

## 통계적 경향 분석을 통한 영산강의 클로로필 *a*와 수질 변동 해석

송은숙 · 전송미 · 이어진<sup>1</sup> · 박도진<sup>1</sup> · 신용식\*

(목포해양대학교 연안하구연구센터, <sup>1</sup>환경 · 생명공학과)

Long-term Trend Analysis of Chlorophyll *a* and Water Quality in the Yeongsan River. Song, Eunsook, Songmi Jeon, Eojin Lee<sup>1</sup>, Dojin Park<sup>1</sup> and Yongsik Shin\* (Coastal Estuarine Research Center, <sup>1</sup>Department of Environmental Engineering and Biotechnology, Mokpo National Maritime University, Mokpo, Jeonnam 530-729, Korea)

Long-term trends (e.g. 1997~2010) of chlorophyll *a* and water quality properties of the Yeongsan River were analyzed by using water quality monitoring data collected by the water information system, ministry of environment. Nine monitoring stations were selected along the main channel of the river, and parameters of BOD, COD, TN, TP, conductivity, TSS and chlorophyll *a* were collected for surface water monthly through the monitoring system. Trends of water quality and chlorophyll *a* were analyzed by the Seasonal Mann-Kendall Test and LOWESS (Locally Weighted Scatter-plot Smoother). The results showed that the water quality parameters, including chlorophyll *a*, were improved in all stations except Station WC in the most-upper region, where water quality data for the determined parameters were increased, indicating a reduction in water quality. Based on the results from LOWESS analysis, chlorophyll *a* (algal blooms), BOD and COD recently began to increase after 2007 suggesting that an additional study on the cause of these increases in organic pollution, as well as a better management system for the region are required.

Key words : trend analysis, chlorophyll *a*, algal blooms, BOD, COD, Youngsan River

### 서 론

일반적으로 수 생태계에서 수질은 계절에 따라 변동하는데 국내 하천의 경우는 특히 몬순 기후의 영향이 큰 것으로 알려져 있다(Faithful and Griffiths, 2000; An *et al.*, 2001; An and Shin, 2005). 변동이 심하고 정규분포를

보이지 않으며 또한 결측치가 상대적으로 많은 자료를 분석하기 위해 분포모양에 대한 가정없이 가설을 검정하는 비모수 통계기법이 사용되어 왔다(Lettenmaier, 1988; Hirsch *et al.*, 1991). 그 중에서도 Seasonal Mann-Kendall Test (계절 맨-켄달 검정법)가 대표적인 예이다. 하지만 계절 맨-켄달 검정법은 선형 경향 분석기법으로 분석 시간내에서 변화되는 경향성을 반영할 수 없는 단점이 있

\* Corresponding author: Tel: 061) 240-7312, Fax: 061) 240-7321, E-mail: yongsik@mmu.ac.kr

어 이를 보완하는 LOWESS (Locally Weighted Scatterplot Smoother) 기법을 사용할 수 있다(Kim and Park, 2004). 국내 하천을 대상으로 이러한 비모수 통계 기법이 사용되었지만, BOD, TN, TP와 같은 일부 수질항목에 제한되어 적용되었다(Lee and Park, 2008, 2009). 클로로필 *a*는 일차생산자인 미세조류의 생체량을 대표하는 지시인자로 최근 빈발하고 있는 조류 대발생을 관리하기 위해서 경향 분석이 필요한 항목이라 할 수 있다. 또한 이 항목과 더불어 TN/TP, 전기전도도, 부유물질, COD와 같은 다른 수질 항목들의 경향과 상관성도 해석할 필요가 있다.

영산강 유역은 하구둑이 1981년도에 하류에서 건설되어 현재 농업용수와 농업용수로 사용되고 있지만 하구둑 건설이후 수질이 악화되고 있어 4대강 중에서 가장 낮은 수질(Sin *et al.*, 2005)을 보이고 있는 실정이다. 그 동안 수질 현황에 대한 연구(Kang and An, 2006; Yi *et al.*, 2006)와 더불어 영산강 수질과 관련이 있는 수생태계 내 일차생산자와 환경에 대한 연구(Yi *et al.*, 2007; Song and Shin, 2008; Song *et al.*, 2010) 등이 이루어졌다. 최근 영산강의 수질을 개선하기 위해 정부에서도 여러 가지 대책을 마련하여 노력하고 있지만 수질 개선의 결과는 아직까지 제시되고 있지 않다. 특히 환경부에서 실시하고 있는 수질측정망을 통해 수질항목들에 대한 자료가 확보되어 수질의 시공간적 변동과 같은 현황(Kang and An, 2006)이 보고되었지만 이러한 자료를 이용한 장기적 통계 분석과 같은 해석은 제시되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 기존에 확보된 장기 수질 자료를 활용하여 조류 발생(클로로필 *a*)과 수질에 대한 장기적 경향을 분석함으로써 수질 대책의 효과를 확인하고 향후 지속적인 대책마련을 위한 기초자료와 정보를 제공하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 수질 항목과 정점

하천은 본류와 주요 지류들로 연결되어 있어 모든 오염원은 본류로 유입되어 본류의 하류로 집중하게 되므로 영산강의 본류를 중심으로 9개 지점을 대상으로 수질항목별 분석을 실시하였다. 조사지점은 본류에 해당되는 우치(WC), 광주1(GJ1), 광주2(GJ2), 광산(GS), 나주(NJ), 영산포(YSP), 함평(HP), 무안1(MA1), 무안2(MA2) 9개 지점을 선정하였다(Fig. 1). 분석 항목은 BOD (Biological Oxygen Demand), COD (Chemical Oxygen Demand), TN (Total Nitrogen), TP (Total Phosphorus), TN/TP, 클로로필 *a* (chl-*a*), 전기전도도 (conductivity), 부유물질 (Total

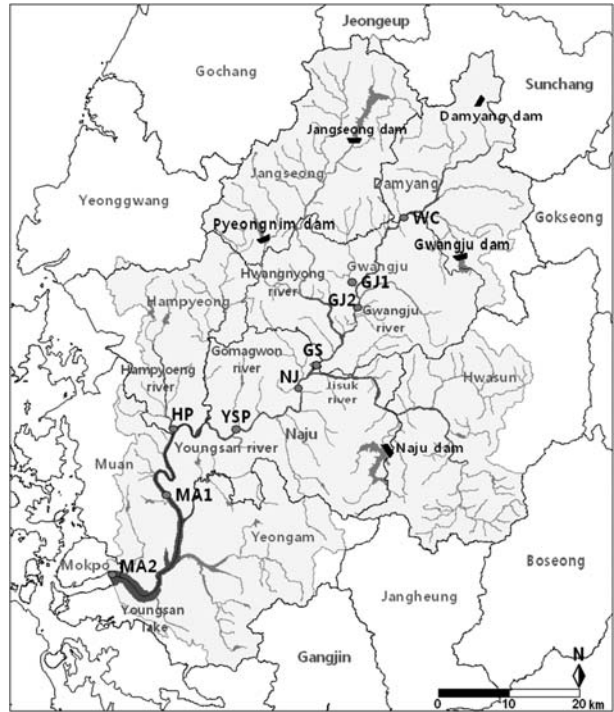


Fig. 1. Water quality monitoring stations located along the channel of Yeongsan River (the base map was provided by WAMIS, <http://www.wamis.go.kr>).

Suspended Solids, TSS)이며, 하천수 수질측정망을 통해 확보된 자료(환경부 물환경정보시스템, <http://water.nier.go.kr>)를 이용하였다. 수질측정망 운영계획에 따라 시료의 채취방법, 채취시료의 보존, 현장측정, 시험은 「수질 오염공정시험기준」에 의거하여 실시되었다. TN/TP ratio는 조류발생에 영향을 미치는 제한영양염을 평가할 수 있는 간접지수로 사용되어(Smith, 1983; Fujimoto and Sudo, 1997; Seppälä *et al.*, 1999) 이에 대한 장기 동향 분석을 실시하였다. 조사지점별로 자료구축 시기의 차이가 있어 1992년부터 2009년까지 18년 동안 수집된 수질 자료를 분석하였고 클로로필 *a*는 2001년부터 2009년 자료를 분석하였다.

### 2. 경향 및 상관성 분석 (Trend and correlation analyses)

물환경정보시스템의 수질 자료는 월별로 표층수에서 수질항목에 대해 측정된 자료인데, 그 중 수질을 대표할 수 있는 BOD, COD, TN, TP, TN/TP, 클로로필 *a*, 전기전도도, 부유물질 자료를 시계열 형태로 정리하였다. 본 연구에서 사용된 수질항목은 규칙적으로 측정이 이루어져

결측치가 거의 존재하지 않았다. 경향분석은 MYSYSTAT 12 통계패키지를 이용하여 실시하였다. 클로로필 *a*와 수질항목들과의 상관성은 Pearson's correlation analysis를 이용하여 분석하였다.

### 1) 계절 맨-켄달 검정법

영산강의 수질의 변화 경향을 정량적으로 분석하기 위하여 사용된 계절 맨-켄달 검정법(Seasonal Mann-Kendall Test)은 관찰치들 사이의 상관 추정치를 통해 경향을 분석하는 비모수 통계방법으로 각 계절에 대해 켄달 검정을 독립적으로 시행한 후, 각 결과들의 가중합을 통하여 켄달 통계 추정치를 도출하여 계절성을 배제하는 방법이다(Mann, 1945; Kendall, 1976; Hirsch *et al.*, 1982).

### 2) LOWESS 검정법

계절 맨-켄달 검정법은 자료의 대상기간 동안 선형 경향을 기본 가정으로 하기 때문에 대상기간 중 경향성이 변할 경우 이를 적절히 반영할 수 없다(Kim and Park, 2004; Lee and Park, 2009). 자료의 대상기간 중 변화하는 경향성을 파악하고 수질 자료의 변화 경향을 정성적으로 분석하기 위하여 LOWESS (Locally Weighted Scatterplot Smoother) 통계 분석 방법을 실시하였다. LOWESS

는 *x* 값에 대해 이동직선을 구하고 이로부터 *y*의 평활값을 얻은 후 이 평활점들을 직선으로 연결한 것이다(Cleveland, 1979). LOWESS는 어떤 측정 모델 형태인 1차 또는 2차 회귀모델에 대한 가정없이 자료들을 회귀모델에 맞추므로 유용한 경향 분석법이다.

## 결 과

### 1. 물리, 화학적 특성

#### 1) BOD, COD

계절 맨-켄달 검정법을 이용해 18년간(1992년~2009년)의 경향 분석을 수행한 결과 BOD는 가장 상류에 위치한 우치 지점에서 맨-켄달 기울기 통계량  $0.05 \text{ mg L}^{-1} \text{ Y}^{-1}$ 의 증가경향을 보였다(Table 1, Fig. 2). 상류에 위치한 광주2와 중류에 위치한 나주, 영산포 지점은 감소 경향이 있었다. 맨-켄달 기울기 통계량은 광주2  $0.336 \text{ mg L}^{-1} \text{ Y}^{-1}$ , 나주  $0.1 \text{ mg L}^{-1} \text{ Y}^{-1}$ , 영산포  $0.1 \text{ mg L}^{-1} \text{ Y}^{-1}$ 로 감소량은 작았으나, BOD 농도가 과거에 비해 개선되고 있음을 의미한다. 광주, 나주, 영산포는 영산강 본류 중 BOD 값이 높은 지점들로 지난 18년 동안의 환경시설 개선 등으로

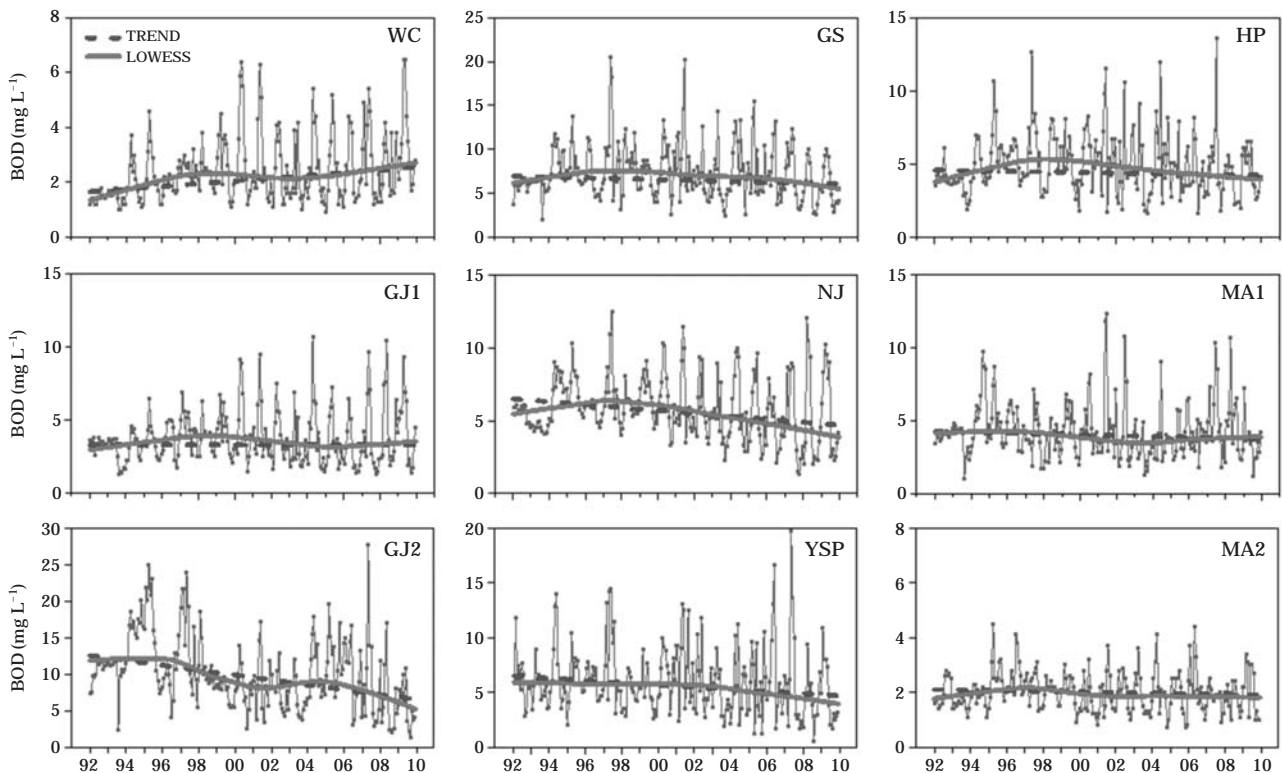


Fig. 2. Temporal variations and long-term trends of BOD (1992 ~ 2009) in the Yeongsan River.

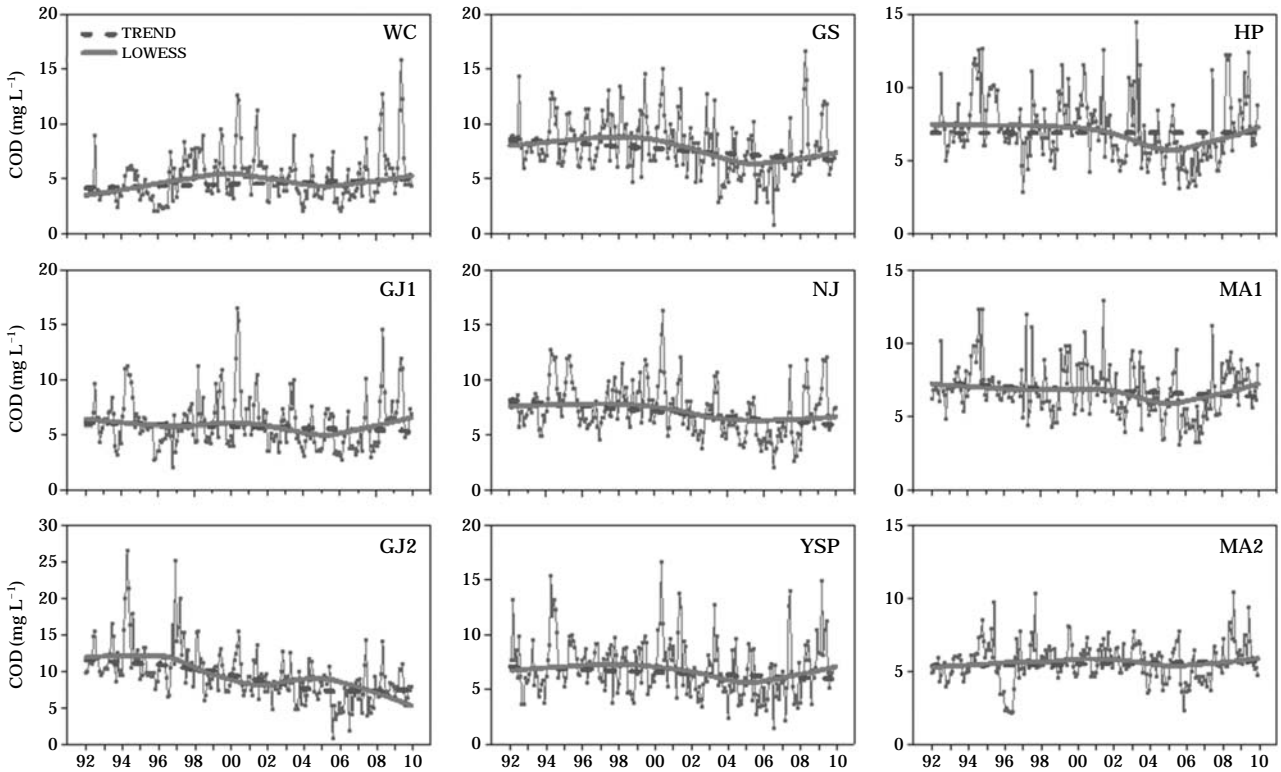


Fig. 3. Temporal variations and long-term trends of COD (1992 ~ 2009) in the Yeongsan River.

감소 효과가 나타난 것으로 판단된다. 광주1, 광산, 함평, 무안1, 무안2 지점은 아무런 경향성이 없는 것으로 나타나 18년간 BOD 농도의 변화가 없었음을 보여주었다. LOWESS 분석 결과에서는 시기별로 약간의 증감이 나타나기는 하지만 계절 맨-켄달 검정법의 경향성과 큰 차이는 없었다 (Fig. 2).

COD의 경우 BOD와 동일하게 우치 지점에서 증가경향(맨-켄달 기울기 통계량  $0.04 \text{ mg L}^{-1} \text{ Y}^{-1}$ )을 보였고, 광주1과 무안2를 제외한 나머지 지점에서는 감소하는 경향을 보였다 (Table 1, Fig. 3). 맨-켄달 기울기 통계량은  $-0.050 \sim -0.300 \text{ mg L}^{-1} \text{ Y}^{-1}$ 의 분포를 보였으며 광주2 지점에서 가장 크게 감소하는 경향을 보였다. LOWESS 결과, 우치, 광주1, 광산, 영산포, 함평, 무안1 지점에서는 2002년 이후 감소했다가 증가하는 경향을 보인 반면, 광주2 지점은 2002년 이후 증가했다가 감소하는 경향을 보였다 (Fig. 3). 이러한 경향은 최근 광주광역시에서 배출되는 도시 생활하수 및 폐수의 수처리기가 이루어지고 있기 때문이라고 사료된다. 또한, 광주2 지점은 상대적으로 다른 지점에 비해 높은 COD 값을 나타내고 있으며, 이는 광주2 지점이 광주광역시를 지나는 광주천의 합류 지점이기 때문으로 판단된다.

2) 총질소 (TN), 총인 (TP), TN/TP ratio

총질소는 우치, 광산, 함평, 무안1, 무안2에서 증가 경향을 보였다 (Table 1, Fig. 4). 맨-켄달 기울기 통계량은 광산에서  $0.175 \text{ mg L}^{-1} \text{ Y}^{-1}$ 로 가장 높게 증가하였다. 나머지 광주1, 광주2, 나주, 영산포 지점에서는 유의한 경향성이 없는 것으로 나타났다. LOWESS 결과를 보면, 대부분 지점들에서 기간 내 경향성의 변화가 나타났다 (Fig. 4). 총질소 농도가 90년대 후반까지 증가한 후 유지되다가 최근 2005년 이후 다시 감소하는 경향을 보였다. 계절 맨-켄달 검정법은 선형 경향 분석기법으로 단일한 경향 분석 결과를 보여주기 때문에 본 연구의 총질소 경우처럼 기간 내 경향성이 변할 경우 이를 제대로 반영할 수 없다. 총질소 농도가 증가 경향을 보인 우치, 광산, 함평, 무안1, 무안2 경우, 2005년 이전의 증가 경향성이 이후의 감소경향보다 컸기 때문이다. 광주1, 광주2, 나주, 영산포 지점의 경우 대상기간 중 증가 경향의 정도가 감소 경향을 상쇄하기 때문에 계절 맨-켄달 검정법에서는 통계적으로 유의한 경향성이 없는 것으로 나타난 것이다.

총인은 가장 상류에 위치한 우치와 가장 하류에 위치한 무안1, 무안2 지점에서 증가 경향을 보였으며 맨-켄달 기울기 통계량은  $0.002 \sim 0.005 \text{ mg L}^{-1} \text{ Y}^{-1}$ 이었다 (Table

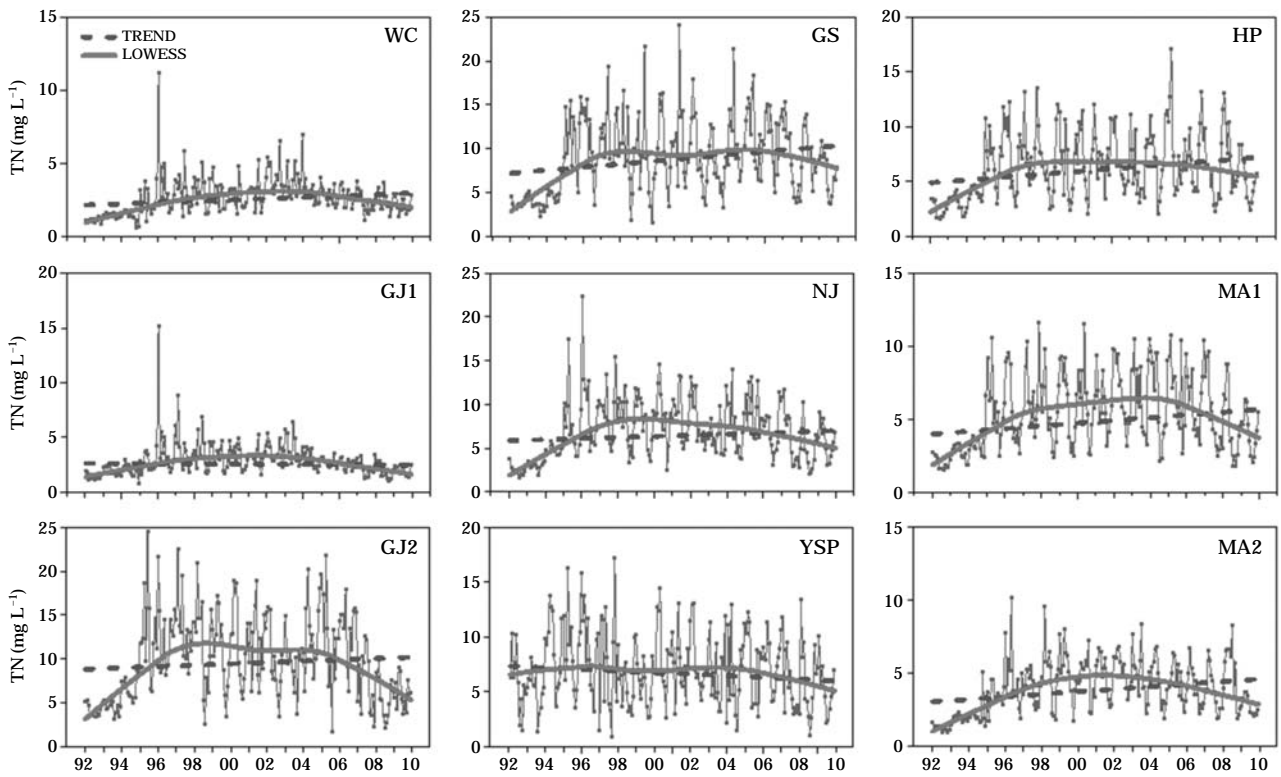


Fig. 4. Temporal variations and long-term trends of TN (1992~2009) in the Yeongsan River.

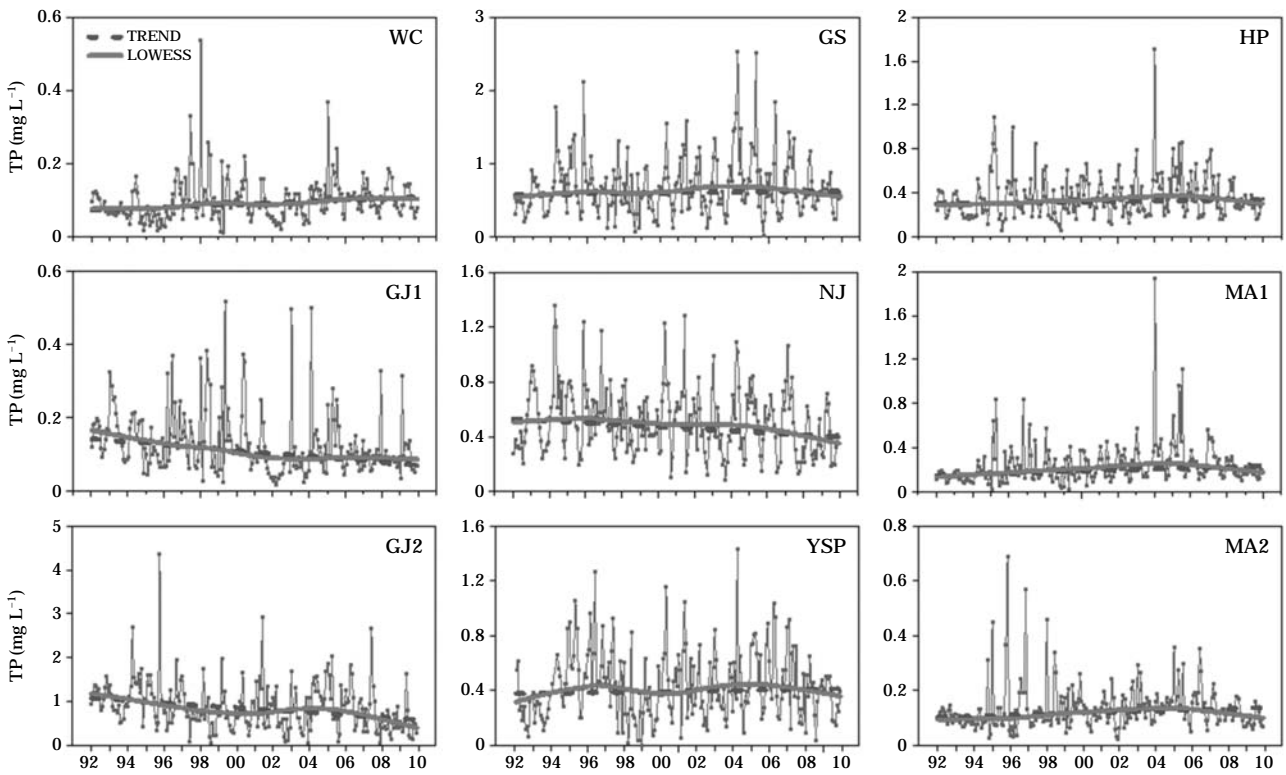


Fig. 5. Temporal variations and long-term trends of TP (1992~2009) in the Yeongsan River.

**Table 1.** Results of seasonal Mann-Kendall test on BOD, COD, TN, TP (1992~2009) in the Yeongsan River.

	Station	Range	Zvalue	Pvalue	Trend	Slope (mg L <sup>-1</sup> Y <sup>-1</sup> )
BOD	WC	0.9~6.5	5.253	0.000	UP	0.050
	GJ1	1.3~10.7	0.186	0.852	-	0.000
	GJ2	1.4~27.8	-6.184	0.000	DOWN	-0.336
	GS	2.0~20.6	-1.787	0.074	-	-0.050
	NJ	1.3~12.5	-3.703	0.000	DOWN	-0.100
	YSP	0.6~19.8	-2.744	0.006	DOWN	-0.100
	HP	1.6~13.6	-0.800	0.424	-	-0.020
	MA1	1.0~12.3	-1.447	0.148	-	-0.028
	MA2	0.7~4.5	-1.487	0.137	-	-0.011
COD	WC	2~15.9	2.313	0.021	UP	0.044
	GJ1	2.1~16.6	-1.621	0.105	-	-0.041
	GJ2	0.7~26.5	-9.357	0.000	DOWN	-0.300
	GS	0.8~16.6	-3.613	0.000	DOWN	-0.107
	NJ	2.1~16.3	-4.843	0.000	DOWN	-0.125
	YSP	1.4~16.6	-2.006	0.045	DOWN	-0.060
	HP	2.8~14.5	-3.221	0.001	DOWN	-0.082
	MA1	3.1~12.9	-2.587	0.010	DOWN	-0.050
	MA2	2.1~10.4	1.250	0.211	-	0.018
TN	WC	0.605~11.157	3.652	0.000	UP	0.045
	GJ1	0.770~15.146	-0.525	0.600	-	-0.008
	GJ2	1.714~-24.571	1.072	0.284	-	0.076
	GS	1.592~24.168	3.258	0.001	UP	0.175
	NJ	1.706~22.300	1.684	0.092	-	0.063
	YSP	0.926~17.242	-1.882	0.060	-	-0.074
	HP	1.611~17.064	3.969	0.000	UP	0.128
	MA1	1.512~11.626	3.160	0.002	UP	0.094
	MA2	0.866~10.098	4.133	0.000	UP	0.087
TP	WC	0.011~0.538	3.053	0.002	UP	0.002
	GJ1	0.018~0.518	-4.802	0.000	DOWN	-0.004
	GJ2	0.054~4.349	-4.309	0.000	DOWN	-0.027
	GS	0.012~2.538	0.864	0.388	-	0.003
	NJ	0.089~1.361	-3.456	0.001	DOWN	-0.007
	YSP	0.017~1.433	0.749	0.454	-	0.002
	HP	0.053~1.708	1.455	0.146	-	0.002
	MA1	0.024~1.937	4.431	0.000	UP	0.005
	MA2	0.020~0.687	2.210	0.027	UP	0.002

1, Fig. 5). 광주1, 광주2, 나주 지점은 통계적으로 유의한 감소 경향을 보였다. 맨-켄달 기울기 통계량은  $-0.004 \sim -0.027 \text{ mg L}^{-1} \text{ Y}^{-1}$ 였으며 광주2에서 가장 감소량이 크게 나타났다. 나머지 광산, 영산포, 함평 지점은 유의수준 95%기준, 통계적으로 유의한 경향성을 보이지 않아 지난 18년 동안 총인의 농도의 변화가 없었다고 할 수 있다. LOWESS 경향 분석 결과 우치와 광주1 지점을 제외한 나머지 지점에서는 지난 18년 동안 약간의 증감이 존재하다가 최근 2005년 이후 감소하는 경향인 것으로 나타났다(Fig. 5). 총질소와 총인 농도의 2005년 이후의 감소 경향은 2005년 8월부터 광주와 나주를 시작으로 실시된 수질오염총량관리제의 영향으로 판단된다. 오염총량관리제는 단위유역별 목표수질과 허용총량을 산정하여 오염

물질을 총량적으로 규제하는 제도이다.

TN/TP Ratio는 영산포와 무안1을 제외한 모든 지점에서 증가하는 경향을 나타냈다(Table 2, Fig. 6). 맨-켄달 기울기 통계량은  $0.363 \sim 1.328 \text{ mg L}^{-1} \text{ Y}^{-1}$ 의 분포를 보였으며, 광주1 지점에서 가장 높게 증가하였다. 무안1 지점은 통계적으로 유의한 경향을 보이지 않았고, 영산포 지점은 감소하는 경향을 보였다. LOWESS 결과, 시기별로 약간의 증감이 나타나기는 했지만 계절 맨-켄달 검정법의 경향성 결과와 큰 차이는 없었다(Fig. 6).

**3) 전기전도도 (Conductivity), 부유물질 (TSS)**

전기전도도의 경향 분석 결과를 보면 상류인 우치와 광주1 지점에서 증가하는 경향을 나타냈고, 맨-켄달 기울

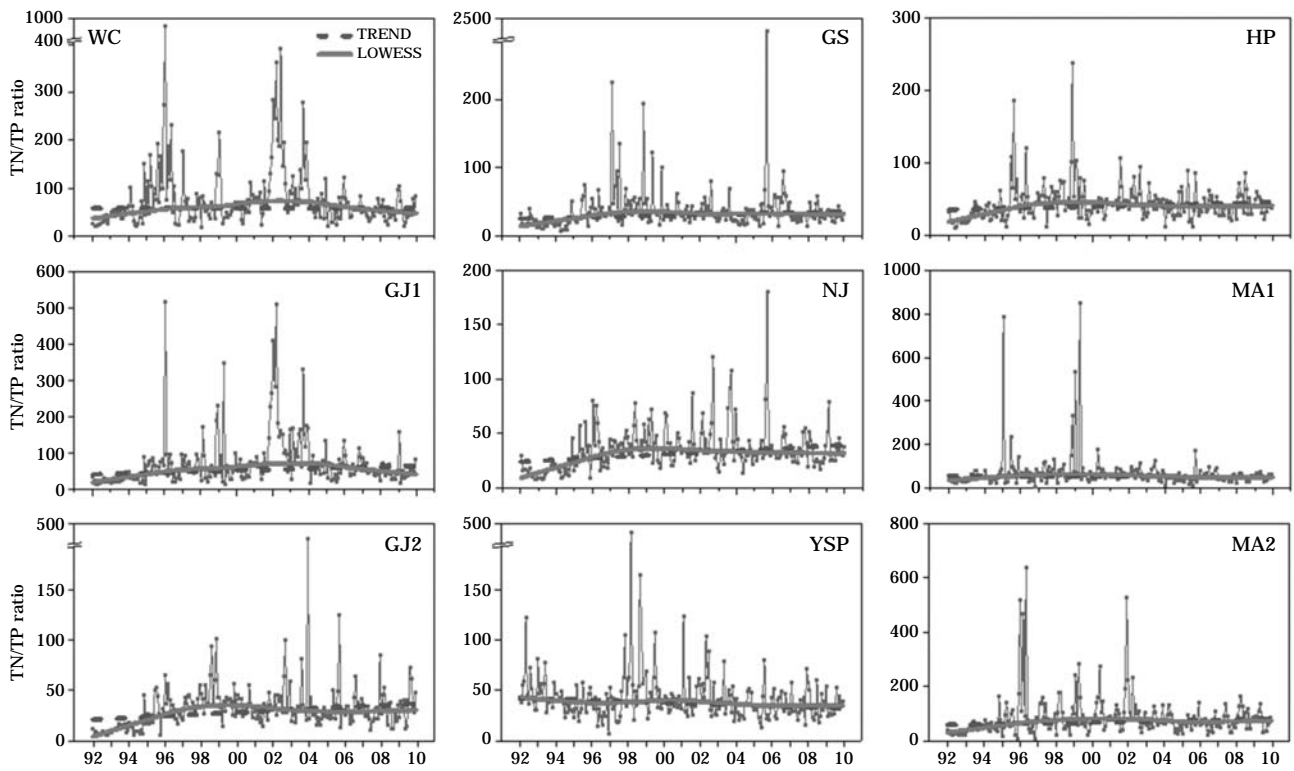


Fig. 6. Temporal variations and long-term trends of TN/TP ratio (1992~2009) in the Yeongsan River.

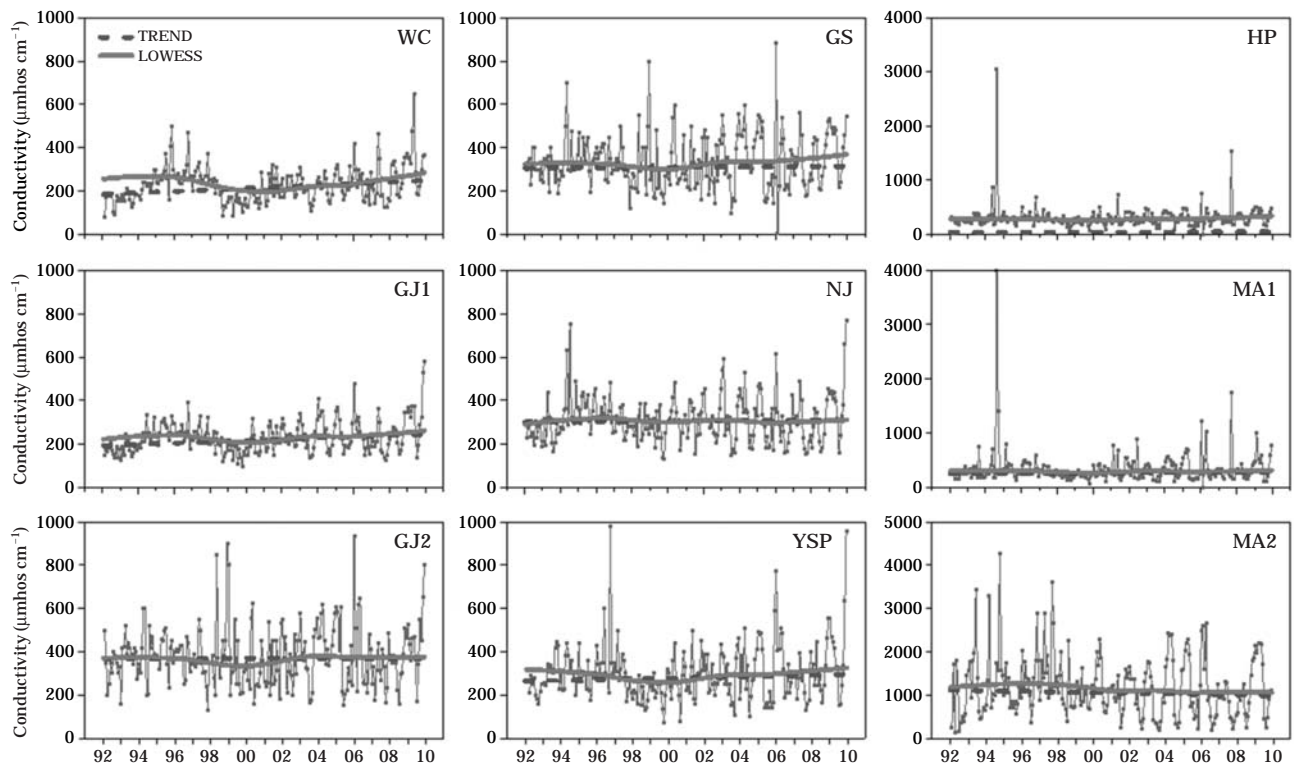


Fig. 7. Temporal variations and long-term trends of water conductivity (1992~2009) in the Yeongsan River.

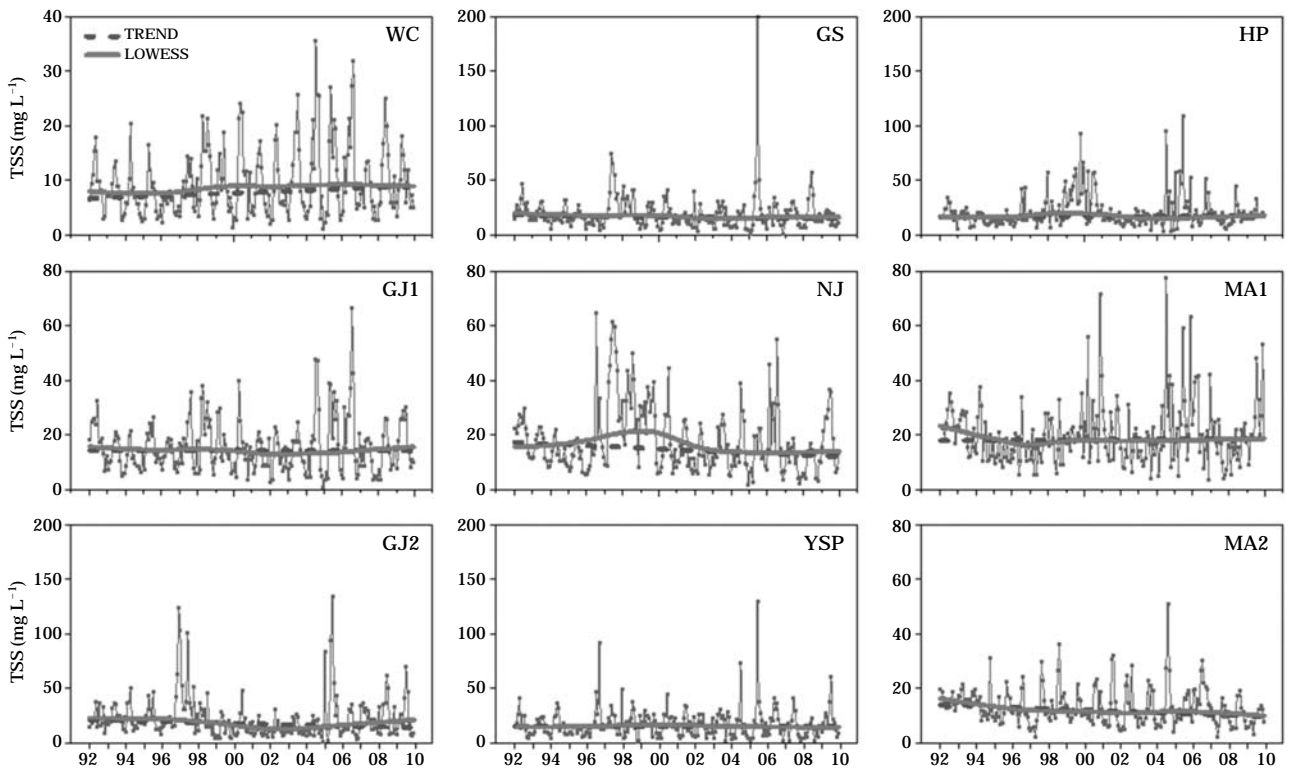


Fig. 8. Temporal variations and long-term trends of TSS (1992 ~ 2009) in the Yeongsan River.

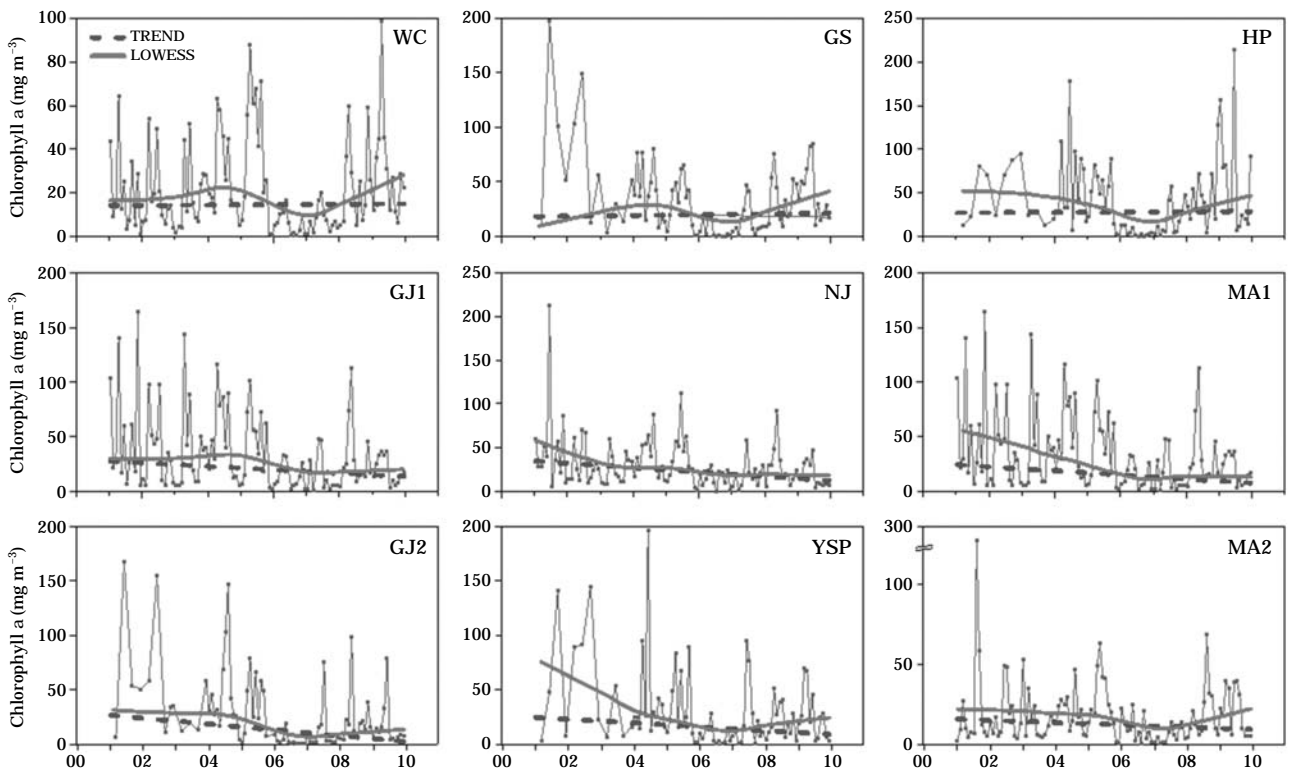


Fig. 9. Temporal variations and long-term trends of chlorophyll a (2001 ~ 2009) in the Yeongsan River.



기 통계량은 3.000~3.571 mg L<sup>-1</sup> Y<sup>-1</sup>이었다 (Table 2, Fig. 7). 그 외의 지점에서는 통계적으로 유의한 경향을 보이지 않았다. LOWESS 경향 분석 결과, 상류인 우치, 광주1, 광주2 지점에서는 약간의 증감이 존재하였고, 중류인 광산, 나주, 영산포 지점에서는 2000년 이후 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 7).

부유물질은 가장 상류에 위치한 우치 지점에서 증가하는 경향을 보였으며 맨-켄달 기울기는 0.123 mg L<sup>-1</sup> Y<sup>-1</sup>로 나타났다 (Table 2, Fig. 8). 영산포, 함평, 무안1 지점은 통계적으로 유의한 경향을 보이지 않았고, 그 외의 지점에서는 감소되는 경향을 나타냈다. 맨-켄달 기울기 통계량은

-0.200~-0.400 mg L<sup>-1</sup> Y<sup>-1</sup>의 분포를 보였으며 광주2 지점에서 가장 크게 감소하는 경향을 보였다. LOWESS 결과를 보면, 시기별로 각 지점마다 약간의 증감이 나타나는 것을 알 수 있었다 (Fig. 8).

## 2. 조류발생 (chlorophyll a) 경향 및 수질과의 상관성

계절 맨-켄달 검정법을 이용해 9년간 (2001~2009)의 경향분석을 수행한 결과 클로로필 a는 우치, 광산, 함평, 무안2를 제외한 전체 지점에서 통계적으로 유의한 감소

**Table 2.** Results of seasonal Mann-Kendall test on TN/TP, water conductivity, total suspended solids (1992~2009), and chlorophyll a (2001~2009) in the Yeongsan River.

	Station	Range	Zvalue	Pvalue	Trend	Slope (mg L <sup>-1</sup> Y <sup>-1</sup> )
TN/TP	WC	16.62~915.0	1.137	0.255	-	0.363
	GJ1	12.81~515.96	3.871	0.000	UP	1.328
	GJ2	5.73~454.91	4.199	0.000	UP	0.896
	GS	6.23~2143.43	3.237	0.001	UP	0.577
	NJ	7.88~179.95	4.111	0.000	UP	0.866
	YSP	7.09~472.16	-2.432	0.015	DOWN	-0.563
	HP	9.57~238.54	2.252	0.024	UP	0.553
	MA1	6.96~852.5	-0.525	0.600	-	-0.181
	MA2	7.15~638.85	2.734	0.006	UP	1.173
Cond.	WC	80~651	3.281	0.001	UP	3.571
	GJ1	96~580	3.215	0.001	UP	3.000
	GJ2	130~934	0.187	0.851	-	0.000
	GS	3~884	0.430	0.667	-	0.417
	NJ	133~770	0.496	0.620	-	0.533
	YSP	70~980	1.095	0.274	-	1.667
	HP	3~3050	1.895	0.058	-	2.500
	MA1	3~4000	0.936	0.349	-	1.500
	MA2	125~4275	-1.002	0.316	-	-7.118
TSS	WC	1~35.7	2.845	0.004	UP	0.123
	GJ1	0.8~66.5	-0.109	0.913	-	-0.007
	GJ2	0.8~134	-2.977	0.003	DOWN	-0.400
	GS	0.4~200	-2.036	0.042	DOWN	-0.200
	NJ	1.8~6.5	-3.161	0.002	DOWN	-0.300
	YSP	1~129.3	-0.342	0.733	-	-0.020
	HP	3.6~109	0.482	0.630	-	0.052
	MA1	3.6~77.5	0.328	0.743	-	0.044
	MA2	2~51	-3.555	0.000	DOWN	-0.243
Chl a	WC	0.4~98.8	0.301	0.763	-	0.094
	GJ1	1.6~164.4	-2.500	0.012	DOWN	-1.575
	GJ2	0.1~167.7	-3.658	0.000	DOWN	-2.700
	GS	0.1~197.5	0.396	0.692	-	0.364
	NJ	0.4~212.5	-4.364	0.000	DOWN	-2.523
	YSP	0.1~195.7	-2.716	0.007	DOWN	-1.737
	HP	0.1~214.1	0.154	0.877	-	0.146
	MA1	0.1~111.2	-2.963	0.003	DOWN	-1.867
	MA2	0.5~258.7	-1.445	0.148	-	-0.724

Water conductivity (Cond.), TSS (Total suspended solids), Chl a (Chlorophyll a).

경향을 보였다 (Table 2, Fig. 9). 맨-켄달 기율기 통계량은  $-1.575 \sim -2.700 \text{ mg L}^{-1} \text{ Y}^{-1}$ 의 분포를 보였고, 광주2 지점에서 감소량이 가장 크게 나타났다. 나머지 우치, 광산, 함평, 무안2 지점은 통계적으로 유의한 경향을 보이지 않았다.

LOWESS 결과를 보면, 대부분 지점들에서 기간 내 경향성의 변화가 나타났다 (Fig. 9). 우치, 광산, 함평, 무안2 지점은 2005년까지 증가하거나 유지되었다가 2006년, 2007년에 감소하였지만 이후 다시 증가하는 추세를 보였다. 또한 영산포 지점은 2007년 이전에는 급격히 감소하다가 2007년 이후 다소 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 클로로필 *a*의 경향은 조류 대발생의 형태에서도 나타났다. 2006년, 2007년에는 조류 최대치가 급격히 감소하였다가 이후에 다시 증가하는 형태를 보이고 있다.

조류 발생의 경향은 COD와 같은 수질항목의 장기적 경향과 유사한 형태를 보이고 있으며 상관성 조사에서 클로로필 *a*와 COD는 유의한 양의 상관성을 보여주었다 ( $R=0.41, P<0.01$ ). BOD와도 유의한 양의 상관성을 나타내어 ( $R=0.39, P<0.01$ ) TN, TP, TSS 등의 수질인자들 ( $R>0.20$ )보다 높은 상관성을 보였다. 또한 강수량(월합), 방류량(월합), 수온, 일조시간 등의 환경인자들과도 낮은 상관성을 나타내었다.

## 고 찰

산악지역에 위치한 동북호나 주암호 수계와는 달리 영산강은 연안지역에 인접하고 있고, 상류와 하류에 물의 흐름이 존재하는 하천과 유사한 형태를 띠고 있다. 또한 유역의 토지 이용도 상이하여 영산강 유역에서는 농업 폐수 및 생활 하수 등의 오염원 비율이 상대적으로 높은 편이다 (Cha *et al.*, 1999; Yun *et al.*, 2003). 이러한 이유로 영산강은 동북호나 주암호 수계에 비해 영양염이 전체적으로 상당히 높은 편이고 총질소, 총인의 경우에는 5~20 배가 높은 것으로 보고 되었다 (Yi *et al.*, 2006). 최근 오염물질총량관리대책, 수처리시설확충 등을 통해 총인을 줄이기 위해 노력하고 있으며, 본 연구의 총인 감소 추세 (Fig. 5)는 이러한 대책의 실효성을 입증할 만한 결과라 할 수 있다. 하지만 상류지점인 우치 지점은 다른 중류나 하류 지점과는 달리 많은 수질 인자들이 증가추세로 나타나 이에 대한 대책이 필요할 것으로 사료된다. 또한 총인에 비해 총질소는 감소보다는 증가 추세이고 이러한 영향 때문에 TN/TP ratio가 전체적으로 증가하는 경향을 보인 것은 향후 수질관리 대책 마련시 고려해야

할 사항이라 사료된다. 국내·외적으로 담수환경에서는 일반적으로 인이 제한영양염으로 작용하는 것으로 알려져 있고 (Hecky and Kiham, 1988; Jeong *et al.*, 2008), 영산호를 대상으로 실시된 생물검정실험에서도 여름철을 제외하고 인이 제한영양염으로 나타났다 (Yoon, 2012). 따라서 인의 제한 강도가 강해질 경우 인에 대한 조류들의 민감성이 높아질 수 있는 가능성이 있다. 본 연구의 조류 발생 경향에서도 2007년 이후에 조류 발생량이 증가하는 경향을 보인 것 (Fig. 9)은 총인이 지속적으로 감소함에도 불구하고 조류 발생량은 지속적으로 감소되지 않은 것으로 나타나 영양염 인 외에도 조류 발생에 영향을 미치는 환경 인자가 존재할 수 있을 것으로 판단된다.

2007년 이후에 조류 발생량이 증가하는 경향과 관련 있는 수질인자들 중 하나는 TSS이다. TSS는 탁도와 밀접한 관계를 갖고 이는 곧 조류의 광합성에 필요한 광량을 조절한다. TSS는 우치정점을 제외하고 전반적으로 감소하는 추세를 보였지만 조류 발생 감소 추세와 일치하는 정점은 광주2와 나주로 나타났다 (Table 2). 영산강은 인근 담수지역에 비해 탁도가 높아 (Yi *et al.*, 2006), 조류 발생의 제한 인자로 작용하는 것으로 보고되었다 (Song *et al.*, 2010). 따라서 영산강에서 탁도의 감소는 조류 발생의 증가로 이어질 개연성이 있다. 이러한 조류 발생의 증가는 수질 악화로 이어질 수 있는데 본 연구결과에서도 COD, BOD와 유의한 상관성을 보여주고 있다. 하지만 탁도뿐만 아니라 다른 환경요인들이 복합적으로 조류 발생 증가에 기여할 가능성도 배제할 수 없으므로 종합적인 조사를 통한 원인 분석이 필요할 것으로 사료된다.

결론적으로 본 연구결과를 통해 수질이 악화되어 있는 영산강의 수질 개선을 위해서는 조류 발생과 같은 내부 생산에 의한 유기물 생성 억제 필요성을 제시하고 있고, 이러한 조류 발생 관리를 위해서는 본 연구와 같이 기본적인 환경인자들에 대한 장기적 추세 해석과 더불어 단기적인 조류 발생 기작과 생리, 생태에 대한 조사도 필요할 것으로 사료된다. 또한 총인과 같은 단일적인 오염물질, 절대농도 감소보다는 N:P ratio를 고려하는 총질소의 감소 방안도 필요하고, 탁도와 같은 환경인자들도 고려하는 종합적 수질관리 방안 도출이 필요하다고 볼 수 있다.

## 적 요

영산강을 대상으로 1992년부터 2009년까지 18년 동안 수집된 환경부 물환경정보시스템의 수질측정망 자료를

이용하여 수질 변동에 대한 장기적 경향을 통계 분석하였다. 영산강 본류에 위치한 9개 지점(우치, 광주1, 광주2, 광산, 나주, 영산포, 함평, 무안1, 무안2)에서 월별로 표층수에서 수질항목에 대해 측정하였고, 클로로필 *a*, 전기전도도, BOD, TN, TP 자료를 시계열 형태로 정리, 분석하였다. 경향분석은 MYSYSTAT 12 통계패키지를 이용하여 계절 맨-켄달 검정법과 LOWESS 검정법을 실시하였다. 경향분석 결과, 최상류 지점인 우치 정점에서 수질 항목들의 수치가 증가하는 것으로 나타났으나 나머지 정점에서는 전체적으로 클로로필 *a*와 더불어 수질이 개선되고 있는 것으로 확인되었다. 다만 클로로필 *a*(조류 발생), BOD, COD 등은 2007년 이후인 최근에 다시 수치가 증가하는 것으로 나타나 이에 대한 원인조사와 대책마련이 필요할 것으로 사료된다.

## 사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0025136).

## 인 용 문 헌

- An, K.G. and I.C. Shin. 2005. Influence of the Asian monsoon on seasonal of fluctuations of water quality in a mountainous stream. *Korean Journal of Limnology* **38**(1): 54-62.
- An, K.G., J.W. Seo and S.S. Park. 2001. Influences of seasonal rainfall on physical, chemical and biological conditions near the intake tower of Taechung Reservoir. *Korean Journal of Limnology* **34**(4): 327-336.
- Cha, J.M., S.E. Shin and G.S. Cha. 1999. Non-point source pollutions of the Youngsan River basins I - The method of land -Use types and rainfall-. *Journal of Environmental Impact Assessment* **8**(4): 41-49.
- Cleveland, W.S. 1979. Robust locally weight regression and smoothing scatterplot. *Journal of the American Statistical Association* **74**(3): 829-836.
- Faithful, J.W and D.J. Griffiths. 2000. Turbid flow through a tropical reservoir (Lake Dalrymple, Queensland, Australia): Responses to summer storm event. *Lake & Reservoir Management* **5**: 231-247.
- Fujimoto, N. and P. Sudo. 1997. Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and competition under various N : P supply ratios and temperatures. *Limnology & Oceanography* **42**: 250-256.
- Hecky, R.E. and P. Kilham. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnology & Oceanography* **33**: 796-822.
- Hirsch, R.M., J.R. Slack and R.A. Smith. 1982. Techniques for trend assessment for monthly water quality data. *Water Resources Research* **18**: 107-121.
- Hirsch, R.M., R.B. Alexander and R.A. Smith. 1991. Selection of methods for the detection and estimation of trends in water quality. *Water Resources Research* **27**(5): 803-813.
- Jeong, B.K., Y.S. Shin, N.M. Jang and S.D. Kim. 2008. Nutrient limitation of phytoplankton in the Dongbok Lake: Analyses of long-term data and bioassay experiments. *Korean Journal of Limnology* **41**(3): 412-421.
- Kang, S.A. and K.G. An. 2006. Spatio-temporal variation analysis of physico-chemical water quality in the Yeongsan-River watershed. *Korean Journal of Limnology* **39**(1): 73-84.
- Kendall, M.G. 1976. Rank Correlation Methods. 4th Ed. Griffin.
- Kim, J.H. and S.S. Park. 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.
- Lee, H.W. and S.S. Park. 2008. Long-term trend analyses of water qualities in Mangyung watershed. *Journal of Korean Society on Water Environment* **24**(4): 480-487.
- Lee, H.W. and S.S. Park. 2009. Trend analysis of water quality in Dongjin River watershed. *Korean Journal of Limnology* **42**(1): 39-47.
- Lettenmaier, D.P. 1988. Multivariate nonparametric tests for trend in water quality. *Water Resources Bulletin* **24**(3): 505-512.
- Mann, H.B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* **13**: 245-259.
- Ministry of Environment, Water Information System. <http://water.nier.go.kr/>.
- Sen, P.K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association* **63**(324): 1379-1389.
- Seppälä, J., T. Tammiminen and S. Kaitala. 1999. Experimental evaluation of nutrient limitation of phytoplankton communities in the Gulf of Riga. *Journal of Marine Systems* **23**: 107-126.
- Sin, Y.S., C.H. Lee, K.A. Cho and E.S. Song. 2005. Trends of phytoplankton community and water quality and

- implications for management in estuarine river systems. *Korean Journal of Limnology* **38**(2): 160-180.
- Smith, V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green alge in lake phytoplankton. *Science* **221**: 669-671.
- Song, E.S. and Y.S. Shin. 2008. Spatio-temporal fluctuations of size-structured phytoplankton over and annual cycle in the Youngsan Lake. *Korean Journal of Limnology* **41**(4): 430-540.
- Song, E.S., Y.S. Shin, N.I. Jang and J.B. Lee. 2010. Assessment of nutrient and light limitation of phytoplankton in the Youngsan Lake. *Korean Journal of Limnology* **43**(1): 35-43.
- Theil, H. 1950. A rank-inveriant method of linear and polynomial regression analysis, I, II and III. *Nederlandse Akademie van Wetenschappen. Proceedings* **53**: 386-392, 521-525, 1397-1412.
- Yi, H.H., Y.S. Sin, S.R. Yang, N.I. Chang and D.H. Kim. 2007. Size-structure and primary productivity of phytoplankton from major lakes in Sumjin and Yeongsan watershed. *Korean Journal of Limnology* **40**(3): 419-430.
- Yi, S.H., Y.S. Sin, N.I. Chang, J.M. Kim, H.K. Kim, Y.G. Cho and J. Jeong. 2006. Trophic state and water quality in major lakes of the Sumjin and Youngsan River systems. *Korean Journal of Limnology* **39**(3): 296-309.
- Yoon, B.B. 2012. A Study of nutrient limitation in estuary using bioassay experiment. Mokpo Maritime University dissertation paper.
- Yun, S.T., Y.G. Go, G.H. O, B.C. Mun and H.G. Kim. 2003. Water quality assessment of the lower Yeongsan River system. *Journal of Environmental Impact Assessment* **12**(4): 259-270.

(Manuscript received 30 May 2012,  
Revised 20 August 2012,  
Revision accepted 5 September 2012)