

## 영산강 수계의 이화학적 수질에 관한 시공간적 변이 분석

강 선 아 · 안 광 국\*

(충남대학교 생명과학부)

Spatio-temporal Variation Analysis of Physico-chemical Water Quality in the Yeongsan-River Watershed. Kang, Sun-Ah and Kwang-Guk An\* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

The objective of this study was to analyze long-term temporal trends of water chemistry and spatial heterogeneity for 10 sampling sites of the Yeongsan River watershed using water quality dataset during 1995 to 2004 (obtained from the Ministry of Environment, Korea). The water quality, based on multi-parameters of biological oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), conductivity, dissolved oxygen (DO), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN) and total suspended solids (TSS), largely varied depending on the sampling sites, seasons and years. Largest seasonal variabilities in most parameters occurred during the two months of July to August and these were closely associated with large spate of summer monsoon rain. Conductivity, used as a key indicator for a ionic dilution during rainy season, and nutrients of TN and TP had an inverse function of precipitation (absolute  $r$  values  $> 0.32$ ,  $p < 0.01$ ,  $n = 119$ ), whereas BOD and COD had no significant relations ( $p > 0.05$ ,  $n = 119$ ) with rainfall. Minimum values in conductivity, TN, and TP were observed during the summer monsoon, indicating an ionic and nutrient dilution of river water by the rainwater. In contrast, major inputs of total suspended solids (TSS) occurred during the period of summer monsoon. BOD values varied with seasons and the values was closely associated ( $r = 0.592$ ;  $p < 0.01$ ) with COD, while variations of TN were had high correlations ( $r = 0.529$ ;  $p < 0.01$ ) with TP. Seasonal fluctuations of DO showed that maximum values were in the cold winter season and minimum values were in the summer seasons, indicating an inverse relation with water temperature. The spatial trend analyses of TP, TN, BOD, COD and TSS, except for conductivity, showed that the values were greater in the mid-river reach than in the headwater and down-river reaches. Conductivity was greater in the down-river sites than any other sites. Overall data of BOD, COD, and nutrients (TN, TP) showed that water quality was worst in the Site 4, compared to those of others sites. This was due to continuous effluents from the wastewater treatment plants within the urban area of Gwangju city. Based on the overall dataset, efficient water quality management is required in the urban area for better water quality.

**Key words :** chemical water quality, temporal trend, nutrient, monsoon, Yeongsan river

\* Corresponding author: Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 822-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

## 서 론

최근 산업화에 따른 인구의 도시 집중화 현상으로 도심 하천의 오염이 심각한 수준에 이르러 하천의 중요성이 크게 부각되고 있다. 특히 우리나라의 경우 가정 및 도심에서 배출되는 대부분의 생활하수, 산업 폐수 및 축산폐수 등의 각종 영양염류 및 유해 화합물이 하상에 퇴적되면서 이화학적 수질오염 및 수생태계의 교란을 가져오고, 궁극적으로는 하천의 총체적 건강도 악화를 초래하고 있다(Berner, 1987, 전 등, 1998; 옥 등, 1999). 일반적으로 강이나 하천의 유수생태계의 경우 상류지역의 수질이 양호하다 할지라도 도시의 인구 밀집지역이나 공단지역을 통과하면서 수질 환경이 극심하게 악화되는 것으로 나타나고 있다(Moon, 2001).

수질 환경의 변화에 영향을 주는 요인에는 물리·화학적 영향이 포함되며, 그 중에서 계절적 강수 분포도 매우 중요한 것으로 알려지고 있다(Parks and Baker, 1997; Winston and Criss, 2002). 이러한 사실은 국외 하천의 다양한 수질 환경에 대해 기후·수문 요인의 직접적인 영향을 평가한 많은 선행연구에서 제시된 바 있으며(Ostry, 1982; Grim and Fisher, 1986; Thornton *et al.*, 1990; Cameron, 1996; Collins and Jenkins, 1996; Criss *et al.*, 2001; Wetzel, 2001; Kalff, 2002), 우리나라에서도 하절기 강우가 수질 환경에 미치는 중요인자라는 연구들이 소개되었다. 박 등(2002)은 낙동강 하류에서 장마 강우가 하천 수질에 미치는 영향을 평가한 바 있고 그 외의 다양한 강 및 하천에서의 이화학적 역동성에 대한 폭넓은 연구가 이루어지고 있다(안 등, 2001; An and Kim, 2003; 신 등, 2003). 특히, 우리나라의 수체는 강우량의 50% 이상이 하계에 편중하여 매년 주기적 유량변동에 의해 이화학적 수질 측정값에 직접적인 영향을 준다는 결과가 폭넓게 보고되고 있다(An and Jones, 2000; 안 등, 2001; An and Kim, 2003; 김과 김, 2004). 게다가, 겨울부터 이듬해 봄까지는 강우가 적어 하천 수질의 계절 변화가 큰 것으로 나타나고 있다(강, 1998; 안 등, 2001; 박 등, 2002).

본 연구 대상 수계인 영산강의 중·하류권역은 1차 산업업 농업지역으로 영산강 본류를 비롯한 여러 지류들이 관류하며, 1981년 영산강 하구에 방조제가 건설된 이후 하류권역은 영양염류(총인, 총질소) 농도증가 및 유기물(BOD, COD) 오염이 가속화되고 있다(조 등, 1994). 특히, 광주광역시를 중심으로 인구가 밀집되어 있는 상류권역은 농업활동이나 도시에서 배출되는 생활 하·폐수에 의

해서 수질환경이 악화되고 있다(영산강유역 환경청, 2002). 최근에 이르러서는 우리나라 5대 하천 가운데 본류의 수질 오염이 가장 심각한 하천으로 전락하였다(수자원공사, 1992). 영산강 환경 관리청(1995)에 의하면 광주시의 방류하천인 광주천이 유입되는 지점에서 생화학적 산소요구량은  $15.7 \sim 28.9 \text{ mg L}^{-1}$  범위로서 최저 수질 등급인 5등급 기준 값에 비해 2~3배 더 높으며, 영산강의 수질오염도 또한 모든 항목에서 환경 기준치를 월등히 초과하였다. 이런 이유로 영산강 수계에 관한 최근 연구에 따르면, 수질변화에 대한 이화학적 연구(송, 1997, 2001; 조 등 1999; 윤, 2000; 차 등, 1999, 황, 2001), 지하수에 대한 환경오염실태에 관한 연구(박 등, 1999) 등이 이루어진 바 있고, 김 등(1998)의 영산강 하상퇴적물의 중금속 함량, 영산호의 유기물질에 관한 생태학적 변이(최 등, 1985; 김 등, 1987), 영산호에 관한 수질오염의 변동양상(오 등, 1986; 김 등, 1987)에 이르기까지 다양한 연구가 수행되어졌다. 이런 다각적 연구에도 불구하고 영산강 본류 수계의 시공간적 수질 특성 및 강우 패턴에 따른 수질변이에 대한 연구는 여전히 미비한 실정이다.

본 연구에서는 영산강 본류를 중심으로 첫째, 영산강 수계의 10개 지점을 선정하여 수질 모니터링을 통하여 몬순강우를 고려한 장마전기(Premonsoon), 장마중기(During monsoon), 그리고 장마후기(Postmonsoon)로 대별하여 주요 수질 변수에 대한 수질평가를 실시하였고, 둘째, 수체내 상·하류간의 수질에 대한 공간적 변이 및 장기간의 연별특성을 파악하였다. 이런 결과는 영산강수계의 오염실태를 파악하고 수질개선을 위한 대책 방안 마련시 기초 자료를 제공할 것으로 사료된다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지점

조사지점은 영산강 수계 본류 10개 지점으로서, 환경부에서 지정한 수질 측정망 지점을 이용하였다(Fig. 1).

- S1 전라남도 담양군 금성면 금월리 금월교
- S2 광주광역시 북구 우치동 용산교
- S3 광주광역시 서구 치평동 하수처리장 상류 1 km
- S4 광주광역시 광산구 마록동 극락교
- S5 전라남도 나주군 노안면 학산리 학산교
- S6 전라남도 나주시 남산동 나주교
- S7 전라남도 나주군 다시면 구진포나루터
- S8 전라남도 함평군 학교면 곡창리 동강교

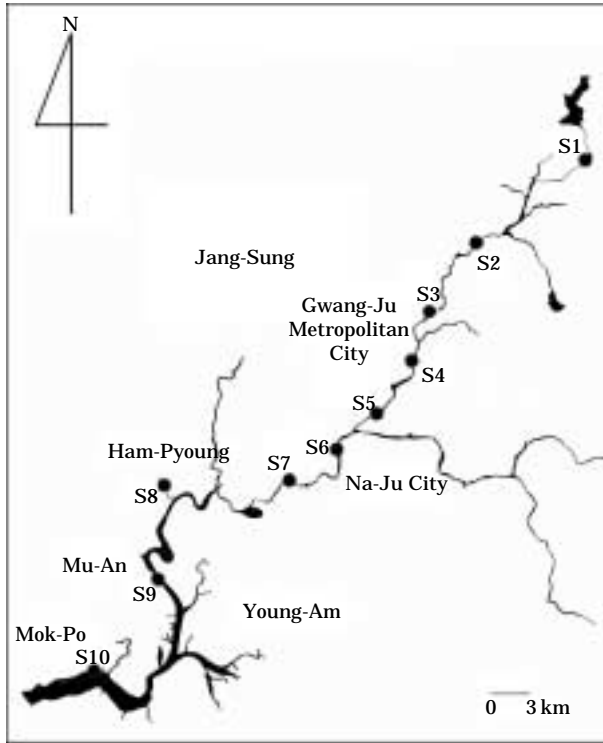


Fig. 1. Map showing the sampling sites of Yeongsan-River watershed.

S9 전라남도 무안군 몽탄면 명산리  
 S10 전라남도 목포시 옥암동 방조제 앞

2. 조사지역 현황

본 연구대상인 영산강 수계는 소백산맥 줄기인 노령산맥과 광주를 향해 서쪽으로 뻗어 남해안의 서단측까지 이르는 산맥 사이에 위치하고 있다. 총 유역면적이 3,371.4 km<sup>2</sup>, 유로연장 136.0 km<sup>2</sup> (본류)로서 우리나라의 5대강 중의 하나이며, 본류를 중심으로 5개의 직할하천, 2개의 지방하천, 168개의 준용하천 등 총 175개의 하천으로 구성되어 있다. 영산강 수계 주변에는 총인구 170만명이 거주하며, 영산강의 상류권에 위치하고 있는 광주광역시의 인구는 130만명으로 영산강 유역 전체 인구의 75%를 차지한다. 산업체의 분포를 보면 영산강 유역에 총 1,065 개소가 분포하는데 광주광역시에 전체의 72%인 762 개소가 집중되어 있다 (정부합동, 2000). 특히, 본류로 유입되는 광주천을 중심으로 광주광역시 인구의 80% 이상이 밀집되어 있어, 영산강 수질오염에 미치는 영향이 큰 것으로 보고되고 있다 (오 등, 2003). 영산강의 중류권은 토지이용의 50% 이상이 농경지, 임야, 양식장으

로 이용되고 있으며, 본류를 비롯한 대 지류인 황룡강과 광주천, 고막원천, 지석천, 함평천 등의 하천이 흐르고 있고 이들 하천은 영산강 본류에 집수되어 최종적으로 하구에 위치한 영산호의 화학적 산소 요구량 (COD) 증가 및 부영양화 가속화에 악재로 작용하고 있다.

3. 이화학적 자료 분석

이화학적 수질자료 분석을 위해 1995년 1월부터 2004년 12월까지 10개 지점에서 측정된 월별자료를 획득하였다. 자료 분석에 이용된 수질변수는 전기전도도 (Conductivity), 총인 (Total phosphorus, TP), 총질소 (Total nitrogen, TN), 생물학적 산소요구량 (Biological oxygen demand, BOD), 화학적 산소요구량 (Chemical oxygen demand, COD), 용존산소량 (Dissolved oxygen, DO), 총부유물 (Total suspended solids, TSS)이며 각 수치값의 시간별, 공간별 변화양상을 분석하였다. 영산강 유역의 강수량은 1995년에서 2004년까지 광주 기상청 (<http://gwangju.kma.go.kr>)의 데이터를 획득하여 광주광역시를 중심으로 상·하류의 공간적 변이 및 계절적 특성을 반영한 시간적 변이 (장마 전, 장마 중, 장마 후)를 분석하였다.

공간적 수질특성 분석을 위해 환경부에서 지정한 S1 (담양), S2 (우치), S3 (광주 1), S4 (광주 2)를 상류역으로 지정하였고, S5 (광산), S6 (나주), S7 (영산포)을 중류역으로, 그리고 S8 (함평), S9 (무안 1), S10 (무안 2)는 하류역으로 구분하였다. 시간적으로는 장마 전기 (5~6월), 장마 중기 (7~8월), 장마 후기 (9~10월)로 구분하여 수질자료를 분석하였으며 본 연구에서 수질요인들 간의 상관관계를 알아보는 통계분석은 SPSS ver 12.0 프로그램을 사용하여 Pearson's correlation 분석을 실시하였다. 조사 지점별 유사도지수에 의거한 Dendrogram 분석은 PRIMER 5 군집분석 패키지를 이용하여 수행하였다.

결과 및 고찰

1. 강우특성과 수질변수와의 관계

영산강의 수질은 시간적 측면 (장마 전, 장마 중, 장마 후) 및 공간적 측면 (상류, 중류, 하류)에 따라 역동적으로 변화하는 것으로 나타났으며, 이러한 특성은 하절기 몬순 강우의 특성에 의해 결정되는 것으로 나타났다. 영산강 수계에서 1995년부터 2004년까지 측정된 10년 동안의 자료 분석에 따르면, 연평균 강우량은 1,472 mm로서 집중호우 기간인 6~9월 동안 969 mm의 강우량을 보여 이 기간 동안의 강우량이 전체의 66% 이상을 차지하는 것

으로 나타났다 (Fig. 2). 광주광역시시의 연별 총 강우량은 1998, 2003, 2004년에 1,500 mm 이상으로 다른 해에 비해 높은 강우를 보인 반면, 1995과 2001년에는 1,000 mm 이하로 적은 강우를 보였으나 특히 1995년에는 800 mm 이하의 비가 내린 것으로 볼 때 가뭄의 해로 판단되었다 (Fig. 2a). Fig. 2b에서 보는 바와 같이, 집중강우의 해 (2003), 가뭄해 (1995), 10년간의 평균 강우량을 비교해 볼 때, 강우는 1~6월, 9~12월에는 각각 다른 강우의 해와 거의 차이를 보이지 않는 반면 7~8월에는 뚜렷한 차이를 보이고 있어 본 수계의 강우량도 대부분 장마기인 7~8월의 집중강우량에 의해 조절됨을 제시하고 있다.

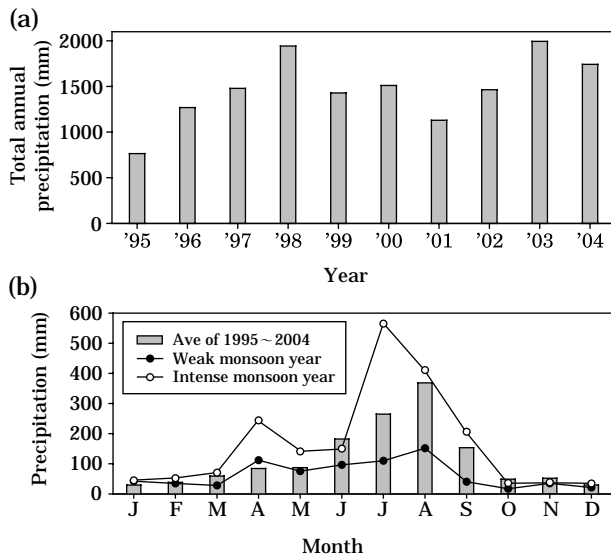


Fig. 2. Total annual precipitation (a) and monthly precipitation (b) during the study.

이러한 우리나라의 장마기 동안의 몬순강우의 특성은 이미 안 등(2001)에 의해 보고된 바 있다.

영산강에서의 강우에 대한 수질변수의 Pearson 상관지수 분석에 따르면, 강우량은 전기전도도 (Conductivity), 총인 (TP), 총질소 (TN)의 항목과 역상관 관계 ( $|r| > 0.32$ )를 보였으며, 통계학적으로 유의 ( $p < 0.01$ )한 것으로 나타났다 (Table 1). 한편, 총부유물농도 (TSS)는 강우량과 정상관 관계 ( $r = 0.49, p < 0.01, n = 120$ )를 보였으며, 생물학적 산소요구량 (BOD)과 화학적 산소요구량 (COD)은 강우분포와 통계학적 유의성이 없는 것으로 나타났다 (Table 1).

2. 수계의 수질특성 및 계절별 변이

1995년부터 2004년 동안 수질변수의 연별 평균값, 최대·최소값 분석 결과는 Table 2와 같다. 전기전도도는 연평균  $416 \mu S cm^{-1}$ 로 6월에 S10 (무안 2)에서 최대값  $1,211 \mu S cm^{-1}$ 을 보였고, 9월에 S1 (담양)에서 최소값  $125 \mu S cm^{-1}$ 로 지점별로 약 10배 이상의 계절적 차이를 보였다 (Table 2). 총인과 총질소의 평균값은 각각  $337 \mu g L^{-1}$ ,  $6.3 mg L^{-1}$ 로서 각각  $840 \mu g L^{-1}$ 와  $11.7 mg L^{-1}$ 로 연중 최고치를 보였는데, 이는 하천 주변에 위치하고 있는 오염원으로부터 다량의 오염물질이 하천에 유입된 것으로 사료되었다. 유기물 오염의 지표로 사용되고 있는 생물학적 산소요구량과 화학적 산소요구량의 평균농도는 각각  $4.7 mg L^{-1}$  및  $6.6 mg L^{-1}$ 로서 우리나라 환경부의 하천 수질기준에 의거할 때 3급수의 수질을 보였다. 이런 특성은 산간 계류성 하천 (신, 2003)에 비해 오염도가 높은 수준으로서, 전형적으로 타 도심수계들에서 처럼 도심에서의 오염물 유입특성을 반영하는 것으로 나타났다. 연평균 총부유물의 농도는  $15.5 mg L^{-1}$ 로 지점별 농도범위

Table 1. Pearson's correlation coefficients (r) and its probability (p, n=120) of chemical parameters.

		Conductivity	TP	TN	BOD	COD	DO	TSS
TP	r	.621 (**)						
	p	.000						
TN	r	.562 (**)	.529 (**)					
	p	.000	.000					
BOD	r	.444 (**)	.414 (**)	.431 (**)	1			
	p	.000	.000	.000				
COD	r	.205 (*)	.272 (**)	.289 (**)	.592 (**)	1		
	p	.026	.003	.001	.000			
DO	r	.528 (**)	.411 (**)	.549 (**)	.140	.132	1	
	p	.000	.000	.000	.130	.154		
TSS	r	-.257 (**)	-.169	-.214 (*)	.267 (**)	.296 (**)	-.389 (**)	1
	p	.005	.067	.020	.003	.001	.000	
Precipitation	r	-.450 (**)	-.329 (**)	-.409 (**)	-.072	-.022	-.583 (**)	.490 (**)
	p	.000	.000	.000	.438	.815	.000	.000

\* : significant at the 0.05 level, \*\* : significant at the 0.01 level

**Table 2.** Means±standard error (S.E.) and ranges of physical, chemical, and biological parameters in Yeongsan River watershed during 1995 (January~December) to 2004 (January~December).

Parameters	Mean±S.E.	N	Range (Min~Max)
Conductivity ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	416±3.15	120	125~1,211
TP ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	337±2.55	120	68~840
TN ( $\text{mg L}^{-1}$ )	6.3±0.05	120	2.2~11.7
BOD ( $\text{mg L}^{-1}$ )	4.7±0.04	120	0.9~10
COD ( $\text{mg L}^{-1}$ )	6.6±0.05	120	2.8~9.9
DO ( $\text{mg L}^{-1}$ )	9.8±0.07	120	7.5~12.9
TSS ( $\text{mg L}^{-1}$ )	15.5±0.18	120	1.9~22.9

가 1.9~22.9  $\text{mg L}^{-1}$ 로 전기전도도와 마찬가지로 지점에 따른 계절적 변이가 크게 나타났다.

영산강 본류의 상류, 중류 및 하류에 대한 이화학적 변수의 계절별 수질특성은 Fig. 3과 같다. 분석된 자료에 따르면, 총부유물의 농도를 제외한 전기전도도, 총인, 총질소, 생물학적 산소요구량 및 화학적 산소요구량 농도가 갈수기에 높게 유지되다가 장마기에 접어들면서 농도가 낮아지는 경향이 뚜렷하였다. 이런 특성은 장마기에 인근 수계로 부터의 영양물질 등의 하천유입으로 수질악화가 초래되는 산간 계류성 하천들의 계절적 특성과는 반대의 양상을 보였다(신 등, 2003). 이는, 영산강 수계에서 높은 농도의 오염물이 강우기의 집중호우로 인해 오염물질이 희석되는 효과(dilution effect)를 나타내었기 때문으로 사료되었다. 이화학적 수치값은 계절성 강우의 특징인 몬순강우로 인해 강우가 집중되는 장마기와 그 전·후 시기의 차이가 크게 나타나는데(이 등, 2002; 안 등, 2005), 강우에 의한 희석효과가 상대적으로 적은 갈수기의 수질은 생활하수와 농업용수 등의 오폐수의 직접적인 유입으로 수질악화를 가져올 것으로 사료되었다(오 등, 2003).

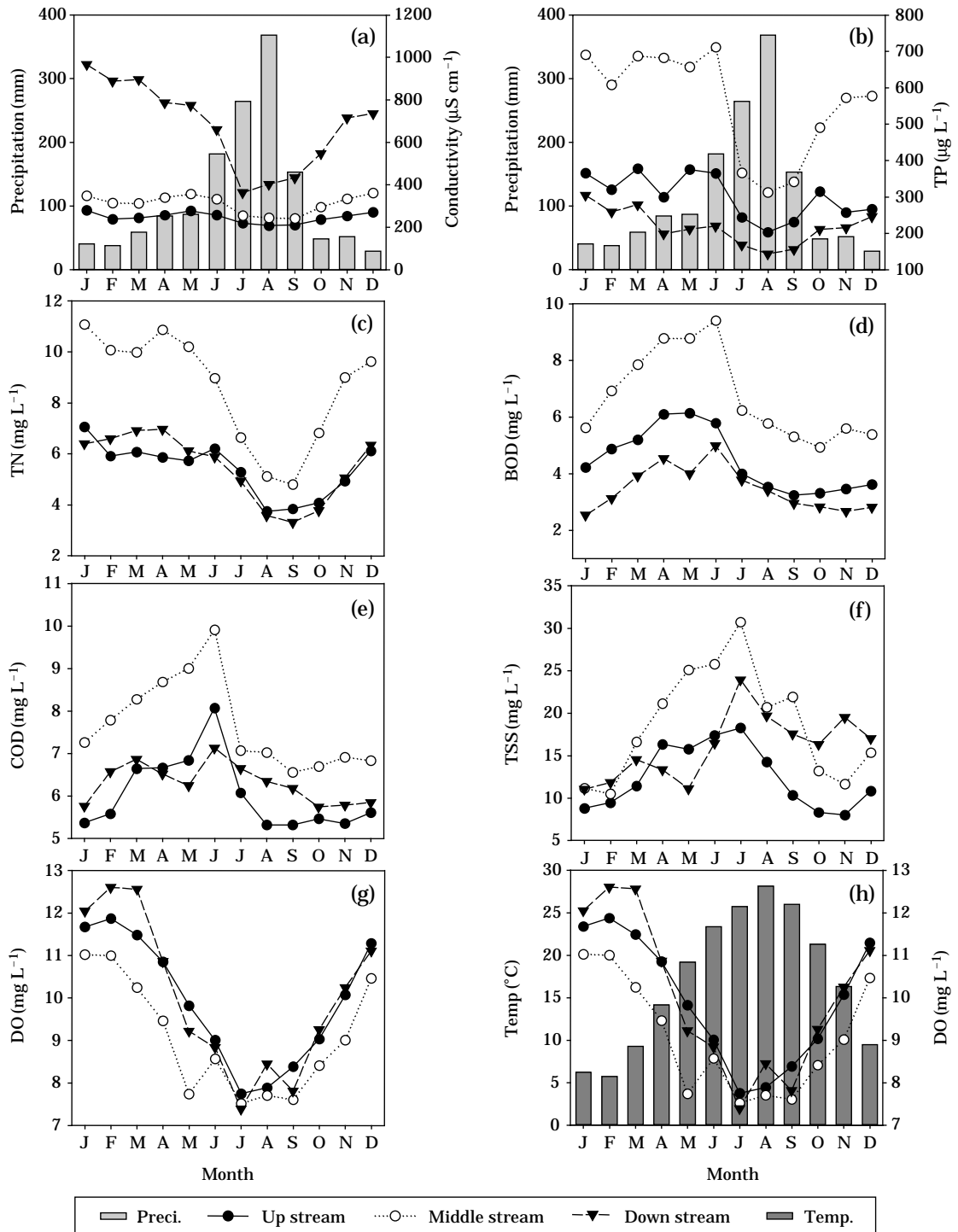
전기전도도는 모든 지점에 있어서 갈수기인 1월에서 3월에 높은 값을 보였고, 장마기인 7월과 8월에 낮은 값을 보였다. 상류와 중류에서는 장마기를 제외하고는 계절별로 큰 차이를 보이지 않았으나, 하류지점에서는 장마기에 약 100  $\mu\text{S cm}^{-1}$ 의 큰 감소폭을 보이다가 이후에 다시 급속히 증가하는 양상을 보였다(Fig. 3a). 이는 전기전도도 값이 강우에 의해 감소됨( $r=-0.450, p<0.01$ )을 의미하였다. 이러한 하류에서의 전기전도도의 급격한 감소 현상은 장마철 집중 강우로 인해 하류에서 다량의 이온이 일시적으로 희석됨을 의미한다(안 등, 2005). 본 연구에서는 장마기간의 전기전도도 값이 연평균 전기전도도 값보다 약 60%의 증가를 보이는 산간 계류성 하천의 특성과는 반대 양상을 보였다(신, 2003).

총인은 총질소와 유사한 패턴을 보였다(Fig. 3b, c). Pearson 상관지수 분석결과를 볼 때, 총인 농도와 총질소 농도는 상관성( $r=0.529, p<0.01$ )이 높은 것으로 나타났으며(Table 1), 계절별 변동양상을 보면 총질소에 비해 총인의 경우 상·하류간의 변동 폭이 더 크게 나타났다. 총인의 농도변화는 중류에서 상·하류에서의 농도보다 각각 2배, 2.7배의 높은 값을 보였다. 갈수기에 평균 672  $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 높은 농도를 유지하다가 6월에 최대값(711  $\mu\text{g L}^{-1}$ )을 나타내었고, 장마기인 7월에 큰 폭(약 300  $\mu\text{g L}^{-1}$ )으로 감소하여 8월에 최소값 143  $\mu\text{g L}^{-1}$ 를 보인 후 다시 강우 감소에 따라 서서히 증가하는 양상을 보였다. 이러한 분석 결과는 이전의 다른 하천의 수질연구에서 인(P)의 유입이 주로 하절기에 발생하여 8월에 최대값을 보이고 다시 강우의 감소에 따라 농도가 감소한다는 연구와는 반대의 결과를 보였다(안 등, 2005). 하류에서의 총질소는 총인과 마찬가지로 계절적인 영향을 받으며 장마전(7.6  $\text{mg L}^{-1}$ )에 비해 장마기(4.9  $\text{mg L}^{-1}$ )에 낮은 농도를 나타내다가 9월에 하류지점에서 최소값인 3.3  $\text{mg L}^{-1}$ 을 보였다. 한편, 10월 이후에는 총질소의 농도가 급격한 증가를 보여 1월에는 중류에서 농도가 11.1  $\text{mg L}^{-1}$ 로 최대값을 보였다. 조 등(1999)에 따르면, 6월에 가장 높은 총질소를 나타내며, 8월부터 10월까지 감소하다가 11월 이후부터 증가한다는 연구 결과를 보고하였는데 이와 같은 결과는 본 수계와 유사한 계절 패턴을 보였다. 이는 중류지점의 지역적 특성으로 미루어 볼 때, 강우로 인하여 농업폐수 유입량이 더욱 더 많아져 하계에 총질소의 농도가 높을 것으로 생각되나, 이미 광주시에 인접한 공단 및 인구의 밀집으로 인한 생활하수 및 공장 폐수등의 오염물질이 하천으로 유입됨으로서 오염도가 높아진 상태에서 장마기의 집중적 강우에 의해 급격한 유량증가를 가져와 오염물질이 오히려 희석되는 효과가 나타나기 때문으로 사료된다(오 등, 2003).

유기물 오염의 지표로서 많이 이용되는 생물학적 산소요구량은 화학적 산소요구량 변화와 유사한 계절변화를 보였으며(Fig. 3d, f), Table 1에서 보여 주는 바와 같이 두 수질 변수 간에 높은 상관성( $r=0.592, p<0.01$ )을 나타내었다. 생물학적 산소요구량 농도는 모든 지점에서 1월에 급속히 상승하기 시작하여 6월에 최고치인 9.4  $\text{mg L}^{-1}$ 를 나타내었으며, 7월 이후 급격히 하강하여 상류에서 9월에 최저치인 3.2  $\text{mg L}^{-1}$ 의 농도를 나타내었고, 10월부터 안정적인 값을 유지하였다. 갈수기인 1월에서 6월까지 생물학적 산소요구량 농도가 증가한 것은 유량이 적은 갈수기에는 유기물질이 농축되기 때문에 생물학적 산소요구량 농도가 증가되는 것으로 보였고, 반면에 장마

중에는 유기물질이 희석되는 효과를 가져와 생물학적 산소요구량이 낮아지는 것으로 사료되었다. 이런 결과는 다

른 도심하천의 생물학적 산소요구량 농도변화와 일치하는 결과를 보였다(한 등, 2004). 화학적 산소요구량 농도



**Fig. 3.** Seasonal fluctuations of conductivity (Cond.), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), total suspended solids (TSS), water temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), dissolved oxygen (DO), biological oxygen demand (BOD), and chemical oxygen demand (COD). Each data point indicates monthly average during 1995~2004.

또한 1월부터 급속히 상승을 하여 6월에 중류에서 최대값  $9.9 \text{ mg L}^{-1}$ 을 나타내었고, 6월 이후에는 급격히 하강하기 시작하여 상류에서 8월에 최소값인  $5.3 \text{ mg L}^{-1}$ 을 나타내었으며, 중류와 하류에서는 각각 9월과 10월에  $6.5$ ,  $5.7 \text{ mg L}^{-1}$ 을 보였다.

총부유물 농도는 갈수기인 1월에 최소값 ( $8.8 \text{ mg L}^{-1}$ )을 보이다가 1월 이후에 완만하게 상승하여 장마기인 7월에 중류지점에서  $30 \text{ mg L}^{-1}$  이상을 상회하는 최대치를 보였다 (Fig. 3f). 장마 기간 동안에 총부유물 농도는 연 평균 농도 ( $15.5 \text{ mg L}^{-1}$ )에 비해 약 2배 정도 높은 결과를 보였는데, 이는 강우시 유기물 유입과 함께 대량의 무기성 부유물 (Inorganic solids)이 유입되었기 때문으로 사료된다. 이전의 영산강의 수계에 대한 문헌에 따르면, 총부유물의 농도가 수생물의 변화나 강우에 의한 하천으로의 폐수 유입으로 많은 영향을 받게 된다는 사실이 연구된 바 있으며 (조 등, 1999), 수계가 다른 하천 유역에서도 하절기에 무기성 부유물의 농도가 급격히 증가했음을 보고한 바 있다 (신, 2003). 용존산소량은 수온이 높은 7월에 하류에서 가장 낮은 용존산소량인  $7.4 \text{ mg L}^{-1}$ 을 나타냈으며, 수온이 가장 낮은 2월에  $12.6 \text{ mg L}^{-1}$ 로 가장 높은 용존산소량을 보여 (Fig. 4g, h) 계절별 용존산소 농도는 온도 상승과 함께 감소되는 계절적인 경향을 보였는데 이러한 특성은 다른 하천의 연구결과와도 잘 일치하였다 (안 등, 2005).

### 3. 연별 수질 변화 특성

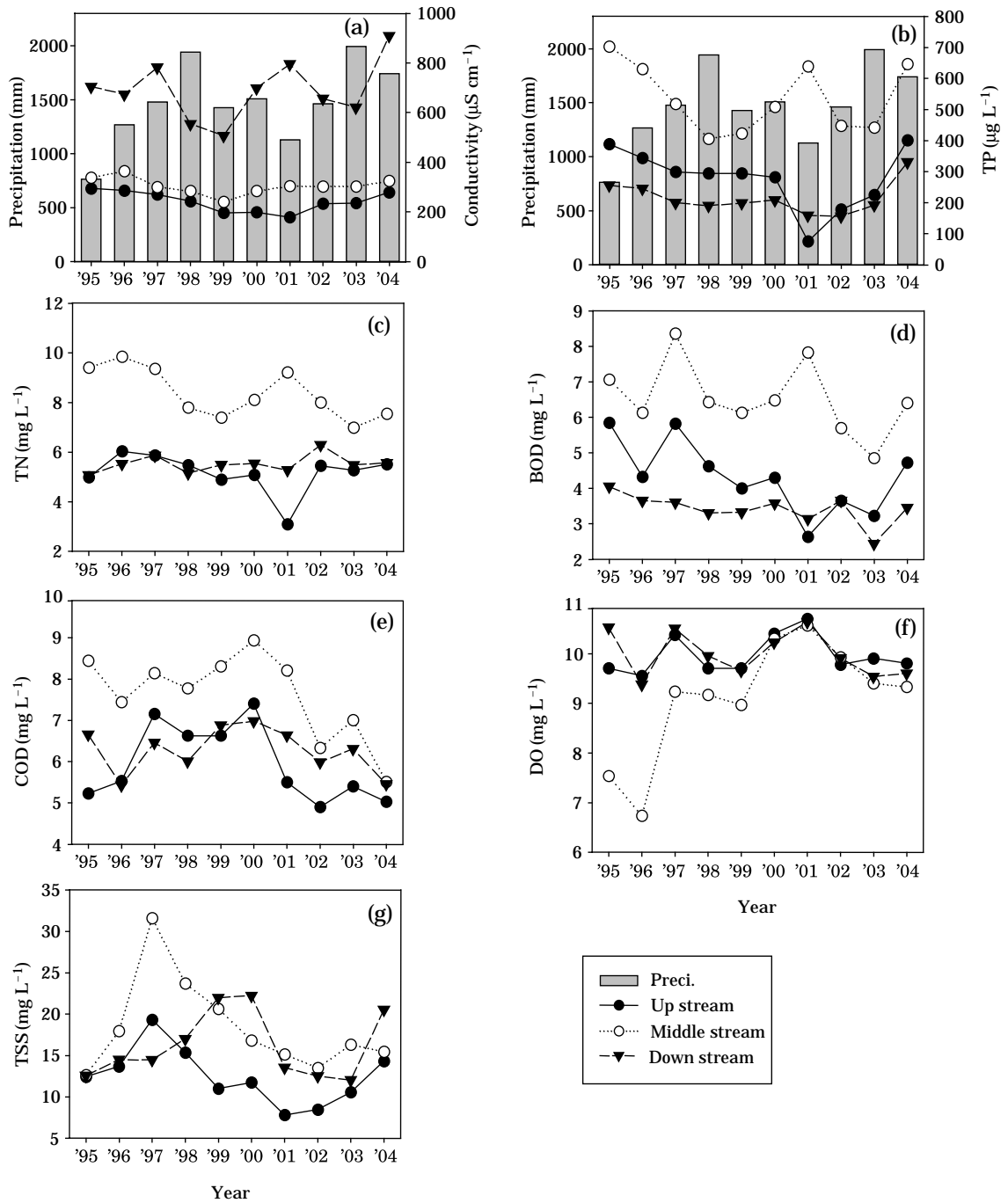
10년간 수질변수들의 변화양상 분석에 따르면, 전기전도도, 총인, 총질소, 생물학적 산소 요구량, 및 총부유물 농도는 2003년 이후로 증가하는 양상을 보인 반면, 화학적 산소 요구량은 2000년까지는 계속 증가하다가 그 이후에 오히려 감소하는 양상을 보였다 (Fig. 4). 10년 동안 총인, 총질소, 생물학적 산소 요구량, 및 화학적 산소 요구량의 변화는 중류에서 높은 농도를 유지하였는데, 이는 중류역의 토지이용도 측면에서 많은 비점오염원인 농경지 분포 및 소규모 양식장 영향 이와 아울러 여러 오페수처리장으로 부터의 농공폐수가 유입되기 때문으로 사료된다.

전기전도도는 10년 동안  $178 \sim 908 \mu\text{S cm}^{-1}$  범위내에서 변화하였으며 상류에서의 평균농도 ( $241 \mu\text{S cm}^{-1}$ )보다 하류에서의 평균농도 ( $690 \mu\text{S cm}^{-1}$ )가 약 2.9배로 높게 나타나 다른 수질변수보다 공간적 변이가 높게 나타났다. 10년간의 영산강 전체의 생물학적 산소 요구량은 평균  $4.8 \text{ mg L}^{-1}$ 로 우리나라 하천 수질 기준에 의한 3등급의

수질을 보였다. 한편, Fig. 4d에서 보는 바와 같이, 지점에 따른 생물학적 산소 요구량은 연별 큰 변이를 보였는데 하류에서의 연별변화 보다는 상류와 중류에서의 연별변화의 변이 폭이 크게 나타났다. 1995년에는 영산강의 극심한 가뭄으로 영산강 본류의 수질오염도가 하천수 4등급으로 높았다가 이후 1996년에는 3등급으로 개선되었고, 1997년에 오염도가 다시 악화되었다. 1997년에 생물학적 산소 요구량은 중류에서  $8.4 \text{ mg L}^{-1}$ 로 최대값을 보여 5등급으로 수질이 악화되었고, 2003년에 하류에서  $2.4 \text{ mg L}^{-1}$ 로 최소값을 보였다. 대부분지점에서 1997년 이후로 다소 감소하는 경향을 보이다가 비가 비교적 적게 내렸던 해인 2001년에 상류와 하류에서는 생물학적 산소 요구량 농도가 2등급까지 감소하였고, 중류에서는 오히려 4등급으로 증가하는 패턴을 보였다. 이는 1997년 이후 하천정비사업 등을 통해 생물학적 산소 요구량 농도의 증가원인인 하천 저질의 유기물을 제거한 결과로 사료된다 (오 등, 2003), 이후에 측정된 자료와 분석치를 볼 때, 영산강 전 지점에서 생물학적 산소 요구량 농도의 부하가 다시 증가하는 것으로 나타났다. 이런 특성은 화학적 산소 요구량, 총인, 총질소, 및 총부유물 등에서 유사한 경향을 보였다. 화학적 산소 요구량은 평균  $6.6 \text{ mg L}^{-1}$ 으로 생물학적 산소 요구량보다 높은 수치를 보였으며 (Fig. 4e), 2000년에 가장 높은 수치인  $8.9 \text{ mg L}^{-1}$ 을 보인 이후에 점차 감소하여 2004년에는  $5.0 \text{ mg L}^{-1}$ 의 최소값을 보여 수질향상을 보였다. 총인과 총질소의 경우 상·하류에서 1995년부터 2000년까지는 변화폭이 미미하다가 2001년 이후에 증가하는 양상을 보였으며 상대적으로 수치가 높은 중류에서는 불안정한 변화 패턴을 보이며 증감을 반복하다가 2003년 이후에 다시 증가하고 있었다 (Fig. 4b, c). 정 등 (1997)에 따르면 낙동강 수계의 총인의 농도변화는  $100 \sim 400 \mu\text{g L}^{-1}$  범위 내에서 변화하는데 반해 영산강에서의 총인의 농도변화는  $75 \sim 702 \mu\text{g L}^{-1}$  범위내에서 변화하는 양상을 보여 그 변이 폭이 타 하천보다 더 크게 나타났다 (정 등, 1997). 영산강의 10년 동안 용존산소량은  $6.7 \sim 10.7 \text{ mg L}^{-1}$  범위 내에서 변화하였으며 1997년에 모든 지점에서 큰 폭으로 증가하여 그 이후에 차츰 평균  $9.5 \text{ mg L}^{-1}$ 로 안정화 되었다 (Fig. 4f). 총부유물은 1995~1997년에 급격히 증가한 후 그 이후에 증감을 반복하다가 2002년 이후부터 다시 부유물의 농도가 증가함을 볼 수 있다 (Fig. 4g).

### 4. 공간별 수질 변이 양상

지점별 이화학적 수질변이 분석에 따르면, 최상류부인



**Fig. 4.** Interannual variation of conductivity (Cond.), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), biological oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total suspended solids (TSS), and dissolved oxygen (DO).

S1(담양)에서 하류부인 S10(무안 2)로 내려갈수록 전기 전도도는 계속 증가하는 경향을 보여 거리에 따른 수질 악화현상을 보였다(Fig. 5). 전기전도도의 변화는 최하류 지점인 S10(무안 2)를 제외한 상·중류역에서 152~372  $\mu\text{S cm}^{-1}$  내에서 평균 307  $\mu\text{S cm}^{-1}$ 의 농도를 보였으나, 최

하류 지점인 S10(무안 2)에서는 다른 지점보다도 무려 7.7배 이상 높은 1,193  $\mu\text{S cm}^{-1}$ 의 특이적으로 높은 수치를 나타냈다(Fig. 5a). 하천 부영양화의 핵심지표인 총인과 총질소의 지점별 변화양상은 아주 유사한 패턴을 보였다(Fig. 5b, c). 총인의 경우 최상류부인 S1(담양)에서



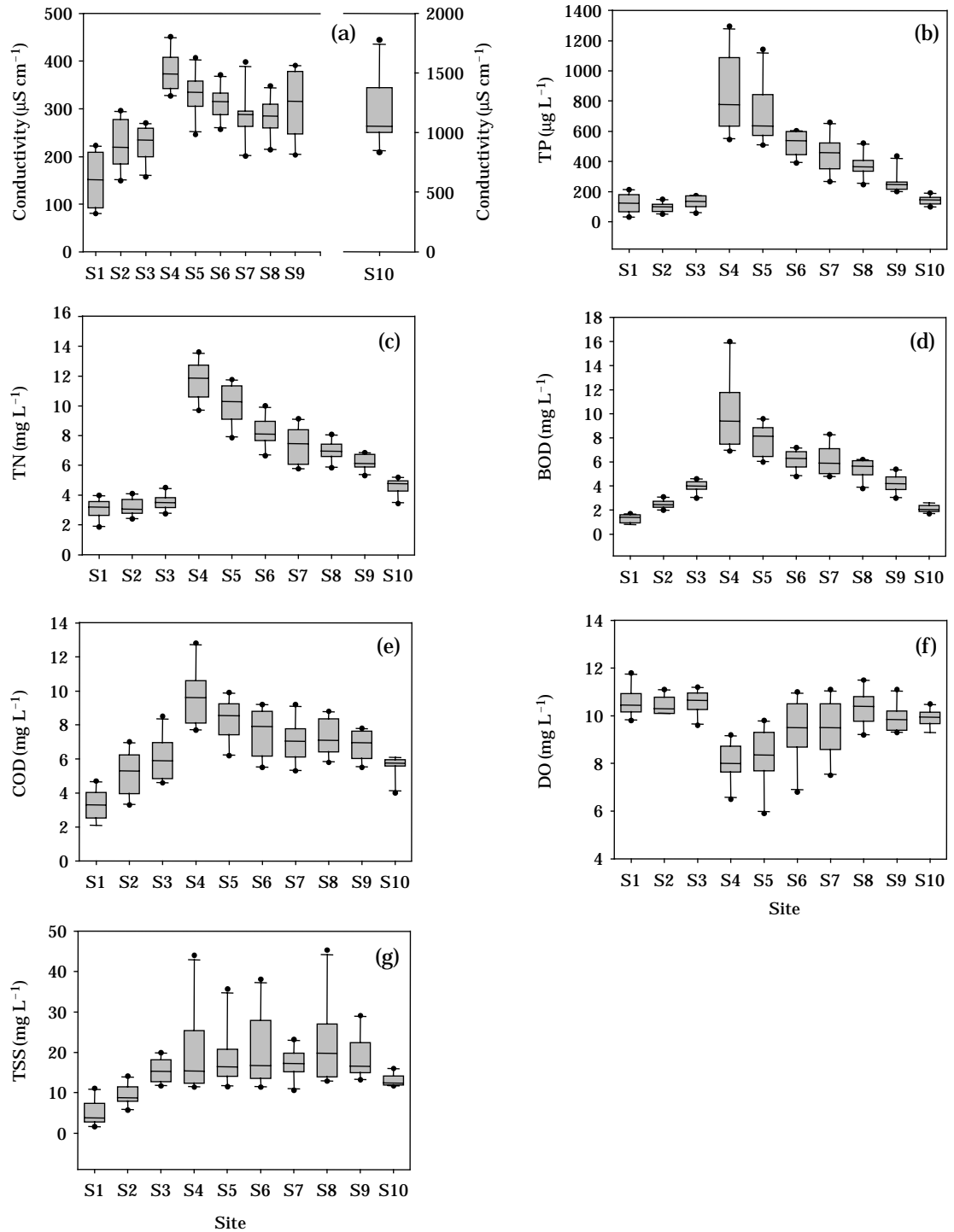


Fig. 5. Spatial variation of water quality based on the average of 1995~2004.

124  $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 나타나고 있는 반면, 중 상류부인 S4(광주 2)에서 820  $\mu\text{g L}^{-1}$ 으로 상기 두 지점 간에 약 6.7배 이상의 변이가 보였다. 이런 결과는 S4(광주 2)에서 부영양화

현상이 가속화 됨을 제시하는 바이다. 총질소의 경우 전체 지점에서 3.0  $\text{mg L}^{-1}$  이상을 보였고, S4(광주 2)에서 총질소의 평균값이 11.6  $\text{mg L}^{-1}$  이상으로 총인 및 생물학

적 산소요구량, 화학적 산소요구량과 유사한 패턴을 보였다 (Fig. 5c). S4 (광주 2) 지점의 주변이 대부분 농경지이며, 광주천 하류부근에 하천경관을 위해 꽃밭공원이 조성되어 있어 총질소 함량이 높게 나타나는 것은 비료 등의 살포에 의한 영향일 가능성이 있으며, 총인 농도 또한 증가하게 된 원인으로 주변 농지 및 꽃밭 등에서 토양 유실 등에 의한 농도변화가 발생된 것으로 사료된다 (오 등, 2003).

생물학적 산소요구량도 지점별 농도변화의 폭이 크게 나타났다 (Fig. 5d). 영산강의 최상류부인 S1 (담양), S2 (우치)에서의 생물학적 산소요구량 농도는  $1.9 \text{ mg L}^{-1}$ 로 하천수질 환경기준을 토대로 평가한다면 2등급에 해당한다. 이와 같은 결과는 임 등 (2005)에 의한 1994년부터 2003년까지의 생물학적 산소요구량, 화학적 산소요구량, 총부유물, 총질소, 및 총인의 수질값은 각각 3.2, 5.9, 12.0,  $3.3 \text{ mg L}^{-1}$  및  $115 \mu\text{g L}^{-1}$ 로서 일반적으로 2~3 등급 수준의 수질 양상을 보인 결과에 비추어 볼 때, 상류지역의 수질 변화는 현재까지 별다른 변동이 없는 것으로 나타났다. 반면, 중·상류부에 위치하는 S4 (광주 2)에서는 생물학적 산소요구량값이  $9.6 \text{ mg L}^{-1}$  이상을 상회하여 5 등급을 보였으며 급격한 수질 악화 현상을 보였다. 특히 S3 (광주 1)의  $4.0 \text{ mg L}^{-1}$ 과 S4 (광주 2)의  $9.6 \text{ mg L}^{-1}$  사이에서의 변화폭이 큰 것은 영산강이 광주광역시를 지나면서 광주광역시에서 배출되는 생활하수 (광주천 하류)중에 포함되는 가정용 세제와 축산, 농업활동의 결과로부터 생기는 각종 분뇨, 농약으로 인한 영향이 큰 것으로 사료된다 (오 등, 2003). 이와 같은 결과는 생물학적 산소요구량, 화학적 산소요구량, 총부유물, 총질소, 총인의 농도가 각각 8.3, 9.1, 20.2,  $9.6 \text{ mg L}^{-1}$  및  $692 \mu\text{g L}^{-1}$ 을 보여 수질 상태가 5등급 수준이어서 침수식물은 전혀 생육하기 힘든 물 환경으로 나타났던 이전의 연구결과 (임 등, 2005)와 견주어 볼 때 영산강 중·상류지역의 수질 상태는 예전에도, 그리고 지금까지 계속적으로 악화되고 있음을 나타내고 있다. 따라서 앞으로 다른 지점보다도 S4 (광주 2) 지점의 수질개선에 있어서 집중적이고 체계적인 관리가 절실히 필요하다고 판단된다. 하류로 내려가면서 생물학적 산소요구량의 농도가 낮아짐으로 최하류 지점인 S10 (무안 2)에서는 평균  $2.3 \text{ mg L}^{-1}$ 의 2급수를 회복하였다. 이와 같이 하류로 갈수록 수치가 낮아지는 것은 하천수로 인한 자정작용에 의한 것으로 판단된다. 총부유물의 지점별 평균농도는  $15.5 \text{ mg L}^{-1}$  ( $5.0 \sim 22.3 \text{ mg L}^{-1}$ )로서 다른 지점들에 비해 영산강으로 유입되는 대표적인 지천인 풍영천, 광주천, 지석천, 고막원천, 함평천의 부근에 위치하는 S4 (광주 2), S6 (나주), S8 (함평)부근에서  $20 \text{ mg}$

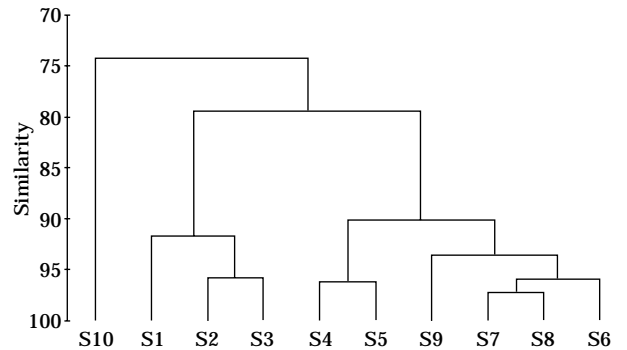


Fig. 6. The dendrogram representing the similarity among sampling sites in the Yeosan River watershed.

$\text{L}^{-1}$  이상의 급격한 부유물 증가로 인한 오염도가 크게 나타났다 (Fig. 5g).

### 5. 지점별 유사도 분석

각 지점들간의 유사도 지수에 의거한 수지도 (Dendrogram)는 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 각 지점별 유사도 (%)를 90% 유사도 수준에서 분석한 결과에 따르면, S10의 1개 그룹, S1~S3의 1개 그룹, S4~S5의 1개 그룹, S6~S9의 1개 그룹으로서 총 4개 그룹으로 대별되었다. 유사도가 가장 높은 곳은 S7과 S8이었으며 그 외에 산지 계류형인 S1·S2·S3와 같은 상류의 지점들과 하천형이 도심하천에 해당하는 S4·S5 지점에서 같은 집단을 형성하고 있었다. 대체적으로 최상류와 중하류의 지점들 간에는 유사성이 낮았고 전반적으로 지점들간의 상류와 중·하류 집단이 잘 구분되고 있으나 광주천과 합류되는 지점인 S4 (광주 2)를 기점으로 하여 그 상부와 하부의 생물학적 산소요구량, 화학적 산소요구량, 총인, 총질소 및 총부유물의 농도변이가 매우 심한 것으로 나타났다. 따라서 본류를 중심으로 폐수처리장 및 도심이 밀집한 지점 4에서는 급격한 수질 악화현상을 보여 향후 오염저감을 위한 대책이 필요한 것으로 사료되었다.

### 적 요

본 연구는 영산강 수계 내 10개 지점의 이화학적 수질에 관한 시공간적 변이상태를 분석하기 위해 1995년부터 2004년까지 측정된 환경부 수질데이터를 이용하여 분석하였다. 이용된 수질 변수는 전기전도도 (Conductivity), 생물화학적 산소요구량 (BOD), 화학적 산소요구량 (COD), 용존산소량 (Dissolved oxygen), 총인 (Total phos-

phorus), 총질소 (Total nitrogen) 및 총부유물 (Total suspended solids)의 7개 항목으로서 계절별, 연별, 및 조사 지점별 농도변이가 큰 것으로 나타났다. 영산강 수계 내에서의 이화학적 수질측정값은 계절성 강우에 따라 수질 측정값의 변동 폭이 심하며, 대부분의 수치 농도변이는 7~8월에 집중되는 하절기 몬순 강도에 의해 조절되었다. 장마기에 이온희석의 지표로 사용되는 전기전도도와 총인, 총질소와 같은 영양염류들의 경우 강우량과 역 상관관계 ( $|r| > 0.32, p < 0.01, n = 119$ )를 보였으나, 생물학적 산소 요구량과 화학적 산소요구량의 경우에는 강우분포와 통계학적 유의성 ( $p > 0.05, n = 120$ )을 보이지 않았다. 총인, 총질소 및 전기전도도는 대부분 장마 중인 7~8월에 최소값을 보였는데, 이는 강우에 의해 오염물질이 희석되기 때문으로 사료되었다. 반면, 총부유물의 유입은 하절기 몬순 동안에 최대치를 보여 이온 감소와는 대조적인 특성을 보였다. 생물학적 산소요구량의 계절적 변화 패턴은 화학적 산소요구량과 유사한 ( $r = 0.592, p < 0.01$ ) 양상을 보였으며, 마찬가지로 총질소의 변화패턴 또한 총인과 유사한 ( $r = 0.529, p < 0.01$ ) 양상을 보였다. 용존산소량의 계절별 변화에 따르면, 수온이 낮은 겨울에 최대값을 보이며 온도가 높은 여름에 최소값을 보여 수온과의 역 상관관계를 보였다. 지점별 변화 패턴 분석에 따르면, 전기전도도를 제외한 총인, 총질소, 생물학적 산소요구량, 화학적 산소요구량 및 총부유물은 상류 및 하류역 보다 중류역에서 높은 농도를 보인 반면, 전기전도도의 경우에는 하류역에서 높은 농도를 보였다. 특히, 총인, 총질소, 생물학적 산소요구량 및 화학적 산소요구량은 지점 4(광주 2)에서 급격히 악화되는 양상을 보였으며, 이는 광주 도심으로부터 유출되는 가정하수 및 인접한 공단에서 배출하는 폐수유입에 의한 영향으로 사료되었다. 따라서, 영산강의 수질 개선을 위해서는 이런 도심지역의 오염부하 저감을 통한 효율적 수질관리가 요구된다.

## 사 사

본 연구는 한국 과학재단 목적기초연구 (과제번호: R08-2003-000-10535-0) 지원의 일부로 수행되었음.

## 인 용 문 헌

강태호. 1998. 도시하천에서의 강우와 유출 및 수질 예측기법 개발에 관한 연구, 경기대학교 토목대 학원 박사학위논문. 2-16pp.

김주용. 1998. 영산강 수계내 부유물질과 하상퇴적물 중의중금속 함량과 분포특성

김범철, 김윤희. 2004. 아시아 몬순지역의 대형댐 (소양호)에서의 인 순환과 2차원모델의 적용. 한국육수학회지 **37**(2): 205-212.

김철수, 송태곤, 박경양. 1987. 영산호 수질의 이화학적 특성, 연안생물연구. **1**(1): 1-5.

박성배, 이상균, 장광현, 정광석, 주기재. 2002. 장마기 강우가 낙동강 하류 (물금) 수질에 미치는 영향. 한국육수학회지 **35**(3): 160-171.

박찬영, 신인현, 안건상, 이창신, 정연중, 최낙철. 1999. 광주광역시 지하수에 대한 환경오염실태와 지구화학적 특성 연구. 한국지구과학회지 **20**: 266-276.

송기판. 2001. 영산강수계 영양염류 변화추이 분석에 관한 연구. 전남대학교 석사학위논문. 44p.

송재성. 1997. 영산강 상류 수계의 수질변화에 관한 연구. 전남대학교 석사학위논문. 44p.

신인철. 2003. 유구천의 수질평가 및 효율적인 수질 감시를 위한 적정 조사빈도 설정 연구. 충남대학교 석사학위논문. 11p.

신재기, 황순진, 조경제. 2003. 평택호와 주요 하천의 수환경 및 오염도평가. 한국육수학회지 **36**(1): 38-47.

안광국, 신일철. 2005. 산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 몬순 강우의 영향. 한국육수학회지 **38**(1): 54-62.

안광국, 정승현, 최신석. 2001. 생물보전지수 (Index of Biological Integrity) 및 서식지평가지수 (Qualitative Habitat Evaluation Index)를 이용한 평창강의 수환경 평가. 한국육수학회지 **34**: 153-165.

윤희선. 2000. 영산강 목표 수질을 위한 BOD 오염부하량 산정. 서울대학교 석사학위논문. 38p.

오석차, 이진형. 1986. 영산호 하류의 수리 및 수질자연보전 연구보고서. **8**: 1-13

오강호, 고영구. 2003. 광주광역시 하천수의 수질 및 오염. 한국환경과학회지 **12**(3): 287-297.

옥치상, 이주상, 박홍석, 백병천, 이병인. 1999. 수질 및 수자원 관리. 도서출판 대학서림. 606p.

이혜원, 안광국, 박석순. 2002. 소양호 표층수 수질의 연별 추이 및 상·하류 이질성 분석. 한국육수학회지 **35**(1): 36-44.

임동욱, 유윤미, 황인천. 2005. 광주광역시 도심 하천의 이화학적 환경과 수생식물 분포 비교연구. 한국환경과학회지 **23**(2): 120-128.

전라남도. 1996. 영산강 수질개선 종합대책 수립에 관한 연구.

전효택, 문희수, 김규한, 정명채. 1998. 환경지질학. 서울대학교 출판부. 529p.

정부합동. 2000. 호남의 생명수 지키기 대역사-영산강 수계 물 관리 종합대책. 환경부. 483p.

정종배, 김복진, 김정국. 1997. 낙동강 수계 주요 농업지대 소유역의 수질오염. 한국환경농학회지 **16**(2): 187-192.

- 조기안, 안병권, 홍순강, 정동욱. 1999. 영산강하류의 계절 변화에 따른 수질특성과 유기인산염의 분해율에 관한 연구 1 - 부영양화를 중심으로 -. 한국환경과학회지 **8(6)**: 691-698.
- 조기안. 1994. 호남지역 동북호와 영산호의 부영화에 대한 연구, 한국환경과학회 1994년도 봄 특별호나경심포지움 및 학술발표회 초록집.
- 차진명, 신성의, 차규석. 1999. 영산강 수계의 비점오염원에 관한 연구 I-토지이용 및 강우를 중심으로. 환경영향평가. **8**: 41-49.
- 최청일. 1985. 영산호의 부유성 고형유기물질에 관한 생태학적 연구. 서울대학교 박사학위논문.
- 한중근, 이양규, 남정만. 2004. 안양천의 계절별 수질분석. 한국환경복원녹화기술학회지. **7(4)**: 52-60.
- 황대호. 2001. 영산강 수질기준 달성을 위한 BOD 부하량 삭감방법의 비교 연구, 서울대학교 석사학위논문. 65p.
- An, K-G. and D.S. Kim. 2003. Response of lake water quality to nutrient inputs from various streams and in-lake fishfarms. *Water, Air, and Soil Pollution* **149(1-4)**: 27-49.
- An, K-G. and J.R. Jones. 2000. Temporal and spatial patterns in ionic salinity and suspended solids in a reservoir influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia* **436**: 179-189.
- Berner, E.K. and R.A. Berner, 1987, The global water cycle, Prentice -Hall, Englewood Cliffs, New York, 397p.
- Cameron, E.M. 1996. Hydrogeochemistry of Fraser River, British Columbia: seasonal variation in major and minor components. *J. of Hydrology* **182**: 209-225.
- Collins, R. and A. Jenkins. 1996. The impact of agricultural land use on stream chemistry in the middle Hills of the Himalayas. *J. of hydrology* **185**: 71-86.
- Grim, N.B. and S.G. 1986. Nitrogen limitation in a Sonoran desert stream, *J.N. Am. Benthol. Soc. Fisher* **5**: 2-15.
- Kalff, J. 2002. Limnology: Inland Water Ecosystems. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA. 592p.
- Moon, Y.H., J.M. Park., J.G. Son and K.H. Kim. 2001. Change in water quality on upper stream of Mankyeong river, *Kor. J. Environ. Agric.* **20(3)**: 252-257.
- Ostry, R.C. 1982. Relationship of water quality and pollutant to land uses in adjoining watershed. *Water Res. Bull.* **18**: 99-104.
- Parks, S.J. and L.A. Baker. 1997. Sources and transport of organic carbon in an Arizona River-Reservoir System. *Water Research* **31**: 1751-1759.
- Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 1990. Reservoir Limnology-Ecological Perspectives. A Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. 246p.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd Edition. Academic Press, California, SA. 1006p.
- Winston, W.E. and R.E. Criss. 2002. Geochemical variations during flash flooding, Meramec River basin, May 2000. *Journal Hydrology* **265**: 149-163.

(Manuscript received 29 November 2005,  
Revision accepted 20 February 2006)