

미호천의 물 환경 탐구 - TOC를 중심으로 한 수질모니터링 -

류재홍^{*,**,*} · 이두곤^{**}

^{*}삼일공업고등학교

^{**}한국교원대학교 환경교육과

Inquiry of Water Environment in Mihocheon (Stream) - Water Quality Monitoring focused on TOC -

Jai Hong Lyu^{*,**,*} · Du Gon Lee^{**}

^{*}Sam-il Technical High School

^{**}Department of Environmental Education, Korea National University of Education

(Received 27 July 2007, Accepted 18 September 2007)

Abstract

In this study, water quality monitoring focused on TOC was performed at 5 points in Mihocheon (Stream) from January to December 2006. And 10 parameters (water temperature, pH, DO, EC, turbidity, SS, BOD, PO₄-P, TOC, TN) were monitored every month for one year. According to this study, TOC increased towards the lower stream (#4~#5). Correlation coefficients between TOC and DO, EC, turbidity, SS, BOD, PO₄-P, TN were -0.126, 0.351, 0.320, 0.286, 0.711, 0.525, 0.666. TOC was highly related to BOD. As a result of linear regression analysis, regression equation between BOD and TOC was $BOD=0.58TOC+1.90$ ($R^2=0.506$). In Mihocheon (Stream), BOD/TOC ratio decreased towards the lower stream. This results show decrease of ratio of biodegradable organic material to total organic pollutants towards the lower stream. This study is significant since it has revealed the potential value of TOC as organic material indicator for inquiry of water quality characteristics in the natural water system.

keywords : Inquiry, Mihocheon (Stream), TOC, Water Quality Monitoring

1. 서론

자연수계의 환경탐구를 위한 수질모니터링에서 하천과 호소의 유기물 오염도 지표로는 생물화학적산소요구량(BOD), 화학적산소요구량(COD) 등이 이용되고 있다(김 등, 2007a, 2007b; 박 등, 2006; 유 등, 1999, 2005; Sawyer et al., 2003). 그러나 급격한 도시화, 산업화 과정에서 오염원이 다양해지고 난분해성 물질을 포함하는 비점오염원의 증가로 인해 BOD와 COD만으로는 유기물 오염도를 제대로 평가할 수 없게 되었다(김 등, 2007a, 2007b; 박 등, 2006).

BOD는 측정과정에서 독성물질, 난분해성 물질, 조류(algae), 질산화 등의 오차요인과 분석과정의 어려움 및 최소 분석소요 기간 5일 등의 한계가 있다(김 등, 2007a, 2007b; 박 등, 2006; 유 등, 1999; Sawyer et al., 2003). COD는 질산화 및 조류(algae) 등에 의한 오차를 보완할 수 있기 때문에 BOD에 비해서 상대적으로 정확한 유기물 지표가 될 수 있으나, 오염물질의 성상에 따른 분석오차가 크기 때문에 BOD와 마찬가지로 여러 가지 한계를 지적받

고 있다(김 등, 2007a, 2007b; 박 등, 2006; 유 등, 1999; Sawyer et al., 2003).

이와 같은 이유 때문에 BOD와 COD의 한계성 보완 수단으로서 총유기탄소(TOC)를 고려할 수 있다(김 등, 2007a, 2007b; 박 등, 2006; 유 등, 1999). BOD나 COD와 비교해서 TOC는 유기물의 안정적인고 정확한 측정이 가능하며, 하천 및 호수에 동시적용이 가능하기 때문에 난분해성 여부에 관계없이 측정가능한 장점이 있다(김 등, 2007a, 2007b; 박 등, 2006; 유 등, 1999). 최근, TOC의 중요성을 인식하고 총량관리(박 등, 2006; 류 등, 2006a)나 유기물 오염도 평가(김 등, 2007a, 2007b; 유 등, 1999) 관련 TOC 연구가 활발해지고 있으나, 본 연구와 같은 자연수계의 환경탐구를 위한 TOC 중심 수질모니터링 연구는 시작단계라 할 수 있다. 그러나, TOC 분석의 유용성과 편리함에도 불구하고 법적·제도적 장치 미비 및 고가장비 확보는 현실적인 문제점으로 제기되고 있다(박 등, 2006).

본 연구에서는 자연수계 환경탐구의 한 가지 방법론으로서 수질모니터링의 중요성을 인식하고(류 등, 2006b) 금강의 주요 지류인 미호천에서 수질모니터링을 수행하였다. 이를 바탕으로 TOC 중심 수질특성을 탐구하였고, TOC와

[†] To whom correspondence should be addressed.
ooy21@paran.com

BOD의 상관성 분석을 통해 BOD의 한계성을 보완하는 수단으로서 TOC의 동시 적용방안을 검토하였다. 또한, 자연수계의 환경탐구를 위한 유기물 오염도 지표로서 BOD/TOC ratio를 이용할 경우 그 해석범위가 확대될 수 있는 가능성에 대하여 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구장소 및 기간

연구가 이루어진 장소는 금강의 주요 지류인 미호천(美湖川)이다(Fig. 1). 미호천은 경기도 안성시, 이천시, 충청북도 음성군의 경계지점인 마이산(馬耳山)에서 발원하여 도청천, 성산천, 칠장천, 구암천, 장양천, 한천, 백곡천, 초평천, 보강천, 성암천, 석화천, 무심천, 석남천, 병천천, 조천 등과 합류한 후 충청남도 연기군에서 금강 본류와 만나게 된다. 미호천의 일반적인 규모는 유역면적 1855 km², 유역둘레 272 km, 본류의 유로연장 약 80 km이며, 수질모니터링은 상류부터 하류까지의 5개 지점에서 2006년 1월부터 12월까지 월 1회 간격으로 총 12회 수행되었다.

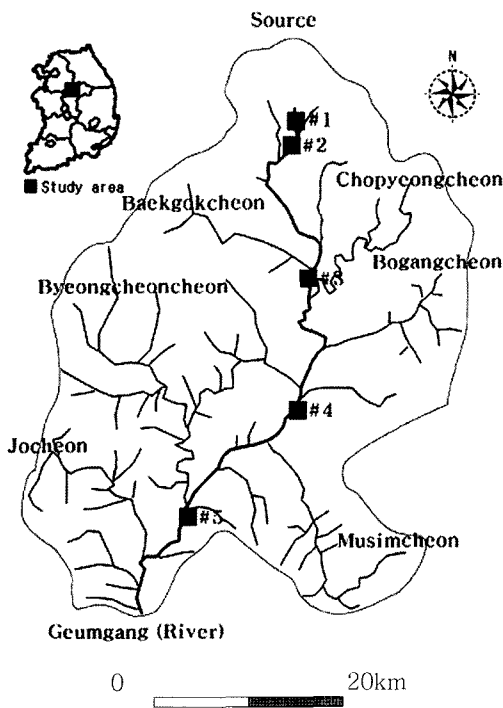


Fig. 1. Study area and monitoring points in Mihocheon (Stream).

2.2. 수질모니터링 방법

2.2.1. 모니터링 및 시료채취지점

제1측정지점(#1)은 음성군 삼성면 흥태교(Bridge)로서 발원지로부터 약 4 km 정도에 위치한다. 유하하는 동안 여러 개의 농촌마을, 주거 및 상업지역(삼성면)을 통과했고, 주변에는 중·소규모 공장들이 산재해 있으며, 농경지에 접한 곳으로서 생활하수, 공장폐수 그리고 비점오염원으로부터의 비료·농약 잔류물질 등의 유입이 예상되는 지점이다. 특히, 발원지로부터의 유하거리에 비해 오염원이 밀집된 특성이 있다.

제2측정지점(#2)은 음성군 삼성면 천평교(Bridge)로서 발원지로부터 약 6 km 정도에 위치한다. 유역특성은 #1지점과 거의 비슷하나, 도청천과의 합류점을 통과하면서 도청천의 수질·유량에 의한 영향이 예상된다.

제3측정지점(#3)은 진천군 문백면 진천농교(Bridge)로서 발원지로부터 약 30 km 정도에 위치한다. 성산천, 칠장천, 구암천, 장양천, 한천, 백곡천 등이 합류했고, 주거 및 상업지역(음성군 대소면, 진천군 광혜원면, 이월면, 덕산면, 진천읍)과 농촌마을, 농경지, 공장지대 등을 통과하면서 오염물질 유입이 예상되고, 여러 지천들과의 합류영향이 나타날 가능성도 있다.

제4측정지점(#4)은 청원군 오창면 팔결교(Bridge)로서 발원지로부터 약 45 km 정도에 위치한다. 초평천, 보강천, 성암천, 석화천 등이 합류했고, #3지점과 마찬가지로 주거 및 상업지역(진천군 문백면, 청원군 오창면, 증평군 증평읍)과 농촌마을, 농경지, 공장지대 등을 통과하면서 상당량의 오염물질 유입이 예상된다. #1, #2, #3지점에 비해서 유역면적이 넓어졌기 때문에 오염물질 유입량도 증가했을 가능성이 있다.

제5측정지점(#5)은 청원군 강내면 미호천교(Bridge)로서 발원지로부터 약 65 km 정도에 위치한다. 무심천, 석남천, 병천천 등의 대규모 지천이 합류했고, 미호천 유역의 최대 규모 도시화·공업화 지역인 청주·청원 일대를 통과하면서 대량의 오염물질 유입이 예상된다.

2.2.2. 측정 및 분석방법

수질모니터링 항목은 수소이온농도지수(pH), 용존산소량(DO), 전기전도도(EC), 염도(salinity), 탁도(turbidity), 부유물질(SS), 생물화학적산소요구량(BOD), 인산염인(PO₄-P), 총유기탄소(TOC), 총질소(TN) 등이었다. pH, DO, EC, salinity는 현장에서 즉시 측정하였고, 나머지 항목들은 채수한 시료를 실험실로 운반하여 분석하였다.

pH미터(HI-8314)와 휴대용 측정기기(YSI-85)를 이용하여 pH와 DO·EC·salinity를 각각 측정하였고, turbidity는 채

Table 1. Monitoring points

Points	Location	Remark
#1	Eumseong-gun Samseong-myeon, Heungtae-gyo (Bridge)	Upper-stream
#2	Eumseong-gun Samseong-myeon, Cheonpyeong-gyo (Bridge)	Upper-stream
#3	Jincheon-gun Munbaek-myeon, Nong-gyo (Bridge)	Middle-stream
#4	Cheongwon-gun Ochang-myeon, Palgyeol-gyo (Bridge)	Middle-stream
#5	Cheongwon-gun Gangnae-myeon, Mihocheon-gyo (Bridge)	Lower-stream

Note : #1~#5 are located in Chungcheongbuk-do (Province).

Table 2. Analytical principles and instruments

Items	Principles	Instruments
pH	Electrode	pH meter (HI-8314, HANNA)
DO · EC · salinity	Electrode	DO · EC · salinity meter (YSI-85, YSI)
Turbidity	Light scattering	Turbidity meter (Turb550, WTW)
SS	Standard method	Filter (GF/C, Whatman) Drying oven (FO-450M, JEIO TECH)
BOD	Standard method	DO meter (YSI-5100, YSI) Incubator (IL-11, JEIO TECH)
PO ₄ -P	Standard method	Spectrophotometer (2120UV, Mecasys)
TOC	Combustion (680°C) NDIR detection	TOC analyzer (TOC-V _{CPN} , Shimadzu)
TN	Thermal decomposition NO detection	TN measurement unit (TNM-1, Shimadzu)

수한 시료를 실험실로 운반하여 desktop turbidity meter (Turb550)로 측정하였다.

SS는 GF/C(Whatman) 유리섬유여지로 여과 후 105°C에서 2시간 건조하여 중량 분석하였고, BOD는 Standard method에 준하는 방법으로 초기 DO 측정 및 20°C 항온에서 5일간 배양한 후 DO를 측정하여 BOD₅를 계산하였다.

PO₄-P는 Standard method에 준하는 방법(ascorbic acid method)으로 발색시킨 후 spectrophotometer(2120UV)를 사용하여 흡광도법으로 분석하였다.

TOC는 수 분 간의 sparging 과정을 통해 무기탄소(IC)를 제거한 후 680°C combustion oxidation method로 발생하는 CO₂를 비분산적외선(NDIR) detector로 검출하는 TOC analyzer(TOC-V_{CPN})로 분석하였고, TN은 thermal decomposition에 의해 생성된 NO를 chemiluminescence method로 검출하는 TN measurement unit(TNM-1)으로 분석하였다.

수질모니터링 장소는 5개 지점 공하 농경지 주변이었고, #1지점부터 #5지점에 이르는 동안 도시화 · 공업화에 의한 오염물질 유입 가능성이 점차 증가하고 있다. 5개 지점에서의 수질측정 및 실험실 분석을 위한 채수위치는 수면 아래 30 cm 부근의 표층이었다.

2.2.3. 자료처리 방법

수질모니터링을 통해 수집된 자료의 통계처리는 MS-Office Excel 및 SPSS for Windows 통계 · 분석 프로그램을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수질모니터링 결과

미호천의 5개 지점에서 2006년에 수행된 지점별 수질모니터링 결과를 Table 3에 나타내었다. Table 3 및 Fig. 2의 그래프 (a)를 보면 DO는 지점별로 복잡한 변화경향을 나타내고 있다. 미호천을 대상으로 한 연구(류 등, 2006b)와 도

시하천(갑천)을 대상으로 한 선행연구(이 등, 2006)에서는 상 · 하류 간 차이를 보고한 바 있다. 용존산소량의 변화는 대부분 오염물질 유입에 의해서 야기되기 때문에(박 등, 2006) DO 자료의 명확한 해석을 위해서는 각 지류별 수질 특성에 대한 연구가 병행되어야 할 것이다.

Fig. 2의 그래프 (b)를 보면 EC는 전 지점에서 7~8월에 상대적으로 낮게 나타났다. 또한, (c)와 (d)를 보면 turbidity와 SS는 전 지점에서 7월에 상대적으로 높게 나타나는데, 이는 이 시기에 집중되는 강우의 영향으로 추정된다. 약수를 대상으로 한 선행연구(이 등, 2002)와 빗물을 대상으로 한 선행연구(박 등, 2003a; 송 등, 2006; 이 등, 2004)에서도 이 시기에 EC가 낮아지는 결과를 보고한 바 있고, 강우에 의한 하천 수질특성 변화를 조사한 선행연구(김 등, 2006)에서는 하천유량 증가에 의한 오염물질 희석효과를 논한 바 있다. 강 생태계에서의 수증 탁도를 대상으로 한 선행연구(신 등, 2005)와 SS 관련 선행연구(박 등, 2006; 최 등, 2001)에서도 이 시기의 탁도와 SS 증가 현상을 보고하였고, 손 등(2003)과 김 등(2006)은 강우 시 지표유출에 의한 SS 증가 현상을 보고한 바 있다. Turbidity와 SS의 변화경향은 거의 일치하였으며 이 등(2006)의 선행연구에서도 유사한 결과를 보고한 바 있다.

Fig. 2의 그래프 (e), (f), (g), (h)를 보면 BOD, PO₄-P, TOC, TN은 하류지점(#5)에서 연중 높은 것을 알 수 있다. 이는, 유하 과정에서 지천합류, 산업폐수 및 생활하수 유입, 각종 비점오염원 유입 등 다양한 요인에 의한 오염물질이 축적되었음을 의미하는 결과이다.

BOD는 지점별 수질비교(박 등, 1994), 하천 수질현황(오 등, 2002), 지점별 수질특성(박 등, 2003b), 유기물 오염도 특성(김 등, 2007a, 2007b; 이 등, 2003, 2006b), 총량관리(박 등, 2006) 등 다양한 관점에서 많은 연구가 이루어지는 항목이지만 특정 하천의 상류부터 하류까지를 장기적으로 비교 · 분석한 경우는 많지 않다. 다만, BOD 관련 선행연구에서 오 등(1997, 2002)과 이 등(2003)은 상 · 하류 간 차

Table 3. Results of water quality monitoring

Items	Point	Monitoring month											
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
DO (mg/L)	#1	11.4	9.3	10.1	7.4	8.3	7.8	6.8	7.3	7.5	9.9	8.9	10.9
	#2	11.3	10.6	12.3	11.5	9.4	7.4	6.5	7.4	8.0	9.0	9.4	10.8
	#3	13.9	12.4	8.4	10.0	7.8	7.2	6.8	7.6	7.1	9.3	9.0	10.7
	#4	13.3	13.3	11.2	11.1	9.4	7.2	6.7	7.8	8.4	9.5	10.4	10.3
	#5	12.1	9.9	7.3	9.3	8.8	7.1	6.8	10.1	8.4	9.6	9.5	10.9
EC (μ S/cm)	#1	410.8	223.3	334.7	401.5	289.7	389.2	216.9	239.9	321.5	60.3	411.2	537.0
	#2	446.4	534.1	664.0	673.0	363.3	416.0	251.2	315.7	532.0	467.7	559.0	477.6
	#3	398.6	349.3	360.2	277.2	244.8	244.5	245.8	209.8	335.3	369.4	424.6	449.4
	#4	314.3	354.9	385.8	291.8	296.6	235.6	195.3	218.9	320.1	332.4	389.8	416.9
	#5	480.3	432.3	671.2	430.5	451.3	406.4	169.9	284.4	474.6	480.7	515.0	557.0
Turbidity (NTU)	#1	10.6	4.6	94.7	70.1	33.7	17.5	32.1	22.9	6.7	3.5	3.6	17.7
	#2	30.7	42.0	34.8	18.5	32.7	12.1	24.7	33.5	7.4	3.7	3.1	17.4
	#3	7.5	4.3	17.7	26.1	58.9	35.8	52.5	18.4	4.5	4.3	4.9	8.9
	#4	4.7	6.5	5.1	12.1	42.7	27.4	26.8	7.5	4.3	2.5	3.0	4.2
	#5	10.3	8.2	8.1	14.0	17.4	18.5	43.8	6.4	2.8	5.1	6.8	8.1
SS (mg/L)	#1	5.0	5.0	84.0	42.5	23.5	19.5	21.0	20.5	5.5	3.5	5.0	15.5
	#2	39.0	46.0	31.0	9.0	31.5	14.0	30.0	33.5	8.0	4.0	4.0	17.5
	#3	5.5	4.5	19.0	10.0	44.5	42.5	56.0	21.5	5.0	5.0	3.5	11.0
	#4	3.0	6.0	3.0	5.0	44.0	23.0	32.5	7.5	4.5	2.0	3.0	6.0
	#5	17.0	6.0	9.0	6.0	31.5	11.0	42.0	7.0	3.0	4.5	6.0	9.0
BOD (mg/L)	#1	1.2	1.4	9.0	5.9	4.5	3.5	3.0	3.0	4.5	2.5	4.5	7.1
	#2	2.7	3.5	6.4	5.4	2.8	2.3	3.8	2.8	3.2	2.8	3.2	5.2
	#3	2.7	3.3	4.7	4.5	3.1	2.2	3.0	3.0	2.5	2.4	3.0	3.7
	#4	3.0	3.6	7.0	4.8	4.6	7.1	3.9	3.4	3.2	2.6	3.0	4.1
	#5	5.1	4.1	6.0	7.1	6.7	7.2	3.8	3.6	4.5	5.2	5.4	7.4
PO ₄ -P (μ g/L)	#1	125.2	125.7	316.9	349.5	203.8	206.1	208.3	139.8	129.7	108.5	80.7	157.8
	#2	263.2	242.9	278.5	310.4	236.2	141.7	195.7	138.3	159.3	143.4	56.7	203.3
	#3	174.2	179.3	193.4	239.1	179.5	100.5	133.2	66.5	92.4	79.5	30.7	168.5
	#4	348.1	335.9	191.3	304.6	197.1	219.1	293.9	87.1	299.8	266.5	43.4	222.2
	#5	469.6	460.1	786.1	493.7	268.7	271.2	294.7	67.6	361.8	305.3	103.6	898.2
TOC (mg/L)	#1	1.0	1.0	11.5	6.6	5.9	6.3	2.6	3.1	3.8	2.7	3.3	7.7
	#2	2.5	2.3	4.2	3.1	4.2	3.6	2.6	3.4	3.0	2.7	2.8	5.8
	#3	2.4	2.2	4.1	2.9	3.8	3.8	1.9	3.0	2.5	2.6	2.6	2.9
	#4	2.5	2.3	4.2	2.9	3.7	3.6	4.0	3.6	2.7	2.6	2.8	3.0
	#5	3.8	3.6	12.4	4.9	5.9	5.3	2.6	4.5	5.3	5.1	4.7	7.1
TN (mg/L)	#1	2.4	2.4	4.7	8.3	3.8	3.9	3.1	2.5	4.5	3.2	4.0	9.5
	#2	4.7	4.7	4.1	3.2	2.8	2.6	3.0	2.2	4.3	3.9	4.6	6.0
	#3	4.4	4.4	3.4	2.4	3.1	2.2	2.1	2.0	2.6	2.5	3.4	4.9
	#4	4.7	4.7	3.2	2.3	2.8	2.1	1.7	1.8	1.8	1.8	2.6	3.9
	#5	7.1	7.1	12.0	6.5	7.0	6.2	3.2	3.4	4.9	4.6	5.2	7.0

이를 보고한 바 있고, 미호천을 대상으로 한 선행연구(류 등, 2006b)에서도 유사한 결과를 보고한 바 있다.

PO₄-P와 TN은 대표적인 영양염으로서 이 등(2006)의 도시하천(갑천)을 대상으로 한 선행연구에서는 하류로 갈수록 PO₄-P 농도가 증가하는 결과를 보고한 바 있고, 오 등(2002)과 이 등(2006)의 선행연구에서는 하류로 갈수록 TN 농도가 증가하는 결과를 보고한 바 있다.

DO, EC, turbidity, SS, BOD, PO₄-P, TOC, TN 등 전 항목에 대하여 하류인 #5지점에서 연중 악화된 수질특성이 나타나고 있다. 손 등(2003)의 선행연구에서는 하천이 인구

밀집지역, 공장지대 등을 통과하면서 오염부하량이 증가할 가능성을 논한 바 있다.

3월과 12월에 BOD, PO₄-P, TOC, TN 농도가 급격히 증가하는 경향이 나타나고 있는데, 이를 해석하기 위해서 미호천에 인접한 청주지역 강수자료를 이용하였다(Table 4). 강수량은 하천유량에 영향을 미치는 주요 인자이기 때문에 강수량이 적은 계절에는 하천유량이 감소할 가능성이 크다.

청주지역의 강수자료를 보면 2006년 3월에 최저치인 8.2 mm, 7월에 최고치인 508.0 mm, 12월에 16.7 mm로 나타나고 있다. 미호천으로 유입되는 오염물질 총량에 변동이

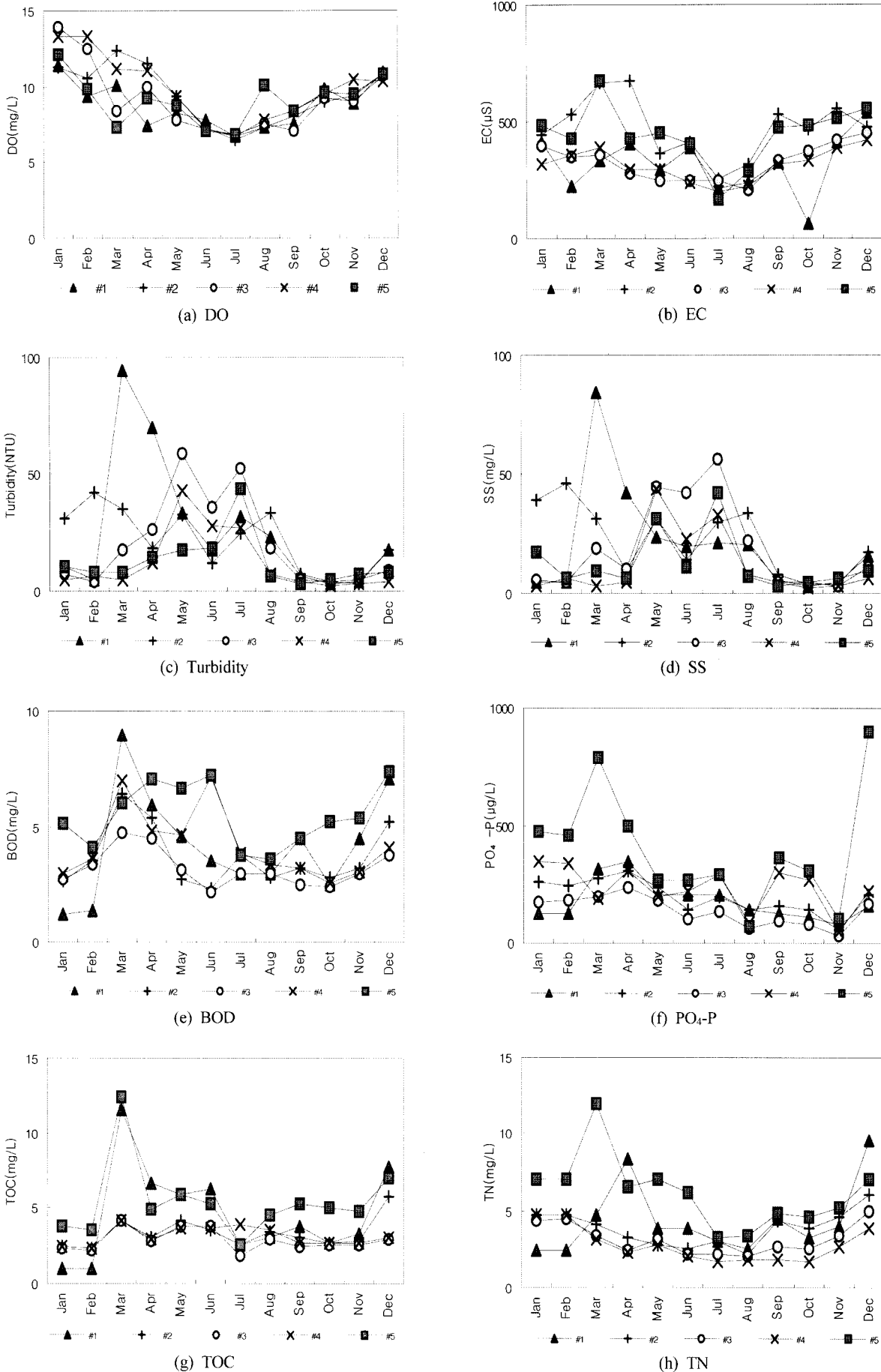


Fig. 2. Monthly variation of water quality according to monitoring point (#1~#5 mean monitoring points).

Table 4. Rainfall in Cheongju, 2006 (Source: Korea Meteorology Administration, 2007)

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Rainfall (mm)	20.4	28.9	8.2	89.3	119.4	115.5	508.0	52.5	18.4	21.3	83.4	16.7

없다고 가정할 경우, 상대적으로 강수량이 적은 3월과 12월의 오염물질 농도가 증가할 가능성이 있다.

3.2. TOC 농도 변화

Table 3에 제시된 연간 TOC 농도를 각 지점별로 산술평균한 결과 각각 4.6 mg/L, 3.3 mg/L, 2.9 mg/L, 3.2 mg/L, 5.4 mg/L로 나타났다(Fig. 3).

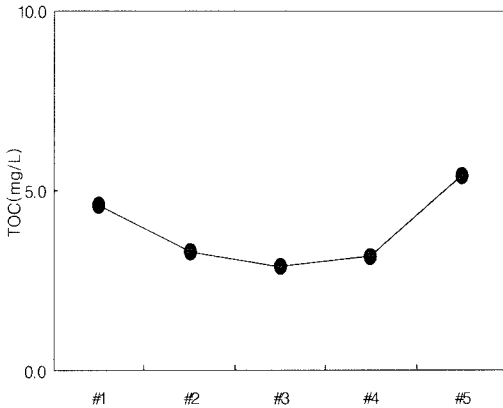


Fig. 3. Annual mean of TOC concentration with monitoring point.

TOC 농도는 상류인 #1지점과 #2지점을 지나면서 중류인 #3지점까지는 감소하다가 #4지점을 지나면서 하류인 #5지점에 이르는 동안 급격히 증가하고 있다. 하류인 #5지점에서는 연중 높게 나타나고 있는데, #4지점 이후 #5지점에 이르는 중간에 인구밀집지역 및 산업단지를 통과하면서 각종 생활하수 및 산업폐수 유입에 기인하는 결과로 추정된다. #1지점, #2지점의 TOC 농도가 상류임에도 불구하고 높게 나타난 것은 발원지로부터의 짧은 유하거리와 오염원이 밀집된 유역특성과 2006년 6월까지 진행된 대소(大所) 하수처리장 건설공사로 인한 정체수역 형성에 기인하는 결과로 해석된다.

3.3. 항목별 상관분석 결과

수질모니터링 자료에서 TOC와 다른 수질지표 항목들 간

의 상관분석을 실시하였다(Table 5).

TOC와 DO 사이의 상관계수는 -0.126으로서 상관관계가 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 자연수계의 물 환경에서는 유기물 오염도 증가로 인해 DO를 소모하는 요인이 생기더라도 대기 중 산소의 자연적인 용해작용이나 수생식물 및 조류(algae) 등의 광합성 작용에 의한 용존산소 공급조건이 동시에 존재한다. 이 때문에 유기물 농도가 높은 경우에도 용존산소량이 절대적으로 감소하는 현상은 나타나지 않을 수 있다.

TOC와 EC, turbidity, SS 사이의 상관계수는 각각 0.351, 0.320, 0.286으로서 낮은 상관관계를 나타내고 있다. 이 결과에서 TOC와 EC, turbidity, SS 사이의 상관관계가 낮기는 하지만 모든 경우에 상관관계가 없다고 규정할 수는 없다. 우선, 유기물과 이온성 물질 함량은 유역에 따라 다르기 때문에 TOC와 EC 사이의 상관관계도 변할 가능성이 크다. 그리고, Turbidity와 SS는 무기물·유기물의 성분비 조건에 따라 TOC와의 상관관계가 변할 수 있다. TOC와 PO₄-P 사이의 상관계수는 0.525로서 상관관계가 있는 것으로, TOC와 TN 사이의 상관계수는 0.666으로서 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 이는 유기물과 영양염류 사이의 상관성을 의미하는 결과로 해석된다.

본 연구의 중심 항목인 TOC와 BOD 사이의 상관계수는 0.711로 나타났는데, 이 값은 통계적으로 두 항목 간의 상관관계가 높은 범위에 해당한다(성, 2005). TOC와 BOD는 모두 유기물에 기인하기 때문에 두 항목의 상관관계는 유기물 오염특성 해석 시 주요 지표로 활용될 수 있다. 하지만, TOC와 BOD는 각각의 측정대상 유기물이 다르다는 점에 유의해야 한다. 즉, TOC는 생분해성 유기물과 난분해성 유기물을 모두 포함한 것이고, BOD는 생분해성 유기물만을 포함한 것이기 때문에 각각 다른 의미를 나타낸다.

따라서, 유기물에 기인하는 TOC와 BOD의 성격상 두 항목 사이의 상관관계는 상당히 높을 수 있지만, 각각의 측정값이 나타내는 정확한 의미상 반드시 완전한 상관성을 나타내는 상관계수 값인 1에 근접할 필요는 없을 것으로 사료된다. TOC와 BOD 사이의 상관계수가 1에 근접하다는 것은 두 항목 사이의 관계가 1:1 대응에 가깝다는 것을 의

Table 5. Correlation coefficients among water quality items

	DO	EC	Turbidity	SS	BOD	PO ₄ -P	TOC	TN
DO	1.000							
EC	0.377	1.000						
Turbidity	-0.262	-0.201	1.000					
SS	-0.278	-0.199	0.941	1.000				
BOD	0.077	0.374	0.270	0.202	1.000			
PO ₄ -P	0.152	0.382	0.055	0.025	0.511	1.000		
TOC	-0.126	0.351	0.320	0.286	0.711	0.525	1.000	
TN	0.193	0.612	-0.016	-0.043	0.553	0.606	0.666	1.000

미한다. 그런데, 본 자료의 상관분석 결과를 통해 알 수 있는 바와 같이 두 항목 사이의 상관관계는 유기물의 성상(총유기물 중 생분해성과 난분해성 유기물 비율)에 따라서 시·공간적 차이가 있을 수 있다는 점을 고려해야 할 것이다.

특히, 본 모니터링 자료는 특정 조건으로 통제할 수 없는 자연수계의 물 환경을 대상으로 하였고, TOC와 BOD로 나타난 유기물은 정량한계 및 농도표현 등에서 차이가 있으며, 유역특성에 따라 그 경향성이 달라진다는 측면을 충분히 고려해야 할 것이다. 참고로, 유 등(1999)과 김 등(2007b)의 선행연구에서는 하천 수질자료에서 TOC와 BOD의 상관계수를 각각 0.73과 0.60으로 보고한 바 있다.

3.4. TOC와 BOD의 상관성

TOC와 BOD의 상관성을 고찰하기 위해 산포도(scatter plot)를 작성하였다(Fig. 4). 상관성이란 두 변수 사이의 관계를 의미하는데, 이는 한 변수가 변할 때 다른 변수가 어떻게 변하는가를 나타낸다. 즉, 산포도 상의 회귀선(regression line)을 중심으로 분포되어 있는 정도를 의미한다(성, 2005; 원 등, 2003).

회귀선은 회귀식으로 나타낼 수 있는데(성, 2005) Fig. 4의 산포도에서 구한 회귀식은 $BOD=0.58 \cdot TOC+1.90$ 이다. 회귀식의 기울기 0.58은 TOC의 단위변화량에 대한 BOD 변화량이며, TOC가 1 mg/L 증가할 때 BOD는 평균적으로 0.58 mg/L 증가함을 의미한다. 회귀식에서 BOD와 TOC값이 같게 되는 TOC 농도는 4.48 mg/L이다. 4.48은 원점을 통과하면서 기울기가 1인 직선과 회귀선의 교점에서 TOC 값을 의미한다.

이 값은 회귀식에 따라 변할 수 있는 수치이며, 수계의 유기물 오염 특성에 의해 변할 수 있는 값이다. 즉, TOC 농도가 4.48 mg/L일 때 BOD/TOC의 비(ratio)가 1이 되는 것을 의미한다. 이는, TOC 값이 4.48 mg/L 미만일 경우에는 BOD가 TOC보다 큰 값, 4.48 mg/L를 초과할 경우에는 BOD가 TOC보다 작은 값으로 나타난다는 의미이다.

유 등(1999)의 연구에서는 TOC/BOD ratio를, 김 등(2007b)의 연구에서는 BOD-C/TOC(%)를 논한 바 있고, 김 등(2007a)의 연구에서는 본 연구와 동일하게 BOD/TOC

ratio를 사용하여 유기물 지표 간의 상관성을 논한 바 있다.

BOD는 수중의 미생물이 유기물을 산화시키는 과정에서 소모되는 산소의 양(mgO_2/L)을 의미(환경부, 2004; APHA et al., 1995; Sawyer et al., 2003)하므로 생물학적으로 분해가능한 유기물을 간접적으로 나타내는 지표이다. COD는 수중의 유기물 분해에 필요한 산화제 소모량을 산소량(mgO_2/L)으로 환산한 지표(환경부, 2004; APHA et al., 1995; Sawyer et al., 2003)로서, 생물학적으로 분해가능한 유기물 뿐 아니라 생물학적으로 분해불가능한 유기물도 포함하는 전체 유기물 지표가 된다. 다만, 산화제로 이용되는 $KMnO_4$ 와 $K_2Cr_2O_7$ 의 산화율이 약 60~80% 정도(김, 2001; 이, 2000)이므로 완전산화는 불가능(Sawyer et al., 2003)하다는 점에 유의할 필요성이 있다. 그리고, TOC는 유기물을 탄소량(mgC/L)으로 환산한 지표(APHA et al., 1995)이며, BOD나 COD에 비해서 측정의 간편성·정확성·신속성, 난분해성 유기물의 정량 가능성 등 장점이 있는 것으로 알려져 있다(김 등, 2007a, 2007b; 박 등, 2006; 유 등, 1999).

이상의 논의를 토대로 BOD/COD ratio와 BOD/TOC ratio의 환경적 의미를 생각해 보면, 이 두 가지 ratio는 수중 유기물 중 생분해 가능한 유기물 비율을 나타내는 지표가 될 수 있다. 그러나, 유기물 지표로서의 BOD, COD, TOC는 대상물질이 다르기 때문에 BOD/COD ratio와 BOD/TOC ratio를 이용한 오염특성 해석 시에는 각각의 개념을 고려하여야 한다. 우선, BOD와 COD를 나타내는 단위는 공히 mgO_2/L 이고, TOC를 나타내는 단위는 mgC/L 이기 때문에 BOD/COD ratio와 BOD/TOC ratio의 직접 비교는 어려운 측면이 있다. BOD/COD ratio는 산화제에 의해 정량된 유기물 지표(mgO_2/L)에 대해서 생물학적으로 분해가능한 유기물(mgO_2/L)의 비를 의미하고, BOD/TOC ratio는 총유기물에 포함된 탄소농도(mgC/L)에 대해서 생물학적으로 분해가능한 유기물(mgO_2/L)의 비를 의미한다.

그러므로, BOD/COD ratio는 산화제에 의해 정량된 유기물 지표(mgO_2/L)와 생물학적으로 분해가능한 유기물(mgO_2/L) 사이의 비를 의미하고, 총유기물 중 생분해성 유기물의 비를 나타내는 지표가 될 수 있으나, COD 측정 과정에서의 산화율 때문에 총유기물 전체를 나타내지 못하는 한계가 있다. 그런데, COD에 비해 TOC는 총유기물의 정확한 정량이 가능하므로(김 등, 2007a, 2007b; 박 등, 2006; 유 등, 1999), BOD/COD ratio과 비교해서 BOD/TOC ratio는 총유기물 중 생분해성 유기물의 비를 더 정확히 나타내는 지표가 될 수 있다. 다만, BOD/TOC ratio 해석 시 주의할 것은 BOD와 TOC 농도가 나타내는 대상물질 즉, 분자·분모의 차원이 다르다는 점이다. 이를 고려한다면, 총유기물 중 생분해성 유기물 비율 해석 시 BOD/TOC ratio는 유용한 지표가 될 것으로 생각된다.

3.5. BOD/TOC ratio 변화

#1지점부터 #5지점까지의 BOD/TOC ratio를 연간 산술평균한 결과 각각 0.94, 1.09, 1.11, 1.31, 1.05로 나타났다(Fig. 5).

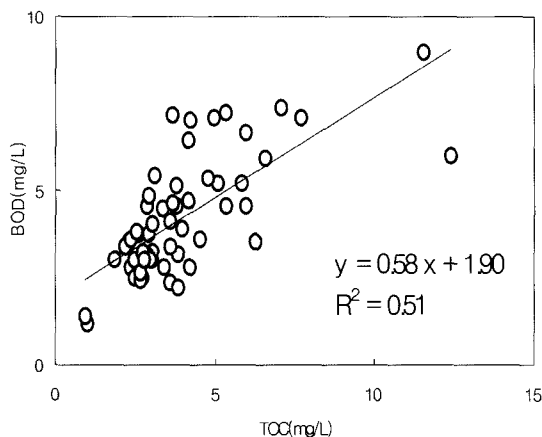


Fig. 4. Scatter plot between TOC and BOD concentration.

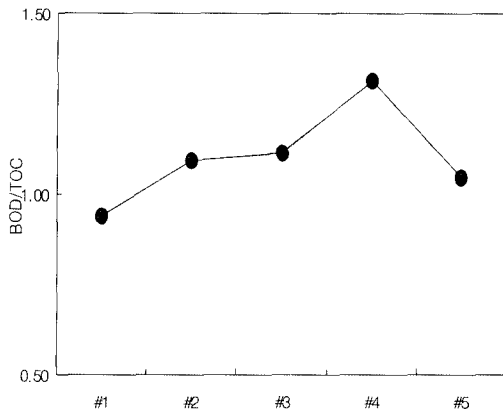


Fig. 5. Annual mean of BOD/TOC ratio with monitoring point.

BOD/TOC ratio는 #1지점, #2지점, #3지점, #4지점까지 증가하다가, #4지점에서 #5지점 사이에 급격히 감소하고 있다. 이는, 하류인 #4지점과 #5지점 사이에서 난분해성 비율이 증가함을 의미하는데, 이 등(2003)의 선행연구에서 하류로 갈수록 난분해성 비율이 증가하는 유사한 결과를 보고한 바 있다.

측정지점별 TOC 농도를 보면 #4지점과 #5지점 사이에서 급격히 증가하고 있는데, 이 지점에서 BOD/TOC ratio는 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이는, #4지점과 #5지점 사이의 유기물 오염도 증가와 더불어 난분해성 비율이 증가하고 있음을 의미한다.

4. 결론

미호천에서 2006년 1월부터 12월까지 월 1회 간격으로 1년에 걸쳐 수행되어진 TOC를 중심으로 한 수질모니터링 결과를 분석한 결과 TOC는 1월에 상류인 #1지점에서 0.95 mg/L로 최저값을 나타냈으며, 3월에 하류인 #5지점에서 12.38 mg/L로 최고값을 나타내었다. #1지점부터 #5지점까지의 연간 산술평균은 각각 4.62 mg/L, 3.34 mg/L, 2.89 mg/L, 3.16 mg/L, 5.43 mg/L였고, 하류인 #5지점에서는 연중 높게 나타났다. TOC와 수질지표 항목들 간의 상관성 분석결과에 의하면 TOC와 DO는 상관관계가 거의 없었고, TOC와 EC, turbidity, SS의 상관관계는 낮은 것으로 나타났다. TOC와 PO₄-P는 상관관계가 있었고, TOC와 TN은 높은 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 특히, TOC와 BOD의 상관계수는 0.711로서 높은 상관관계를 나타냈는데, 이를 적용하면 유기물 오염도 해석범위의 확대 가능성이 커질 것으로 사료된다.

1년간의 수질모니터링 결과에서 TOC와 BOD 자료를 회귀분석한 결과 BOD=0.58 · TOC+1.90의 회귀식을 구할 수 있었다. 이를 근거로 해석한 결과 TOC 농도가 약 4.48 mg/L일 경우 BOD/TOC ratio가 1이 되는 것을 알 수 있었다. 또한, TOC 농도가 증가함에 따라서 BOD/TOC ratio가 감소하는 경향이 나타났는데, 이는 총유기물 중에서 생분해성(labile) 비율이 낮아지고 있음을 즉, 난분해성(refractory)

비율이 높아지고 있음을 의미한다. BOD/TOC ratio의 변화 경향을 해석한 결과 하류인 #4지점에서 #5지점으로 넘어갈 때에는 연중 감소하는 경향이 나타났다. 이 결과를 통해 총유기물 중 생분해성 또는 난분해성 비율의 상·하류 간 차이를 확인할 수 있었다.

예측불허의 다양한 변수들이 존재하는 자연수계의 물 환경 특성상 측정지점별 TOC와 BOD는 각각 다른 경향성을 나타낼 수 있기 때문에 BOD/TOC ratio를 일정한 규칙성으로 규명하기 위해서는 지속적인 실험·측정을 통한 총체적인 유기물 오염 특성 자료축적이 필요할 것으로 사료된다. 본 연구는 자연수계인 미호천에서의 수질모니터링을 통해 TOC 중심의 수질특성을 탐구함으로써 유기물 지표로서 BOD/TOC ratio의 가치 및 중요성을 고찰한 연구라는 점에 의미가 있다.

참고문헌

- 기상청, <http://www.kma.go.kr> (accessed Aug. 2007).
- 김범철, 정성민, 장창원, 김재구, 호수와 하천에서 유기물 오염도의 지표로서 BOD, COD와 TOC의 비교 및 분해율 산정, *대한환경공학회지*, **29**(6), pp. 640-643 (2007a).
- 김연태, 김유리, 우남철, 현승규, 강우에 의한 중랑천의 수질 특성 변화 연구, *한국물환경학회지*, **22**(4), pp. 666-671 (2006).
- 김재구, 신명선, 장창원, 정성민, 김범철, 한강수계 주요 하천과 호수내 TOC와 DOC분포 및 BOD와 COD의 산화율 비교, *한국물환경학회지*, **23**(1), pp. 72-80 (2007b).
- 김좌관, 수질오염개론, 동화기술 (2001).
- 류동경, 배상득, 장재용, 박제철, 류재근, 낙동강수계 수질오염총량관리 대상물질에 관한 연구 -TOC 유기물 중심으로-, *한국물환경학회·대한상하수도학회 2006년 공동추계학술발표회 논문집*, pp. 1181-1188 (2006a).
- 류재홍, 이두곤, 자연수계의 환경탐구를 위한 수질모니터링 -미호천을 중심으로-, *한국물환경학회·대한상하수도학회 2006년 공동추계학술발표회 논문집*, pp. 505-515 (2006b).
- 박석순, 박배경, 이상호, 한강유역의 토지이용도에 따른 지천 수질 비교, *한국수질보전학회지*, **10**(1), pp. 10-16 (1994).
- 박승택, 강공언, 최규철, 익산지역 겨울철 강수의 산성도와 이온성분의 화학적 특성, *대한환경공학회지*, **25**(12), pp. 1584-1595 (2003a).
- 박재로, 방천희, 한강유역의 주요지점별 수질특성 분석, *대한상하수도학회·한국물환경학회 2003년 공동추계학술발표회 논문집*, pp. 143-146 (2003b).
- 박재홍, 오승영, 박배경, 공동수, 류덕희, 정동일, 수질오염총량관리를 위한 관리대상물질, *한국물환경학회지*, **22**(6), pp. 1004-1013 (2006).
- 성태제, *현대 기초통계학의 이해와 적용*, 교육과학사 (2005).
- 손재권, 박종민, 최진규, 송재도, 동진강 상류 하천 유역의 수질특성, *농촌계획*, **9**(2), pp. 19-28 (2003).
- 송희봉, 이은경, 정동숙, 김인옥, 이명숙, 권병윤, 이경출, 대구지역의 빗물 중 화학적 성분의 계절별 및 지역별 농도분포, *대한환경공학회지*, **28**(5), pp. 522-526 (2006).
- 신재기, 정선아, 황순진, 강생태계에서 수중 탁도의 장기 변동, *한국물환경학회·대한상하수도학회 2005년 공동추계학술발표회 논문집*, pp. 711-714 (2005).
- 오종민, 이수환, 신갈저수지 및 유입 하천의 수질특성에 관

- 한 연구, *한국수질보전학회지*, **13**(1), pp. 9-16 (1997).
- 오창환, 이지선, 김강주, 황갑수, 전주시 하천의 BOD, COD, 총질소, 총인에 대한 수질현황 및 오염원, *대한자원환경지질학회지*, **35**(1), pp. 43-54 (2002).
- 원태연, 정성원, *한글 SPSS10K 통계조사분석*, SPSS아카데미 (2003).
- 유순주, 김창수, 하성룡, 황종연, 채민희, 금강 수계 자연유기물 특성 분석, *한국물환경학회지*, **21**(2), 125-131 (2005).
- 유순주, 황종연, 윤영삼, 천세익, 한의정, 하천·호소의 유기물 지표 평가, *환경형향평가*, **8**(1), pp. 81-92 (1999).
- 이근광, *수계환경오염개론*, 동화기술 (2000).
- 이성호, 송희봉, 정동숙, 대구지역 강수의 화학적·미생물학적 특성, *대한환경공학회지*, **26**(8), pp. 853-860(2004).
- 이성호, 송희봉, 조찬래, 이영주, 이선영, 전현숙, 정동숙, 강우석, 화학적-미생물학적 수질에 대한 강우영향의 특성 (대구지역 약수), *대한환경공학회지*, **24**(12), pp. 2213-2225 (2002).
- 이순화, 김용환, 신동락, 낙동강 하천수중 용존유기물질의 특성, *대한환경공학회지*, **25**(6), pp. 701-708 (2003).
- 이홍수, 허진, 정선아, 황순진, 신재기, 도시하천(갑천) 유역에서 수질오염의 공간적 특성, *한국물환경학회지*, **22**(5), pp. 943-951 (2006).
- 최중대, 이기중, 권기수, 구분준, 강원도 농촌유역 소하천의 수질특성과 비점오염원 배출, *한국물환경학회·대한상하수도학회 2001년 공동춘계 학술발표회 논문집*, pp. 85-88 (2001).
- 환경부, *수질오염공정시험방법* (2004).
- APHA, AWWA, & WEF, *Standard methods for the examination of water and wastewater*(19th ed.), Washington D.C. (1995).
- Sawyer, C. N., McCarty, P. L. and Parkin, G. F., *Chemistry for Environmental Engineering and Science*(5th ed.), New York: McGraw-Hill (2003).