

한강수계 유기물의 시·공간적 분포 특성 비교

유순주[†] · 조항수 · 류인구 · 손주연 · 박민지 · 이보미

국립환경과학원 한강물환경연구소

Characteristics of Spatial and Temporal Organic Matter in the Han River Watershed

Soonju Yu[†] · Hangsoo Cho · Ingu Ryu · Juyeon Son · Minji Park · Bomi Lee

*Han-River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research
(Received 2 April 2018, Revised 17 July 2018, Accepted 20 July 2018)*

Abstract

The purpose of this study is to find the characteristics of organic matters based on the distribution and oxidation rates, as noted according to the spatial and temporal variations from 2008 to 2016. Generally speaking, the Han River system is separated into one lower course and two upper courses which are the Namhan River and Bukhan River. The seasonal factor is one of the most important causes of water quality changing in both of the upper courses as a result of a few pollution sources. The concentration of organic matter was measured as higher in the lower course into which great streams with point and non-point sources were identified. According to seasonal variations, however, the change of the organic matter in the lower course is comparatively slighter than that of organic matters in the upper courses. The oxidation rates related to the BOD were 15 %, 17 % and 26 % in the Bukhan River, Namhan River and the lower course, respectively. These results could be explained that more biodegradable organic matter were seen to have existed in the lower courses comparing to the activity in the upper course. The oxidation rates of the BOD were noted as relatively higher in the eutrophicated places with phytoplankton. Therefore the BOD is one of the good index models to find the characteristic of the eutrophicated water. On the other hand BOD would not be enough to estimate concentration of refractory organic matters in the Bukhan and Namhan river. Consequently, both of the TOC and BOD are necessary indices to understand the identified refractory and/or biodegradable characteristics of organic matter.

Key words : BOD, COD, Han River watershed, Organic matter, Oxidation rate, TOC

1. Introduction

과거 인구 증가와 도시 및 산업 발전으로 인한 수질오염은 과량의 유기물이 분해되는 과정에서 산소가 소모되어 어류 폐사 또는 악취 등이 발생되어 주로 용존산소를 소모하는 유기물 중심이었고 특히 생분해성 유기물이 수질관리의 대상이었다. 생분해성 유기물은 생성 및 소멸기작의 변화에 따라 용존산소가 매우 중요한 역할을 한다. 최근 하수처리율이 90 % 이상에 이르고 공공폐수처리시설이 확대되면서 공공수역에서 생물분해 가능한 생화학적산소요구량(Biochemical Oxygen Demand, BOD) 중심의 수질은 개선되고 있으나 화학적산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD)은 크게 개선되고 있지 않은 실정이다. COD는 난분해성 유기물까지 측정할 수 있는 지표로 간주되어 왔으나 유기물을 분해하는데 필요한 산소요구량을 총량적으로 반

영하는데 분석적 한계가 있으며 국제적으로도 일본을 제외하고 거의 사용하지 않는 점에서 적용에 많은 논란이 있어왔다(Kim, Jung et al., 2007; Rhew and Yu, 2015). 그럼에도 Park et al. (2013)은 금강, 영산강, 낙동강, 한강의 순으로 COD/BOD비가 증가하는 비율이 각각 97 %, 81 %, 78 %, 70 %를 차지하여 난분해성 유기물이 증가하는 것으로 보고하였다.

최근 수처리 및 최신 분석기술을 반영하여 복잡 다양해지는 유기물질의 특성을 정확하게 측정할 수 있고 사람이나 생태계에 미치는 영향까지 고려하는 새로운 유기물 지표 설정의 필요성이 제기되었다(Choi and Han, 2011). 과거 초기 수질해석을 위한 수치모형도 용존산소 중심의 QUAL 계열에서 점차 유기물의 심층적 이해와 수치해석의 발전으로 유기물을 입자성(Particulate), 용존성(Dissolved), 분해성(Labile), 난분해성(Refractory)물질로 개념화하여 적용되고 있다(Charpra, 1987; Charpra et al, 2012; Cole and Wells, 2013; NIER, 2004; NIER, 2005; NIER, 2013; Tera Tech, Inc., 2007; Thomann and Mueller, 1987). 이들 수치모형에서 유기물의 경계조건은 형태별로 직접 측정하지 못하고 기존 측정지표간의 관계나 특정시간 또는 공간에서의 결과를 참고하여 간접적으로 이용되고 있는 실정이다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
ysu1221@korea.kr

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.

공공수역에서 유기물을 보다 과학적이고 신속하게 평가하기 위하여 난분해성 물질의 관리적 측면과 정수처리 시 소독부산물의 전구물질로서 역할뿐 아니라 수생태계 유기물 기원을 규명하는 중요한 단서를 제공하고(Fry and Sherr, 1984; Mcknight et al., 1994; Leenheer and Huffman, 1979; Owens, 1987)호수나 하천의 영양 상태에 대한 정보를 제공(Amon and Benner, 1994.; Hama and Handa, 1980; Kim, Shin et al., 2007; Ochiai and Hanya, 1980; Thurman, 1985; Wetzel, 1972)할 수 있는 총유기탄소(Total organic carbon, TOC)가 2013년에 수질 및 수생태계 환경기준으로 적용되었다. 그간 유기물의 총량을 간접적으로 대표할 수 있었던 COD는 환경기준에서 2015년까지만 적용함으로써 현재는 기준에서 제외되었으며 모니터링 항목으로 평가되고 있다(ME, 2017a). TOC 환경기준은 하천과 호소를 구분하지 않고 등급별로 동일한 값으로 하천에서는 BOD를 함께 적용하며, 호소에서는 TOC만을 적용하고 있다. 하지만 물 환경에서 TOC에 의한 수질을 평가할 때 그간 축적된 BOD, COD와의 시공간적인 관계를 이해하고 이들 관계를 규명하여 기본적인 유기물의 특성을 이해하는 것이 필요하다.

TOC는 공공수역에서 2008년부터 측정되어 자료가 축적되기 시작하였고 일부 지점은 이보다 늦게 측정되었기 때문에 TOC와 기존 유기물 지표와의 관련성 연구는 많이 이루어져 왔음에도 단기간 또는 일부 소규모 수계 대상으로 경향 및 상관분석을 실시한 것이 대부분이다(Hwhang et al., 2016; Kim, Jung et al., 2007; Kim, Shin et al., 2007).

본 연구대상인 한강 수계는 유역면적이 25,954 km²로 남한의 총 유역면적 91,126 km²의 28.5%를 차지하며 큰 지류인 북한강과 남한강이 팔당호에서 합류하여 한강 하류를 지나 서해로 흘러나간다. 이들 지류는 지질학적 특성과 오염원의 양과 질, 하천 환경에 따라 수질의 차이를 보이고 있다. 지질학적 특성으로 북한강 유역은 선캄브리아 화강편마암과 중생대 화강암이 주된 기반암이 분포하며 하천수는 규산염암의 화학적 풍화에 의해 영향 받으며 남한강 유역은 동북부 캄브로-오르도비스기 석회암과 퇴적암이 주를 이루어 탄산염암의 풍화에 의해 영향 받고 있다(Ryu et al., 2008). 토지 유형별로 볼 때 북한강 유역은 산림이 대부분을 차지하는 반면 한강하류는 서울과 수도권 등 시가지 면적이 상대적으로 크게 차지하고 있다(ME, 2010). 따라서 한강 수계는 수계별 지질학적 특성과 토지 사용에 따라 유기물의 특성은 다르게 나타나므로 이들 관계는 시기와 공간에 따라 다를 수 있다. 본 연구에서는 한강 수계를 토지 이용도가 다른 남한강, 북한강 그리고 한강하류 수계로 구분하여 물환경측정망 자료를 이용하여 시공간적 유기물 지표의 분포를 알아보고 산화율과 이들 지표 간 상호관계를 규명하여 한강수계에서 유기물의 특성을 살펴보고자 하였다.

2. Materials and Methods

연구 대상 지점은 물환경측정망(ME, 2017a)에서와 같이 한강권역을 남한강 수계, 북한강 수계, 한강 수계(한강하류)로 구분하고 해당 중권역 대표지점으로 남한강 수계는 8개

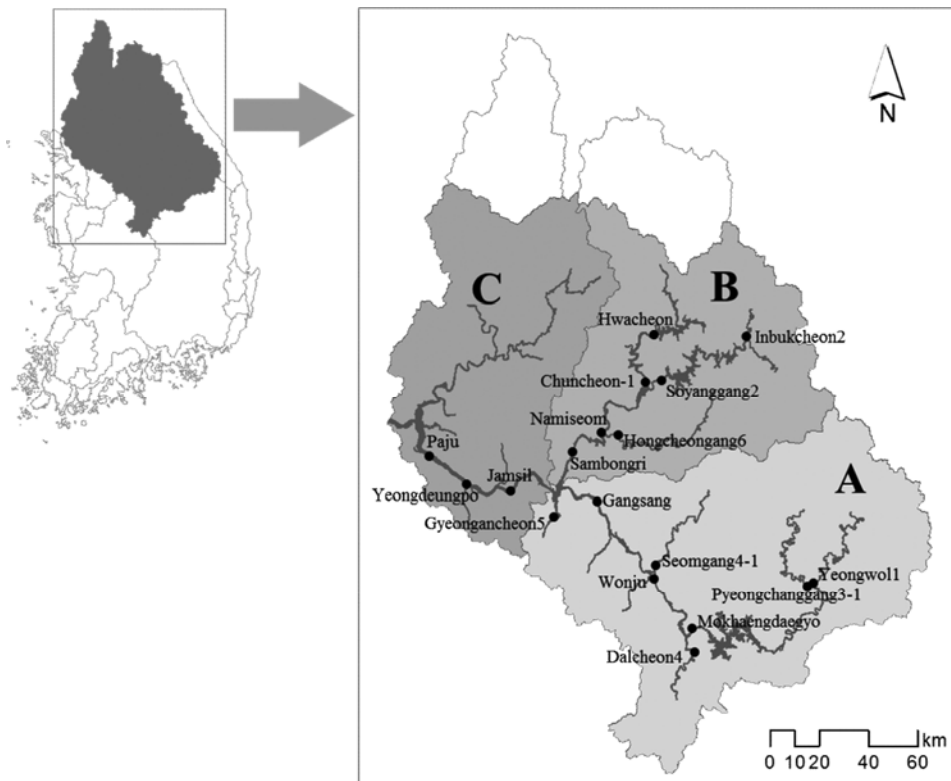


Fig. 1. Monitoring sites in the Mid-watershed of the Han River basin. (a) Namhan River watershed, (b) Bukhan River watershed, (c) Han River watershed downstream.

Table 1. Surveyed mid-watershed sites of each watershed in the Han River basin

Watershed	Sampling site*	Mark	Remarks
Namhan River	Yeongwol1	M-YW	
	Pyeongchang3-1	T-PC	
	Mokhaengdaegyo	M-MH	
	Dalcheon4	T-DC	
	Wonju	M-WJ	
	Seomgang4-1	T-SG	
	Gangsang	M-GS	
Bukhan River	Gyeongancheon5	T-GA	
	Inbukcheon2	T-IB	M: main stream
	Soyanggang2	T-SY	T: tributary
	Hwacheon	M-HwC	
	Chuncheon-1	M-CC	
Han River downstream	Namiseom	M-NM	
	Hongcheongang6	T-HC	
	Sambongri	M-SB	
	Jamsil	M-JS	
	Yeongdeungpo	M-YD	
	Paju	M-PJ	

*Name of mid-watershed based on the Water Quality Monitoring Program (ME, 2017b).

지점, 북한강 수계는 7개 지점, 한강 하류는 임진강과 한탄강은 제외한 3개 지점이 포함된다(Table 1, Fig. 1). 해당 수계별 토지이용 현황은 환경공간정보서비스(ME, 2010)를 이용하였으며 강우 및 기온 분포는 양평관측소 자료(KMA, 2017)를 토대로 2008년부터 2016년까지의 월 평균 자료를 사용하였다. 수질자료는 2008년부터 2016년까지 물환경측정망(ME, 2017b)에서 제공하는 BOD, COD, TOC, 클로로필-a(Chlorophyll-a, Chl-a), 총질소(Total Nitrogen, TN), 총인(Total Phosphate, TP) 등 6개 항목의 월평균값으로 이용하였다.

BOD와 COD의 산화율은 각각의 BOD와 COD에 총유기탄소로부터 환산한 총산소요구량을 나누어 구하였다. 이때 총산소요구량은 487개 유기화합물에 대한 산소(O₂)와 탄소(C)의 평균 몰비 1.24를 기준으로 산정하였으며 이는 수계의 유기물이 복잡 다양한 복합체로 이루어져 있어 단순한 산소요구량을 계산할 수 없기 때문이다(Choi et al., 2015).

상관분석은 SPSS 20.0을 이용하여 두 변수간의 관련성을 평가하는 보편적인 방법인 피어슨상관분석(Pearson correlation analysis)으로 적용하였다.

3. Results and Discussion

3.1 한강권역 유역 특성

한강권역을 남한강 유역, 북한강 유역 및 한강하류 유역으로 구분하여 토지이용 현황을 살펴보았다. 남한강 유역에 경안천 유역과 팔당댐 유역을 포함하였으며 한강하류 유역에는 팔당댐 하류부터 한강고양 유역까지 대상으로 하였다. 유역별 면적은 남한강이 13,012 km², 북한강 10,744 km², 한강하류 2,385 km²이며 토지이용 현황은 Fig. 2와 같이 남한강 유역은 산림이 78.3%이고 논과 밭이 15.5%, 시가지는 1.6% 정도이다. 북한강 유역은 산림이 87.0%, 논과 밭이 9.4%, 시가지가 0.8%를 차지하여 산림의 비율이 가장 높다. 한강하류 유역은 산림이 41.3%이고 논과 밭이 17.6%, 시가지가 27.1%로 시가지의 비율이 상대적으로 매우 높다. 특히 Fig. 3과 같이 한강하류 유역 중 영등포 지점까지 시가지의 면적은 486.4 km²로 전체 면적의 31.6%를 차지한다. 따라서 한강하류는 면적당 인구밀도가 높고 서울특별시를 중심으로 수도권 밖으로 축산업과 산업단지가 집중되어 있으며 하류에 대규모 환경기초시설의 방류구가 위치하고 있다(Choi et al., 2017). 2008년부터 2016년까지 연도별 연평균 기온 및 강우량 변화는 양평관측소를 중심으로 살펴본 결과 Fig. 4와 같이 9년간 연평균 강우량은 1,426.7 mm이고 2011년이 2,198.5 mm로 가장 높고 여름철의 강우량이 많은 비중을 차지하였다. 최근 2014년에서 2016년까지 연평균에 크게 못 미치는 것으로 나타났는데 2014년 790.1 mm, 2015년 801.5 mm, 2016년은 935.9 mm이고 평균 기온도 2014년 12.5 °C에서 2016년 13.0 °C로 3년간 연속한 가뭄으로 기온도 높았다.

3.2 한강수계 지점별 수질 분포

2008년부터 2016년까지 각 수계별 중권역 대표지점의 BOD, COD, TOC, TN, TP 및 Chl-a 월평균 농도는 Table 2와 같다. Fig. 1과 같이 남한강 수계는 본류인 영월1에서 평창강(평창강3-1)이 유입되어 목행대교를 흘러 달천(달천4)이 유입된다. 본류 원주지점을 거쳐 섬강(섬강4-1)이 유입되며 강상을 흘러 팔당호로 유입된다. 인근 경안천(경안

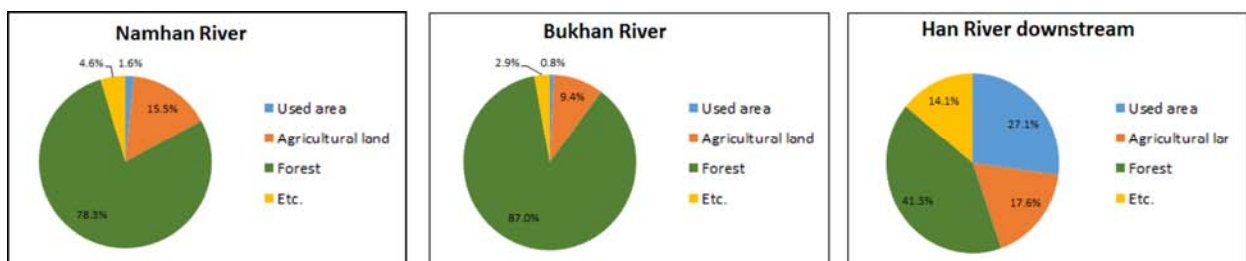


Fig. 2. Land use status of each watershed in the Han River basin.

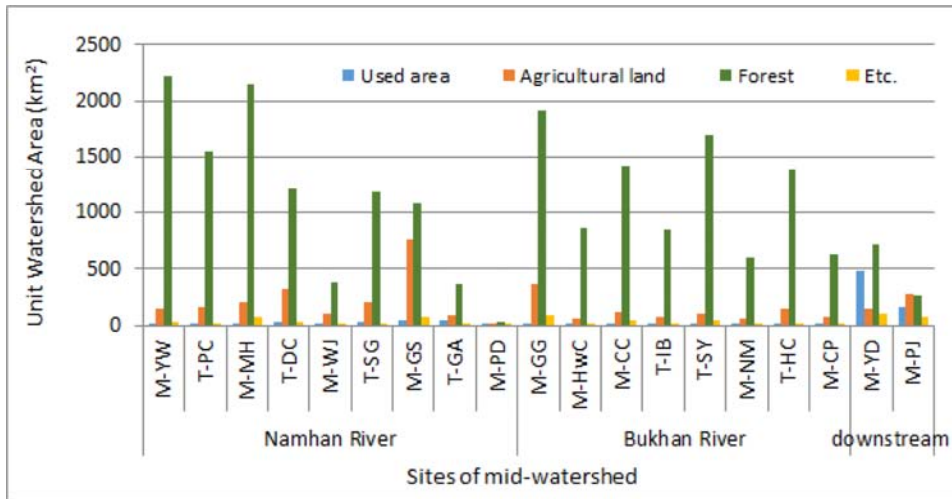


Fig. 3. The area of unit watershed in the Han River basin.

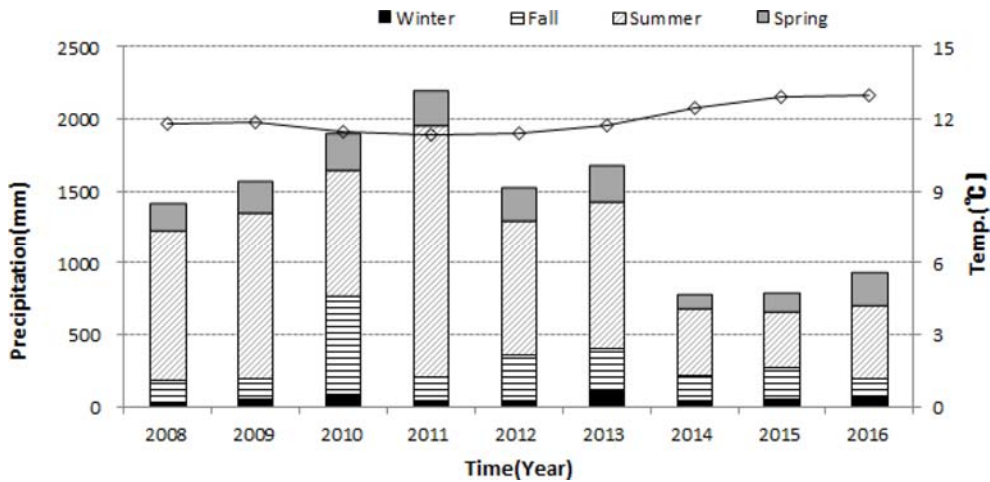


Fig. 4. Annual variation of mean temperature and annual precipitation at the Yangpyeong station.

천5)은 남한강 수계에 포함하였다. Table 2의 지점별 평균 BOD 농도는 달천 유입 전 본류인 목행대교에서 0.7 mg/L 이고 달천(1.0 mg/L)이 유입한 원주지점에서 BOD 0.9 mg/L 로 약간 증가를 하였으나 섬강(1.6 mg/L) 유입 후 강상지점에서 1.6 mg/L로 크게 증가하였다. 섬강 이후 BOD 뿐 아니라 TOC 등 모든 항목에서 농도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 경안천(경안천5)은 BOD 2.8 mg/L이고 다른 항목도 다른 지점에 비하여 가장 높은 농도 분포를 보이고 있다.

북한강 수계에서는 인북천(인북천2)과 소양강(소양강2)이 합류하여 본류인 화천지점에서 춘천-1지점까지 BOD 1 mg/L 이하로 약간의 농도 증가를 보였으나 북한강 하류 지점 삼봉리에서 0.9 mg/L로 BOD 농도 변화는 크지 않았다. TOC 도 유사한 경향을 보이며 삼봉리 1.6 mg/L로 나타났다. 한강하류 수계에서는 영등포지점과 파주지점을 지나면서 급격한 농도 증가를 보이고 있다. 파주지점에서 BOD는 4.3 mg/L, COD 7.7 mg/L, TOC 3.5 mg/L, TN 6.000 mg/L, TP 0.305 mg/L, Chl-a 28.7 mg/m³로 한강 수계에서 가장 높은 수치를 보여주고 있다.

중권역 대상지점의 시기별 BOD, COD와 TOC의 농도변

화를 토대로 계절적 변동성과 항목간의 간격을 살펴보면 Fig. 5와 같이 남한강 수계에서는 평창강지점(b)에서 모든 항목이 계절별 변화를 뚜렷하게 보이고 농도의 변화 폭도 일정한 경향을 보이는데 이 유역은 남한강 상류로 산림이 87.6% 이상을 차지하여 오염원의 영향이 상대적으로 적고 강우 등 계절적 요인이 주로 영향을 미치기 때문으로 판단 된다. 지천인 달천(d)은 논과 밭, 시가지 등의 토지 이용도가 상류에 비하여 증가하며 수질의 계절적 변동이 뚜렷하지 않고 안정적이지 않다. 섬강(f)은 토지이용도면에서 산림이 52.4%로 낮으며 상대적으로 논과 밭, 시가지의 비율이 높은 유역으로 수질의 계절적 변동성이 있으나 시기별 농도의 증가폭이 크다. 섬강 합류 후 본류 강상지점(g)은 계절적 변동성을 보이며, 상류 본류인 원주(e)에 비하여 TOC와 BOD가 증가하고 다소 농도의 변화폭은 크며 유기물 항목간의 농도가 유사하게 반응하고 있다. 경안천지점(h)은 계절적 수질의 변동폭이 크고 BOD에 비하여 COD와 TOC 농도가 높은 특징이 있다.

북한강 수계는 유역의 토지 이용면에서 소유역별 산림이 80% 이상을 차지하고 수질은 계절적 변동을 보이며 남한

Table 2. Average concentration of water quality data in the monitoring sites (periods 2008-2016)

Watershed	Mark	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TOC (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)
Namhan River	M-YW	0.8±0.5	2.4±1.1	1.9±0.8	2.970±0.784	0.020±0.020	3.1±3.8
	T-PC	0.8±0.4	2.9±0.8	1.7±0.5	3.009±0.779	0.020±0.015	2.9±3.6
	M-MH	0.7±0.4	2.6±0.6	1.9±0.6	2.526±0.502	0.027±0.032	3.2±2.6
	T-DC	1.0±0.4	3.3±1.0	2.3±0.7	2.432±0.969	0.035±0.033	3.8±2.7
	M-WJ	0.9±0.3	3.3±0.6	2.1±0.5	2.285±0.312	0.030±0.019	6.8±4.7
	T-SG	1.6±0.7	4.7±1.3	2.9±1.0	3.341±1.249	0.109±0.063	12.0±10.9
	M-GS	1.6±0.9	4.1±0.9	2.4±0.6	2.453±0.394	0.050±0.028	13.7±12.1
	T-GA	2.8±1.6	6.1±1.7	2.8±0.7	4.890±2.027	0.101±0.068	30.5±31.7
Bukhan River	T-IB	0.7±0.4	2.9±1.0	1.6±0.6	1.831±0.536	0.032±0.058	2.8±2.7
	T-SY	0.4±0.2	2.7±0.4	1.7±0.3	1.637±0.189	0.015±0.015	1.9±0.8
	M-HwC	0.5±0.9	2.5±1.7	1.5±0.4	1.231±1.221	0.013±0.037	4.7±18.7
	M-CC	0.9±0.6	2.7±0.8	1.8±0.8	1.738±0.652	0.022±0.028	4.2±4.2
	M-NM	1.1±0.6	3.3±0.7	1.6±0.3	1.664±0.344	0.019±0.012	9.4±6.4
	T-HC	0.8±0.5	3.1±0.7	1.8±0.5	2.687±0.773	0.019±0.013	3.7±7.0
	M-SB	0.9±0.3	3.4±0.5	1.9±0.4	1.784±0.288	0.021±0.010	9.7±6.0
Han River downstream	M-JS	1.4±0.8	3.9±1.0	2.0±0.4	2.304±0.605	0.041±0.041	19.1±16.6
	M-YD	2.6±1.5	5.3±1.4	2.6±0.7	4.058±1.416	0.171±0.083	27.4±30.2
	M-PJ	4.3±2.0	7.7±2.6	3.5±0.9	6.000±2.386	0.305±0.148	28.7±30.8

강 수질에 비하여 비교적 안정적으로 낮고 항목별 일정한 간격을 유지하고 있다(Fig. 6). 소양강(b)은 토지이용도 중 산림의 비율이 91.3%로 매우 높아 BOD 농도가 1 mg/L 이하의 낮은 농도이고 TOC 농도도 연중 2 mg/L 이하이며 계절적인 변화도 작다. 춘천지점(d)은 전체적인 수질농도는 높지 않으나 2014년부터 그 농도가 증가하고 항목간의 변동이 불안정한 경향을 보인다. 또한 여러 지류의 영향과 여러 유기물 유입의 영향을 받는 본류로서 지류에 비해 계절적인 특성이 비교적 두드러지게 나타나지 않는다. 특히 본류 하류 구간인 삼봉지점(g)은 계절적 요인에 의한 변동은 상대적으로 크지 않고 항목간의 변동 폭도 안정적이다.

남한강과 북한강의 계절적 영향의 크기가 산림이 주를 이루는 지류와 비교적 복잡한 토지이용도를 가지는 본류에서 다르게 나타나지만, 전체적인 수질 특성은 수계별로 유사한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 반면 한강하류 수계는 전체적으로 농도가 높고 Fig. 7과 같이 잠실지점에서는 '15년과 '16년에 수질이 불안정한 경향을 보이며 영등포 지점을 지나면서 수질 변동이 매우 급격히 변화하고 계절적 경향이 나타나지 않는다. 파주지점에서는 수질농도가 높고 수질변화가 크다. 한강하류로 갈수록 BOD와 TOC의 농도 분포가 유사한 수준을 나타내고 있다.

따라서 점오염원이 비교적 적은 경우, 강우로 인한 비점오염물질의 유입 또는 조류가 과다 발생할 때 계절적 영향과 유기물 항목간의 변동이 유사하게 나타나고 있으나 '14년부터 '16년과 같이 평년 강우량에 못 미치는 갈수해의 경우 계절적 특성이 두드러지지 않는다. 점오염원의 영향이 큰 도시하천의 경우 계절적인 영향이 상대적으로 작아지고

유기물 항목간의 변동이 일정하지 않다.

3.3 남한강, 북한강 및 한강하류 수질변화

수질평가 시 강우 등 기후적인 요소에 따라 초기 강우의 영향으로 수질 농도가 증가할 경우 연평균 수질 농도도 증가한다. 본 연구에서는 유기물 농도별 추세 경향을 비교하기 위하여 평균농도와 퍼센타일 농도를 함께 비교하였다. 퍼센타일에 의한 수질평가는 일본 등 외국에서 유기물질 달성도 평가 시 적용되고 있다. 일본의 경우 75퍼센타일 수준이 기준을 만족하면 수질기준을 달성한 것으로 간주하며 우리나라는 TOC기준 설정 시 등급별 BOD와 COD 기준값에 해당하는 퍼센타일을 구하여 해당 TOC의 농도로 검토한 바 있다(Choi and Han, 2011). 유기물의 수질 변화 추세를 장기간의 5퍼센타일, 50퍼센타일, 90퍼센타일 농도로 구하여 평균값과 비교하였다(Fig. 8).

남한강 수계에서 BOD의 분위수 농도는 연도별 '14년 이후 증가하고 '16년에 감소하는 경향을 보이고 있으며 대부분 퍼센타일별 농도 변화가 유사하다. 평균 농도는 50퍼센타일 농도보다 높은 것으로 나타나 고농도 수질이 평균 수질에 영향을 주고 있다. COD는 BOD에 비하여 연도별 농도 변화가 크지 않으나 '14년 증가하여 16년에 감소하는 패턴과 중앙값과 평균값이 유사하다. TOC는 연도별 변동이 BOD와 COD에 비하여 크고 '12년, '14년과 '16년에 증가하는 경향을 보인다. TOC는 중앙값과 평균값이 유사하여 고농도 또는 저농도의 수질이 평균값에 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

북한강 수계에서는 유기물 농도가 세 개의 수계 중 가장 낮고 연도별 변화가 크게 나타나지 않았다. 유기물의 중앙

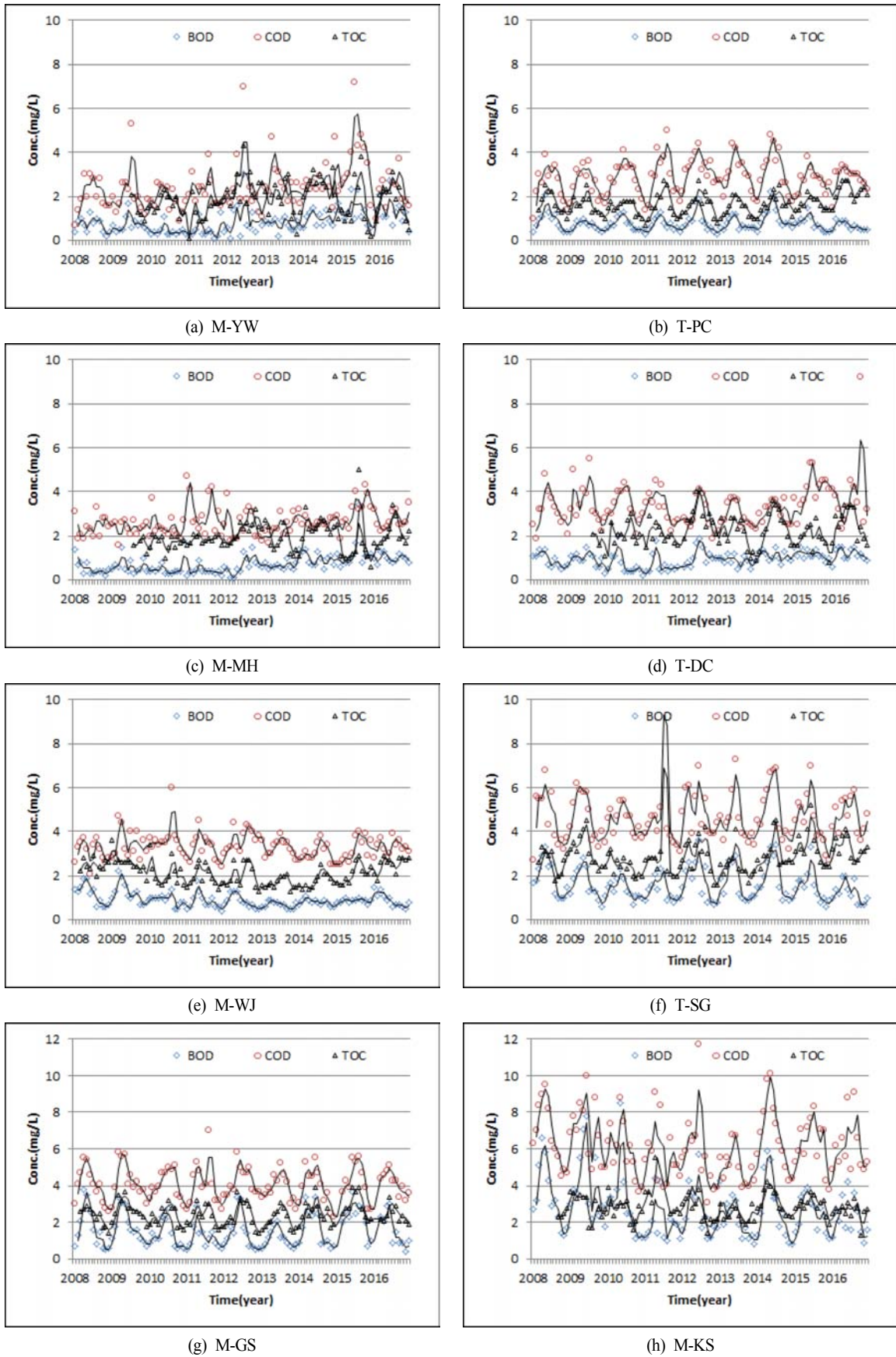


Fig. 5. Water quality variation of BOD, COD and TOC at mid-watershed in the Namhan River during 9 years (2008 ~ 2016).

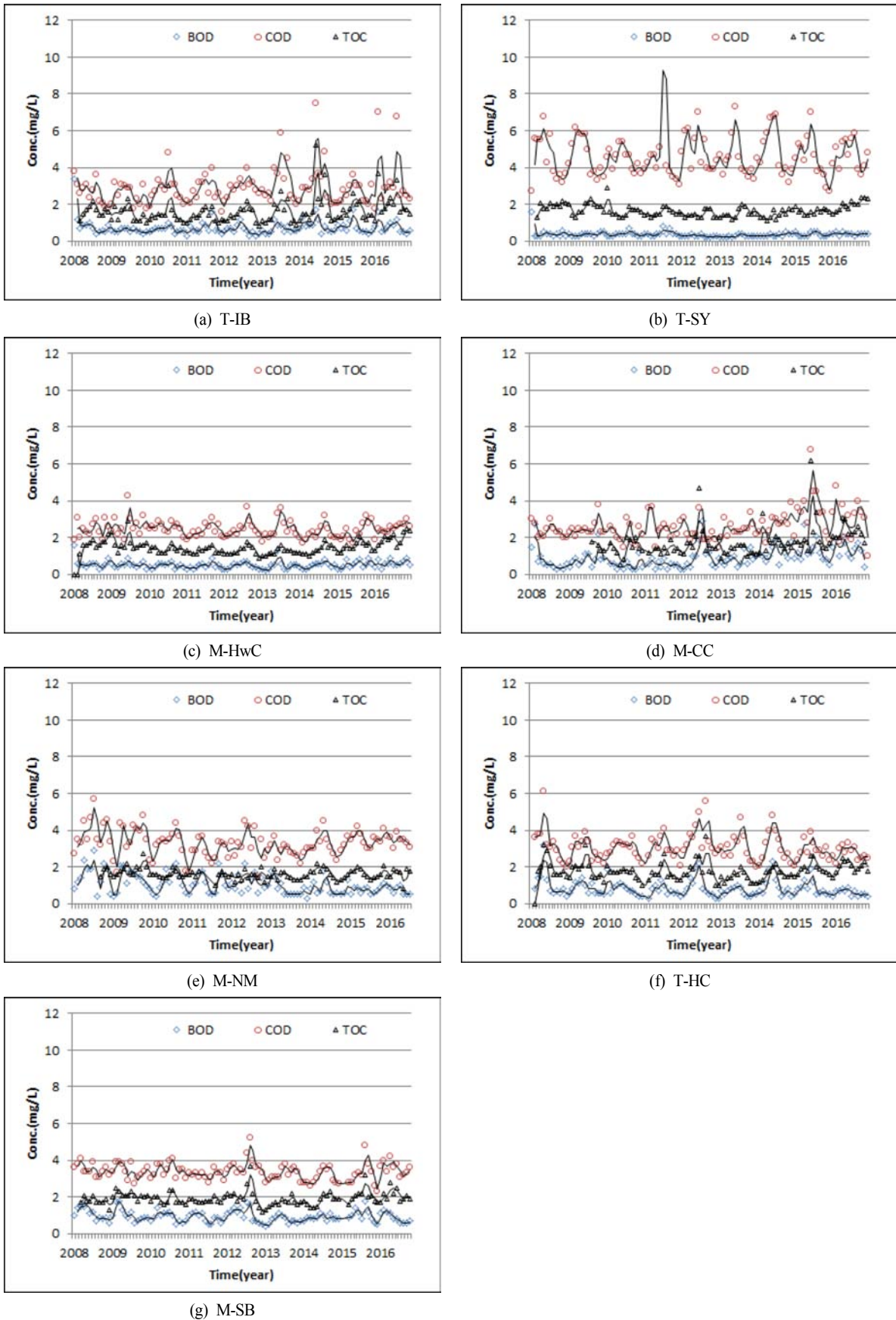


Fig. 6. Water quality variation of BOD, COD and TOC at mid-watershed in the Bukhan River during 9 years (2008 ~ 2016).

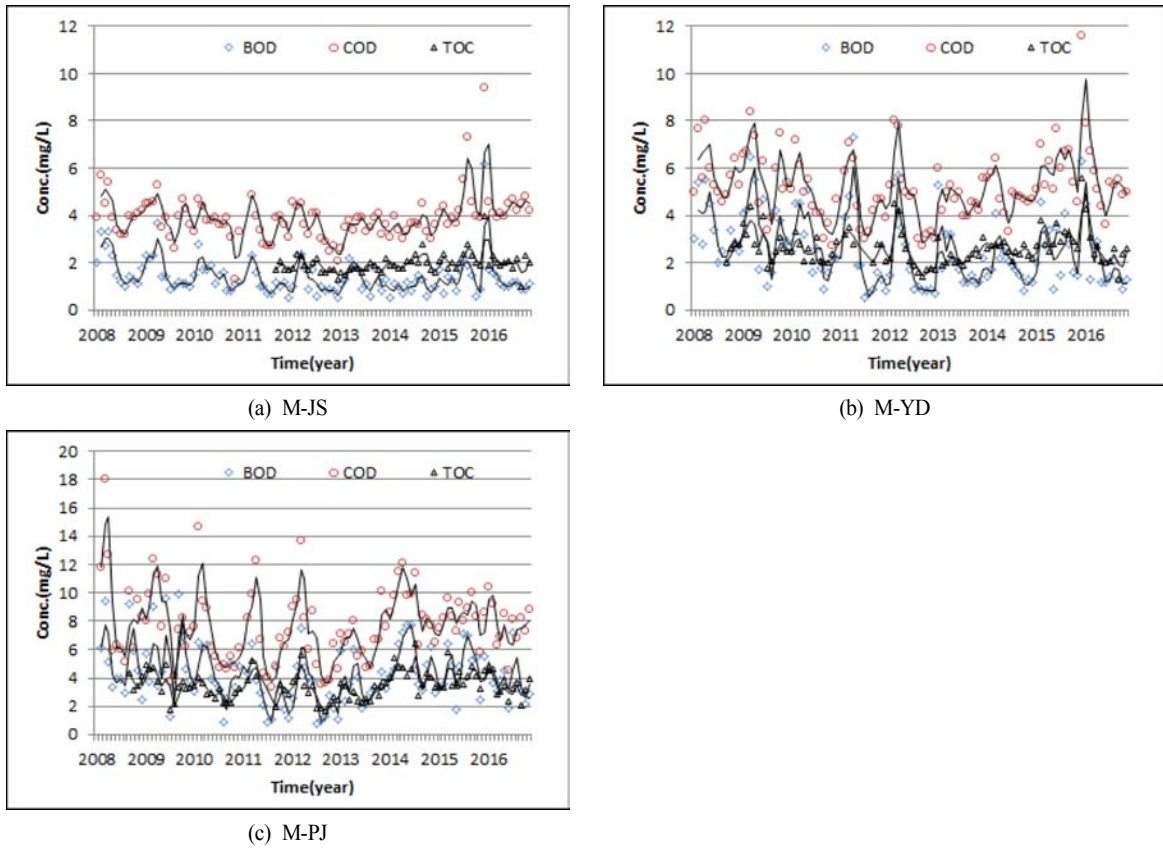


Fig. 7. Water quality variation of the BOD, COD and TOC at the downstream of the Han River during 9 years (2008 ~ 2016).

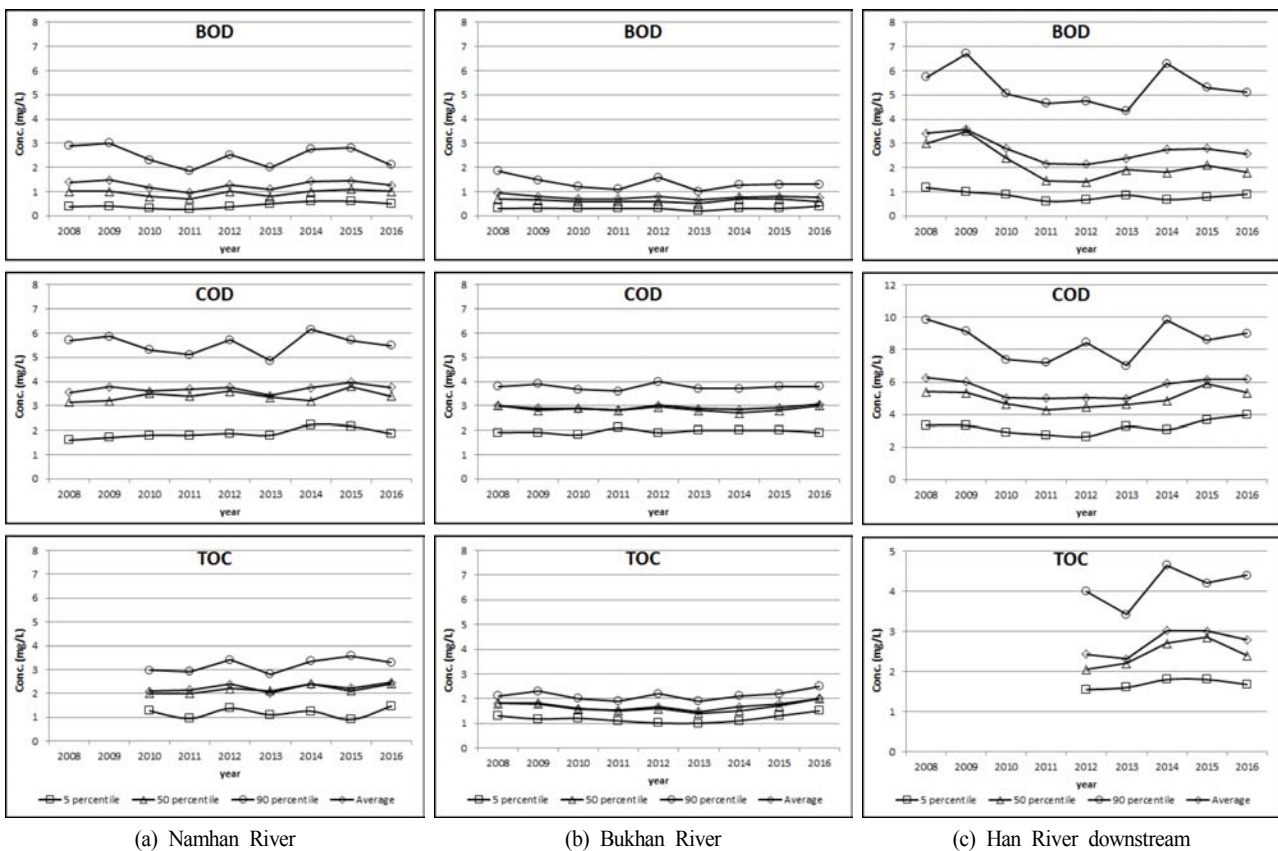


Fig. 8. Water quality variation in each watershed of the Han River basin.

값과 평균값의 차이가 거의 없으나 TOC는 '14년부터 5퍼센타일 농도 뿐 아니라 90퍼센타일 농도에 이르기까지 증가하는 경향을 보이고 있어 비점오염원 등에 의한 난분해성유기물의 영향이 TOC 농도에 영향을 미치나 BOD와 COD에는 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.

한강하류는 연도별 수질변화가 상대적으로 크며, BOD는 5퍼센타일 농도 수준은 유지되고 있으며 평균값이 중앙값보다 높아 고농도 수질이 영향을 미치며 COD는 각 분위수별 '14년 이후 증가하는 경향을 보이고, TOC는 '14년에 증가하다가 '16년에 감소 경향을 보이고 있다. 한강하류는 대부분 평균값이 중앙값보다 높아 고농도 수질의 영향이 있으며 고농도 뿐 아니라 저농도 수준의 수질도 북한강과 남한강에 비하여 높다.

3.4 한강수계 유기물 지표의 산화율 비교

산화율은 유기물의 생분해도 및 구조, 기원에 따라 다양하게 나타나는 것으로 알려져 있다(Lai et al., 2011). 따라서 산화율 비교를 통해서도 유역으로 유입된 유기물의 개략적인 특성을 비교할 수 있어 매우 유용하다. 전체 유기물에 대한 BOD와 COD에 의한 산화율을 계산하기 위해서 Kim, Jung et al. (2007)은 유기물 산화 시 소비되는 산소(O₂)와 산화되는 탄소(C)의 몰 비인 1.1을 이용하여 호소와 하천에서 BOD와 COD를 탄소의 양으로 환산하여 BOD-C, COD-C로 산정하였다. 하지만 최근 487개 유기화합물질을 대상으로 이론적인 산소요구량과 이론적 총유기탄소를 구하여 산소/탄소의 몰 비를 구한 결과 평균 1.24(Choi et al., 2015)로 제시하고 있어 본 연구에서는 총유기탄소를 기준으로 총산소요구량을 구하여 BOD와 COD의 산화율로 계산하였다.

BOD의 산화율은 Fig. 9에서와 같이 남한강 수계는 14.1~21.8%, 평균은 16.8% 정도이고, 북한강은 11.6~14.4%으로 평균은 13.4%, 한강하류 수계는 23.6~29.7%, 평균 26.1% 였다. 대부분 30% 미만의 비율을 보이고 있으나 북한강이 15% 미만으로 가장 낮고 다음이 남한강, 한강하류가 26.1%로 가장 높게 나타나고 있다. 북한강 수계는 토지 이용 면에서 산림지역의 비중이 크기 때문에 산림기원 유기물의 영향으로 생물학적 분해면에서 난분해 경향을 보이며 난분해성유기물이 많은 경우 BOD에 의한 산화가

충분하지 못함을 알 수 있다. 난분해성물질은 기원별로 다양한 분포를 보이는데 Jung et al. (2009)은 기원별로 난분해성 물질이 8~100%의 분포를 보이며 계곡, 퇴적물, 논 토양, 밭 토양, 방류수 기원의 시료는 80% 이상이고 생물학적 기원을 갖는 축산, 갈대, 잡초, 조류, 부차조류 기원의 시료에서는 20% 정도의 낮은 분포를 갖는다고 하여 산림 또는 토양 기원의 유기물이 난분해 경향을 보인다.

연도별로 볼 때 남한강과 한강하류에서 산화율의 변동 폭이 다소 크게 나타나지만 북한강은 변동 폭이 크지 않다. 이전 연구(Kim, Jung et al., 2007)에서는 한강수계 일부 하천과 호소에서 BOD 산화율이 20%정도 내외로 낮다고 하였고, 국내 몇 개 호수에서도 약 18% 정도로 보고하였으나 본 조사결과 한강하류에서는 20% 이상을 보이고 있어 유역 특성에 따라 BOD 산화율에 차이가 있음을 알 수 있다. 한강하류는 대규모 하수처리시설이 위치하고 있으며 도로망의 발달과 많은 교통량 등으로 생활계 하수 및 도로 비점오염원 등 다양한 경로로부터 생물학적 분해가능한 오염물질이 상대적으로 증가하여 BOD 산화율 증가에 기여하는 것으로 판단된다. Jeong et al. (2016)은 하수처리시설 처리용량 500 m³/일 이상 311개소 방류수의 BOD 산화율이 11.8%이고 COD 산화율은 35.4%로 통계적 상관성은 낮지만 BOD 산화율이 낮은 것으로 보고하고 있으나 미처리 하수 또는 폐수 등 오염물질이 유입될 경우 산화율은 상대적으로 커질 수 있다. 대도시 차량 운행에 따른 배기가스, 타이어 등에서 배출의 영향으로 입자상 오염물질, 중금속, 오일류 등과 같은 도시 비점오염물질의 함량이 높은 특징이 있기 때문에(Kim and Kang., 2004) 강우 초기에 이들이 매우 높은 농도로 유출될 수 있다. 차량 등에 배출되는 오염물질 중 탄화수소류는 이론적탄소량에 대한 이론적산소요구량의 비가 다른 화학물질 그룹에 비하여 높은 편에 속하여(Choi et al., 2015) 이들 물질이 비교적 많이 함유할 경우 BOD 또는 COD 산화율은 높게 나타날 수 있다. Yu et al. (2005)도 금강 수계를 대상으로 상류 호소와 하류 하천에서 이분해성 유기탄소와 난분해성 유기탄소의 비율 변화에서 하류로 갈수록 하류 유입지천 등으로부터의 도시생활계의 영향으로 분해성 유기물이 증가하는 것으로 보고한 것과 유사하다. 즉 도시하천의 경우 분해성 유기물질이 증가하여 상대적으로 BOD에 의한 산소요구량도 증가하는 것

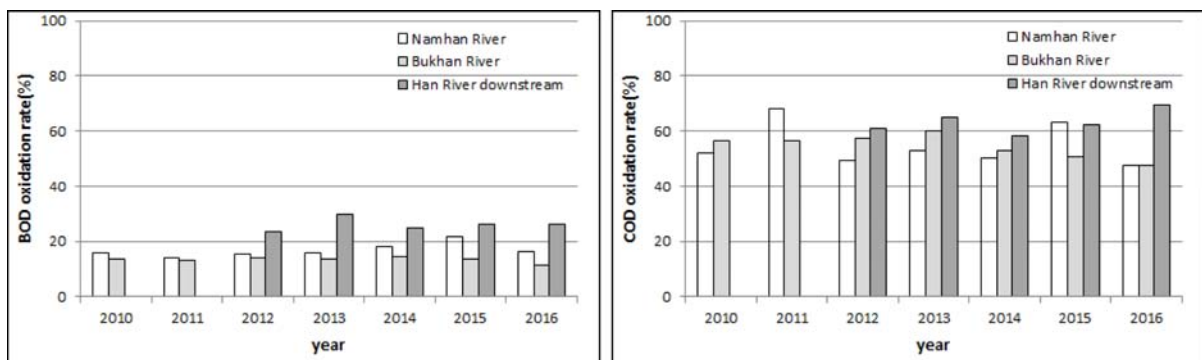


Fig. 9. Annual variation of oxidation rate in each watershed of the Han River basin.

으로 생각할 수 있다. 이와 같이 BOD가 절대적인 유기물의 양을 판단하는 데는 과소평가될 수 있는 지표이지만 생물분해 가능한 수준 또는 인위적인 오염원의 유입 영향을 알려주는 정보로서 유용하다고 판단된다.

COD에 의한 산화율은 남한강은 47.5~67.9%이고 평균 54.8% 정도였으며, 북한강은 47.6~60.2%이고 평균 54.5%, 한강하류는 58.1~69.5%, 평균 63.2%로 북한강과 남한강이 유사한 값을 보이며 한강하류로 갈수록 높게 나타나고 있다. Kim, Shin et al. (2007)은 한강 수계 일부 지점의 COD 산화율이 하천에서 약 30~75%, 호수에서도 30~50% 정도로 보고하여 본 결과보다 일부 높게 보고되었다. 북한강과 남한강이 합류하는 팔당호의 댐 앞 지점에서 COD 산화율이 59.2±9.5%로 보고하여(Hwang et al., 2016) 북한강과 남한강의 범위에 포함된다. 팔당호는 체류시간이 비

교적 짧은 하천형 호수로 남한강과 북한강의 수질 특성에 직접적으로 영향 받기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 10(a)에서와 같이 남한강은 갈수기 또는 건기에 해당하는 3월에서 6월까지 BOD 산화율이 증가하다가 강우기인 7월부터 감소하는 것으로 나타나고 있다. Chl-a 증가 패턴으로 볼 때 내부생산에 의한 유기물은 생물학적 분해가 용이한 반면 강우에 의한 난분해성 유기물에 의한 영향은 생물학적 분해가 쉽지 않아 BOD로 반영되지 않고 있다. Park et al. (2008)은 남한강을 구간별로 BOD와 Chl-a 간의 상관관계에서 유속이 느린 전이대 구간과 호수 구간에서 높은 상관관계를 보여 식물플랑크톤의 현존량 즉 내부유기물 생산이 수역의 유기물 오염의 주요 기원이며 연간 BOD가 높은 봄철 갈수기에 BOD와 Chl-a의 상관관계가 높게 나타난다고 하였다. Gil et al. (2011)은 건기 시 남한강의 난분해성 용존유기탄소가 전체 중 약 73%를 차지하나 강우기에 증가하는 것으로 보고한 바와 같이 조사 결과 강우기에도 BOD에 의한 산화율이 감소되는 것으로 나타나 외부 기인에 의한 난분해성 유기물의 증가가 BOD로 잘 반영되지 않음을 알 수 있다.

Fig. 10(b)에서와 같이 북한강에서 유기물의 산화율을 월별로 살펴보면 BOD의 산화율이 가장 높은 시기에도 20%를 넘지 않으나 Chl-a 농도에 따라 변화하고 있다. 남한강과 마찬가지로 BOD 산화율은 계절별 변동을 보이며 COD 산화율은 계절적 특징을 남한강에 비하여 잘 보여주고 있다. 오히려 갈수기 조류의 현존량이 높지 않은 시기에 COD 산화율이 증가하는 경향은 난분해성 유기물의 비율이 남한강에 비하여 높기 때문으로 사료된다.

한강하류의 경우(Fig. 10(c))는 Chl-a 농도가 10 mg/m³ 이상이고 오염물질 농도가 상대적으로 높아 BOD 산화를 뿐만 아니라 COD의 산화율도 증가하였다. 여름 강우뿐 아니라 도시 하천으로부터 오염 배출량이 지속적으로 유입되기 때문에 남한강과 북한강의 양상과는 다르게 BOD와 COD의 경향이 유사하게 변화한다.

3.5 TOC, COD, BOD의 비율과 상관관계

한강의 수계별 수질인자 간의 상관성을 살펴본 결과를 Table 3과 Fig. 11에 나타내었다. 남한강 수계에의 유기물(BOD, COD, TOC)간 상관계수는 0.562~0.803으로 북한강 수계의 0.454~0.658에 비해 높게 나타났다(Table 3). 이는 Fig. 11에서 보는바와 같이 남한강에 비해 북한강의 수질농도가 낮고 하천특성 상 호소가 많아 일반적 하천과 호소의 영향을 함께 받기 때문으로 사료된다. 한강 하류의 경우 0.776~0.890으로 상류인 남한강과 북한강에 비해 높게 관찰되었으며, 상류 수계에서는 낮게 나타났던 BOD와 TOC의 상관계수가 0.776으로 높게 나타났다. 또한 영양염류와 유기물과의 상관계수를 살펴보면 남한강은 TN이 0.127~0.266, TP가 0.474~0.594이고, 북한강은 TN이 0.102~0.142, TP가 0.165~0.432로 유기물의 상관계수와 마찬가지로 북한강이 낮게 관찰되었다. 한강하류의 경우 TN이 0.587~0.725, TP가 0.665~0.692로 상류 수계에 비해 높

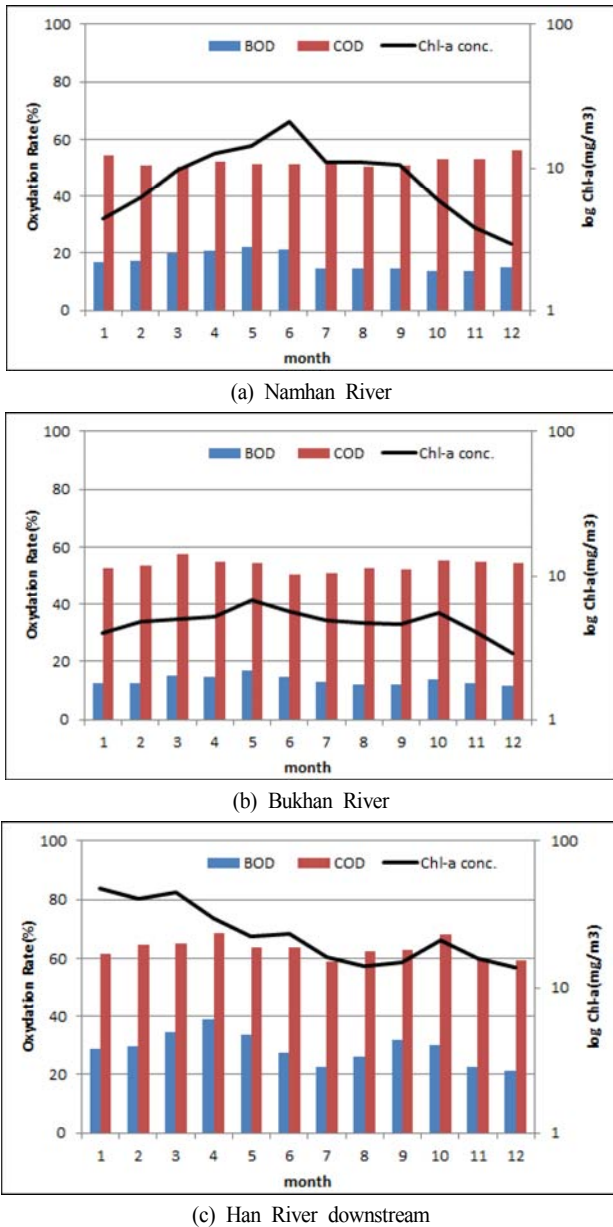


Fig. 10. Averaged monthly variation of oxidation rate in the Han River basin.

Table 3. The relation coefficients between the water quality index in each watershed of the Han River basin

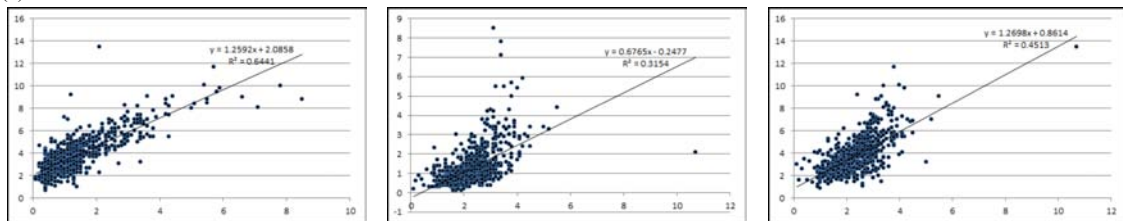
		BOD	COD	TOC	TN	TP	Chl-a
Namhan River	BOD	1	.803*	.562*	.235*	.510*	.795*
	COD		1	.672*	.266*	.594*	.723*
	TOC			1	.127*	.474*	.438*
	TN				1	.400*	0.047
	TP					1	.370*
	Chl-a						1
		BOD	COD	TOC	TN	TP	Chl-a
Bukhan River	BOD	1	.579*	.454*	.142*	.165*	.580*
	COD		1	.658*	.124*	.432*	.488*
	TOC			1	.102*	.404*	.314*
	TN				1	0.065	-0.008
	TP					1	.118*
	Chl-a						1
		BOD	COD	TOC	TN	TP	Chl-a
Han River downstream	BOD	1	.819*	.776*	.587*	.665*	.534*
	COD		1	.890*	.722*	.692*	.503*
	TOC			1	.725*	.685*	.546*
	TN				1	.744*	.296*
	TP					1	.291*
	Chl-a						1

*p < 0.01

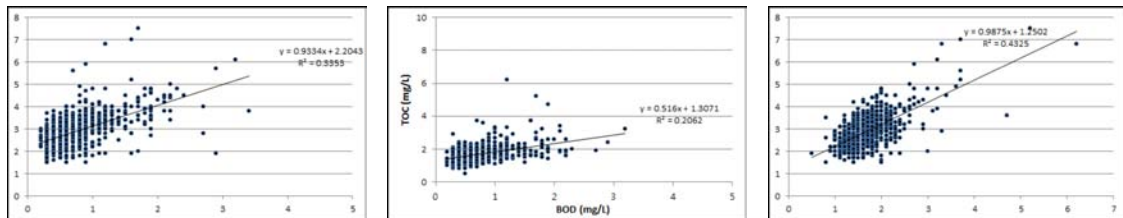
게 나타났다. 이는 한강하류 유입 하천의 특성이 비교적 생물분해 가능한 유기물의 비중이 높고 영양염류도 고농도로 포함되기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 동일한 수계에서도 유기물 배출 특성이 다른 하천 또는 호소를 함께 상관분석을 할 경우 항목간의 상관성이 낮아질 수 있다.

TOC에 대한 BOD와 COD의 비는 Table 4 및 Fig. 12와 같이 남한강 수계에서는 각각 0.55(0.44 ~ 0.72), 1.78(1.57 ~ 2.09)이고 북한강 수계에서는 각각 0.44(0.38 ~ 0.48), 1.80(1.57 ~ 1.99)이며 한강하류에서는 0.86(0.78 ~ 0.98), 2.09(1.92 ~ 2.30)로 나타났다. 순서로 보면 BOD/TOC 비는 북한강(0.44) < 남한강(0.55) < 한강하류(0.86)이고, COD/TOC 비는 남한강(1.78) < 북한강(1.80) < 한강하류(2.09)의 순이다. 이때 남한강과 북한강, 남한강과 경안천, 북한강과 경안천을 t-test 하였을 때, BOD/TOC와 COD/TOC 각각의 p-값은 남한강과 북한강의 COD/TOC(0.08)를 제외하면 모두 0.001 이하로 통계적으로 차이를 확인하였다. COD/TOC 비는 수계에서 유사한 편이지만 BOD/TOC 비는 수계별 차이가 크게 나타나는데 난분해성 유기물의 비중이 큰 북한강에 비하여 한강하류에서 BOD/TOC 비가 약 2배 정도 증가하는 것으로 나타났다. Kim, Shin et al. (2007)의 결과에서도 부영양화할수록 내부생산에 의한 영향으로 BOD/TOC의 비가 높은 것으로 밝히고 있어 BOD/TOC의 비가 높은 한강하류도 도시하천이 유입되고 말단에 대규모 하수처리시설이 위치하며, 도시 비점에 의한 영향으로 부영양화 된 상태라 할 수 있다. 또한 Choi et al. (2015)의 산업폐수 방류수 대상으로 BOD/TOC가 0.7, COD/TOC는 1.9라는 것과 비교할

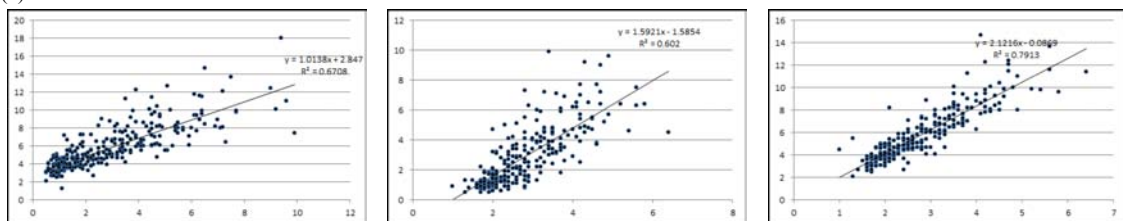
(1) Namhan River



(2) Bukhan River



(3) Han River Downstream



(a) BOD and COD

(b) BOD and TOC

(c) COD and TOC

Fig. 11. Scatter plot of BOD, COD and TOC in each watershed.

Table 4. The comparison of BOD/TOC and COD/TOC ratio in each watershed of the Han River basin

Nanhan River		Bukhan River		Han River downstream	
BOD/TOC (mgO ₂ ·L ⁻¹ /mgC·L ⁻¹)	COD/TOC (mgO ₂ ·L ⁻¹ /mgC·L ⁻¹)	BOD/TOC (mgO ₂ ·L ⁻¹ /mgC·L ⁻¹)	COD/TOC (mgO ₂ ·L ⁻¹ /mgC·L ⁻¹)	BOD/TOC (mgO ₂ ·L ⁻¹ /mgC·L ⁻¹)	COD/TOC (mgO ₂ ·L ⁻¹ /mgC·L ⁻¹)
0.55 (0.44 ~ 0.72)	1.78 (1.57 ~ 2.09)	0.44 (0.38 ~ 0.48)	1.80 (1.57 ~ 1.99)	0.86 (0.78 ~ 0.98)	2.09 (1.92 ~ 2.30)

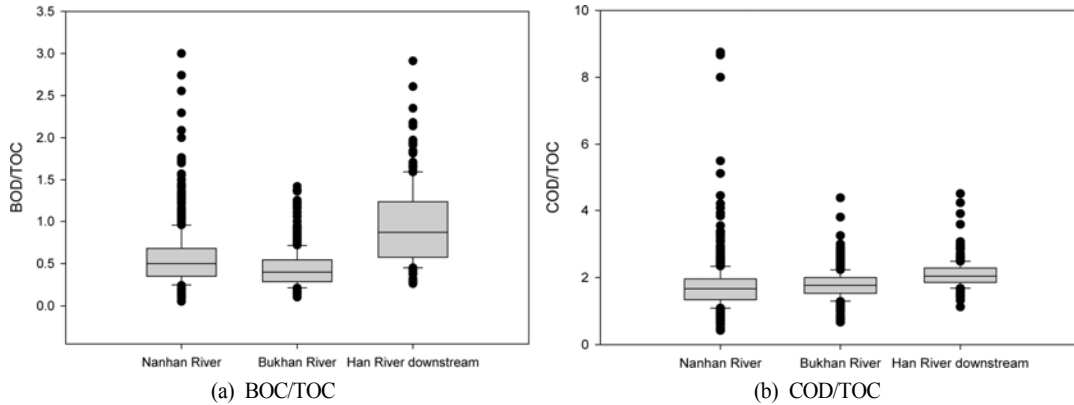


Fig. 12. Box plot of (a) BOD/TOC and (b) COD/TOC in each watershed.

때 BOD/TOC비는 오염원 특성에 따라 다르게 나타나지만 COD/TOC는 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 일반적으로 과망간산칼륨을 이용하여 유기물을 분해하는 COD는 총유기물을 산화하는 데 충분하지 못하지만 공공수역에서 TOC와의 상관성이 높고 TOC와의 비가 수계별로 큰 차이가 나지 않음을 고려할 때 COD를 TOC로 대체 적용하는 데 무리는 없을 것으로 사료된다.

4. Conclusion

한강수계를 남한강, 북한강 그리고 한강하류 수계로 구분하여 9년간 시·공간적 유기물 지표의 변화를 알아보고 이들 지표 간 상호관계 및 산화율을 규명하여 한강수계의 유기물 분포 특성을 살펴본 결과는 다음과 같다.

남한강과 북한강 유역은 산림이 각각 78%, 87%로 대부분을 차지하며 특히 비교적 인위적 오염원이 없는 상류지점의 경우 수질의 변동은 계절적 변화에 많은 영향을 받는 것으로 보이고 유기물 항목간의 변동이 유사하게 나타났다. 한강하류 유역은 시가지가 27%를 차지하여 점오염원과 도시비점오염원의 영향이 큰 도시하천이 유입되어 한강하류의 수질농도는 상대적으로 높고 계절적인 유기물의 변화가 적으며 항목간의 변동이 일정하지 않았다.

BOD에 의한 산화율은 북한강 15% 미만으로 가장 낮고, 남한강 17%, 한강하류가 26%로 한강하류에서 가장 높게 나타났다. 한강하류에 대도시 주변 생활계 하수 및 도시비점오염원의 영향으로 유기물 농도가 높고 조류 발생량도 높아 BOD에 의한 산화율이 다른 수계에 비하여 높은 것으로 판단된다. 항목별 상관성에서도 남한강과 북한강과 달리 한강하류는 유기물 지표 뿐 아니라 영양염류까지 항목 간 상

관성이 높게 나타났다. BOD/TOC 비는 북한강(0.44) < 남한강(0.55) < 한강하류(0.86)의 순이고, COD/TOC 비는 남한강(1.78) < 북한강(1.80) < 한강하류(2.09)의 순으로 COD/TOC 비에 비하여 BOD/TOC 비가 수계별 차이를 보이고 있다. 특히 한강하류는 전반적으로 수질 농도가 높고 유기물 지표간의 상관성이 높은 가운데 BOD/TOC 비도 높게 나타나고 있어 도시 비점오염원 및 생활계로부터 산화되기 쉬운 오염물질이 유입되는 것으로 판단되어 이와 같은 오염원 관리 필요성이 있다.

일반적으로 과망간산칼륨을 이용하여 유기물을 분해하는 COD는 총유기물을 산화하는 데 충분하지 못하지만 TOC와의 상관성이 높고 TOC와의 비가 수계별로 큰 차이가 나지 않음을 고려할 때 COD를 TOC로 대체 적용하는데 무리가 없을 것으로 보인다. 하지만 BOD는 난분해성 유기물을 포함하는 총유기물을 대표하는 지표로서 한계는 있으나 부영양한 하천 또는 고농도의 식물플랑크톤을 함유하는 경우에는 산화율이 높아져 농도가 높아지므로 수체의 특성을 이해하기 위하여 TOC와 함께 유용하다고 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2018-01-01-073).

References

Amon, R. M. W. and Benner, R. (1994). Rapid Cycling of High-molecular Weight Dissolved Organic Matter in the Ocean, *Nature*, 369, 549-552.
Charpra, S. C. (1987). *Surface Water-Quality Modeling*, Waveland

- Press, Illinois, 347-365.
- Chapra, S. C., Pelletier, G. J., and Tao, H. (2012). *QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.12: Documentation and Users Manual*, Tufts University, Massachusetts, 31-71.
- Choi, I. W., Kim, J. H., Im, J. K., Park, T. J., Kim, S. Y., Son, D. H., Huh, I. A., Rhew, D. H., and Yu, S. J. (2015). Application of TOC Standards for Managing Refractory Organic Compounds in Industrial Wastewater, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(1), 29-34. [Korean Literature]
- Choi, J. Y. and Han, D. H. (2011). Development of Water Quality Standard for TOC as Organic Matter Index, *Seoul Studies*, 12(3), 173-184. [Korean Literature]
- Choi, O. Y., Kim, H. T., Seo, H. S., and Han, I. S. (2017). Analysis of Water Quality Changes & Characterization at the Watershed in Han River Basin for Target Indicator in TMDLs, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 33(1), 15-33. [Korean Literature]
- Cole, T. M. and Wells, S. A. (2013). *CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.71 User Manual*, Portland State University, B-1-B-75.
- Fry, B. and Sherr, E. B. (1984). $\delta^{13}\text{C}$ Measurements As Indicators of Carbon Flow in Marine and Freshwater Ecosystem, *Contributions in Marine Science*, 27, 196-229.
- Gil, K. I., Kim, T. W., 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]
- Hama, T. and Handa, N. (1980). Molecular Weight Distribution and Characterization of Organic Matter From Lake Water, *Archiv Für Hydrobiologie*, 90, 106-120.
- Hwhang, M. Y., Son, J. Y., Park, J. R., Kim, G. H., Jung, D. S., Cho, H. S., Lee, Y. J., and Yu, S. J. (2016). Comparison of Correlation and Oxidation Efficiency of Organic matters in the Main Inflows of Lake Paldang, *Journal of Environmental and Sanitary Engineering*, 31(1), 43-52. [Korean Literature]
- Jeong, D. H., Cho, Y. S., Ahn, K. H., Park, H. W., Shin, H. S., Hur, J., and Han D. H. (2016). A Study on the Determination Method of TOC Effluent Limitation for Public Sewage Treatment Plants, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, 30(3), 241-249. [Korean Literature]
- Jung, K. Y., Park, M. H., Hur, J., Lee, S. Y., and Shin, J. K. (2009). Comparison of Spectroscopic Characteristics and Chemical Oxygen Demand Efficiencies for Dissolved Organic Matters from Diverse Sources, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 25(4), 589-596. [Korean Literature]
- Kim, L. H. and Kang, J. H. (2004). Characteristics of First Flush in Highway Storm Runoff, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 20(6), 614-646. [Korean Literature]
- Kim, B. C., Jung, S. M., Jang, C. W., and Kim, J. K. (2017). Comparison of BOD, COD and TOC as the Indicator of Organic Matter Pollution in Streams and Reservoirs of Korea, *Journal of the Korean Society of Environmental Engineers*, 29(6), 640-643. [Korean Literature]
- Kim, J. K., Shin, M. S., Jang, C. W., Jung, S. M., and Kim, B. C. (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), 72-89. [Korean Literature]
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2017). *Meteorological Data Open Portal*, <https://data.kma.go.kr>. (accessed July 2017)
- Lai, M. T., Shin, J. K., and Hur, J. (2011). Estimating the Biodegradability of Treated Sewage Samples Using spectroscopic Fluorescence Spectra, *Sensors*, 11, 7382-7394.
- Leenheer, J. A. and Huffman, Jr. E. W. (1979). *Analytical Method for Dissolved Organic Carbon Fractionation*, Water Resources Investigation Report, 79-4. U.S. Geological Survey, United State, 1-16.
- Mcknight, D. M., Andrews, E. D., Spaulding, S. A., and Aiken, G. R. (1994). Aquatic Fulvic Acids in Algal Rich Antarctic Ponds, *Limnology Oecnaography*, 39, 1972-1979.
- Ministry of Environment (ME). (2010). *Environmental Geographic Information Service*, <https://egis.me.go.kr>. (accessed July 2017)
- Ministry of Environment (ME). (2017a). *Water Quality Monitoring Program*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2017b). *Water Information System*, <http://water.nier.go.kr>. (accessed July 2017)
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2004). *Development of Stream Water Quality Model for Total Maximum Daily Load (I)*, NIER NO. 2004-19-725, 10-122. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2005). *Development of Stream Water Quality Model for Total Maximum Daily Load (II)*, NIER NO. 2005-23-768, 4-14. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2013). *A Study of Water Quality Model Optimization with an Application of TMDL Reflected on the Change of Stream Environment*, NIER-SP2013-457, 68-100. [Korean Literature]
- Ochiai, M. and Hanya, T. (1980). Change in Monosaccharide Composition in the Course of Decomposition of Dissolved Carbohydrates in Lake Water, *Archiv Für Hydrobiologie*, 90, 257-264.
- Owens, N. J. R. (1987). Natural Variation in ^{15}N in the Marine Environment, *Advances Marine Biology*, 24, 390-451.
- 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]
- Park, J. H., Park, B. K., Lee, J. K., and Rhew, D. H. (2013). Necessity of Refractory Organic Matters Management in Total Maximum Daily Loads (TMDLs), *Journal of Korean Society on Water Environment*, 29(3), 393-399. [Korean Literature]
- Rhew, D. H. and Yu, S. J. (2015). The Management of Organic Matter in Water Environment, *Journal of Environmental Hi-*

- Technology*, 46-51. [Korean Literature]
- Ryu, J. S., Chang, H. W., and Lee, K. S. (2008). Hydrogeochemistry and isotope geochemistry of the Han River System: A Summary, *Journal of the Geological Society of Korea*, 44(4), 467-477. [Korean Literature]
- Tetra Tech, Inc. (2007). *The Environmental Fluid Dynamic Code Theory and Computation Volume 3: Water Quality Module*, Fairfax Virginia, 9-54.
- Thomann, R. V. and Mueller, J. A. (1987). *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Prentice Hall, New Jersey.
- Thurman, E. M. (1985). *Organic Geochemistry of Natural Water*, Dordrecht, The Netherland.
- Wetzel, R. G. (1972). The Role of Carbon in Hard Water Marl Lakes. In : G.E. Likens(ed.) Nutrients and eutrophication : The limiting-nutrient controversy, Special Symposium, *Limnology Oceanography*, 1, 84-97.
- Yu, S. J., Kim, C. S., Ha S. R., Hwang, J. Y., and Chae, M. H. (2005). Analysis of Natural Organic Matter(NOM) Characteristics in the Geum River, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 21(2), 125-131. [Korean Literature]