

## 하천에서 BOD 존재형태별 분포 특성

김호섭<sup>1,†</sup> · 오승영<sup>2</sup>

<sup>1</sup>KE컨설팅 · <sup>2</sup>국립환경과학원

## The Fractionation Characteristics of BOD in Streams

Ho-Sub Kim<sup>1,†</sup> · Seung-Young Oh<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea Environmental Consulting

<sup>2</sup>National Institute of Environmental Research

(Received 5 February 2021, Revised 19 March 2021, Accepted 22 March 2021)

---

### Abstract

In this study, the distribution characteristics according to the type of BOD and the effect of nitrogenous oxygen demand (NOD) and algal oxygen demand on BOD in three streams (Bokhacheon, Byeongseongcheon, and Gulpocheon) were evaluated. Although the BOD and NOD concentrations demonstrated a difference in the three streams, the carbonaceous BOD(CBOD)/BOD ratio was 0.75 ( $p=0.053$ , one-way ANOVA), and there was no significant difference in the three streams ( $r^2 \geq 0.92$ ,  $p < 0.0001$ ). The NOD concentration of the Bokhacheon with high NH<sub>3</sub>-N was  $1.7 \pm 1.3 \text{ mg/L}$ , which was the highest among the three streams and showed a significant correlation with BOD. Seasonal variations in NOD in the three streams did not show a significant correlation with changes in NH<sub>3</sub>-N concentration ( $r^2 < 0.28$ ,  $p \geq 0.1789$ ), and there was no significant difference in NOD even though NH<sub>3</sub>-N concentration in Gulpocheon was about twice that of Byeongseongcheon ( $p=0.870$ , one way ANOVA). The particulate CBOD(PCBOD)/CBOD ratio of the three streams was 0.55~0.64, and about 60% of the biodegradable organic matter was present in the particulate form. When the Chl.*a* concentration in the stream was more than  $7 \mu\text{g/L}$ , the PCBOD tended to increase with the Chl.*a* concentration ( $r^2=0.61$ ,  $p=0.003$ ). In the three streams, particulate NOD accounted for 81% of NOD; however, despite the large variation in NH<sub>3</sub>-N concentration (0.075~3.182 mg/L), there was no significant difference in soluble NOD(SNOD) concentration that ranged from 0.1 to 0.3 mg/L. In this study, the low contribution rate of SNOD to NOD is considered as a result of the removal of nitrifying bacteria along with the particles during the filtration process.

---

**Key words :** Algal oxygen demand, Carbonaceous BOD, Nitrifying bacteria, Nitrogenous oxygen demand, Particulate CBOD

---

<sup>1</sup> Corresponding author, 이사 (Director) [kimhosub1022@naver.com](mailto:kimhosub1022@naver.com), <https://orcid.org/0000-0001-7512-8170>

<sup>2</sup> 전문연구원(Researcher), [osyoung@korea.kr](mailto:osyoung@korea.kr), <https://orcid.org/0000-0001-5403-2807>

## 1. Introduction

공공수역에서 유기물은 수중 내 산소고갈, 자정능력감소 등 수 환경변화 뿐만 아니라 상수 처리 시 소독부산물의 전구물질로 알려져 있어 수질관리 측면에서 중요한 수질지표 항목으로 사용되고 있다. 수생태계 및 이수적 측면에서 유기물이 야기하는 환경적 문제는 농도 뿐만 아니라 존재형태에 따라 달라 질수 있기 때문에 국내 하천이나 호수 그리고 배출시설 방류수 유기물의 존재형태별 분포 특성을 규명하기 위한 많은 연구가 선행된 바 있다(Gil et al., 2011; Jang et al., 2008; Kim, Jung et al., 2007; Kim et al., 2017; Kim et al., 2018; Kim, Shin et al., 2007; Kim and Gil, 2011; Lee et al., 2011; Lee et al., 2012; Lee et al., 2010; Seo et al., 2010).

수체 내 유기물의 존재형태는 유기물 입자의 크기와 생물학적인 분해특성에 구분할 수 있으며 생물학적 분해특성에 따라 구분하는 방법은 미생물 분해에 따른 유기탄소총량을 생물학적인 분해특성에 따라 정량화하는 방법과  $BOD_5$ 를 미생물에 의해 분해되는 탄소성 BOD(carbonaceous BOD, CBOD)로 간주하고, COD 혹은 TOC농도와의 차이를 난분해성물질로 추정하는 방법이 있다(Gil et al., 2011; Jang et al., 2008; Kim, Jung et al., 2007; Kim et al., 2017; Kim et al., 2018; Kim, Shin et al., 2007; Kim and Gil, 2011; Lee et al., 2011; Lee et al., 2012; Seo et al., 2010). 5일 동안 Bottle내 BOD를 CBOD로 고려하는 것은 BOD측정 시 배양온도(20°C)가 질산화 미생물의 성장에 필요한 최적온도에 비해 낮기 때문에 탄소화합물 산화세균에 비하여 증식속도가 느려 일반적으로 질소화합물의 산화와 분해에 의한 산소소모가 8~10일이 경과한 후에 나타나는 것으로 알려져 있기 때문이다(Bitton, 2011; Ge et al., 2015; Grunditz and Dalhammar, 2001; Paredes et al., 2007). 그러나 생물학적 기반의 처리공정을 갖춘 공공하수처리시설과 질소 유입원의 영향이 큰 하천에서는 질산화에 의해 소비되는 산소량(nitrogenous oxygen demand, NOD)이 5일 후 Bottle BOD로 측정되는 생분해성 유기물에 상당부분 영향을 야기할 수 있는 것으로 알려져 있다(Han et al., 2015; Jang et al., 2007; Jeong et al., 2009; Kang, 2009; Khorsandi et al., 2014; Kil and Kang, 2016; Kim et al., 2018; Min et al., 2011; Nam et al., 2017).

국내 하천 유기물에 대한 지표항목으로 총유기탄소(total organic carbon, TOC)와 BOD가 사용되고 있으며, 하천 수질 관리는 유역 내 토지이용규제와 배출시설에 대한 농도관리 및 오염물질의 양적 관리 등 배출원 중심으로 관리되고 있다(Kim et al., 2019). 그러나 하천 수질이 BOD와 배출원 중심 관리되고 있는 상황에서  $NH_3-N$ 농도에 기인한 NOD나 정체 수역 형성으로 조류에 의한 내부생성유기물의 영향으로 증가된 하천 내 BOD농도를 유역 내 배출원에서의 BOD배출량이나 방류 농도의 관리수준만으로 이해하는 것은 어려울 수 있다(Han et al., 2015; Nam et al., 2017). 따라서 계절에 따른 방류수내 질소 태별 농도 변화가 큰 점오염원이 유입되거나 정체수역이 형성되는 하천에서 BOD의 손상원인을 규명

하고 관리 대책을 마련함에 있어 BOD존재형태별 분포 특성을 이해하는 것이 필요할 수 있다.

국내에서 BOD존재형태와 관련된 선행된 연구는 대부분 공공하수처리장 방류수나 방류수가 유입되는 하천을 대상으로 NOD와 관련해 진행된 바 있으나(Han et al., 2015; Jang et al., 2007; Jeong et al., 2009; Kang, 2009; Kil and Kang, 2016; Kim and Kim, 2021; Min et al., 2011; Nam et al., 2017) 입자크기에 따른 BOD 분포특성과 관련된 연구는 거의 없으며, 일부 내부생성유기물의 영향을 정량화하거나 평가하기 위한 연구로 모델이나 BOD와 Chl.a농도와의 관계분석을 통해 수행된 바 있다(Kong, 2017; Lee, 2011; Park et al., 2008; Yu et al., 2018). 이에 본 연구에서는 유량 및 수질에 대한 하·폐수 방류수의 영향이 상이한 하천들을 대상으로 BOD를 산소소비물질과 입자크기에 따라 구분하여 BOD 존재형태별 분포특성을 평가하였고, 입자크기에 따른 구분된 생분해성유기물과 Chl.a 농도와의 관계를 통해 BOD에 대한 내부생성유기물의 영향을 파악하였다.

## 2. Materials and Methods

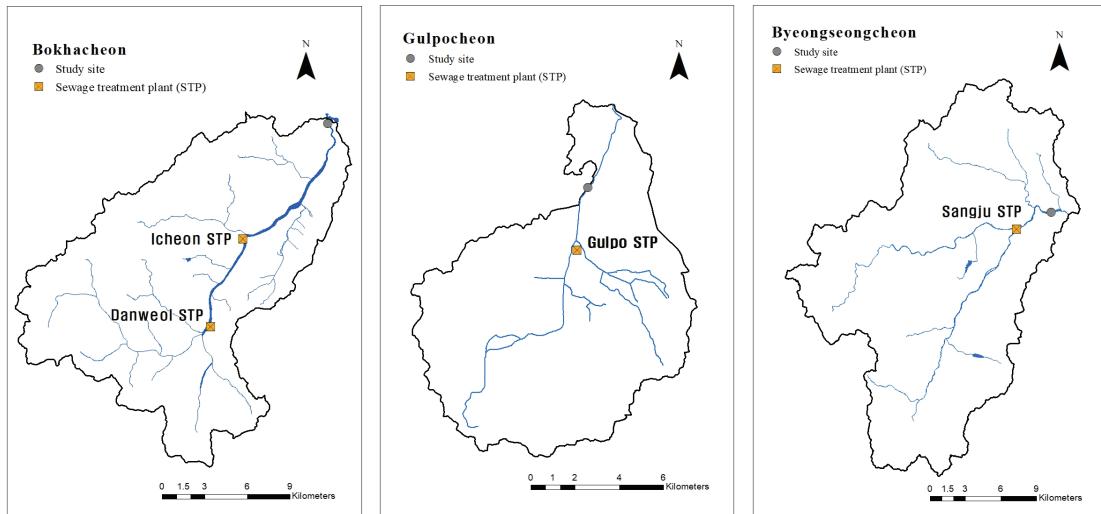
### 2.1 조사 지점 및 시기

본 연구는 복하천, 굴포천 및 병성천을 대상으로 하였으며 2019년 10월부터 2020년 6월까지 1월을 제외하고 월1회 조사하였다(Fig. 1). 복하천 유역에는 2017년 기준 공공하수처리시설 38개소와 산업폐수 개별처리시설(1, 2종) 9개소가 위치하고 있으며 하천유량에 대한 하·폐수방류수 기여율은 27%이고 TN 유달부하량에 대한 기여율은 51%(ME, 2019). 굴포천은 도심을 관통하는 국가하천으로 하천 말단부에 설치된 구조물로 인해 상류 일부구간을 제외하고는 정체 수역을 형성하고 있다. 굴포천 유역에는 1개의 공공하수처리시설이 위치하고 있으며 하천 유량 및 TN 유달부하량에 대한 기여율이 각각 96%, 87%로 조사 대상하천 중 공공하수처리시설의 영향이 가장 큰 하천이다(ME, 2019). 병성천은 하천 주변이 대부분 농경지로 사용되고 있으며 유역 내 공공하수처리시설 10개소와 산업폐수개별처리 시설(1종) 2개소가 위치하고 있으며 하천유량 및 TN유달부하량에 대한 기여율은 각각 3%, 11%이다(ME, 2019).

### 2.2 BOD 존재형태별 분류 및 분석방법

입자크기에 따른  $BOD_5$  존재형태는 GF/C 여과지로 구분하였고, 산소소비물질에 따른  $BOD_5$  존재형태는 질산화억제제(ATU)를 이용해 구분하였다(NIER, 2018). 입자크기와 산소물질에 따라 구분된 BOD 존재형태별 농도는 초기 DO농도와 20°C로 유지되는 배양기에서 5일간 배양 후 측정된 DO농도 차이로 산정하였다.  $BOD_5$ 는 원수를 이용해 측정하였고 본 연구에서는 BOD로 표현하였다. CBOD는 여과되지 않은 시료에 질산화억제제(ATU)와 식종액을 넣은 후 측정하였고(NIER, 2018), NOD는 BOD와 CBOD값의 차이로 산정하였다(식 1).

$CBOD = \text{입자크기 } - \text{용존형태 탄소성 BOD(soluble}$



**Fig. 1.** The map showing the study sites.

CBOD, SCBOD)와 입자형태 탄소성BOD(particulate CBOD, PCBOD)로 구분하였고 NOD는 용존형태 질소에 의한 산소소비량(soluble NOD, SNOD) 및 입자형태 질소에 의한 산소소비량(particulate NOD, PNOD)으로 구분하였다(Khorsandi, et al., 2014). SCBOD는 여과액에 질산화억제제와 식종액을 침가하여 측정하였으며 PCBOD는 CBOD와 SCBOD의 차이로 산정하였다(식 2). SNOD는 여과액을 이용해 측정된 용존성 산소소비량(soluble oxygen demand, SBOD)과 SCBOD의 차이로 산정하였으며(식 3), PNOD는 NOD와 SNOD 차이로 산정하였다(식 4).

$$\text{BOD} = \text{CBOD} + \text{NOD} \quad (\text{식 } 1)$$

$$\text{CBOD} = \text{SCBOD} + \text{PCBOD} \quad (\text{식 } 2)$$

$$\text{SBOD} = \text{SCBOD} + \text{SNOD} \quad (\text{식 } 3)$$

$$\text{NOD} = \text{SNOD} + \text{PNOD} \quad (\text{식 } 4)$$

BOD와 조류기원유기물 그리고 NOD와 NH<sub>3</sub>-N농도와의 관계분석을 위해 일정량의 시료를 GF/C로 여과한 후 여과지를 이용해 클로로필- $\alpha$ (Chl. $\alpha$ ) 농도를 측정하였고 여과액은 NH<sub>3</sub>-N농도 측정에 사용하였다(NIER, 2018).

### 2.3 통계분석

조사대상 하천에서 BOD, CBOD 및 NOD농도 등 존재형태별 농도 및 비율 등을 one-way ANOVA(SPSS, ver.14.0)를 이용해 비교하였고 하천별 Chl. $\alpha$ 농도 기준으로 구분된 시기의 PCBOD/CBOD비의 차이는 *t*-test(SPSS, ver. 14.0)를 통해 비교하였다. 통계적인 유의수준은  $p \leq 0.05$ 를 기준으로,  $p > 0.05$ 인 경우 유의적인 차이가 없는 것으로 판단하였다. 조사 항목 간 통계적 유의성은 회귀분석을 통해 분석하였다(SPSS, ver.14.0).

## 3. Results and Discussion

### 3.1 산소소비물질에 따른 BOD 존재형태

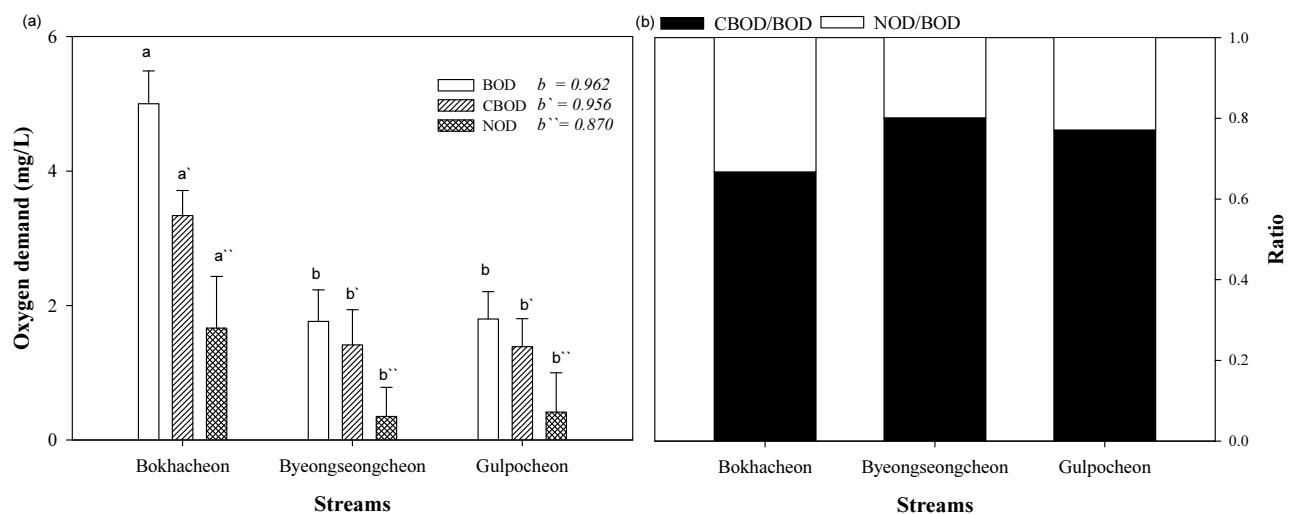
산소소비물질에 따라 구분된 CBOD와 NOD 농도는 하천별로 차이가 있었으나 BOD에 대한 기여율은 유사하였다(Table 1). 복하천에서 BOD 농도는 2.7~10.1 mg/L 범위였고 평균  $5.0 \pm 2.4$  mg/L로 조사대상 하천 중 가장 높았으며 병성천과 굴포천은 평균 1.8 mg/L로 유사하였다( $p=0.962$ , one-way ANOVA). CBOD와 NOD도 복하천에서 각각 평균  $3.3 \pm 1.3$  mg/L,  $1.7 \pm 1.3$  mg/L로 병성천과 굴포천과 비교해 높았으며, 병성천과 굴포천에서의 CBOD와 NOD농도는 큰 차이가 없었다 ( $p>0.80$ , one-way ANOVA)(Fig. 2).

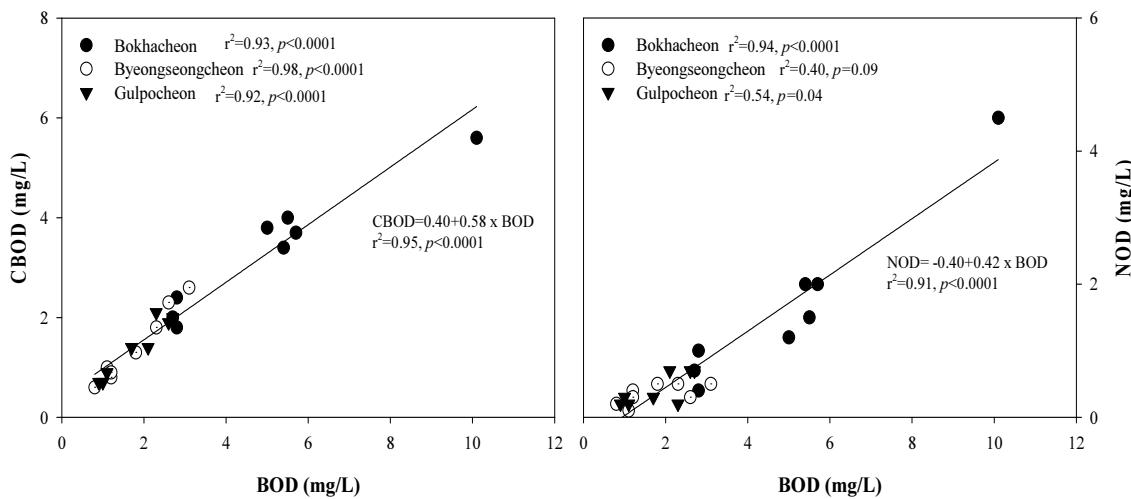
CBOD/BOD비는 복하천에서 평균  $0.70 \pm 0.09$ 로 가장 낮았으나 병성천(평균  $0.79 \pm 0.08$ )이나 굴포천(평균  $0.77 \pm 0.08$ )과 큰 차이가 없었다( $p=0.053$ , one-way ANOVA). BOD 농도 차이에도 불구하고 하천별 BOD에 대한 CBOD 존재비율이 유사하게 나타난 것은 조사 대상 하천 모두 BOD에 대한 CBOD 기여율이 높고 BOD 농도가 CBOD와 유의적인 관계( $r^2 \geq 0.92$ ,  $p < 0.0001$ )가 있었기 때문인 것으로 판단된다. BOD에 대한 NOD평균 기여율은 0.21~0.30으로 하천별로 큰 차이가 없었으나, 복하천과 굴포천에서의 BOD와 NOD 농도 변화는 유사한 경향을 보였다( $r^2 \geq 0.54$ ,  $p \leq 0.04$ )(Fig. 3).

조사대상 하천에서 NH<sub>3</sub>-N농도가 높을수록 NOD가 높았으나 NOD와 NH<sub>3</sub>-N농도 사이의 유의적인 상관성은 없었다( $r^2 \leq 0.28$ ,  $p \geq 0.1789$ )(Table 1). NH<sub>3</sub>-N농도는 NOD농도가 가장 높았던 복하천에서 평균  $1.365 \pm 0.894$  mg/L로 가장 높았으며, NOD농도의 큰 차이가 없었던( $p=0.870$ , one-way ANOVA) 병성천과 굴포천 NH<sub>3</sub>-N농도는 각각  $0.223 \pm 0.177$  mg/L,  $0.502 \pm 0.260$  mg/L로 통계적으로 유의적인 차이는 없었다( $p=0.319$ , one-way ANOVA). 복하천에서 NH<sub>3</sub>-N농도는 3월에 3.182 mg/L로 가장 높았으나, NOD농도는 4월에 4.5 mg/L로 가장 높았으며 병성천에서도 2월에 암모니아 농도가 0.564 mg/L로 가장 높았던 반면 NOD농도는 조사기간 중 가

**Table 1.** BOD, CBOD, NOD and NH<sub>3</sub>-N concentration in the three streams

Streams	Month	BOD (mg/L)	NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	CBOD (mg/L)	NOD (mg/L)	CBOD/BOD	NOD/BOD
Bokhacheon	'19.10	2.7	0.658	2.0	0.7	0.74	0.26
	11	2.8	0.358	1.8	1.0	0.64	0.36
	12	5.0	1.283	3.8	1.2	0.76	0.24
	'20.2	5.5	1.700	4.0	1.5	0.73	0.27
	3	5.7	3.182	3.7	2.0	0.65	0.35
	4	10.1	1.885	5.6	4.5	0.55	0.45
	5	5.4	0.998	3.4	2.0	0.63	0.37
	6	2.8	0.858	2.4	0.4	0.86	0.14
	Avg.	<b>5.0±2.4</b>	<b>1.365±0.894</b>	<b>3.3±1.3</b>	<b>1.7±1.3</b>	<b>0.70±0.09</b>	<b>0.30±0.09</b>
Byeongseongcheon	'19.10	0.8	0.106	0.6	0.2	0.75	0.25
	11	1.2	0.095	0.8	0.4	0.67	0.33
	12	1.8	0.378	1.3	0.5	0.72	0.28
	'20.2	1.1	0.564	1.0	0.1	0.91	0.09
	3	1.2	0.271	0.9	0.3	0.75	0.25
	4	3.1	0.068	2.6	0.5	0.84	0.16
	5	2.3	0.228	1.8	0.5	0.78	0.22
	6	2.6	0.075	2.3	0.3	0.88	0.12
	Avg.	<b>1.8±0.8</b>	<b>0.223±0.177</b>	<b>1.4±0.7</b>	<b>0.4±0.2</b>	<b>0.79±0.08</b>	<b>0.21±0.08</b>
Gulpocheon	'19.10	0.9	0.166	0.7	0.2	0.78	0.22
	11	2.1	0.667	1.4	0.7	0.67	0.33
	12	1.0	0.453	0.7	0.3	0.70	0.30
	'20.2	2.7	0.929	2.0	0.7	0.74	0.26
	3	1.1	0.489	0.9	0.2	0.82	0.18
	4	2.3	0.242	2.1	0.2	0.91	0.09
	5	1.7	0.733	1.4	0.3	0.82	0.18
	6	2.6	0.338	1.9	0.7	0.73	0.27
	Avg.	<b>1.8±0.7</b>	<b>0.502±0.260</b>	<b>1.4±0.6</b>	<b>0.4±0.2</b>	<b>0.77±0.08</b>	<b>0.23±0.08</b>

**Fig. 2.** (a) Comparison of BOD concentration and (b) proportion classified by the presence of oxygen consumption substance in the three streams. a and b indicate a significant difference among the three streams ( $p \leq 0.05$ , one-way ANOVA).



**Fig. 3.** The correlation between BOD and CBOD, NOD in the three streams.

장 낮은 농도를 보였다(Table 1). 굴포천에서는 11월, 2월 및 6월 0.338~0.929 mg/L 범위의 암모니아 농도 변화에도 불구하고 NOD는 0.7 mg/L로 차이가 없었다.

NOD의 계절적인 변화는 수체 내  $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도 뿐만 아니라 질산화 미생물(Nitrifying bacteria)의 생물량 그리고 수온, pH, C/N 등 이화학적 환경조건의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Ge et al., 2015; Gnida et al., 2016; Jeong et al., 2009; Kang, 2009). Kim and Kim (2021) 또한 발생원이 상이한 17개 하·폐수배출시설에서 방류수 내 유사한  $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도에도 불구하고  $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도에 의존한 NOD 농도 변화가 공공하수처리시설에서만 나타나 NOD와 관련된 생물학적 영향 가능성을 제시한 바 있다. 질산화와 관련된 생물학적·이화학적 요인과의 개별적인 인과관계는 규명되고 있으나(Brion and Billen, 2000; Cirello et al., 1979; Cooper, 1984; Ge et al., 2015; Gnida et al., 2016; Jeong et al., 2009; Kang, 2009; Pauer and Auer, 2000; Polak, 2004; Schwert and White, 1974), 하천에서는 이러한 요인들이 상호 복합적으로 작용할 수 있기 때문에 개별적인 요인과의 인과관계를 통해 하천 내 NOD 변화를 이해하는 것은 어려울 수 있다. 이에 Polak (2004)은 질산화와 관련된 미생물량이나 질산화에 대한 이화학적 요인의 영향 정도 등 생물학적인 여건을 배양 전과 5일 후  $\text{NO}_2\text{-N}$ 와  $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도의 각각의 농도차이로 평가하였고 이를 질산화 활성도(Nitrifying activity)로 표현하였다. 본 연구에서는 Bottle내 5일 후 질소 태별 농도를 분석하지 않아  $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도로부터 산정된 이론적 산소요구량 (4.57mgO<sub>2</sub>/1mgNH<sub>3</sub>-N, NOD<sub>cal.</sub>)과 실측 NOD (NOD<sub>obs.</sub>)의 비를 이용해 조사대상 하천별 질산화 미생물의 생물학적 여건을 비교하였다.

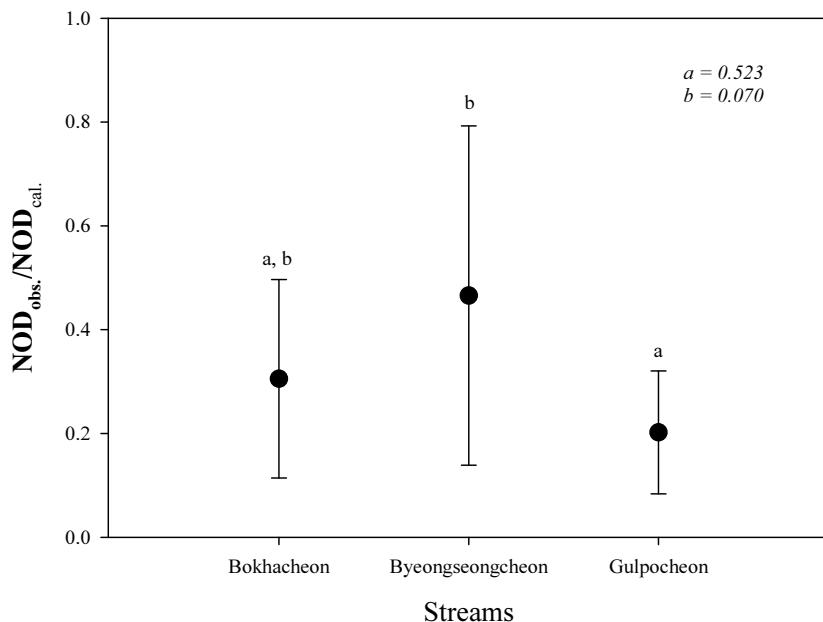
조사대상 하천 중 병성천에서의 NOD<sub>obs.</sub>/NOD<sub>cal.</sub>비가 0.61±0.51로 가장 높았고, NOD농도가 가장 높았던 복하천에서는 0.31±0.19로 굴포천(0.20±0.12)과 유사하였다(Fig. 4)(p=0.523, one-way ANOVA). NOD<sub>obs.</sub>/NOD<sub>cal.</sub>비가 높을수록 질산화가 많이 진행되었음을 의미하므로, 병성천의 질산화 미생물의 생물학적 조건이 복하천이나 굴포천에 비해 질

산화에 용이한 환경이었을 가능성이 있다. 그러나 NOD<sub>obs.</sub>/NOD<sub>cal.</sub>비는 5일 배양기간 중 미생물에 동화되는 양이 고려하지 못하며 질산화 미생물량이나 활성도가 동일하더라도 수체 내  $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도가 높을수록 NOD<sub>obs.</sub>/NOD<sub>cal.</sub>비는 감소할 수 있다. 이러한 평가방법의 한계점에도 불구하고 굴포천에서 NOD<sub>obs.</sub>/NOD<sub>cal.</sub>비는  $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도가 유사한(p=0.319, one way ANOVA) 병성천과 비교해 낮았고  $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도가 가장 높았던 복하천과 비교해 큰 차이가 없었기 때문에 조사대상 하천 중 질산화 생물량이 가장 적거나 활성도가 억제되는 환경조건이었을 가능성이 있다.

굴포천에서 질산화미생물 생물량이나 활성도 등과 관련된 환경조건은 정체된 수리학적 특성과 하천 유량에 대한 공공하수처리시설 방류수의 높은 기여율과 관련이 있을 수 있다. 하천에서 질산화 미생물은 수층 내 부유하고 있는 유기입자 표면이나 하상 퇴적층에 서식하기 때문에 수심이나 유속 등 수리학적인 특성도 하천에서의 질산화에 영향을 야기하는 것으로 알려져 있다(Cirello et al., 1979; Cooper, 1984; Pauer and Auer, 2000; Polak, 2004; Schwert and White, 1974). 굴포천은 정체수역 형성으로 유속이 느려 입자성 물질의 침강이 용이하고 퇴적층과 수층간의 교란정도가 적어 퇴적층에 서식하는 질산화 미생물의 수층으로의 확산이 억제되었을 가능성이 있다. 또한 하천 유량에 대한 공공하수처리시설의 존도가 높기 때문에 공공하수처리시설 및 재이용시설 처리 공정 중에 사용되는 응집제 및 염소 등이 하천 내 잔류하여 질산화 미생물 생물량이나 활성도에 영향을 야기했을 가능성이 있을 수 있다.

### 3.2 입자크기에 따른 CBOD 존재형태

국내 하천이나 호소를 대상으로 유기탄소량을 통해 측정된 유기물은 용존 형태의 난분해성유기물로 존재하는 것으로 보고되고 있으나(Jang et al., 2008; Kim et al., 2017; Kim, Shin et al., 2007; Seo et al., 2010), 본 연구 대상하천에서 CBOD는 입자성형태의 구성 비율이 높았다(Table 2, Fig. 5). 복하천에서 CBOD에 대한 PCBOD기여율은 0.55~0.71범위



**Fig. 4.** Comparison of  $NOD_{obs.}/NOD_{cal.}$  in the three streams. a and b indicate a significant difference among the three streams ( $p \leq 0.05$ , one-way ANOVA).

**Table 2.** BOD concentration and proportion classified by oxygen consumption substance and particle size in the three streams

StreamReferences	Month	Chl. <i>a</i> ( $\mu\text{g/L}$ )	PCBOD (mg/L)	SCBOD (mg/L)	PNOD (mg/L)	SNOD (mg/L)	PCBOD /CBOD	SCBOD /CBOD	PNOD /NOD	SNOD /NOD
Bokha-cheon	'19.10	12.5	1.3	0.7	0.4	0.3	0.65	0.35	0.57	0.43
	11	3.9	1.0	0.8	0.9	0.1	0.56	0.44	0.90	0.10
	12	0.9	2.4	1.4	1.1	0.1	0.63	0.37	0.92	0.08
	'20.2	4.5	2.2	1.8	1.3	0.2	0.55	0.45	0.87	0.13
	3	15.5	2.2	1.5	1.8	0.2	0.59	0.41	0.90	0.10
	4	53.9	4.0	1.6	4.3	0.2	0.71	0.29	0.96	0.04
	5	33.3	2.3	1.1	1.8	0.2	0.68	0.32	0.90	0.10
	6	38.0	1.7	0.7	0.2	0.2	0.71	0.29	0.50	0.50
	Avg.	<b>20.3±19.2</b>	<b>2.1±0.9</b>	<b>1.2±0.4</b>	<b>1.5±1.3</b>	<b>0.2±0.1</b>	<b>0.64±0.06</b>	<b>0.36±0.06</b>	<b>0.81±0.17</b>	<b>0.19±0.17</b>
Byeongseong-cheon	'19.10	3.8	0.3	0.3	0.2	0.0	0.50	0.50	1.00	-
	11	3.0	0.3	0.5	0.4	0.0	0.38	0.63	1.00	-
	12	0.9	0.8	0.5	0.4	0.1	0.62	0.38	0.80	0.20
	'20.2	1.5	0.6	0.4	0.0	0.1	0.60	0.40	-	1.00
	3	4.1	0.4	0.5	0.3	0.0	0.44	0.56	1.00	-
	4	37.8	1.6	1.0	0.5	0.0	0.62	0.38	1.00	-
	5	18.5	1.1	0.7	0.3	0.2	0.61	0.39	0.60	0.40
	6	31.9	1.4	0.9	0.3	0.0	0.61	0.39	1.00	-
	Avg.	<b>12.7±14.9</b>	<b>0.8±0.5</b>	<b>0.6±0.2</b>	<b>0.3±0.2</b>	<b>0.1±0.1</b>	<b>0.55±0.09</b>	<b>0.45±0.09</b>	<b>0.80±0.35</b>	<b>0.20±0.35</b>
Gulpo-cheon	'19.10	7.1	0.4	0.3	0.2	0.0	0.57	0.43	1.00	-
	11	1.0	0.9	0.5	0.5	0.2	0.64	0.36	0.71	0.29
	12	0.9	0.4	0.3	0.2	0.1	0.57	0.43	0.67	0.33
	'20.2	3.0	1.4	0.6	0.5	0.2	0.70	0.30	0.71	0.29
	3	4.0	0.4	0.5	0.2	0.0	0.44	0.56	1.00	-
	4	23.5	1.4	0.7	0.2	0.0	0.67	0.33	1.00	-
	5	8.9	0.9	0.5	0.2	0.1	0.64	0.36	0.67	0.33
	6	26.3	1.3	0.6	0.6	0.1	0.68	0.32	0.86	0.14
	Avg.	<b>9.3±10.0</b>	<b>0.9±0.4</b>	<b>0.5±0.1</b>	<b>0.3±0.2</b>	<b>0.1±0.1</b>	<b>0.62±0.08</b>	<b>0.38±0.08</b>	<b>0.83±0.15</b>	<b>0.17±0.15</b>

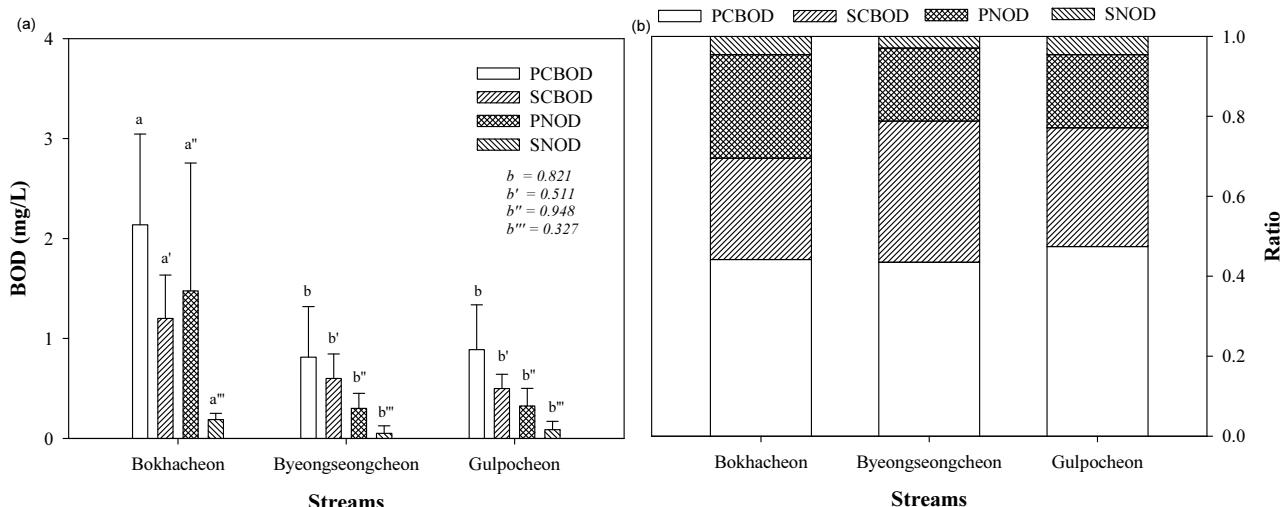


Fig. 5. (a) Comparison of BOD concentration and (b) proportion classified by oxygen consumption substance and particle size in the three streams. a and b indicate a significant difference among the three streams ( $p \leq 0.05$ , one-way ANOVA).

였으며, 병성천은 0.38~0.62 그리고 굴포천은 0.44~0.70로 하천별 CBOD에 대한 PCBOD 평균기여율은 복하천에서 0.64로 비교적 높았으나 병성천(0.55)과 굴포천(0.62)과 큰 차이는 없었다( $p=0.055$ , one-way ANOVA). 복하천에서 CBOD에 대한 PCBOD의 높은 기여율은 하천 내 Chl.a 농도가 38.0~53.9  $\mu\text{g}/\text{L}$  범위로 높았던 3월과 6월 사이에 0.68~0.71로 가장 높았으며, 굴포천과 병성천도 Chl.a 농도가 증가한 4월~6월 기간 중 PCBOD/CBOD비가 증가하는 것으로 조사되었다.

조사대상하천에서 Chl.a농도가 증가하는 시기에 PCBOD/CBOD비가 높게 나타난 것은 CBOD에 대한 내부생성유기물의 영향을 의미할 수 있다. BOD에 대한 내부생성유기물 영향을 평가하는 방법으로 본 연구와 동일하게 입자크기로 분리하여 직접 측정하거나(Khorsandi et al. 2014) 모델을 통한 정량화(Kong, 2017; Lee, 2011) 그리고 BOD와 Chl.a농도와의 관계분석을 통해 간접적으로 평가하는 방법 등이 있다(Park et al., 2008; Yu et al., 2018). Khorsandi et al.(2014)는 입자크기로 분리하여 측정하는 방법으로 Chl.a 농도가 연평균 345  $\mu\text{g}/\text{L}$ 인 pond에서 CBOD에 대한 조류 기여율이 79.7%로 보고한 바 있다. Kong (2017)은 수질모델을 통해 내부생성유기물의 기여율을 정량화하는 방법으로 2011~2017년 팔당호에서 조류 기원성 BOD비율이 28%임을 보고한 바 있으며 Lee (2011)는 낙동강 하류 정체수역 구간에서 BOD의 평균 68.4%가 내부생성유기물임을 제시한바 있다. 본 연구에서 입자크기에 따라 분리하여 측정된 PCBOD가 BOD의 평균 45%, CBOD의 60%로 조사되었으나 Chl.a 농도가 높은 일부 시기에도 PCBOD/BOD비가 높게 나타난 것은 본 연구에서 제시된 PCBOD가 조류 뿐만 아니라 비 조류성 입자물질에 의존하고 있음을 의미한다.

BOD와 Chl.a농도와의 회귀분석에서는 Chl.a 농도가 7  $\mu\text{g}/\text{L}$  이상인 시기에 PCBOD가 Chl.a 농도에 의존하는 경향을 보였고( $r^2=0.61$ ,  $p=0.003$ ), PCBOD/CBOD가 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 6 and 7). 복하천에서는 PCBOD와 Chl.a농도

사이의 유의적인 관계가 나타난 시기의 PCBOD/CBOD비가 평균  $0.67 \pm 0.05$ 로 Chl.a 농도가 7  $\mu\text{g}/\text{L}$  보다 낮았던 시기 ( $0.58 \pm 0.05$ )와 비교해 유의적인 차이를 보였다( $p=0.046$ , *t*-test)(Fig. 8). 그러나 Chl.a 농도가 낮았던 시기의 PCBOD/CBOD비가 0.55~0.65로 일정하게 유지된 것이 아니기 때문에 Chl.a 농도가 높은 시기에 PCBOD가 조류 뿐만 아니라 비조류성 유기입자물질에 의해 증가되었을 가능성도 배제할 수는 없다. 병성천과 굴포천에서도 Chl.a 농도가 7  $\mu\text{g}/\text{L}$ 보다 높았던 시기에 PCBOD/CBOD비가 각각 10.5%, 5.2% 증가하였으나 Chl.a 농도가 7  $\mu\text{g}/\text{L}$  보다 낮았던 시기와 비교해 큰 차이가 없었다( $p \geq 0.083$ , *t*-test)(Fig. 8). 본 연구에서 Chl.a 농도를 기준으로 구분된 시기의 PCBOD/CBOD비 차이가 조류성 CBOD에 의한 것임을 의미하지는 않으나, PCBOD와 Chl.a 농도사이의 유의적인 상관성은 조류성 CBOD가 하천 내 BOD 농도 변화에 상당부분 영향을 야기하고 있음을 제시한다(Park et al., 2008; Yu et al., 2018).

### 3.3 입자크기에 따른 NOD 존재형태

조사대상하천에서 입자 크기에 따른 NOD의 존재형태는 PNOD기여율이 높은 것으로 나타났다(Table 2, Fig. 5). 복하천 PNOD는 평균 1.5  $\text{mg}/\text{L}$ 로 병성천과 굴포천과 비교해 높았으나, 조사대상하천에서의 PNOD/NOD비는 평균 0.81로 큰 차이가 없었다( $p=0.274$ , one-way ANOVA). 조사대상 하천에서 SNOD는 0.1~0.3  $\text{mg}/\text{L}$  범위로 하천별 큰 차이가 없었으며 복하천에서는 12~4월에  $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도가 1.283~3.182  $\text{mg}/\text{L}$ 로 증가하는 시기에 PNOD가 1.1~4.3  $\text{mg}/\text{L}$ 으로 증가하였으나 SNOD는 0.1~0.2  $\text{mg}/\text{L}$  변화가 없었다(Fig. 6). 본 연구에서 계절에 따른  $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도의 변화에도 불구하고 PNOD와 달리 SNOD의 변화가 거의 나타나지 않은 것은 NOD를 입자크기에 따라 구분하는 과정에서의 질산화미생물 생물량 감소와 관련이 있을 수 있다.

질산화 미생물은 입자표면에 부착하여 서식하는 것으로 알려져 있으며(Brion and Billen, 2000; De Bie et al., 2002;

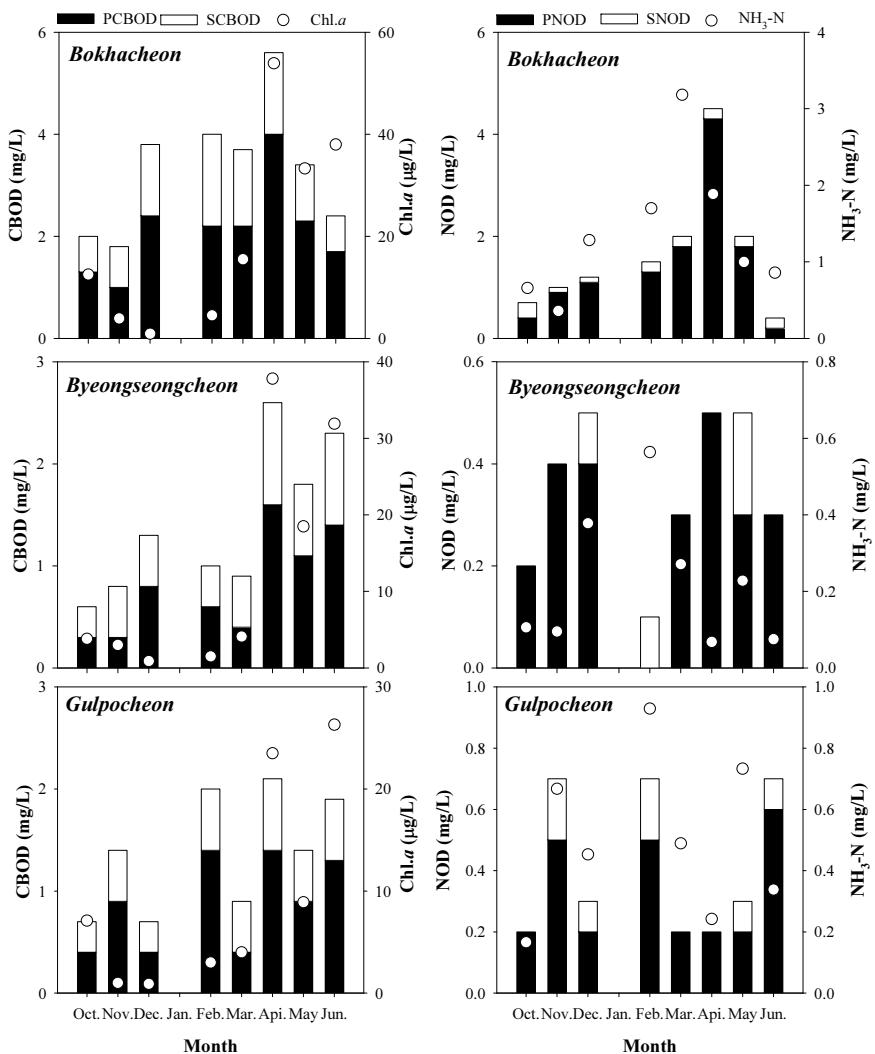


Fig. 6. Temporal variation in CBOD, NOD, Chl.*a*, and NH<sub>3</sub>-N concentration in the three streams (Oct. 2019 ~ Jun. 2020).

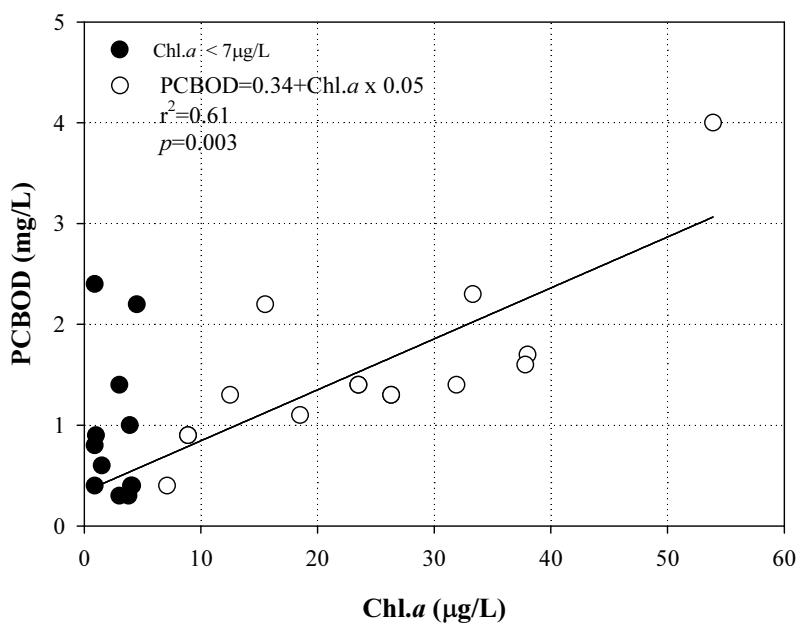
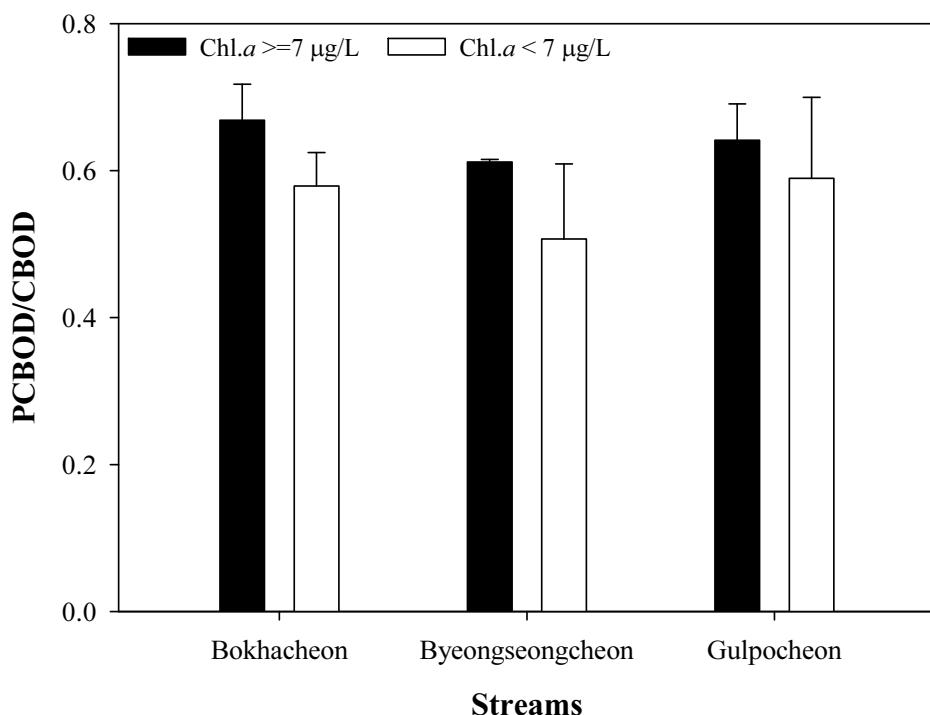


Fig. 7. The correlation between Chl.*a* and PCBOD concentration in the three streams.



**Fig. 8.** Comparison of PCBOD/CBOD ratio at times separated by Chl.*a* concentration in the three streams.

Pauer and Auer, 2000; Polak, 2004) SBOD 측정을 위해 GF/C로 여과하는 과정에서 질산화 미생물이 상당부분 제거되었을 가능성이 있다. 여과과정에서 질산화 미생물이 감소하게 되면 SBOD 측정과정에서 질산화가 억제되기 때문에 SBOD와 SCBOD의 차이로 산정되는 SNOD는 감소하게 되고 상대적으로 NOD에 대한 PNOD 기여율이 증가하게 된다. 입자 크기에 따라 NOD를 구분 과정에서 질산화미생물 생물량 변화로 PNOD의 기여율이 높게 나타난 것과 유사하게, CBOD에 대한 PCBOD의 높은 기여율도 탄소성유기물을 분해하는 미생물량 감소가 영향을 야기했을 가능성이 있으나 본 연구에서 SCBOD와 CBOD에서 나타난 통계적 유의성( $r^2=0.89$ ,  $p<0.0001$ )과 질산화 미생물과 비교해 탄소성유기물을 분해하는 미생물의 빠른 성장속도를 고려할 때 여과과정에서 미생물량 변화가 SCBOD에 미치는 영향은 SNOD와 비교해 적었을 것으로 사료된다.

#### 4. Conclusion

하천 수질 및 유량에 대한 하·폐수 방류수의 영향이 상이한 복하천, 굴포천 및 병성천을 대상으로 BOD의 존재형태별 분포특성과 BOD에 대한 NOD와 내부생성유기물의 영향을 평가하였다. 조사대상하천에서 BOD와 NOD농도의 차이에도 불구하고 CBOD/BOD비는 0.75로 하천별로 유사하였고( $p=0.053$ , one way ANOVA), BOD의 계절적인 변화는 CBOD와 유사하였다( $r^2\geq 0.92$ ,  $p<0.0001$ ). NOD농도는 NH<sub>3</sub>-N가 높은 복하천 1.7±1.3mg/L로 가장 높았고 BOD와

유의적인 상관성을 보였다( $r^2=0.94$ ,  $p<0.001$ ). 그러나 조사대상하천에서 NOD의 계절적인 변화는 NH<sub>3</sub>-N 농도변화와 유의적인 상관성을 없었고( $r^2<0.28$ ,  $p\geq 0.1789$ ), 굴포천은 병성천에 비해 NH<sub>3</sub>-N농도가 약 2배 이상 높음에도 불구하고 NOD는 큰 차이가 없었다( $p=0.870$ , one way ANOVA). 이러한 결과는 하천에서 NOD가 NH<sub>3</sub>-N농도 뿐만 아니라 질산화미생물의 생물량 및 활성도와 관련된 환경적 요인과 관련이 있으며 굴포천은 조사대상 하천 중 질산화 생물량이 가장 적거나 활성도가 억제되는 환경조건이었음을 의미한다. PCBOD/CBOD비는 0.55~0.64 범위로 생분해성 유기물의 60%는 입자성 형태로 존재하였고, Chl.*a* 농도가 7 μg/L 이상인 시기에 PCBOD는 Chl.*a* 농도에 의존하여 증가하는 경향을 보였다( $r^2=0.61$ ,  $p=0.003$ ). 이러한 결과는 Chl.*a* 농도가 높은 하천에서 CBOD에 대한 조류성 BOD가 중요하게 고려될 필요가 있음을 시사한다. 조사대상하천에서 NOD의 81%는 PNOD형태로 존재하였고 SNOD는 조사기간 중 NH<sub>3</sub>-N농도의 큰 변화 (0.075~3.182mg/L)에도 불구하고 0.1~0.3mg/L 범위로 큰 차이가 없었는데 이는 SNOD를 측정하기 위해 여과하는 과정에서 질산화 미생물량이 제거되어 나타난 결과로 사료된다.

#### Acknowledgement

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

## References

- Bitton, G. (2011). *Wastewater microbiology*, 4th Ed., Wiley-Blackwell Inc., New Jersey, USA.
- 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.
- Cirello, J., Raport, R. A., Strom, P. F., Matulewich, V. A., Morris, M. L., Oetz, S., and Finstein, M. S. (1979). The question of nitrification in the Passaic river, New Jersey: Analysis of historical data and experimental investigation, *Water Research*, 13(6), 525~537.
- Copper, A. B. (1984). Activities of benthic nitrifiers in streams and their role in oxygen consumption, *Microbial Ecology*, 10(4), 317-334.
- De Bie, M. J. M., Starink M., Boschker H. T. S., Peene J. J., and Laanbroek, H. J. (2002). Nitrification in the schelde estuary: Methodological aspects and factors influencing its activity, *Federation of European Microbiological Societies Microbiology Ecology*, 42, 99-107.
- 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.
- Gil, K., Kim, T., and Jung, M. S. (2011). Runoff characteristics of refractory organic matters from South-Han river watershed during rainfall event and dry season, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 27(3), 306-313. [Korean Literature]
- Gnida, A., Wisznioski, J., Felis, E., Sikora, J., Sumacz-Gorska, J., and Miksch., K. (2016). The effect of temperature on the efficiency of industrial wastewater nitrification and its (geno) toxicity, *Archives of Environmental Protection*, 42(1), 27-34.
- Grunditz, C. and Dalhammar, G. (2001). Development of nitrification inhibition assays using pure cultures of nitrosomonas and nitrobacter, *Water Research*, 35(2), 433-440.
- 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, *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. and Kim, S. G. (2021). Distribution of organic matter and nitrogenous oxygen demand in effluent of sewage and wastewater treatment plants, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 37(1), 20-31. [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, H. S., Park, Y. H., Kim, Y. S., and Kim, S. Y. (2019). A study on the regulatory effect of the special water preservation area of lake Paldang watershed based on long-term variation of pollutant source and water quality, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 35(1), 43-54. [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]
- Kim, T. and Gil, K. (2011). Runoff characteristics of refractory organic matters from Kyongan river watershed during rainfall event and dry season, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 27(4), 397-404. [Korean Literature]
- Kong, D. (2017). Simple material budget modeling for the Paldang reservoir in the spring season, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 33(6), 696-714. [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, J. (2011). *A water quality modeling study to determine autochthonous BOD and denitrification in a large river system*, Master's Thesis, University of Ewha Womans, Seoul. [Korean Literature]
- Lee, J., Kim, J., Lee, J. K., Kang, L., and Kim, S. (2012). Current status of refractory dissolved organic carbon in the Nakdong river basin, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(4), 538-550. [Korean Literature]
- Lee, T. H., Lee, B., Hur, J., Jung, M. S., and Kang, T. G. (2010). Conversion of COD<sub>Mn</sub> 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., Paik, K., and Mun, Y. (2011). Contribution of NOD to total BOD<sub>5</sub> of effluent from biological sewage treatment plant, *Journal of Korean Society for Environment Analysis*, 14(1), 12-19. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2019). *Water Environment Information System (WEIS)*, <http://water.nier.go.kr> (accessed Jun. 2019).
- 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.
- Paredes, D., Kuschk, P., Mbvette, T. S. A., Stange, F., Muler, R. A., and Koser, H. (2007). New aspects of microbial nitrogen transformations in the context of wastewater treatment - A review, *Engineering in Life Science*, 7(1), 13 - 25.
- Park, H. K., Byeon M. S., Choi, M. J., and Kim Y. J. (2008). The effect factors on the growth of phytoplankton and the sources of organic matters in downstream of South-Han river, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 24(5), 556-562. [Korean Literature]
- Pauer, J. J. and Auer, M. T. (2000). Nitrification in the water column and sediment of a hypereutrophic lake and Adjoining river system, *Water Research*, 34(4), 1247-1254.
- Polak, J. (2004). Nitrification in the surface water of the Włocławek dam reservoir. The process contribution to biochemical oxygen demand (N-BOD), *Polish Journal of Environmental Studies*, 13(4), 415-424.
- Schwert, D. P. and White, J. P. (1974). Method for in situ measurement of nitrification in a stream, *Applied Microbiology*, 28(6), 1082-1083.
- 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 sewage effluent, *Analytical Science and Technology*, 23(1), 36-44.
- Yu, S., Cho, H., Ryu, C., Son, J., Park, M., and Lee, B. (2018). Characteristics of spatial and temporal organic matter in the Han river watershed, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 34(4), 410-423. [Korean Literature]