

Research Paper

장기 모니터링 자료를 이용한 팔당호 수질변화의 비모수적 추세분석

조향수* · 손주연** · 김귀다** · 신명철** · 조용철** · 신기식* · 노혜란**

국립환경과학원 물환경공학연구과*, 국립환경과학원 한강물환경연구소**

Non-parametric Trend Analysis Using Long-term Monitoring Data of Water Quality in Paldang Lake

Hang-Soo Cho* · Ju-Yeon Son** · Guee-Da Kim** · Myoung-Chul Shin** ·
Yong-Chul Cho** · Ki-Sik Shin* · Hye-Ran Noh**

Water Engineering Research Division, National Institute of Environmental Research*
Han-River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research**

요약: 본 연구는 팔당호 내 4개 지점을 대상으로 각 지점에서의 장기 수질 변화 및 지점 간 시차성을 확인하기 위하여 비모수적 추세분석 방법인 Seasonal Kendall test, LOWESS와 Cross Correlation을 수행하였다. 본 분석을 위하여 2004년 1월부터 2016년 12월까지, 각 지점별 9개 수질 항목(수온, EC, DO, BOD, COD, T-N, T-P, TOC, Chl-a)의 주별 분석 자료를 사용하였다. Seasonal Kendall test 결과 수온은 증가, EC와 T-N, T-P는 전 지점 모두 감소 경향을 나타내었다. LOWESS 결과 BOD 농도는 전 지점에서 2013년부터 2016년까지 “감소” 경향을 나타내었고 COD는 2012년부터 “증가” 경향을 나타내었다. 따라서 2012~2013년은 팔당호 전 지점에서 BOD의 개선과 함께 COD의 증가가 나타나는 전환기였음을 확인할 수 있었다. Cross Correlation 결과, 모두 시차성 없으므로 나타났다. 본 연구를 통하여 팔당호에 대한 보다 적합한 수질관리를 위하여 위의 전환기에 대한 발생원인 분석과 함께 수질 측정주기의 증가를 통한 보다 정밀한 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

주요어: 팔당호, 비모수적 추세분석, 교차상관

First Author: Hang-Soo Cho, Water Engineering Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea, Tel: +82-32-560-7464, E-mail: bluedol@korea.kr, ORCID: 0000-0003-4793-8488

Corresponding Author: Hye-Ran Noh, Han-River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Yangpyeong 12565, Korea, Tel: +82-31-770-7250, E-mail: anran1@korea.kr, ORCID: 0000-0002-7188-4841

Co-Authors: Ju-Yeon Son, Han-River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Yangpyeong 12565, Korea, Tel: +82-31-770-7261, E-mail: sorak80@korea.kr, ORCID: 0000-0002-8556-5435

Guee-Da Kim, Han-River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Yangpyeong 12565, Korea, Tel: +82-31-770-7292, E-mail: Gueeda@korea.kr, ORCID: 0000-0002-0891-9623

Myoung-Chul Shin, Han-River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Yangpyeong 12565, Korea, Tel: +82-31-770-7286, E-mail: shinbear@me.go.kr, ORCID: 0000-0002-1757-150X

Yong-Chul Cho, Han-River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Yangpyeong 12565, Korea, Tel: +82-31-770-7238, E-mail: yc800222@korea.kr, ORCID: 0000-0002-4145-8929

Ki-Sik Shin, Water Engineering Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea, Tel: +82-32-560-7427, E-mail: envi95@korea.kr, ORCID: 0000-0001-6477-7677

Received: 21 August, 2018. Revised: 12 December, 2019. Accepted: 28 February, 2019.

Abstract: This study, we conducted a non-parametric trend test (Seasonal Kendall tests, LOWESS) and Cross Correlation. We aimed to identify water quality trends using the weekly data for 9 variables (Water Temperature, EC, DO, BOD, COD, T-N, T-P, TOC and Chl-a) collected from 4 sites in the Paldang Lake from 2004.01 to 2016.12. According to the Seasonal Kendall test, Water temperature increased but EC, T-N and T-P decreased trend. LOWESS showed that BOD was gradually decreased from 2013 to 2016. but COD gradually increased between 2012 and 2016. As a result, it was confirmed that the period between 2012 and 2013 was a turning point in the increase of COD along with the decrease of BOD at all sites in Paldang Lake. Results of Cross Correlation showed that there was no time difference between all of Water variables and Sites. In this study, it is necessary to analyze the cause of the transition period and to monitoring the water quality more precisely for better water quality management in Paldang Lake.

Keywords: Paldang lake, Seasonal Kendall, LOWESS, Cross Correlation

I. 서론

팔당호는 남한강과 북한강 그리고 경안천이 합류하는 지점에 위치하여 매우 독특한 수리·수질 특성을 나타내고 있다(Kong et al, 1996). 호수의 형상은 좁고 긴 수지형으로 유역 특성과 유량이 상이한 세 종류의 유입에 따라 호 내 물의 흐름과 수질 분포가 불균일하게 유지되고 있다(Park et al, 2005). 또한 수표면적에 대한 유역면적의 비가 매우 크기 때문에 호수의 수리 및 수질은 유역으로부터의 강우 및 오염물질 유출에 직접적인 영향을 받는다(Kong 1995). 이처럼 팔당호는 복잡한 구조와 환경으로 인하여 시·공간적 수리, 수질 변화가 큰 수체이다. 따라서 수질 관리 시 양질의 상수원수 확보를 위하여 수질 및 유역 특성에 대한 과학적 규명이 필요하다. 이를 위하여 시·공간성을 고려한 장기 수질 변화 연구로 모수적 방법인 회귀분석은 물론 비정규성, 이상치 및 결측치 등을 고려한 비모수적 추세분석 방법인 Mann-Kendall, Seasonal Kendall test를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다(Xu et al, 2003; Kim and Park 2004; Birsan et al, 2005; Lee and Park 2008; Choi et al, 2008; Karpouzou et al, 2010; Kauffman et al, 2011; Yenilmez et al, 2011; Song et al, 2012; Kim et al, 2014). 팔당호를 대상으로 한 장기 추세분석 연구로는 1985~1993년까지 9년간 팔당댐 COD의 월별 측정 자료를 이용하여 수

질 추세를 잘 반영할 수 있는 통계분석기법을 모색한 연구(Lee 1995), 국가 물환경측정망 운영 지점 중 884개 하천과 호소 지점을 대상으로 1989~2009년까지의 수온 측정결과를 이용하여 Seasonal Kendall test를 실행한 연구(Han 2010), 팔당댐과 노량진을 대상으로 1994~2010년까지 BOD, COD, T-P, Chl-a 자료를 이용하여 Seasonal Kendall test 및 LOWESS (LOcally WEighted Scatter plot Smoother) 분석을 통한 국가 장기 수질 평가방법 개발 연구(NIER 2013) 등 여러 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 하지만 이들 연구는 팔당호 내 대표지점인 P2 지점의 수질 변동을 분석 하였을 뿐, 호 내 상·하류 지점 및 항목간 연관성은 고려하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 팔당호 내 수질 측정 지점에서의 장기간에 거친 수질변화 양상은 물론 호 내 지점 간 수질 변화의 시차성을 분석하고자 하였다. 이를 통하여 팔당호에 대한 수질 관리·정책 수립 시, 수질 상태 및 변화에 대한 보다 다양한 분석 자료를 제공하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상 지역

본 연구는 한강수계 내 팔당호에 위치한 물환경측정망 운영 지점 중 팔당댐2(P2), 팔당댐3(P3), 팔당댐4(P4), 팔당댐5(P5)를 조사 대상 지점으로 선정하

었다(Figure 1). 이중 P3는 평균수심 6.8 m로 남한강 유입지류의 영향을 받고 있으며 P4는 평균수심 9.2 m를 나타내며 호 내 지점 중 북한강 수계와 가장 인접한 지점이다. P5는 평균수심 2.4 m를 나타내며 경안천 수계의 영향을 받고 있는 지점이다. P2는 호 내 지점 중 가장 하류인 댐 앞에 위치하고 있어, 위 3개 지점의 물이 합류하는 곳으로 평균수심 22.5 m로 가장 깊고 호의 수질을 대표하는 지점이다.

2. 연구방법

본 연구는 국가 물환경측정망 중 팔당호에 대하여 2004년 1월부터 2016년 12월까지 총 13년 동안의 수온(°C), EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$), DO (mg/L)의 3개 현장항목과 BOD (mg/L), COD (mg/L), T-N (mg/L), T-P (mg/L), TOC (mg/L), Chl-a (mg/m^3)의 6개 수질 항목을 분석 대상으로 선정 하였다. 수질 분석 자료는 물환경정보시스템의 주별 측정자료 중 수심별 측정치의 평균값(MOE 2018)을 이용하였다. 팔당호의

수질변화를 살펴보기 위하여 본 자료를 바탕으로 추세분석 및 교차상관 분석을 수행하였다. 추세분석은 비모수적 방법을 활용한 Seasonal Kendall test와 LOWESS 분석을 이용하였고 이 두 결과 간 중첩 비교를 수행하였다. Seasonal Kendall test는 전체 연구기간 동안 수질의 전체적인 증감 경향성을 파악하기 위하여 수행하였고 LOWESS는 대상기간 중 증가, 감소의 변화가 발생하는 세부적인 구간을 파악하기 위하여 수행하였다. Seasonal Kendall test-LOWESS 결과의 중첩 비교는 그래프 비교를 통하여 수행하였으며 두 분석결과의 공통 변화 구간 및 차별 구간 확인을 통하여 보다 명확한 변화 시점 및 변화 정도를 살펴보기 위하여 수행하였다. 교차상관 분석(Cross Correlation)은 팔당호 내 상·하류 지점 간 수질변화의 시차성과 각 수질 항목 간 시차성 확인을 위하여 수행하였다. 이를 위하여 각 지점 간, 항목 간 상관분석(Correlation)을 우선 실행하였다. 통계분석은 SPSS 15.0과 R을 사용하였다.

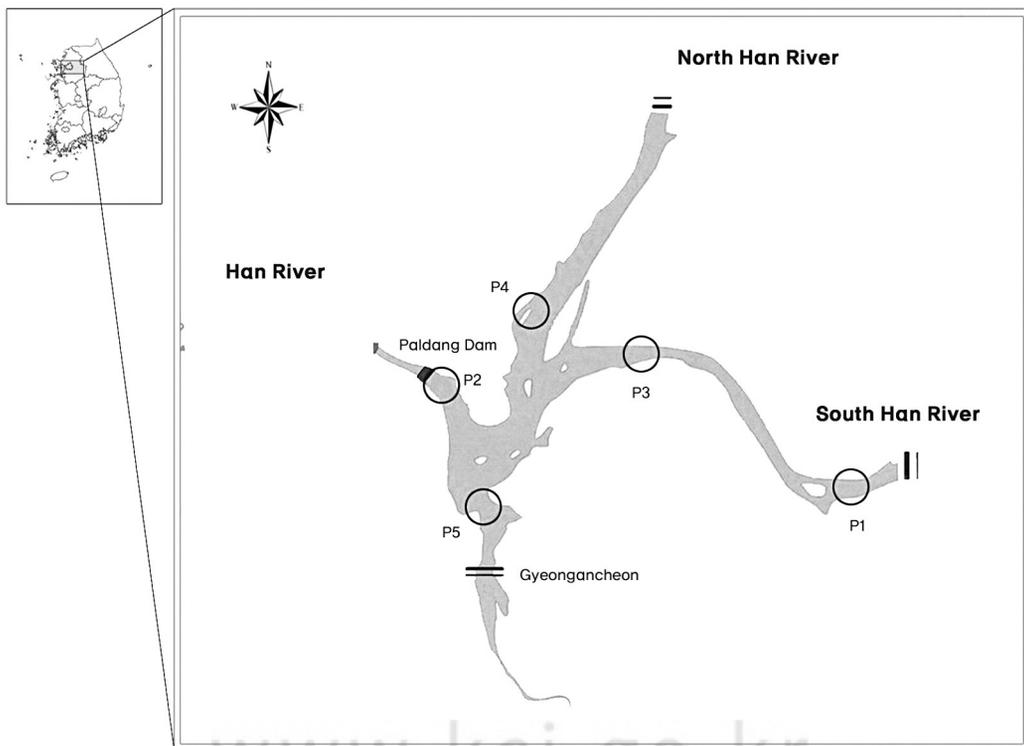


Figure 1. Location of study sites in Paldang lake.

1) Seasonal Kendall test

Seasonal Kendall test는 Mann-Kendall test의 확장형으로 데이터를 월별, 계절별로 구분하여 Kendall의 S통계량의 합으로 검정하며 식은 아래 (2)와 같다. 여기서 식(1)은 각 계절에 대한 Mann-Kendall 방법을 나타낸 것으로서 와 같다(Hirsch and Slack, 1984).

$$S_g = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_{ig} - X_{jg}) \quad (1)$$

$$S' = \sum_{g=1}^p S_g \quad (2)$$

표본이 큰(n>10) 경우 평균과 분산이 정규분포에 근사하게 되며 이때 아래의 식(3)을 이용한다(Helsel and Hirsch, 2002).

$$\mu_{sk} = 0$$

$$\text{Var}(S^*) = \sum_i \text{Var}(S'_i) = \sum_i [n_i(n_i - 1)(2n_i + 5)]/18 \quad (3)$$

$$\mu_{sk} = \text{mean}$$

$$\text{Var}(S^*) = \text{variance} \sum$$

또한 동일한 데이터가 여러 개 존재할 경우 그룹으로 묶어 식(3)에 대입하여 산출한다. 이때 평균이 0, n>10일 경우 Var(S*)을 이용한 표준화 Z통계량을 식(4)에 나타내었다.

$$\text{Var}(S^*) = \sum_i \text{Var}(S'_i) = \sum_i [n_i(n_i - 1)(2n_i + 5) - \sum_{t_i} t_i(t_i - 1)(2t_i + 5)]/18$$

$$Z_{sk} = \begin{cases} \frac{S^* - 1}{\sqrt{\text{Var}(S^*)_{sk}}} & S_k > 0 \\ 0 & S_k = 0 \\ \frac{S^* + 1}{\sqrt{\text{Var}(S^*)_{sk}}} & S_k < 0 \end{cases} \quad (4)$$

n_i = number of data in the i^{th} season
 t_i = number of tied group

이때 귀무가설 H_0 : slope $b_1^* = 0$ (no trend)이며 Z통계량과 p-value를 구해 유의성 검증과정을 거친 후 수질 추세의 유무를 판단하게 된다.

2) LOWESS (LOcally WEighted Scatter plot Smoother)

비모수적 평활(Smoothing) 방법은 연구기간 중 추세 변동이 존재할 경우 회귀선의 형태를 직선으로 한정하지 않고 적절한 경향의 변화를 반영할 수 있는 방법으로써 증가와 감소만을 나타내는 선형추세에 대한 단점을 보완하기 위하여 개발되었다. 따라서 LOWESS 분석은 x에 대한 일정한 수직 구간(span 또는 window)을 정하여 거리와 영향력을 조절한 후 각각의 값에 대한 이동직선을 구한다. 또한 이로부터 y의 평활점(smoother)을 얻고 이 평활점을 직선으로 연결한다. 따라서 본 방법은 회귀모형에 대한 가정 없이 회귀모형을 적용할 수 있다. 이동선(x_i, y_i)을 계산하기 위하여 $x=x_i$ 중심으로 $n \times f$ 에 가장 가까운 정수만큼의 데이터를 포함하도록 수직 띠의 폭을 결정한다(Kim et al, 2014). 이때 $x_i=x$ 이며 평활상수인 f 는 $0 < f < 1$ 의 범위를 가지며 기본 값은 1/3~2/3로 f 가 크면 x에 대한 구간의 크기가 커지고 더 많은 수의 데이터가 \hat{y}_i 의 추정치에 영향을 준다. 여기서 적절한 f 의 선택은 주관적 일 수 있다(Helsel & Hirsch 2002). 따라서 관측 자료의 적합도를 세밀히 관찰하여 적절한 f 값을 찾아야 한다. 본 연구에서는 f 값에 대하여 0.5를 사용하였고 반복수(Iter)는 3으로 실행하였다.

3) 교차상관(Cross Correlation)

교차상관은 두 개의 시계열 데이터에 있어서 서로 간의 시차상관을 알고자 할 때 유용한 방법이다(Noh 2007). 시차성이 존재하는 두 변수 X_t 와 X_{t+k} 의 관계를 X와 Y의 k^{th} 차수 상관이라고 하며 이에 대한 표본 추정치 r_k 는 식 (5)와 같다.

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (X_i - \bar{X})(Y_{i+k} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (5)$$

여기서 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$, $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$ 의 관계식이 성립한다. 또한 시간의 지수인 k는 음수, 양수 모두 가능하며 교차상관의 표본 표준오차는 $1/\sqrt{n}$, 신뢰한계는 $\pm 2/\sqrt{n}$ 을 의미한다.

III. 결과 및 고찰

1. Seasonal Kendall test 및 LOWESS 분석 결과

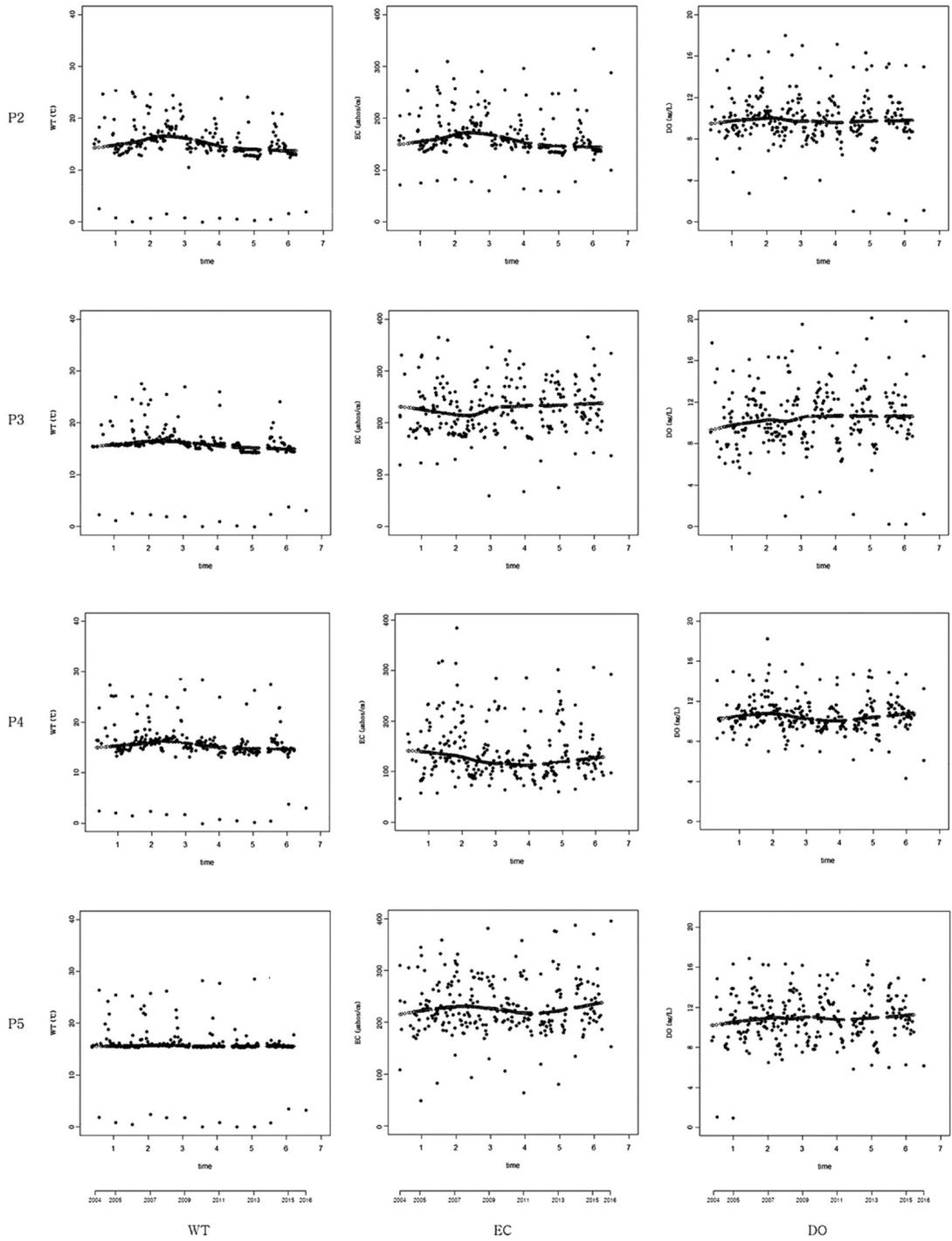
2004~2016년 팔당호의 각 지점별 수질 측정결과를 사용하여 Seasonal kendall test를 수행하였다. 조사기간 동안의 주별 수질 측정결과는 최대·최소, 평균, 표준편차로 요약하여 부록 1에 나타내었다. 수

질 항목별 Seasonal kendall test 결과(Table 1), 수온의 경우 전 지점에서 p-value는 0.000로 유의수준(α) 0.1 이하로 나타나 귀무가설($H_0 = \text{no trend}$)을 기각하여 수계 전반에 걸쳐 경사도에 따라 “증가”하는 경향을 나타내었다. EC의 경우는 전 지점 모두 p-value 0.000로 경사도에 따라 “감소”하는 경향을 나타내었다. DO는 P2, P3 지점에서 p-value

Table 1. The results of Seasonal Kendall tests of water quality variables at stations

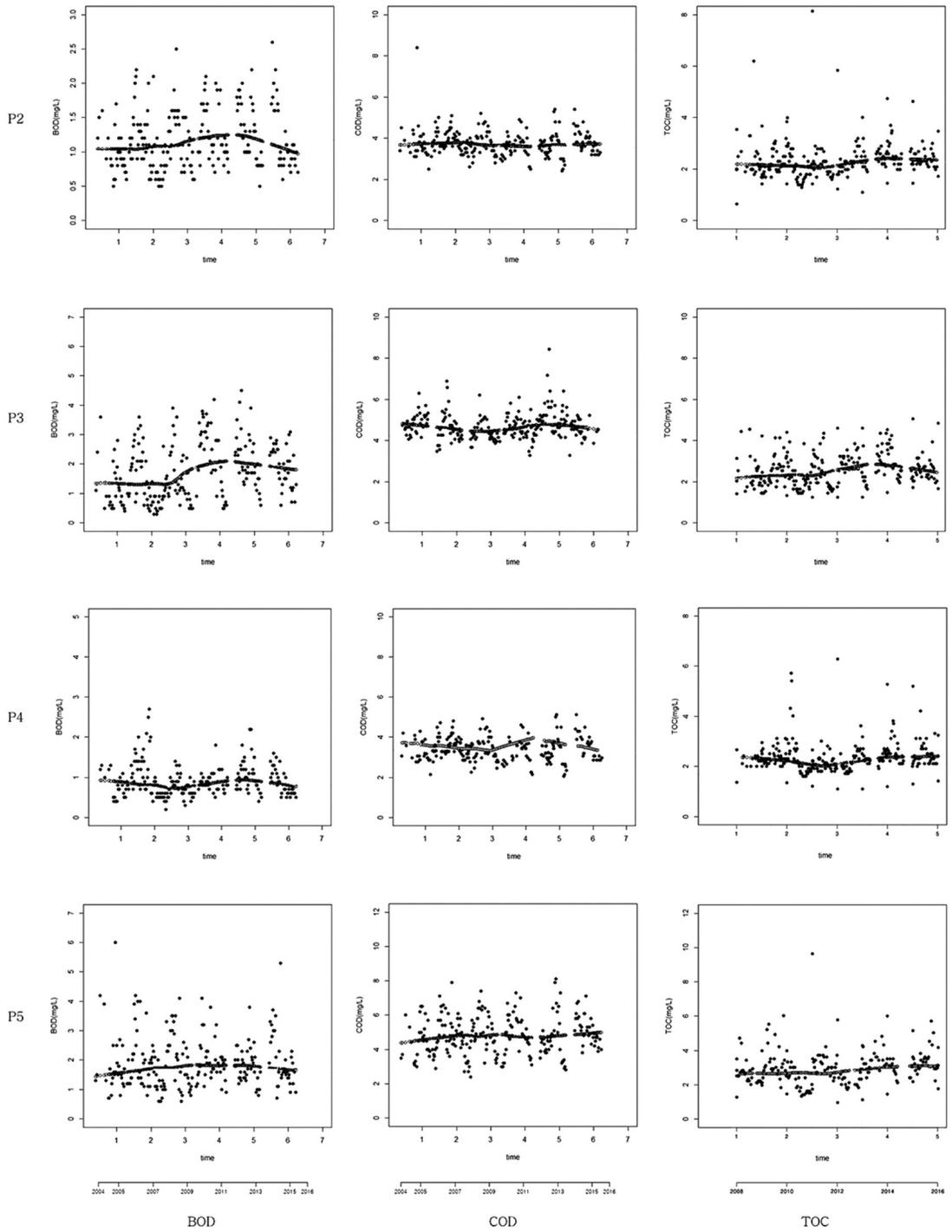
Water Variable	Station	Seasonal Kendall trend					
		Z-value	N	intercept	slope	p-value	trend
WT	P2	6.127	572	15.770	0.5081	0.000	▲
	P3	7.351	319	15.740	0.6534	0.000	▲
	P4	6.368	320	15.020	0.5411	0.000	▲
	P5	6.595	132	16.610	0.6528	0.000	▲
EC	P2	-2.011	572	0.035	-0.0030	0.000	▼
	P3	-4.159	319	0.037	-0.0030	0.000	▼
	P4	-3.305	320	0.013	-0.0024	0.000	▼
	P5	-2.701	132	0.029	-0.0035	0.000	▼
DO	P2	-1.734	572	0.015	-0.0430	0.000	▼
	P3	-1.505	319	0.042	-0.0110	0.000	▼
	P4	0.484	320	0.800	0.0000	0.628	●
	P5	-0.909	132	1.700	0.0000	0.363	●
BOD	P2	1.855	572	1.021	0.0230	0.064	▲
	P3	4.192	319	1.350	0.1000	0.000	▲
	P4	0.484	320	0.800	0.0000	0.628	●
	P5	-0.909	132	1.700	0.0000	0.363	●
COD	P2	-1.476	572	3.840	-0.0400	0.140	●
	P3	0.179	319	4.200	0.0000	0.858	●
	P4	-1.198	320	3.388	-0.0250	0.231	●
	P5	-2.013	132	5.050	-0.1000	0.044	▼
T-N	P2	-3.356	572	2.331	-0.0548	0.001	▼
	P3	-4.236	319	2.679	-0.0690	0.000	▼
	P4	-2.171	320	1.934	-0.0334	0.030	▼
	P5	-5.090	132	2.817	-0.1234	0.000	▼
T-P	P2	-6.770	572	0.037	-0.0030	0.000	▼
	P3	-5.577	319	0.048	-0.0037	0.000	▼
	P4	-7.675	320	0.022	-0.0021	0.000	▼
	P5	-6.078	132	0.049	-0.0047	0.000	▼
TOC	P2	2.808	385	1.925	0.0500	0.005	▲
	P3	3.557	268	2.150	0.1000	0.001	▲
	P4	2.373	269	1.683	0.0333	0.018	▲
	P5	1.477	100	2.683	0.0333	0.140	●
Chl-a	P2	-0.956	571	12.250	-0.4000	0.339	●
	P3	1.852	319	11.600	0.8000	0.064	▲
	P4	-2.319	320	8.319	-0.4625	0.020	▼
	P5	-1.034	132	15.560	-0.6167	0.301	●

WT : Water Temperature
 Water Quality Trend : Increase ▲, Constant ●, Decrease ▼



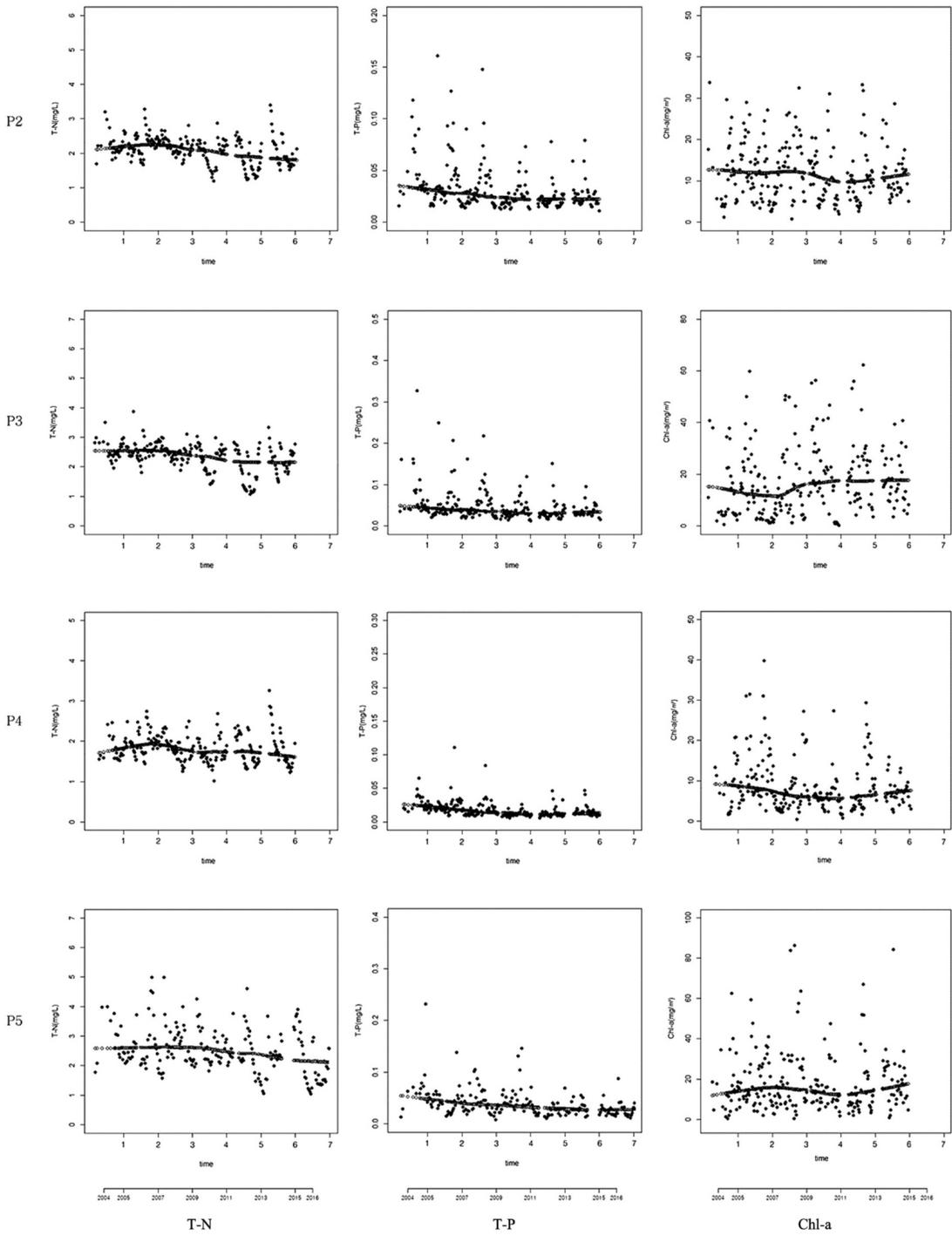
(a) WT, EC, DO

Figure 2. The results of LOEWSS of water quality variables at stations; (a) WT, EC, DO, (b) BOD, COD, TOC, (c) T-N, T-P, Chl-a.



(b) BOD, COD, TOC

Figure 2. Continued



(c) T-N, T-P, Chl-a

Figure 2. Continued

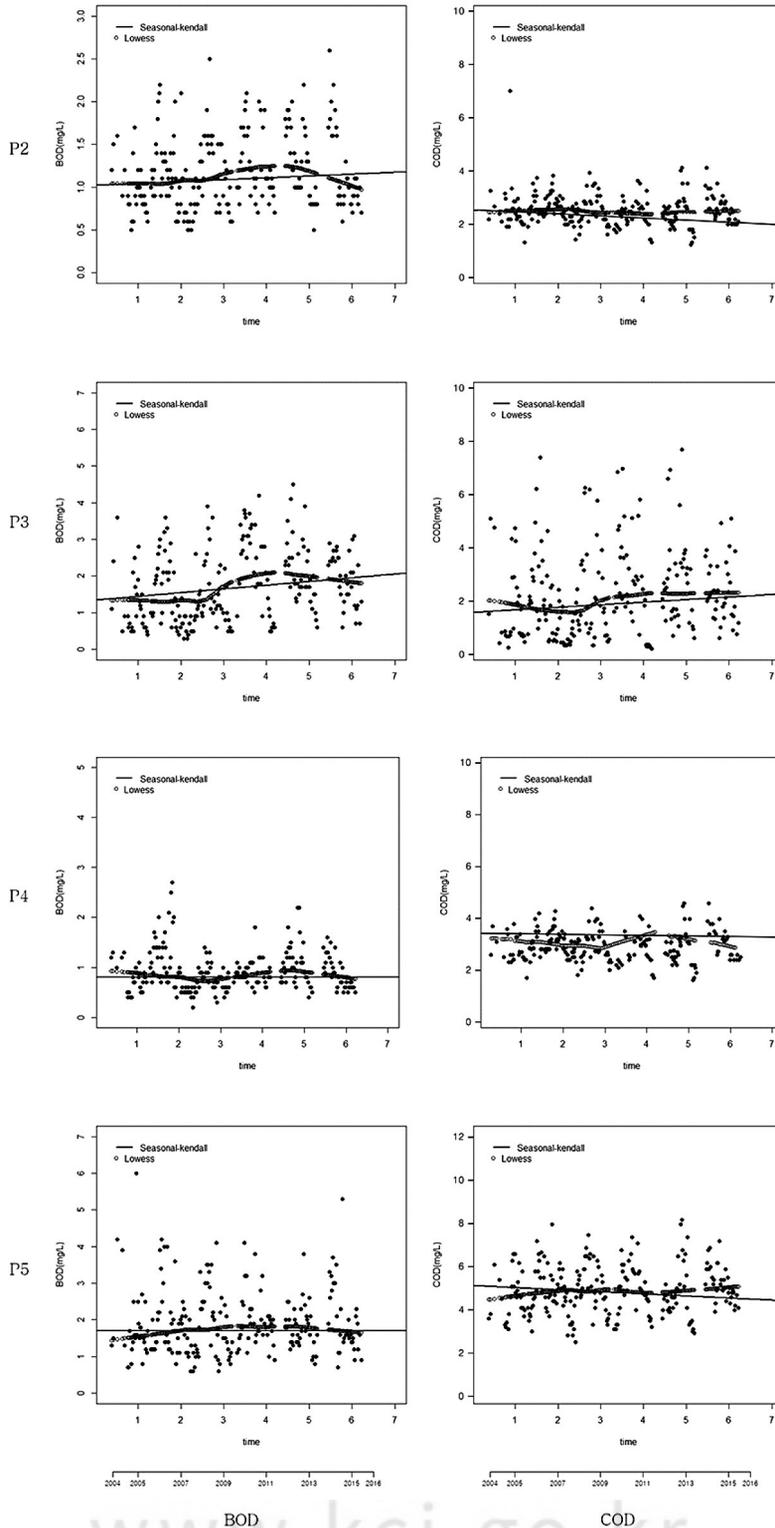


Figure 3. Seasonal Kendall and LOEWSS trend by the weekly data of BOD, COD

0.000로 경사도에 따라 “감소”하였고 P4, P5에서는 p-value 0.628, 0.363로 유의성이 없어 증가 또는 감소 추이에 대한 경향성을 나타내지 않았다. BOD의 경우 P2, P3 지점에서 p-value는 0.064, 0.000로 경사도에 따라 “증가” 경향을 나타내었고 나머지 지점에서는 “경향성 없음”을 나타내었다. COD는 P5 지점은 p-value 0.041로 경사도에 따라 “감소” 경향을 나타내었고 나머지 지점에서는 “경향성 없음”을 나타내었다. T-N, T-P의 경우 전 지점 모두 “감소” 경향을 나타내었다. TOC는 P2, P3, P4 지점에서 p-value는 0.005, 0.001, 0.018로 경사도에 따라 “증가”하였고 P5 지점에서는 “경향성 없음”을 나타내었다. Chl-a는 P3 지점에서는 “증가” P4 지점에서는 “감소”하였고 P2, P5 지점에서는 “경향성 없음”을 나타내었다. 즉 수온, EC, T-N, T-P는 전 지점에서 모두 증감 경향이 일치하였다. 하지만 타 항목에서는 지점에 따라 경향성이 일치하지 않았다. 경향성이 나타난 항목을 대상으로 지점별로 살펴보았을 때, 지난 13년 동안 P2 지점에서는 수온, BOD, TOC는 “증가”하였으나 EC, DO, T-N, T-P는 “감소”하였다. P3 지점에서는 수온, BOD, TOC, Chl-a는 “증가”하였고 EC, DO, T-N, T-P는 “감소”하여 전반적으로 P2 지점과 유사한 경향성을 나타내었다. P4 지점에서는 수온, TOC는 “증가”하였고 EC, T-N, T-P, Chl-a는 “감소”하였다. P5 지점에서는 공통적으로 변화한 항목 외에 COD만 “감소”하였다. 따라서 팔당호의 수질 변화는 각 지점별로 일치하고 있지는 않았다. 하지만 “증가”, “감소”, “경향성 없음”의 세 가지 경우를 나타내는 Seasonal Kendall test 만으로는 지점, 항목 간 수질 변화 특성을 파악하기에 어려운 것으로 판단되었다.

LOWESS 분석 결과 BOD, COD는 전 지점에서 수질 변동을 나타내었으나 나머지 항목은 경향성을 찾을 수 없었다(Figure 2). BOD는 전 지점 모두 공통적으로 2013년부터 2016년까지 “감소” 경향을 나타내었고 그 외 년도에서는 경향성이 일치하지 않았다. COD는 전 지점에서 공통적으로 2012년부터 2016년까지 “증가” 경향을 나타내었고 그 외 년도에서는 경향성이 일치하지 않았다. 이로써 팔당호에서는 생분

해성 유기물에 의한 수질의 영향은 감소하고 있으나 난분해성 물질에 의한 영향은 증가하고 있는 것으로 판단할 수 있었다. 나머지 항목에서는 증감변동을 확인할 수 없었다.

Seasonal Kendall test-LOWESS 중첩 비교 결과(Figure 3), BOD의 경우 P2, P3 지점에서는 2004년부터 2012년까지 지속적으로 증가 후 2013년부터 감소 추세로 전환된 것을 확인할 수 있었고 나머지 지점에서는 2012년까지는 일정 수준을 유지하다 2013년 이후 감소 추세로 전환된 것으로 나타났다. 전 지점 모두 이전년도에 비해 감소폭은 크지 않았다. COD의 경우는 P5 지점에서 2004년부터 2011년까지 감소 추세를 보였으나 2012년부터 소폭 증가된 경향을 나타내었다. 나머지 지점에서는 2012년까지 일정 수준을 유지하다 2012년 이후 소폭 증가 추세로 전환되었다. 따라서 2012~2013년, 팔당호 전 지점에서 BOD의 개선과 함께 COD의 증가를 나타내는 전환기임을 확인할 수 있었다.

2. 상관분석 결과

지점별 수질 변화 추세를 살펴본 후 상류지점과 P2 지점의 관련성을 살펴보기 위하여 지점별 수질 항목 간 상관분석을 수행하였다(Table 2). 분석 결과 유의수준 0.01에서 수온, DO는 P2 지점과 P3, P4, P5 지점 모두 $r = 0.988, 0.987, 0.978$ 로 상관성이 높았으며 EC는 P3, P5 지점과 $r = 0.765, 0.506$ 으로 유의하였으나 P4 지점에서는 $r = 0.345$ 로 낮게 나타났다. T-N, T-P, TOC의 경우, 전 지점 모두 상관계수가 0.5 이상을 나타내어 유의하였다. Chl-a는 P3, P4 지점에서 $r = 0.592, 0.544$ 로 유의한 상관성을 나타내었으나 P5 지점에서는 $r = 0.401$ 로 상관성이 약한 경향을 나타내었다. 따라서 P2 지점과 상류 지점의 수질은 대체로 상관성이 유의한 것으로 나타났다. 또한 수질 항목 간 영향정도를 파악하기 위하여 항목 간 상관분석을 수행하였다(Table 3). 분석결과 유의수준 0.01에서 수온은 DO와 $r = -0.687$ 로 유의한 상관성이 있었고 EC는 BOD와 $r = 0.500$ 으로 유의하였다. BOD는 EC ($r = 0.500$), COD ($r = 0.644$), TOC ($r = 0.593$), Chl-a ($r = 0.722$)와 유의

Table 2. The results of correlation analysis of Paldang Dam (P2) major inflow streams (P3, P4, P5)

	P3	P4	P5
P2 WT	.988**	.987**	.978**
P2 EC	.765**	.345**	.506**
P2 DO	.833**	.852**	.625**
P2 BOD	.639**	.510**	.441**
P2 COD	.720**	.498**	.618**
P2 TOC	.778**	.524**	.647**
P2 T-N	.857**	.794**	.771**
P2 T-P	.906**	.630**	.817**
P2 Chl-a	.592**	.544**	.401**

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).
WT : Water temperature

Table 3. The results of correlation analysis of water quality variables

	WT	EC	DO	BOD	COD	TOC	T-N	T-P	Chl-a
WT	1	.100**	-.687**	.183**	.327**	.408**	-.302**	.200**	.207**
EC	.100**	1	-.025	.500**	.340**	.347**	.290**	-.002	.276**
DO	-.687**	-.025	1	.183**	-.043	-.118**	.344**	-.146**	.159**
BOD	.183**	.500**	.183**	1	.644**	.593**	.282**	.174**	.722**
COD	.327**	.340**	-.043	.644**	1	.850**	.201**	.540**	.517**
TOC	.408**	.347**	-.118**	.593**	.850**	1	.129**	.529**	.438**
T-N	-.302**	.290**	.344**	.282**	.201**	.129**	1	.345**	.156**
T-P	.200**	-.002	-.146**	.174**	.540**	.529**	.345**	1	.095**
Chl-a	.207**	.276**	.159**	.722**	.517**	.438**	.156**	.095**	1

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

한 상관성을 나타내었다. COD는 BOD ($r = 0.644$), TOC ($r = 0.850$), T-P ($r = 0.540$), Chl-a ($r = 0.517$)와 유의한 상관성을 나타내었다. TOC는 BOD ($r = 0.593$), COD ($r = 0.850$), T-P ($r = 0.529$)와 유의한 상관성을 나타내었다. T-N의 경우는 어떤 수질항목과도 상관성을 나타내지 않았으며 T-P는 COD ($r = 0.540$), TOC ($r = 0.529$)와 유의한 상관성을 나타내었다. Chl-a는 BOD ($r = 0.722$), COD ($r = 0.517$)와 유의한 상관성을 나타내는 것으로 분석되었다. 즉 팔당호 전 지점의 수질은 항목별로 서로 다른 상관성을 보이고 있었다.

3. 교차상관 분석 결과

상관분석 결과 유의한 상관관계가 나타난 지점 및 항목에 대한 시차성을 알아보기 위하여 교차상관 분석을 수행하였다. 지점 간 교차상관 분석 결과(Table 4), P2 지점의 상류에 위치하고 있으며 상관성이 유의하

게 나타난 P3, P4, P5 지점의 수질 변화에는 CCF (Cross Correlation 지수) > 0.55 이상인 시차 값이 “0”로 분석되어 시차성이 나타나지 않았다. 또한 상관성이 유의하게 나타난 수질 항목의 경우에도 시차성이 나타나지 않았다(Table 5). P2 지점과 상류 지점 간 유속 및 유하거리에 따른 유하시간의 차이가 있음에도 시차성이 나타나지 않은 주 이유는 연구대상 기간의 장기성(13년간), 거시성으로 인하여 강우기 전·후, 계절 변화에 따른 유하시간 변화를 반영하지 못한데 원인이 있을 것으로 판단된다. 또한 상관분석 결과 유의한 상관성을 나타내었던 수질 항목 간 시차성이 나타나지 않은 이유는 항목 간 1주 이내에서 변화하였거나 수심별 측정 자료가 아닌 전체 수심 평균 자료의 사용에 따른 지점별 수심 변화 미반영, 수직·수평 혼합 효과 미반영 등에 의한 것으로 판단할 수 있었다.

Table 4. The results of cross correlation analysis of Paldang dam (P2) and major inflow streams (P3, P4, P5)

Water variable	P2-P3		P2-P4		P2-P5	
	Lag	Cross Correlation	Lag	Cross Correlation	Lag	Cross Correlation
WT	0	.988	0	.987	0	.978
EC	0	.785	0	.506	0	.345
DO	0	.833	0	.852	0	.625
BOD	0	.639	0	.510	0	.442
COD	0	.720	0	.498	0	.628
TOC	0	.778	0	.624	0	.687
T-N	0	.857	0	.794	0	.771
T-P	0	.906	0	.630	0	.817
Chl-a	0	.592	0	.544	0	.491

Table 5. The results of cross correlation analysis of water quality variables

Lag	WT-DO	BOD-EC	BOD-COD	BOD-TOC	BOD-Chl-a	COD-TOC	COD-T-P	COD-Chl-a	TOC-T-P	TOC-Chl-a
-7	-.224	.396	.164	.226	.097	.238	.140	.090	.064	.060
-6	-.304	.412	.178	.220	.140	.257	.140	.126	.086	.081
-5	-.372	.423	.240	.262	.242	.323	.215	.185	.151	.122
-4	-.443	.438	.287	.292	.213	.318	.243	.177	.221	.119
-3	-.509	.447	.310	.306	.284	.335	.212	.217	.162	.187
-2	-.575	.443	.388	.377	.330	.370	.225	.269	.201	.208
-1	-.635	.462	.412	.381	.410	.373	.208	.346	.203	.285
0	-.687	.500	.644	.593	.722	.850	.540	.517	.529	.438
1	-.732	.466	.426	.395	.374	.359	.207	.342	.201	.314
2	-.724	.458	.388	.374	.353	.326	.200	.327	.198	.303
3	-.699	.445	.353	.349	.263	.275	.194	.267	.200	.244
4	-.659	.424	.326	.323	.240	.301	.241	.253	.241	.230
5	-.606	.426	.310	.297	.209	.263	.214	.215	.215	.236
6	-.551	.397	.275	.281	.163	.215	.147	.198	.139	.231
7	-.475	.379	.275	.300	.171	.172	.120	.168	.112	.223

IV. 결론

본 연구는 북한강, 남한강, 경안천의 수질에 영향을 받고 있는 팔당호 내 3개 지점과 이의 하류에 위치하여 최종방류가 일어나고 있는 P2 지점을 대상으로 2004년부터 2016년까지 13년 동안의 장기 수질변화와 각 지점 및 항목 간 영향관계를 분석하기 위하여 수행하였다. Seasonal Kendall test 결과 팔당호의 수질 변화는 각 지점별로 일치하고 있지는 않았다. 이는 각 지점에 따라 서로 다른 수계의 영향을 받고 있기 때문인 것으로 판단할 수 있었다. LOWESS 분석 결과 BOD 농도는 전 지점에서 2013년부터 2016년까지 “감소” 경향을 나타내었고 COD는 2012년부터 2016년까지 “증가” 경향을 나타내었다. Seasonal Kendall test-LOWESS 중첩 비교 결과 BOD와

COD는 경향이 일치하였으나 나머지 항목은 경향성이 서로 일치하지는 않았다. 즉 2012~2013년은 팔당호 전 지점에서 BOD의 개선과 함께 COD의 증가가 나타나는 전환기였음을 확인할 수 있었다. 따라서 본 기간에 대한 면밀한 원인 규명 연구가 필요할 것으로 판단된다. 팔당호 내 상·하류 지점과 수질 항목 간 교차상관 분석 결과, 모두 시차성을 확인할 수 없었다. P2 지점과 상류 지점 간 유속 및 유하거리에 따른 유하시간의 차이가 있음에도 시차성이 나타나지 않은 주 이유는 13년이라는 연구기간 동안의 거시적 변화를 파악하기 위하여 강우기 전·후, 계절 변화에 따른 유하시간 변화 등을 반영하지 못한 원인일 것으로 판단된다. 또한 상관분석 결과 유의한 상관성을 나타낸 수질 항목 간 시차성이 나타나지 않은 이유는

1주 간격의 수질자료를 사용하였기 때문에 1주 이내에서 나타날 수 있는 연속적인 수질 변화를 반영하기에 한계가 있었으며 전체 수심의 평균 측정치 사용에 따른 수심 변화 미반영, 수직·수평 혼합 효과 미반영 등에 의한 영향일 것으로 판단된다. 따라서 본 연구를 통하여 계절과 강우기 전·후를 고려한 시간차분과 함께 수심별 측정 자료의 사용을 통한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 팔당호에 대한 보다 적합한 수질관리를 위하여 위의 전환기에 대한 발생 원인 분석과 함께 수질 측정주기의 증가를 통한 보다 정밀한 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국립환경과학원 조사연구사업 “담수 중 미세플라스틱 분포 및 거동 특성 연구(I)” 및 GEMS (Global Environmental Monitoring System)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Birsan MV, Molnar P, Burlando P, Pfaundler M. 2005. Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology*. 314: 312-329.
- Cho BW, Choi JH, Yi SJ, Kim YI. 2012. Selection Priority of Tributary Catchments for Improving Water Quality using Stream Grouping Method. *Journal of Korean Society on Water Quality*. 28(1): 18-25. [Korean Literature]
- Choi JH, Ha JH, Park SS. 2008. Estimation of the Effect of Water Quality Management Policy in Paldang Lake. *Journal of Korean Society of Environmental Impact Assessment*. 30(12): 1225-1230. [Korean Literature]
- Han DH. 2010. Temporal and Spatial Analysis of Water Temperature and Water Quality Assessment of Streams and Reservoirs in Korea. University of Seoul. [Korean Literature]
- Helsel DR, Hirsch RM. 2002. *Statistical Methods in Water Resources Techniques of Water-Resources Investigations*. Book 4. Chapter A3, U. S. Geological Survey: 226-230.
- Helsel DR, Frans LM. 2006. Regional Kendall Test for trend, *Environmental Science & Technology*, 40(13): 4066-4073.
- Hirsch RM, Slack JR, Smith RA. 1982. Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. *Water Resources Research*. 18(1); 107-121.
- Hirsch RM, Slack JR. 1984. A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data With Serial Dependence. *Water Resources Research*. 20(6): 727-732.
- Johnson NM, Likens GE, Bormann FH, Fisher DW, Pierce RS. 1969. Nitrification: Importance to nutrient losses from a cutover forested ecosystem. *Science*. 163(3872): 1205-1206.
- Karpouzou DK, Kavalieratou S, Babajimopoulos C. 2010. Trend Analysis of Precipitation Data in Pieria Region(Greece). *European Water*. 30: 31-40.
- Kauffman JG, Homsey RA, Belden CA, Sanchez RJ. 2011. Water Quality Trends in the Delaware River Basin (USA) from 1980 to 2005. *Environmental Monitoring and Assessment*. 177: 193-225.
- Kong DS. 1995. Nutritional Characteristics of Lake Paldang. *Articles in Symposium of Korean Society of Water Quality*: 167-196. [Korean Literature]
- Kong DS, Yoon IB, Ryu JK. 1996. Hydrological Characteristics and Water Budget Lake Paldang. *Korean Journal of Limnology*. 29(1): 51-64. [Korean Literature]
- Kim, JM, Heo SN, Noh HR, Yang HJ, Lim YJ,

- Jeong WT. 2002. Seasonal and long-term trend of water quality in Lake Paldang. *Journal of Korean Society on Water Quality*. 18(1): 67-76. [Korean Literature]
- Kim JH, Park SS. 2004. Long-Term Trend Analyses of Water Qualities in Nakdong River Based on Non-Parametric Statistical Methods, *Journal of Korean Society on Water Environment*. 20(1): 63-71. [Korean Literature]
- Kim EJ, Kim YS, Rhew DH, Ryu JC, Pak BK. 2014. A Study on the WaterQuality Changes of TMDL Unit Watershed in Geum River Basin Using a Nonparametric Trend Analysis. *Journal of Korean Society on Water Environment*. 30(2): 148-158. [Korean Literature]
- Kim JT. 2014. Lowess and outlier analysis of biological oxygen demand on Nakdong main stream river. *Journal of Korean Data & Information Science Society*. 25(1): 119-130. [Korean Literature]
- Lee SH. 1995. A Study of Non-parametric Statistical Tests to Analyze Trend in Water Quality Data. *Journal of Korean Society of Environmental Impact Assessment*. 4(2): 93-103. [Korean Literature]
- Lim BS, Cho BW, Kim YI, Kim DY. 2010. Application of Priority Order Selection Technique for Water Quality Improvement in Stream Watershed by Relationship of Flow and Water Quality. *Environmental Engineering Research*. 32(8): 802-808. [Korean Literature]
- MOE. 2006. Water environment management plan of Paldang dam. [Korean Literature]
- MOE. 2006. Basic plan for water environment management: Master plan for warer quality management ; Basic plan for water quality conservation in great basin of 4 rivers, ('06~'15). [Korean Literature]
- MOE. 2011. Research report for improvement water quality and eco system in tributary streams. [Korean Literature]
- NIER [Internet]. <http://water.nier.go.kr>.
- NIER. 2013. A Study on long-term water quality assessment (I). [Korean Literature]
- NIER. 2013. The water pollution standard method. [Korean Literature]
- Noh HJ. 2007. Interesting trend analysis by SPSS/Excel, *Hyo-san Books*: 59-64. [Korean Literature]
- Park HK, Lee HJ, Kim EK, Jung DI. 2005. Characteristics of Algal Abundance and Statical Analysis of Environmental Factors in Lake Paldang. *Journal of Korean Society on Water Quality*. 21(6): 584-594. [Korean Literature]
- Seo IW, Choi SY, Kim SE. 2014. Classificaton of Water Quality Sampling Station in Nakdong River Based on Water Quality Characteristics using Cluster Analysis. *Articles in Conference proceeding of Journal of the korean society of civil engineers*. 10: 519-520. [Korean Literature]
- Shrestha S and Kazama F. 2007. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin Japan. *Environmental Modelling & Software*. 22: 464-475.
- Youn SJ, Park HJ, Shin KA. 2009. Ecological Characteristics of Phytoplankton Community from Major Lakes in the Han River System. *Conference Papers of Korean Society of Water Quality*. A(17): 79-80. [Korean Literature]

Annex 1. Summary of water quality measurement data; Maximum, Minimum, Average, Standard division

Station	year	Classification	WT (°C)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	TOC (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)
P2	2004	Maximum	28.1	205	15.1	3.6	6.3	4.397	0.515		88.1
		Minimum	3.0	72	6.8	0.5	2.6	1.329	0.010		1.0
		Average	15.3	141	10.3	1.3	4.0	2.109	0.055		20.3
		Standard division	5.6	29	1.8	0.5	0.9	0.451	0.052		14.9
	2005	Maximum	26.7	214	16.5	2.9	6.7	3.501	0.228		51.6
		Minimum	1.1	76	4.5	0.5	1.9	1.332	0.003		1.7
		Average	14.9	132	9.9	1.1	3.6	2.296	0.052		18.1
		Standard division	6.9	30	2.3	0.4	0.9	0.403	0.040		11.9
	2006	Maximum	26.5	226	16.0	3.4	5.5	3.696	0.235		72.4
		Minimum	0.0	75	3.1	0.4	1.1	1.418	0.005		1.7
		Average	15.1	143	10.6	1.2	3.4	2.177	0.062		19.3
		Standard division	6.4	32	2.4	0.6	0.7	0.396	0.039		13.1
	2007	Maximum	25.0	270	16.6	4.3	7.0	3.840	0.133		57.8
		Minimum	1.0	83	7.4	0.4	2.0	1.615	0.017		2.1
		Average	13.7	156	11.5	1.2	3.6	2.377	0.051		15.7
		Standard division	7.2	36	2.5	0.6	0.8	0.394	0.023		11.4
	2008	Maximum	28.0	265	18.0	4.9	6.9	3.585	0.151	3.6	49.4
		Minimum	2.0	81	4.4	0.4	2.3	1.359	0.011	0.7	1.4
		Average	15.3	150	10.7	1.3	3.8	1.935	0.046	2.0	15.9
		Standard division	6.8	36	2.9	0.8	0.8	0.311	0.024	0.5	10.0
2009	Maximum	27.0	231	17.1	3.4	6.4	2.775	0.134	3.8	53.3	
	Minimum	1.0	68	7.0	0.4	2.3	1.149	0.010	1.5	1.7	
	Average	14.9	147	10.8	1.4	4.0	1.745	0.036	2.5	17.2	
	Standard division	6.8	40	2.4	0.7	0.8	0.274	0.020	0.5	12.3	
2010	Maximum	28.0	257	15.6	3.1	6.2	2.921	0.164	3.9	51.9	
	Minimum	0.0	92	4.0	0.4	2.7	1.460	0.010	1.5	1.5	
	Average	14.7	155	10.5	1.2	4.0	2.116	0.036	2.1	15.1	
	Standard division	7.4	35	2.4	0.5	0.6	0.303	0.025	0.4	9.0	
2011	Maximum	27.3	299	17.3	2.7	12.2	3.970	0.316	8.5	40.8	
	Minimum	1.0	76	8.0	0.5	2.1	1.682	0.011	1.5	1.0	
	Average	14.7	162	11.3	1.1	3.8	2.346	0.049	2.2	12.1	
	Standard division	6.1	36	1.6	0.4	1.0	0.429	0.042	0.8	8.0	
2012	Maximum	32.0	219	15.0	2.8	5.9	3.636	0.209	5.8	44.5	
	Minimum	0.8	72	1.5	0.4	2.7	1.553	0.013	1.2	1.5	
	Average	15.2	146	10.2	1.1	3.9	2.288	0.044	2.2	12.7	
	Standard division	7.1	31	2.2	0.5	0.6	0.340	0.031	0.6	8.2	
2013	Maximum	28.2	249	15.2	3.2	7.0	2.921	0.193	4.0	50.5	
	Minimum	0.2	70	7.0	0.4	2.1	1.425	0.011	1.1	0.6	
	Average	14.7	151	10.5	1.2	3.8	2.160	0.039	2.0	13.7	
	Standard division	7.3	39	1.8	0.5	0.7	0.246	0.033	0.5	8.4	
2014	Maximum	28.1	256	15.6	3.2	6.0	3.808	0.084	4.7	56.1	
	Minimum	0.7	95	1.3	0.5	2.2	1.002	0.009	1.6	0.6	
	Average	16.0	183	10.0	1.3	3.6	1.952	0.025	2.2	10.5	
	Standard division	7.1	42	2.4	0.5	0.6	0.398	0.013	0.5	8.1	
2015	Maximum	29.9	338	15.2	3.9	7.1	2.987	0.108	4.6	55.8	
	Minimum	2.0	115	0.2	0.4	2.2	1.122	0.009	1.6	2.0	
	Average	16.6	204	8.2	1.3	3.6	1.875	0.023	2.4	11.4	
	Standard division	7.3	45	3.7	0.5	0.7	0.483	0.012	0.5	8.3	
2016	Maximum	31.8	293	15.1	3.7	6.4	3.738	0.090	3.8	47.4	
	Minimum	2.2	100	1.1	0.4	2.9	1.422	0.008	1.8	2.7	
	Average	16.2	202	9.3	1.2	3.9	2.070	0.026	2.3	11.9	
	Standard division	7.0	50	2.5	0.5	0.6	0.464	0.014	0.4	6.3	

Annex 1. Continued

Station	year	Classification	WT (°C)	EC (µS/cm)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	TOC (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)
P3	2004	Maximum	29.4	211	15.6	4.0	6.3	2.912	0.142		76.5
		Minimum	2.0	110	8.1	0.6	2.2	1.799	0.028		5.1
		Average	14.3	186	11.4	1.7	4.2	2.356	0.062		28.4
		Standard division	7.0	29	2.1	1.0	1.0	0.315	0.033		22.2
	2005	Maximum	26.5	235	15.3	3.1	6.0	3.451	0.120		52.1
		Minimum	1.0	116	6.9	0.3	2.1	2.089	0.021		1.6
		Average	16.0	179	10.3	1.2	3.7	2.749	0.061		15.4
		Standard division	7.0	34	2.3	0.7	1.2	0.387	0.031		14.6
	2006	Maximum	26.0	237	16.2	4.4	5.4	3.750	0.174		65.1
		Minimum	2.5	111	5.5	0.4	2.2	1.865	0.032		0.9
		Average	15.0	193	11.9	1.8	3.6	2.461	0.062		25.8
		Standard division	7.3	29	3.0	1.0	0.7	0.412	0.030		15.9
	2007	Maximum	25.0	261	16.7	6.3	7.1	3.638	0.156		70.6
		Minimum	2.4	127	7.3	0.5	2.0	1.998	0.025		1.7
		Average	14.3	200	11.6	1.7	3.9	2.655	0.069		17.2
		Standard division	7.2	36	2.7	1.3	1.1	0.405	0.038		16.0
	2008	Maximum	25.7	241	16.4	5.3	6.9	3.016	0.100	3.1	77.1
		Minimum	2.0	168	2.2	0.5	2.4	1.737	0.024	1.5	2.7
		Average	15.1	205	11.7	1.9	4.2	2.273	0.058	2.3	22.9
		Standard division	7.3	21	3.4	1.3	1.3	0.349	0.021	0.5	22.9
2009	Maximum	28.0	258	19.1	4.9	7.2	2.581	0.106	4.1	60.9	
	Minimum	2.0	68	3.2	0.6	2.0	1.320	0.013	1.9	6.7	
	Average	16.1	209	12.4	2.6	4.7	2.028	0.038	3.2	27.1	
	Standard division	7.6	44	3.6	1.2	1.2	0.310	0.016	0.7	16.3	
2010	Maximum	29.0	250	18.3	5.1	8.6	3.024	0.122	4.4	73.8	
	Minimum	0.0	150	3.6	0.5	2.6	1.596	0.021	1.4	2.6	
	Average	15.7	207	11.1	1.6	4.6	2.366	0.046	2.3	19.4	
	Standard division	8.1	26	3.1	1.1	1.3	0.407	0.028	0.7	19.5	
2011	Maximum	27.4	250	17.3	3.8	24.1	3.518	0.336	16.0	42.0	
	Minimum	0.9	78	8.6	0.4	1.8	1.941	0.029	1.3	0.4	
	Average	15.8	196	11.5	1.2	4.3	2.564	0.072	2.7	12.4	
	Standard division	6.4	39	1.8	0.8	3.5	0.321	0.060	2.5	12.1	
2012	Maximum	30.8	268	15.2	4.7	7.1	3.917	0.253	4.6	75.0	
	Minimum	0.2	120	2.4	0.2	2.7	1.687	0.020	1.3	1.1	
	Average	15.5	198	10.5	1.5	4.3	2.597	0.056	2.5	14.6	
	Standard division	7.7	34	2.5	1.1	0.9	0.346	0.045	0.8	14.2	
2013	Maximum	29.9	256	20.2	5.9	7.6	3.282	0.234	4.6	67.1	
	Minimum	0.1	85	5.9	0.5	2.2	1.735	0.018	1.3	0.9	
	Average	15.1	200	11.1	1.4	4.2	2.459	0.055	2.3	15.4	
	Standard division	7.8	34	2.4	1.0	1.1	0.246	0.040	0.8	14.9	
2014	Maximum	29.6	278	16.5	5.5	6.5	3.055	0.122	4.5	68.3	
	Minimum	2.1	143	0.4	0.5	2.1	1.301	0.011	1.6	0.2	
	Average	16.6	236	11.1	2.2	4.4	2.215	0.037	2.7	19.2	
	Standard division	7.7	25	3.2	1.1	1.0	0.459	0.021	0.6	15.4	
2015	Maximum	32.2	344	19.8	5.4	8.2	3.645	0.157	5.2	77.5	
	Minimum	4.0	144	0.4	0.6	2.5	1.037	0.008	1.9	2.7	
	Average	18.1	268	9.8	2.1	4.3	1.987	0.035	3.0	21.4	
	Standard division	7.7	42	3.7	1.0	1.1	0.694	0.025	0.7	15.4	
2016	Maximum	32.8	338	16.8	4.1	6.5	3.477	0.107	4.9	62.2	
	Minimum	3.7	126	1.0	0.5	3.1	1.411	0.015	1.8	3.1	
	Average	17.5	260	9.8	1.9	4.4	2.267	0.035	2.5	18.0	
	Standard division	7.3	43	3.4	0.7	0.7	0.394	0.015	0.5	10.3	

Annex 1. Continued

Station	year	Classification	WT (°C)	EC (µS/cm)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	TOC (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)
P4	2004	Maximum	23.6	197	14.3	2.7	7.2	2.267	0.186		61.4
		Minimum	3.0	52	8.2	0.4	1.8	1.114	0.016		5.9
		Average	14.0	95	10.7	1.2	3.7	1.595	0.033		18.9
		Standard division	6.2	30	1.5	0.5	0.9	0.319	0.030		10.6
	2005	Maximum	26.2	224	15.6	2.4	5.3	3.249	0.067		40.1
		Minimum	1.7	60	8.1	0.4	2.6	1.245	0.009		4.9
		Average	15.5	96	10.6	1.2	3.4	2.152	0.029		18.4
		Standard division	7.1	33	1.9	0.5	0.7	0.477	0.013		8.6
	2006	Maximum	24.9	160	15.1	2.5	4.1	2.725	0.102		32.3
		Minimum	1.1	60	8.1	0.4	2.5	0.023	0.000		1.2
		Average	14.4	95	11.3	1.1	3.1	1.803	0.040		15.1
		Standard division	7.3	26	2.1	0.5	0.3	0.426	0.026		8.4
	2007	Maximum	26.0	235	15.2	2.3	5.2	2.798	0.068		29.0
		Minimum	3.0	71	7.1	0.3	2.0	1.472	0.013		1.1
		Average	13.8	105	11.2	0.9	3.2	1.949	0.034		9.8
		Standard division	7.2	34	2.3	0.6	0.8	0.341	0.013		8.1
	2008	Maximum	25.0	227	15.3	3.0	4.8	1.914	0.072	2.6	47.2
		Minimum	2.0	73	7.3	0.5	2.4	1.307	0.013	1.5	0.8
		Average	14.7	107	11.0	1.1	3.5	1.638	0.033	2.1	14.8
		Standard division	7.0	31	2.3	0.6	0.6	0.167	0.015	0.3	10.3
2009	Maximum	26.0	230	15.9	2.6	5.3	2.209	0.068	3.0	37.2	
	Minimum	2.0	65	7.8	0.5	2.4	1.194	0.013	2.0	3.6	
	Average	15.1	115	11.3	1.5	3.9	1.617	0.026	2.4	15.6	
	Standard division	7.2	41	2.2	0.6	0.9	0.286	0.013	0.3	9.9	
2010	Maximum	29.0	229	14.2	2.0	5.2	2.565	0.033	3.1	46.4	
	Minimum	0.0	78	7.3	0.4	2.4	1.397	0.011	1.5	0.7	
	Average	14.9	114	11.1	1.1	3.5	1.702	0.019	2.0	12.9	
	Standard division	7.9	41	1.8	0.5	0.7	0.233	0.007	0.5	11.0	
2011	Maximum	25.7	219	14.3	1.6	4.9	2.510	0.068	2.6	28.1	
	Minimum	1.0	71	8.9	0.3	2.4	1.509	0.013	1.3	0.7	
	Average	15.5	115	11.3	0.8	3.3	1.914	0.029	1.8	9.6	
	Standard division	6.0	38	1.1	0.3	0.6	0.247	0.012	0.3	6.6	
2012	Maximum	31.6	220	14.6	3.4	7.3	3.112	0.126	6.2	39.7	
	Minimum	0.4	61	6.8	0.5	2.3	1.501	0.009	1.1	1.9	
	Average	14.9	108	10.6	1.2	3.8	2.072	0.028	2.3	13.2	
	Standard division	7.6	33	1.7	0.7	0.8	0.302	0.018	0.8	7.8	
2013	Maximum	27.4	236	14.2	2.8	6.4	2.618	0.091	3.2	54.2	
	Minimum	0.1	67	7.7	0.3	1.9	1.382	0.008	1.1	0.3	
	Average	14.1	108	10.8	0.9	3.4	1.868	0.023	1.7	9.9	
	Standard division	7.5	32	1.5	0.4	0.7	0.266	0.016	0.3	7.6	
2014	Maximum	28.1	265	14.6	3.3	8.2	2.632	0.077	5.3	46.7	
	Minimum	1.2	91	7.6	0.4	2.3	1.129	0.007	1.3	1.1	
	Average	16.2	146	10.7	1.2	3.5	1.799	0.018	2.1	9.0	
	Standard division	7.6	44	1.6	0.6	0.9	0.309	0.010	0.7	8.2	
2015	Maximum	30.5	308	15.4	4.0	6.3	2.568	0.071	5.1	48.6	
	Minimum	4.2	113	4.4	0.4	1.3	1.221	0.006	1.4	2.0	
	Average	17.5	160	10.1	1.2	3.5	1.787	0.018	2.4	13.0	
	Standard division	7.5	47	1.8	0.6	0.9	0.369	0.012	0.7	10.4	
2016	Maximum	31.3	293	13.6	1.7	5.5	3.252	0.050	3.3	22.7	
	Minimum	3.8	99	6.0	0.4	2.7	1.395	0.007	1.6	3.3	
	Average	17.3	166	10.0	1.0	3.7	1.948	0.018	2.2	8.9	
	Standard division	7.1	49	1.9	0.3	0.5	0.454	0.008	0.4	3.9	

Annex 1. Continued

Station	year	Classification	WT (°C)	EC (μ S/cm)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	TOC (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)
P5	2004	Maximum	27.9	321	15.7	5.0	7.2	4.359	0.259		73.
		Minimum	2.0	112	1.5	1.3	2.3	1.817	0.026		6.8
		Average	14.8	188	9.9	2.5	5.5	2.872	0.117		39.3
		Standard division	7.4	47	3.2	1.0	1.1	0.631	0.048		20.3
	2005	Maximum	25.9	347	16.6	3.6	7.8	5.853	0.197		95.4
		Minimum	0.9	52	1.2	1.1	2.7	1.028	0.020		2.2
		Average	15.7	195	9.0	2.0	4.6	3.075	0.096		23.8
		Standard division	7.4	63	3.4	0.7	1.2	0.958	0.040		19.3
	2006	Maximum	25.8	276	17.2	5.3	7.2	3.723	0.217		154.9
		Minimum	0.5	87	7.6	0.8	2.6	1.737	0.011		3.0
		Average	14.4	202	11.7	2.6	4.6	2.685	0.107		28.2
		Standard division	9.3	55	3.0	1.5	1.6	0.699	0.060		40.2
	2007	Maximum	26.0	314	16.2	6.5	8.7	4.915	0.235		118.1
		Minimum	2.5	133	6.8	0.8	2.8	2.315	0.045		2.3
		Average	14.1	202	11.2	2.7	5.1	3.491	0.116		25.3
		Standard division	8.3	47	3.2	1.6	1.5	0.817	0.059		29.9
	2008	Maximum	26.8	269	16.6	5.0	7.9	3.545	0.121	3.8	59.7
		Minimum	2.0	97	8.8	1.0	3.6	1.888	0.015	1.7	5.0
		Average	14.5	190	12.5	2.8	5.3	2.327	0.077	2.9	23.9
		Standard division	8.8	52	2.2	1.2	1.4	0.431	0.037	0.7	16.5
	2009	Maximum	27.0	281	16.5	4.6	8.5	4.242	0.161	4.0	94.8
		Minimum	2.0	126	7.7	1.2	3.5	1.676	0.016	2.0	2.2
		Average	15.3	213	11.9	2.5	5.5	2.458	0.059	3.2	33.2
		Standard division	8.9	51	3.0	1.2	1.3	0.715	0.036	0.8	25.6
P5	2010	Maximum	29.0	287	15.5	4.1	7.3	3.787	0.062	4.0	71.1
		Minimum	0.0	102	9.2	0.7	3.0	1.872	0.009	1.6	3.0
		Average	14.6	209	12.3	2.2	5.1	2.639	0.041	2.9	27.7
		Standard division	10.0	61	2.2	0.9	1.3	0.597	0.016	0.7	20.6
	2011	Maximum	27.8	300	15.7	6.0	12.9	3.995	0.232	8.7	62.6
		Minimum	1.0	67	7.7	0.7	2.9	1.783	0.013	1.9	0.3
		Average	15.6	202	11.4	1.8	4.8	2.690	0.055	2.8	16.3
		Standard division	8.1	53	2.3	1.1	1.8	0.589	0.037	1.2	13.1
	2012	Maximum	33.5	295	14.9	4.2	7.9	4.988	0.138	5.9	59.3
		Minimum	0.0	110	5.9	0.6	2.7	1.579	0.015	1.2	1.9
		Average	14.0	198	11.2	1.9	4.8	2.803	0.043	2.7	18.0
		Standard division	9.7	53	2.3	0.9	1.1	0.805	0.025	1.0	12.6
2013	Maximum	28.6	315	14.4	4.1	7.4	4.250	0.146	4.1	86.4	
	Minimum	0.0	89	6.4	0.6	2.4	1.830	0.008	1.3	0.3	
	Average	13.7	203	11.1	1.8	4.6	2.573	0.041	2.5	20.8	
	Standard division	9.6	56	2.2	0.9	1.2	0.540	0.028	0.8	19.2	
2014	Maximum	28.7	390	14.4	4.1	8.0	4.612	0.069	6.0	47.5	
	Minimum	1.0	136	6.1	0.8	2.7	1.063	0.011	1.7	1.7	
	Average	16.1	267	11.1	2.0	4.8	2.319	0.028	3.0	14.7	
	Standard division	9.2	65	2.0	0.8	1.2	0.699	0.012	0.8	10.0	
2015	Maximum	30.2	378	13.5	3.8	8.1	3.903	0.088	5.6	67.1	
	Minimum	3.5	201	6.8	0.8	2.8	1.048	0.012	2.1	1.9	
	Average	18.8	281	10.1	1.8	4.6	2.187	0.027	3.0	15.4	
	Standard division	7.9	45	1.7	0.6	1.3	0.848	0.013	0.8	14.1	
2016	Maximum	32.1	397	15.0	5.3	7.1	5.337	0.114	4.3	84.4	
	Minimum	3.1	152	6.1	0.7	3.1	1.346	0.011	1.9	0.9	
	Average	17.7	279	10.7	1.9	5.0	2.456	0.032	2.9	17.9	
	Standard division	9.1	56	2.4	0.9	1.0	0.893	0.020	0.6	13.1	