도 불구하고 하천 BOD 수질개선은 기대치에 미치지 못할 수 있다(Han et al., 2015; Nam et al., 2017).

따라서 배출원에서 NOD 발생특성을 파악하는 것은 BOD 수질기준을 초과하지 않도록 운영하기 위한 기초자료로서의 중요성과 더불어 하천 유량 및 수질에 대한 배출원 의존도가 높은 하천을 중심으로 유역 내 오염물질의 배출량 감소가 하천 수질에 반영되지 못하는 원인을 규명하는데 도움이 될 수 있다(Han et al., 2015; Nam et al., 2017). 배출원에서의 NOD 배출특성과 관련하여 국내에서 선행된 대부분의 연구

들은 공공하수처리시설을 대상으로 수행되었으나(Han et al., 2015; Jang et al., 2007; Kang, 2009; Kil and Kang, 2016; Min et al., 2011), 산업 및 축산폐수 등 발생성상이 상이한 시설을 대상으로 수행된 연구는 거의 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 하수, 폐수 및 분뇨 등 발생 성상이 다양한 처리시설을 대상으로 방류수 내 유기물 및 NOD 배출특성을 비교하였다. 또한 처리시설별 계절에 따른 NOD변화와 수온 및 NH₃-N농도와의 관계를 분석을 통해 NOD 발생특성을 파악하였다.

2. Material and Methods

2.1 조사 대상 시설

본 연구는 17개 하수 및 폐수를 처리하는 시설을 대상으로 하였으며, 물환경보전법, 하수도법 및 가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률 등 관련법에서 규정한 분류체계에 따라 공공하수처리시설(sewage treatment plant, STP), 폐수공공처리시설(wastewater treatment plant, WTP), 분뇨처리시설(night soil treatment plant, NTP), 가축분뇨공공처리시설(livestock treatment plant, LTP), 폐수개별배출시설(industrial wastewater individual treatment plant, IITP) 및 개인오수처리시설(individual sewage treatment plant, ISTP)로 구분하였다. 공공하수처리시설은 7개 시설을 대상으로 하였으며 그 외 배출원 그룹은 2개 시설 씩 총 17개 시설을 조사하였다.

공공하수처리시설, 폐수공공처리시설 및 폐수개별처리시설은 2017년 전국오염원 조사자료를 토대로 방류유량이 2,000 m³/day 이상인 시설 중 방류수 TN농도가 4 mg/L 이상인 시설을 대상으로 하였다. 폐수공공처리시설은 발생폐수의 대부분이 염색폐수이며 폐수개별처리시설 발생폐수는 반도체(II1)와 주류(II2) 생산과정에서 발생하는 폐수이다. 가축분뇨공공처리시설 및 분뇨처리시설은 공공하수처리시설로 연계 처리되지 않고 하천으로 직접 방류하는 시설을 대상으로 하였으며 개인오수처리시설은 시설용량이 1,000 m³/day 이상인 시설을 대상으로 하였다.

2.2 조사 시기 및 내용

2019년 10월~2020년 6월까지 1월을 제외하고 월1회 간격으로 총 8회 조사하였다. 수온은 현장에서 측정하였고, COD_{Mn}, BOD₅, NOD, TN, NH₃-N, NO₂-N 및 NO₃-N 농도는 수질오염공정시험기준(NIER, 2018)에 따라 분석하였다. NOD는 질산화 억제제(ATU)를 첨가하지 않고 측정된 BOD₅ 농도와 식종액 및 질산화 억제제를 첨가한 후 측정된 탄소BOD(carbonaceous oxygen demand, CBOD) 농도의 차이로 계산하였다(NIER, 2018). 용존무기질소(dissolved inorganic nitrogen, DIN)농도는 NH₃-N, NO₂-N 및 NO₃-N농도의 합으로 산정 하였고 유기질소농도(organic nitrogen, Org.-N)농도는 일반적으로 입자성 무기형태질소는 거의 존재하지 않으므로 T-N과 DIN 농도 차이로 산정하였다.

Table 1. Operating statuses of the sewage and wastewater treatment plants investigated in this study

Source	Symbol	Capacity (m ³ /day)	Discharge (m ³ /day)	Concentration in the effluent (mg/L)			Process type (E.coil deactivation)	Receiving stream
				BOD ₅	COD _{Mn}	T-N		
STP	S1	43,000	40,814	1.2±0.4	7.1±0.9	8.9±1.2	DeNiPho+URC (UV)	Bokhacheon
	S2	2,000	3,033	2.3±0.5	4.9±1.2	6.2±2.1	KIDEA, HS-PRS (UV)	Bokhacheon
	S3	900,000	644,568	1.8±0.7	5.9±0.9	11.5±1.6	DeNiPho, BNR (UV, Not operation)	Gulpocheon
	S4	250,000	161,924	1.2±0.4	8.2±1.8	10.6±2.6	CSBR (UV)	Anyangcheon
	S5	110,000	103,979	2.9±1.8	7.2±1.1	10.4±2.4	MLE, CNR (UV)	Wangsukcheon
	S6	50,000	35,529	1.4±0.8	6.3±0.6	7.2±2.4	MLE, I3 (Ozone)	Wangsukcheon
	S7	26,000	17,922	1.3±0.7	8.0±1.3	6.3±1.5	BSTS-II (NaClO ₂)	Byeongseongcheon
WTP	W1	14,000	9,847.5	5.6±1.1	18.9±4.0	9.5±3.8	SBR (-)	Youngpyeongcheon
	W2	19,000	10,905.2	5.6±2.6	26.6±5.0	6.2±2.9	A ₂ O (have no facilities)	Shincheon
NTP	N1	90	91.8	4.0±2.1	18.5±5.7	18.7±7.6	Bio-coal purge (have no facilities)	Youngpyeongcheon
	N2	90	79.6	6.8±1.8	16.5±2.5	13.4±3.0	Sand filter (have no facilities)	Namhangang
LTP	L1	200	250.9	2.9±2.5	25.8±9.8	21.9±11.5	- (Ozone+active carbon)	Jangcheon
	L2	100	87.5	10.7±4.0	33.6±5.4	35.2±5.8	BCS+DOF+BAF (UV)	Youngpyeongcheon
IITP	II1	-	75,772	1.9±0.2	2.8±1.1	19.9±2.2	- (have no facilities)	Bokhacheon
	II2	-	2,572	1.5±0.9	11.5±3.5	4.1±5.1	- (have no facilities)	Bokhacheon
ISTP	I1	1,400	-	-	-	-	- (have no facilities)	Bokhacheon
	I2	1,100	-	-	-	-	- (have no facilities)	Bokhacheon

- : No information

STP : sewage treatment plant, WTP : wastewater treatment plant, NTP night soil treatment plant, LTP livestock treatment plant, IITP : industrial wastewater individual treatment plant, IITP, ISTP : individual sewage treatment plant

2.3 통계분석

배출원 그룹별 농도 및 존재형태별 비교는 one-way ANOVA (SPSS, ver. 14.0)를 이용하였고 통계적인 유의수준은 $p \leq 0.05$ 를 기준으로, $p > 0.05$ 인 경우 유의적인 차이가 없는 것으로 판단하였다. 배출원 그룹별 NOD와 CBOD의 계절에 따른 변동성은 평균값에 대한 표준편차의 비(Coefficient of variation, CV)를 통해 비교하였다. NOD와 수온, 유기물 지표항목 및 질소의 존재형태별 농도와 상관분석은 주요인 분석(PCA)을 이용하였고 수질항목별 통계적 유의성은 회귀 분석을 이용하였으며(SPSS, ver.14.0) 통계적 유의수준은 $p \leq 0.05$ 인 경우 유의성이 높은 것으로 판단하였다.

3. Results and discussion

3.1 유기물 배출 특성

3.1.1 배출원 그룹별 방류수내 유기물 농도

배출원 그룹별 방류수내 COD_{Mn}농도는 BOD₅와 비교해 큰 차이를 보였다. 공공하수처리시설 중 일부시설(S1, S2, S7)을 제외하고 COD_{Mn} 방류수수질 기준이 40 ~ 50 mg/L으로 유사함에도 가축분뇨공공처리시설, 폐수공공처리시설 및 분뇨처리시설에 비해 공공하수처리시설과 산업개별배출시설에서 COD_{Mn}는 낮았다. 가축분뇨공공처리시설 COD_{Mn}농도는 평균 29.0±9.5 mg/L로 배출원 그룹 중 가장 낮았고($p < 0.05$, one-way

ANOVA), 폐수공공처리시설(22.1±6.5 mg/L)과 분뇨 처리시설(18.1±6.7 mg/L)에서도 비교적 높은 농도를 보였다(Table 1, Fig. 1). 개인오수처리시설 COD_{Mn}농도는 평균 4.6±1.1 mg/L로 가축분뇨공공처리시설 COD_{Mn}농도의 약 16% 수준으로 배출원 그룹 중 가장 낮았으며 공공하수처리시설 및 산업폐수 개별처리시설 COD_{Mn}농도도 개인오수처리시설과 유사한 수준으로 조사되었다($p=0.096$, one-way ANOVA). BOD₅ 농도는 폐수공공처리시설에서 4.6±2.7 mg/L로 가장 높았고 BOD₅농도가 가장 낮은 개인오수처리시설(0.7±1.3 mg/L)과의 농도 차이는 COD_{Mn}농도 차이와 유사하였다. COD_{Mn}농도가 가장 높았던 가축분뇨공공처리시설은 BOD₅ 방류수수질기준이 30 mg/L이하로 높음에도 불구하고 BOD₅농도는 3.3±1.5 mg/L로 분뇨처리시설, 개인오수처리시설 및 공공하수처리시설과는 큰 차이가 없었다($p=0.194$, one-way ANOVA).

배출원 그룹별 방류수내 CBOD농도는 COD_{Mn}농도가 높았던 배출원 그룹에서 높았던 반면 NOD농도는 공공하수처리시설에서 가장 높았다. 폐수공공처리시설에서 CBOD농도는 4.4±2.5 mg/L로 배출원 그룹 중 가장 높았고 BOD₅의 평균 95%이상 CBOD로 존재하는 것으로 조사되었다. 반면 COD_{Mn}농도가 가장 높았던 가축분뇨공공처리시설 CBOD농

도는 3.3±1.5 mg/L로 분뇨처리시설과 유사하였다($p=0.74$, one way ANOVA). 공공하수처리시설 그룹에서의 CBOD농도는 1.1±0.6 mg/L로 개별처리시설 그룹들과 유사한 수준이었으나 NOD 평균 농도(1.4±1.6 mg/L)와 BOD에 대한 NOD 기여율(평균 48%)은 배출원 그룹 중 가장 높았다. 공공하수처리시설을 제외한 배출원 그룹에서의 NOD농도는 유사하였고($p=0.091$, one way ANOVA), BOD₅에 대한 NOD기여율은 COD_{Mn}농도가 높았던 폐수공공처리시설과 가축분뇨공공처리시설에서 평균 5%이하로 가장 낮았다.

3.1.2 배출원 그룹별 방류수내 유기물 분포 특성

방류수내 BOD₅/COD_{Mn}비는 COD_{Mn}농도와 BOD₅농도가 유사했던 공공하수처리시설과 폐수개별처리시설이 각각 0.33±0.22, 0.30±0.21로 가장 높았고, COD_{Mn}농도가 높았던 배출원 그룹(폐수공공처리시설, 분뇨처리시설 및 가축분뇨공공처리시설)과는 유의적인 차이가 있었다($p<0.05$, one-way ANOVA). 유기물 지표 간 비율은 유기물의 존재형태를 평가하는 간접적인 방법으로 COD_{Mn} 및 TOC에 대한 BOD₅의 기여율이 높을수록 생분해성유기물이 많이 포함되어 있음을 의미한다(Kim, Jung et al., 2007; Kim et al., 2013; Kim et al., 2017). 따라

Table 2. Concentration of organic matter and NOD in the effluent of each of the other pollution sources

Source	Symbol	COD _{Mn} (mg/L)	BOD ₅ (mg/L)	CBOD (mg/L)	NOD (mg/L)	BOD ₅ /COD _{Mn}	NOD/BOD ₅	CBOD/COD _{Mn}
STP	S1	7.4±0.5	2.0±0.7	0.8±0.2	1.2±0.5	0.27±0.09	0.61±0.05	0.10±0.02
	S2	6.0±1.8	3.1±1.8	1.0±0.5	2.1±1.5	0.51±0.23	0.65±0.15	0.16±0.04
	S3	6.6±0.9	1.3±0.3	0.8±0.3	0.6±0.3	0.20±0.04	0.42±0.17	0.11±0.03
	S4	10.9±1.1	2.5±0.9	1.2±0.2	1.3±0.9	0.23±0.07	0.48±0.18	0.11±0.02
	S5	7.0±0.6	2.9±1.8	1.3±0.3	1.6±1.6	0.41±0.26	0.42±0.26	0.19±0.04
	S6	8.6±2.5	4.9±3.4	2.0±0.8	3.0±2.9	0.55±0.25	0.50±0.25	0.23±0.05
	S7	6.2±0.6	1.0±0.4	0.7±0.2	0.3±0.3	0.16±0.06	0.27±0.20	0.11±0.03
	Avg.	7.5±2.1	2.5±2.0	1.1±0.6	1.4±1.6	0.33±0.22	0.48±0.22	0.14±0.06
WTP	W1	17.1±3.0	2.5±0.6	2.4±0.6	0.1±0.1	0.15±0.02	0.03±0.02	0.14±0.02
	W2	27.1±5.0	6.7±2.3	6.3±2.2	0.4±0.6	0.24±0.05	0.05±0.07	0.23±0.05
	Avg.	22.1±6.5	4.6±2.7	4.4±2.5	0.2±0.4	0.19±0.06	0.04±0.05	0.19±0.06
NTP	N1	17.2±9.3	1.6±1.2	1.5±1.0	0.2±0.2	0.09±0.03	0.09±0.07	0.09±0.03
	N2	19.0±2.7	3.3±1.8	3.2±1.7	0.1±0.1	0.18±0.09	0.02±0.02	0.17±0.09
	Avg.	18.1±6.7	2.7±1.7	2.3±1.7	0.1±0.1	0.14±0.08	0.05±0.06	0.14±0.06
LTP	L1	30.6±9.6	3.1±0.7	2.5±0.7	0.6±0.3	0.11±0.02	0.20±0.12	0.08±0.01
	L2	27.5±9.7	3.5±2.0	2.5±2.2	1.0±0.9	0.20±0.29	0.31±0.22	0.16±0.30
	Avg.	29.0±9.5	3.3±1.5	2.5±1.6	0.8±0.7	0.15±0.20	0.25±0.18	0.12±0.21
IITP	II 1	3.8±0.6	1.8±0.6	1.6±0.6	0.2±0.1	0.48±0.13	0.12±0.07	0.42±0.14
	II 2	11.4±2.6	1.4±0.9	1.2±0.5	0.2±0.5	0.12±0.05	0.10±0.15	0.10±0.03
	Avg.	7.6±4.3	1.6±0.7	1.4±0.6	0.2±0.3	0.30±0.21	0.11±0.11	0.26±0.19
ISTP	I1	4.6±0.8	0.6±0.3	0.4±0.1	0.1±0.2	0.13±0.08	0.15±0.18	0.10±0.04
	I2	4.7±1.4	0.9±0.3	0.7±0.3	0.2±0.2	0.20±0.04	0.18±0.16	0.16±0.03
	Avg.	4.6±1.1	0.7±0.3	0.6±0.2	0.1±0.2	0.16±0.07	0.17±0.17	0.13±0.05

STP : sewage treatment plant, WTP : wastewater treatment plant, NTP night soil treatment plant, LTP livestock treatment plant, IITP : industrial wastewater individual treatment plant, IITP, ISTP : individual sewage treatment plant

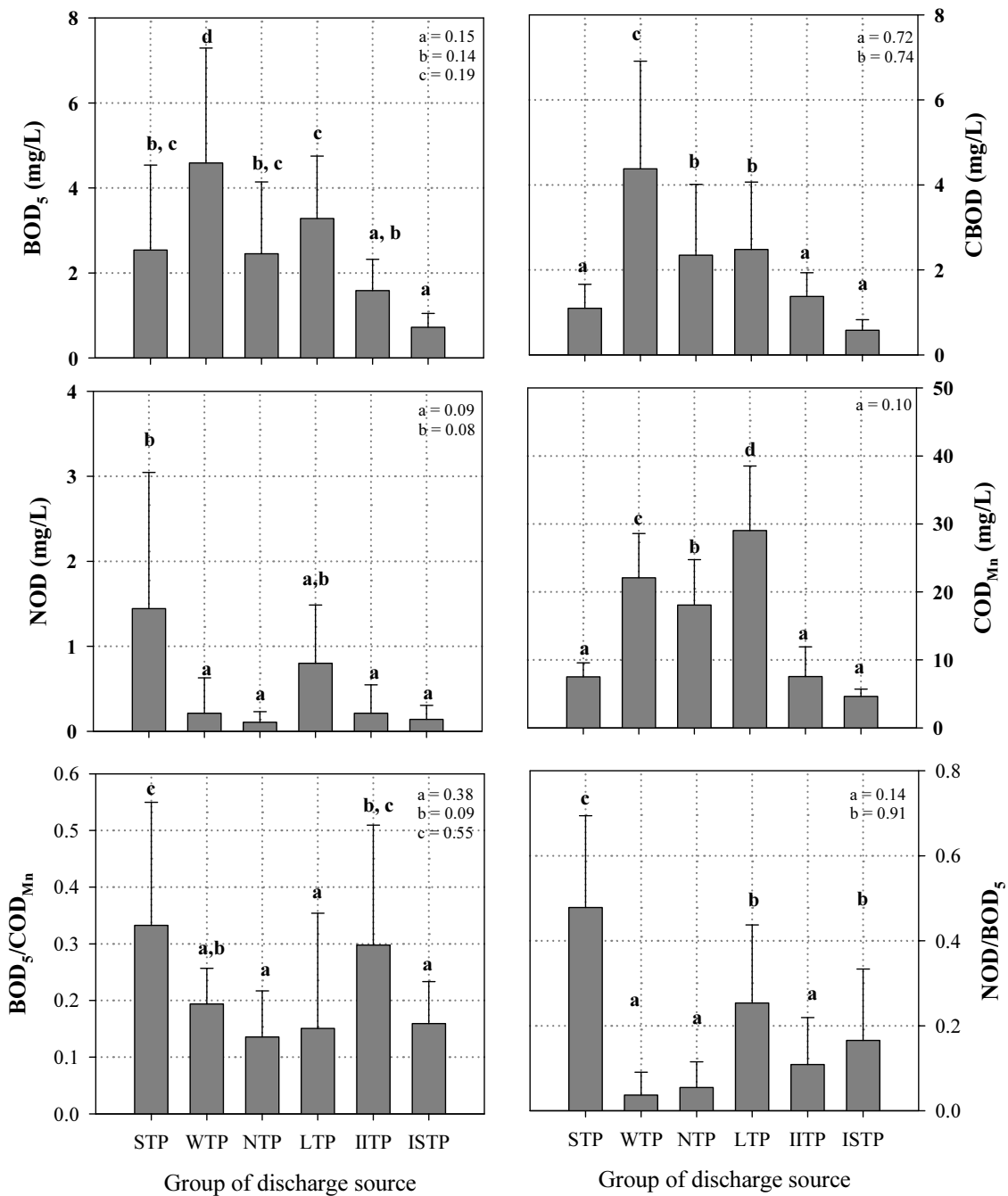


Fig. 1. Comparison of organic matter and NOD concentration in the effluent of each of the other pollution sources.

서 공공하수처리시설과 폐수개별처리시설은 방류수 내 유기물 중 생분해성유기물 구성 비율이 높은 배출원임을 의미한다. 그러나 BOD₅/COD_{Mn}비를 이용한 유기물 존재형태별 평가방법은 BOD₅에 대한 NOD의 기여율 정도에 따라 생분해성유기물이 과대평가될 수 있다. 본 연구에서도 CBOD/COD_{Mn}비는 폐수개별처리시설에서 26%로 가장 높았으나 BOD₅/COD_{Mn}비가 가장 높았던 공공하수처리시설은 산업폐수개별배출시설 제외한 배출원 그룹과 큰 차이가 없었다($p=0.136$, one-way ANOVA).

공공하수처리시설에서 BOD₅/COD_{Mn}비와 CBOD/COD_{Mn}비의 큰 차이는 BOD₅에 대한 NOD의 높은 기여율에 기인된

것으로 이는 공공하수처리시설에서 BOD₅에 대한 NOD 영향이 중요하게 고려될 필요가 있음을 시사한다. 처리시설로 유입된 유기물은 물리적, 생물학적 및 화학적 공정기반의 처리공정을 통해 생물학적 분해 가능한 유기물은 쉽게 제거되는 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2011; Lee et al., 2010). 본 연구에서도 CBOD/COD_{Mn}비가 0.42±0.14로 가장 높았던 산업폐수개별 처리시설 1개 시설(II 1)을 제외하면 배출원 그룹별 방류수내 유기물의 존재형태는 유사하였고 BOD₅/COD_{Mn}비와도 큰 차이가 없었다. 배출원 그룹별 CBOD/COD_{Mn}비의 유사성은 발생성상과 처리공정의 차이에도 불구하고 방류수내 생분해성유기물의 존재비율이 유사하며, COD_{Mn}농도가

높은 폐수공공처리시설, 가축분뇨공공처리시설 및 분뇨처리 시설은 난분해성 유기물 배출량이 많은 배출원임을 의미한다. 그러나 동일 그룹 내 시설 간 농도 차이와 동일시설에서도 계절에 따른 농도 변화가 크게 나타난 점을 고려할 때, 배출원 그룹별 방류수내 유기물 특성을 파악하기 위해서는 조사대상 시설의 확대와 더불어 시설별 운영조건 등을 고려한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3.2 NOD 배출 특성

배출원 그룹 내 방류수내 NOD의 계절적인 변화가 CBOD와 비교해 큰 것으로 조사되었다. 17개 시설 중 1개 시설(L2)를 제외하고는 CBOD 변동계수에 비해 상대적으로 NOD 변동계수가 크게 나타났다(Fig. 2). Han et al. (2015)은 공공하수처리장 방류수 내 CBOD, TOC 농도 변화보다 질산화에 따른 NOD 영향으로 BOD₅ 농도 변화가 크게 나타나는 것으로 보고한 바 있다. BOD₅ 농도와 CBOD 및 NOD와의 관계에서 공공하수처리시설 BOD₅는 CBOD보다는($r^2=0.54, p<0.0001$) NOD 농도와 상관성이 높았고($r^2=0.95, p<0.0001$) 방류수 내 BOD₅/COD_{Mn}비도 NOD 농도와 유의적인 상관성이 있었다($r^2=0.83, p<0.0001$)(Fig. 3). 이러한 결과는 공공하

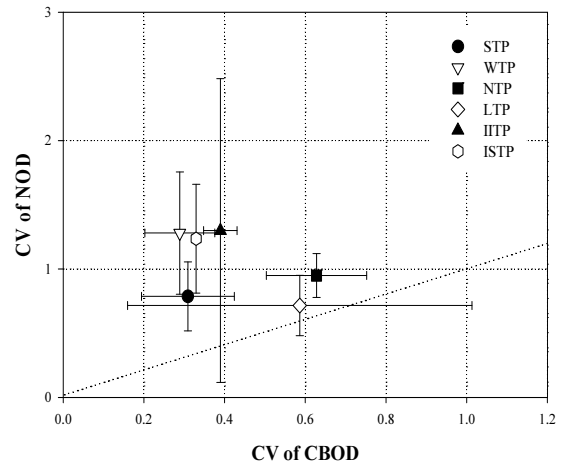


Fig. 2. Comparison of the CV value of CBOD and NOD in the effluent of each of the other pollution sources.

수처리시설에서 시기적으로 BOD₅에 대한 NOD의 영향이 크게 나타나고 있음을 의미한다. 반면, 공공하수처리시설을 제외한 배출원에서의 NOD농도는 1 mg/L이하였고, BOD₅에 대한 NOD기여율도 30%이하였으며 BOD₅가 CBOD와 통계적

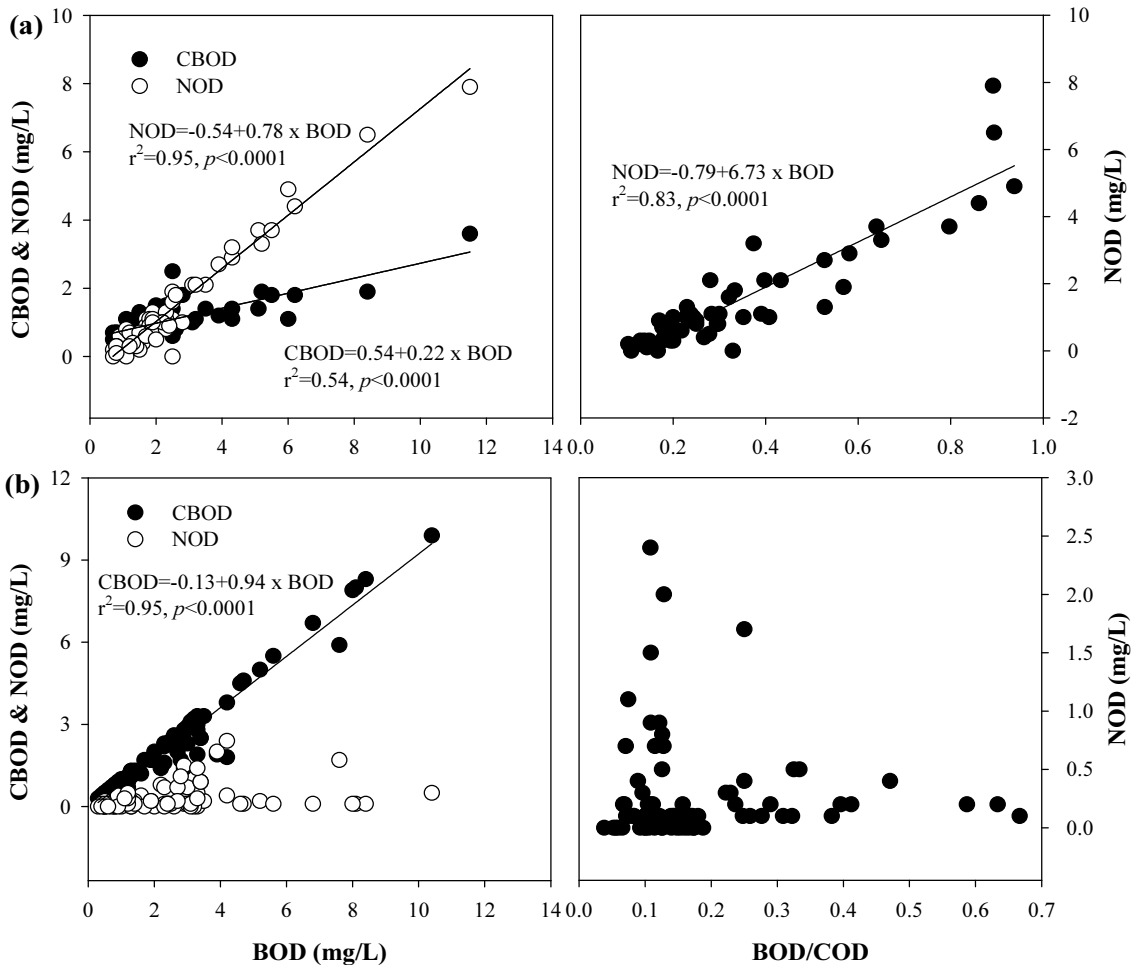


Fig. 3. The correlation between BOD and CBOD, NOD in the effluent of each of the other pollution sources. (a. STP; b. Others)

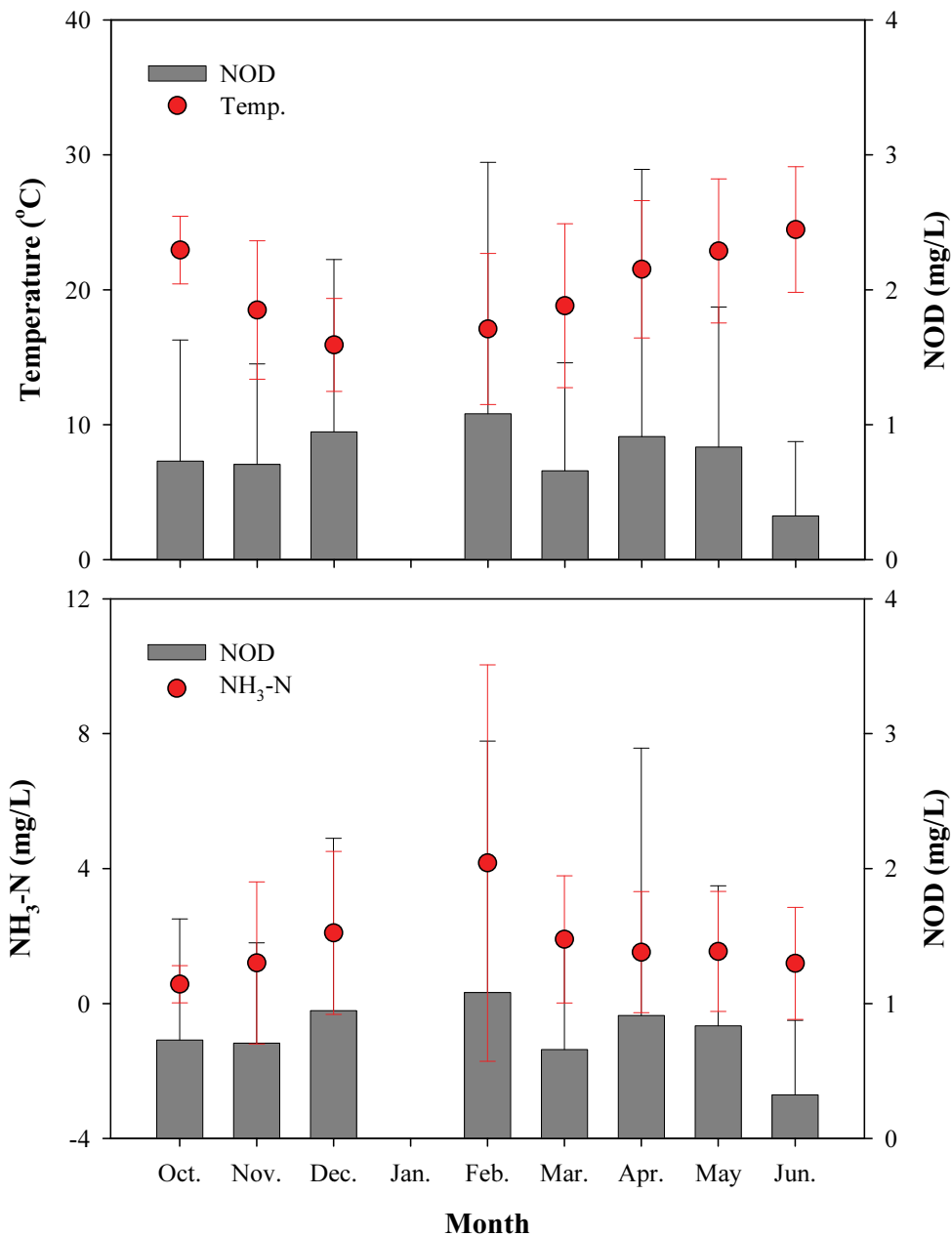


Fig. 4. Monthly variation of water temperature, NH₃-N and NOD in the effluent of pollution sources.

인 유의성을 보인 반면($r^2=0.95$, $p<0.001$), BOD₅/COD_{Mn}비와 NOD와의 상관성은 없었다.

17개 시설에서 계절에 따른 NH₃-N 및 NOD 농도 변화는 시설에 따라 차이는 있으나 수온이 가장 낮은 시기에 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4). 배출원 방류수내 수온은 동절기(12~2월)에도 평균 24.0°C로 높은 수온을 유지한 폐수공공처리시설(W1, W2)을 제외한 15개 시설의 월 평균 수온은 15.4~23.1 °C 범위였고 12월과 2월 평균수온이 15.4±3.4°C로 가장 낮았다($p=0.088$, one-way ANOVA). NH₃-N 농도는 17개 조사대상 시설 중 11개 시설에서 12월과 2월 사이에 증가하는 경향을 나타낸 반면, 3개 시설(S1, W2, I2)은 5~6월에 증가하였고 W1, N2 및 I2 시설은 계절에 따른 뚜렷한

변화가 나타나지 않았다(Fig. 5 and 6). 17개 시설에서 측정된 월 평균 NOD는 수온이 낮고, 방류수내 암모니아 농도가 평균 4.5±5.9 mg/L로 높았던 2월에 가장 높은 경향을 보였고, 2월을 제외한 시기에는 큰 차이가 없었으나($p=0.284$, one-way ANOVA) (Fig. 4) 공공하수처리시설 중 일부시설(S1, S2, S4, S6)에는 4~5월에도 NOD가 증가하는 경향을 보였다(Fig. 5). Kil and Kang (2016)과 Kang (2009)은 수온이 15°C 이하로 낮아지는 동절기 동안 질산화를 저하로 처리수내 NH₃-N 농도가 증가하고 처리수 내 BOD₅ 농도에 대한 NOD 영향이 증가하는 것으로 보고한 바 있다. 반면 Han et al.(2015)은 동절기 뿐 만 아니라 봄에도 공공하수처리장 방류수내 TN 농도에 대한 NH₃-N 농도 기여율 증가와 더불어

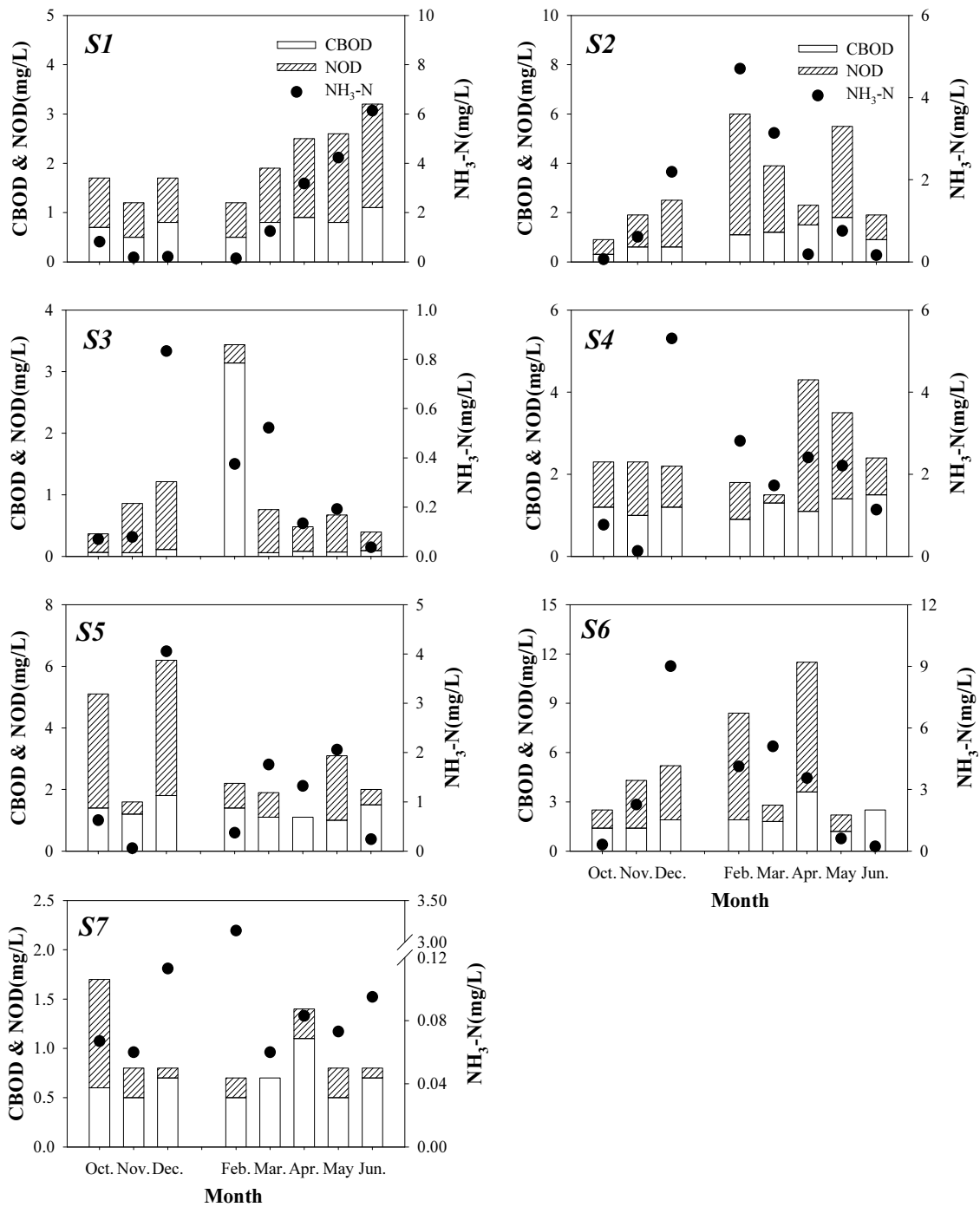


Fig. 5. Monthly variation of CBOD, NOD and NH₃-N in the effluent of sewage treatment plants.

BOD₅에 대한 NOD의 기여율이 17~53%로 증가함을 보고한 바 있다.

배출원 그룹별 NH₃-N농도는 유사하였으나, NH₃-N농도와 NOD와의 유의적인 관계는 공공하수처리시설에서만 나타났다. 조사기간 중 배출원 그룹별 TN 평균농도는 가축분뇨공공처리시설(21.5mg/L)과 개인오수처리시설(16.8 mg/L)이 다른 배출원 그룹과 비교해 높았으나($p \leq 0.05$, one-way ANOVA), NH₃-N농도는 배출원 그룹 간에 큰 차이가 없었다($p=0.08$, one-way ANOVA)(Fig. 7). 배출원 그룹 내 각 시설에서 조사된 NH₃-N농도와 NOD와의 유의적인 상관성은 공공하수처리

시설에서 나타났는데(Fig. 8), 공공하수처리시설 중 S1시설에서 NOD농도가 NH₃-N농도와 가장 유사한 계절적인 변화를 나타냈고($r^2=0.97$ $p < 0.001$), S4와 S7시설을 제외하고는 NH₃-N 농도가 증가할수록 방류수내 NOD가 증가하는 경향을 보였다(Fig. 5). 반면 공공하수처리시설을 제외한 다른 배출원 그룹 내 시설에서는 NH₃-N농도에 따른 NOD의 뚜렷한 변화는 나타나지 않았으며(Fig. 6), 공공하수처리시설과 비교해 유사한 NH₃-N농도에도 불구하고 NOD농도는 낮았다(Fig. 9).

NOD는 수체 내 NH₃-N농도 뿐 만 아니라 질산화박테리아

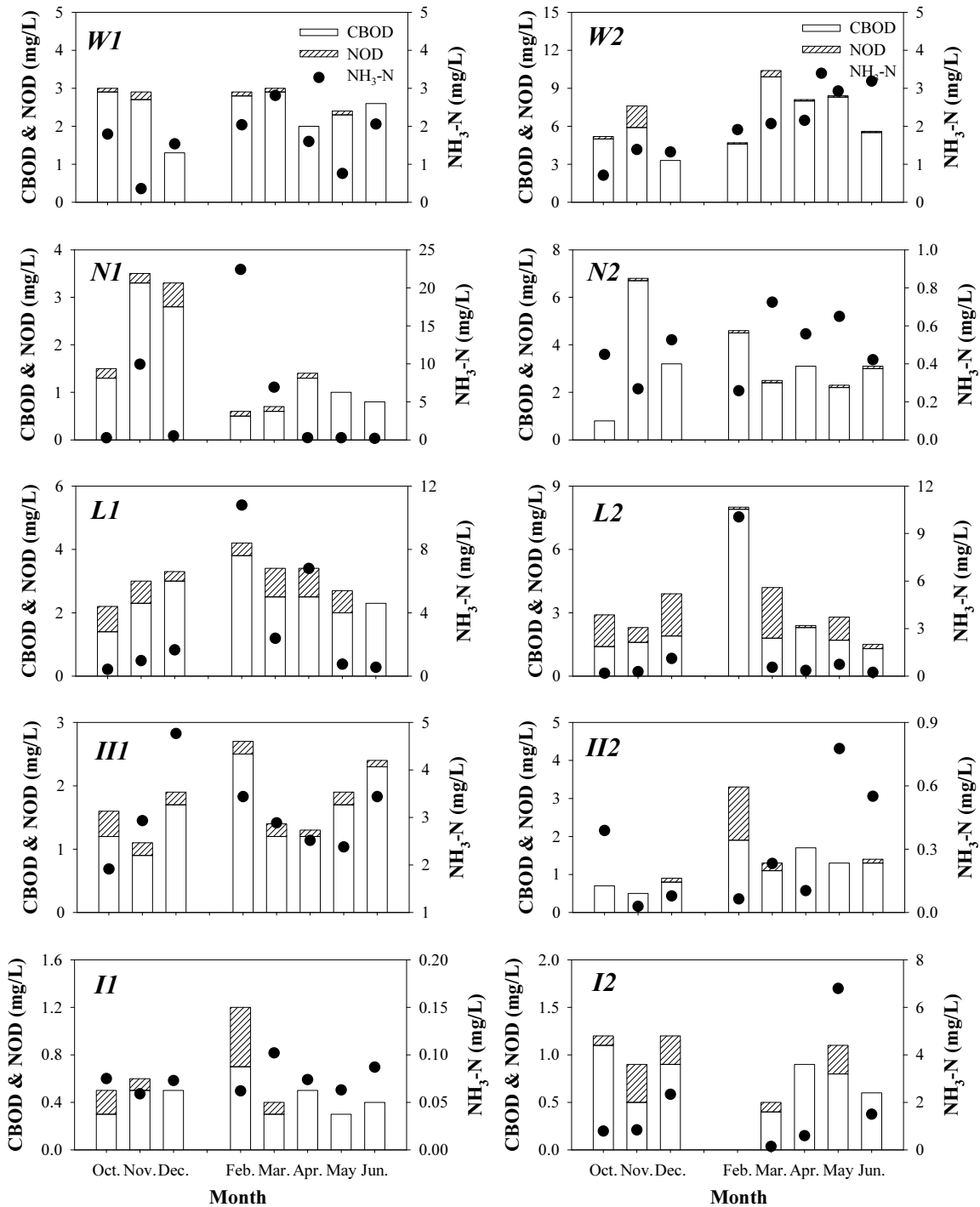


Fig. 6. Monthly variation of CBOD, NOD and NH₃-N in the effluent of others pollution sources.

생물량 그리고 활성도 등 생물학적인 조건의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Brion and Billen, 2000; Ge et al., 2015; Jeong et al., 2009; Kang, 2009). 질산화박테리아는 부유하고 있는 유기입자 표면이나 바닥 층에 서식하고 있는 것으로 알려져 있어 처리시설 공정 중 여과시설이나 중화 및 소독설비 등이 운영되고 있는 경우 질산화박테리아 생물량 감소에 원인이 되며(Brion and Billen, 2000; Polak, 2004) 수온, 산소 농도, pH 및 C/N 등 이화학적 조건도 질산화박테리아 활성도에 영향을 야기할 수 있는 것으로 알려져 있다(Ge et al.,

2015; Jeong et al., 2009; Kang, 2009). 따라서 공공하수처리 시설 일부를 제외한 다른 시설에서 NOD가 NH₃-N농도에 의존하지 않는 것은 방류수내 NOD와 관련된 생물학적 조건이 질산화에 용이하지 않았을 가능성이 있을 수 있다.

비록 본 연구에서 처리시설 별 생물학적인 조건이나 영향 요인을 명확하게 제시할 수는 없으나, 방류수에서 생물학적 조건에 의해 NOD가 발생하지 않았다 하더라도 NH₃-N농도가 높은 방류수가 유입되는 하천에서는 NOD가 발생할 수 있다(Han et al., 2015; Min et al., 2011; Nam et al., 2017).

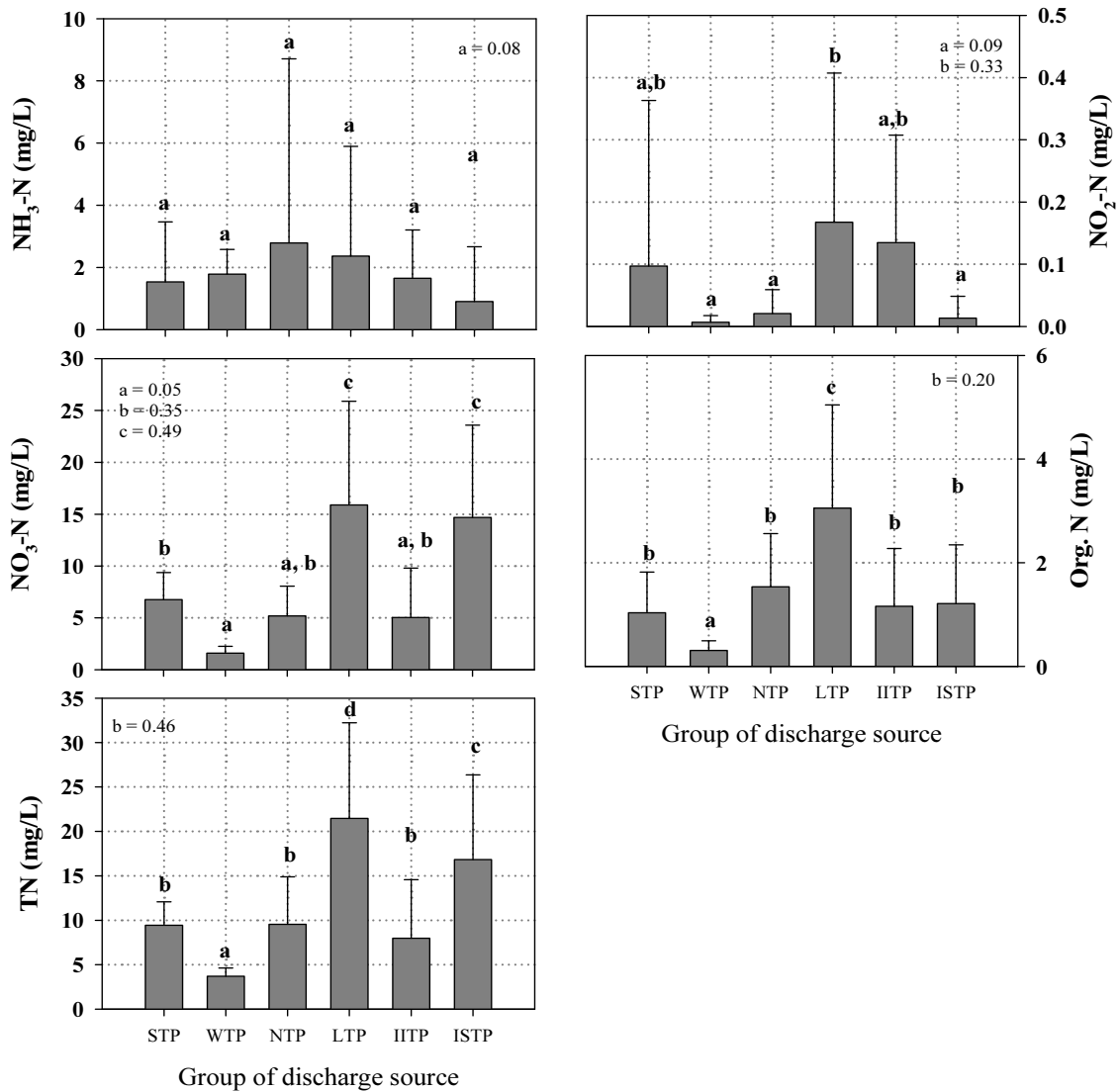


Fig. 7. Comparison of nitrogen concentration in the effluent of each of the other pollution sources.

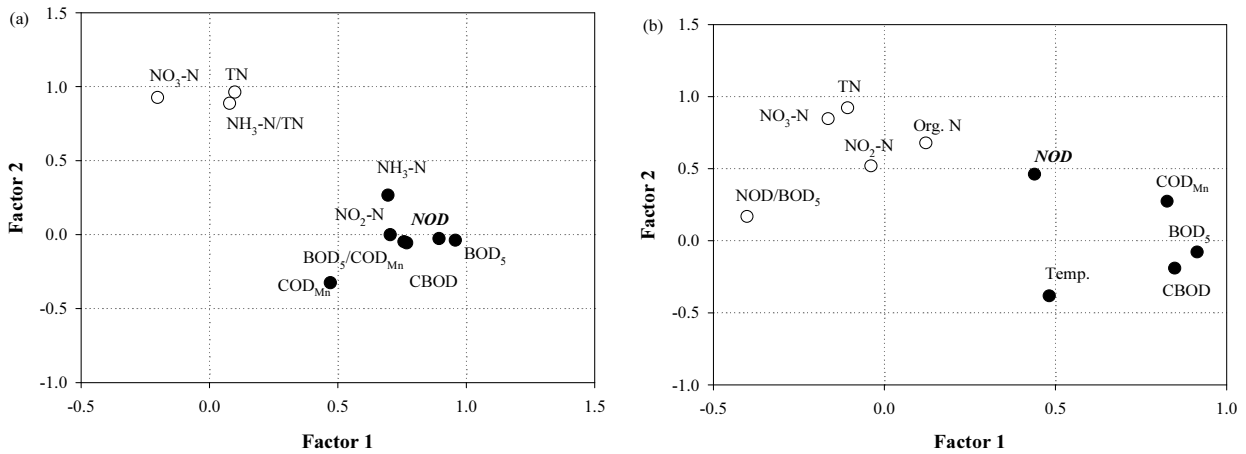


Fig. 8. The relationship between NOD and water quality parameters. (a) STP, (b) Others.

Min et al. (2011)은 하수 고도처리에 의한 질산화 과정에서 완전히 탈질이 이루어지지 않은 상태의 방류수가 유입되는 하천에서 BOD₅ 농도에 대한 NOD의 기여율이 19~26%임

을 보고한 바 있으며 Kim et al. (2018)은 한강 권역 내 지류 하천 중 BOD₅/COD_{Mn} 농도비가 1을 초과한 4개 하천에서 BOD₅에 대한 NOD 기여율이 54.5%~79.3%임을 제시한 바

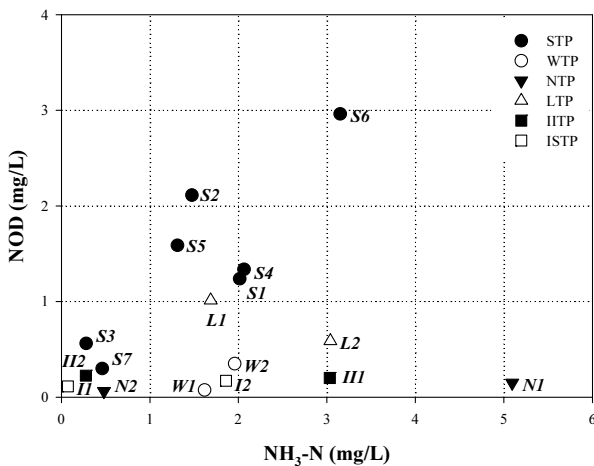


Fig. 9. Comparison of $\text{NH}_3\text{-N}$ and NOD concentration in the effluent of each of the other pollution sources.

있다. 따라서 하천 수질에 대한 배출원 영향이 크고 손상물질로 BOD_5 를 관리하는 하천에서는 수질평가나 관리대책 수립 시 산소소비물질로 생분해성유기물 뿐만 아니라 $\text{NH}_3\text{-N}$ 도 중요하게 고려할 필요가 있을 것으로 사료된다.

4. Conclusions

본 연구에서는 17개 하·폐수 배출시설을 대상 방류수내 유기물 및 NOD 분포특성을 조사하였다. COD_{Mn} 와 CBOD농도는 가축분뇨공공처리시설, 폐수공공처리시설 그리고 분뇨처리시설에서 높았으나, NOD와 BOD_5 에 대한 NOD기여율은 공공하수처리시설에서 가장 높았고, 배출원 그룹별 CBOD/ COD_{Mn} 비는 큰 차이가 없었다. COD_{Mn} 와 CBOD/ COD_{Mn} 비를 기준으로 할 때 COD_{Mn} 농도가 높은 폐수공공처리시설, 가축분뇨공공처리시설 및 분뇨처리시설은 방류수내 난분해성 유기물이 차지하는 비율이 높은 배출원임을 의미한다. 방류수내 NOD의 계절적인 변화는 CBOD와 비교해 큰 것으로 조사되었고, 시설에 따라 차이는 있으나 수온이 가장 낮은 시기에 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도와 더불어 증가하는 경향을 보였다. 배출원 그룹별 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도는 배출원 그룹 간 큰 차이가 없었으나 ($p=0.08$, one-way ANOVA) BOD_5 와 NOD와의 높은 상관성은 BOD_5 에 대한 NOD기여율이 48%로 높았던 공공하수처리시설에서만 나타났다($r^2=0.95$, $p<0.0001$). 이러한 결과는 공공하수처리시설에서는 BOD_5 에 대한 NOD 영향이 중요하게 고려될 필요가 있음을 시사한다.

Acknowledgement

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(11-1480523-004098-01).

References

- Brion, N. and Billen, G. (2000). Wastewater as a source of nitrifying bacteria in river systems: the case of the river Seine downstream from Paris, *Water Research*, 34(12), 3213-3221.
- Ge, S., Wang, S., Yang, X., Qiu, S., Li, B., and Peng Y. (2015). Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: A review, *Chemosphere*, 140, 85-98.
- Han, S. H., Kim, Y. Y., Sung, Y. G., Park, I. B., Cho, D. H., Nam, W. K., Kim, C. G., and Oh, J. K. (2015). Characteristics of organics and ammonia nitrogen discharged by pollution source from human living, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(4), 377-386. [Korean Literature]
- Jang, C. W., Kim, J. K., Kim, D. H., Kim, B., and Park, J. H. (2008). The distribution of organic carbon and its decomposition rate in the Kum river, Korea, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 24(2), 174-179. [Korean Literature]
- Jang, S. J., Lee, S. H., Park, H. S., and Park, C. K. (2007). Effects of NOD on BOD test for the effluents of biological treatment plant, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 23(2), 188-192. [Korean Literature]
- Jeong, G. T., Park, S. H., Park, J. H., Lim, E. T., Bang, S. H., and Park, D. H. (2009). Effect of factors of nitrification process in wastewater treatment, *Journal of Korean Society for Biotechnology and Bioengineering*, 24, 296-302. [Korean Literature]
- Kang, J. H. (2009). *A study on NOD ratio of effluent BOD in sewage treatment plant*, Master's Thesis, University of Seoul, Seoul. [Korean Literature]
- Khorsandi, H., Alizadeh, R., and Tosinejad, H. (2014). Analysis of nitrogenous and algal oxygen demand in effluent from a system of aerated lagoons followed by polishing pond, 2014, *Water Science and Technology*, 70(1), 95-101.
- Kil, H. K. and Kang, S. H. (2016). A study on the NBOD reduction in wastewater treatment plant using sludge reaeration during winter Season, *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 16(2), 207-213. [Korean Literature]
- Kim, B., Jung, S., Jang, C., and Kim, J. K. (2007). Comparison of BOD, COD and TOC as the indicator of organic matter pollution in streams and reservoirs of Korea, *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, 29(6), 640-643. [Korean Literature]
- Kim, H. S., Hong, J. J., Seong, J. U., Choi, K. S., and Park, J. C. (2013). Comparison of organic matter distribution in major tributaries of the Nakdong river, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 29(5), 618-624. [Korean Literature]
- Kim, H. S., Kim, S. Y., Park, J., and Han, M. (2017). The Fractionation characteristics of organic matter in pollution sources and river, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 33(5), 580-586. [Korean Literature]

- Kim, H. S., Park, Y. H., Kim, Y. S., and Kim, S. Y. (2018). The distribution characteristics of organic matters in the contaminated tributaries of Han river region, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 34(5), 494-502. [Korean Literature]
- Kim, J. K., Shin, M., Jang, C., Jung, S., and Kim, B. (2007). Comparison of TOC and DOC distribution and the oxidation efficiency of BOD and COD in several reservoirs and rivers in the Han river system, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 23(1), 72-80. [Korean Literature]
- Lee, B., Lee, T. H., and Hur, J. (2011). Development of estimation indices for refractory organic matter in the Han-river basin using organic matter parameters and spectroscopic characteristics, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 27(5), 625-633. [Korean Literature]
- Lee, T. H., Lee, B., Hur, J., Jung, M. S., and Kang, T. G. (2010). Conversion of COD_{Mn} into TOC and refractory organic matter concentrations for treated sewage using regression equations, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 26(6), 969-975. [Korean Literature]
- Min, K., Jeong, W., Lee, D., Seo, G., Kim, S., Poik, K., and Mun, Y. (2011). Contribution of NOD to total BOD_5 of effluent from biological sewage treatment plant, *Journal of Korean Society for Environment Analysis*, 14(1), 12-19. [Korean Literature]
- Nam, W. K., Choi, I. W., Kim, Y. Y., Lim, H. S., Kim, M. J., Lim C. K., Kim, S. H., and Kim, T. H. (2017). A plan to improve Bokha stream quality using water quality and pollution source analyses, *Journal of Korean Society for Environment Analysis*, 20(3), 174-182. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2018). The method of *water quality pollution process test*, No. 2018-65, Notification of the National Institute of Environmental Research. [Korean Literature]
- Polak, J. (2004). Nitrification in the surface water of the Wloclawek dam reservoir. The process contribution to biochemical oxygen demand (N-BOD), *Polish Journal of Environmental Studies*, 13(4), 415-424.
- Seo, H., Kang, Y., Min, K., Lee, K., Seo, G., Kim, S., Paik, K., and Kim, S. (2010). Characteristics of distribution and decomposition of organic matters in stream water and dewatering effluent, *Analytical Science and Technology*, 23(1), 36-44.
- Yang, J. Y., Shin, D. Y., Park, S. H., Lee, J., Hong, J. H., Ha, H. J., Choi, Y. D., Lee, J. Y., Kim, J. A., Bae, K. S., Jeon, J. S., and Jung, K. (2015). A study on the improvement of effluent water quality standards at public sewage treatment facilities-conversion of $CBOD_5$ to BOD_5 as an organic matter index, *The Report of Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health and Environment*, 51, 254-264. [Korean Literature]