

## 팔당호의 영양염류 장기변동 추세분석

장승현<sup>†</sup> · 정인영 · 김성미 · 양희정 · 김성수 · 공동수

국립환경과학원 한강물환경연구소

### Long-Term Trend Analysis of Nutrient Concentrations at Lake Paldang

Seung-Hyun Chang<sup>†</sup> · In-Young Chung · Sung-Mi Kim · Hee-Jung Yang · Sung-Soo Kim · Dong-Soo Kong

Han-River Environment Research center, NIER

(Received 23 June 2008, Revised 16 January 2009, Accepted 10 February 2009)

#### Abstract

The purpose of this study was to understand of water quality characteristics of lake Paldang, especially at a certain representative site, right in front of Paldang dam (P<sub>2</sub> site) and to propose the directions of water quality management of lake Paldang. Water characteristics at P<sub>2</sub> site was investigated by principle components analysis and the Pearson correlation coefficient analysis. Also, seasonality was identified by the Kruskal-Wallis test and long term trend of nutrients and chlorophyll-*a* was analyzed by seasonal decomposition method at lake Paldang statistically. The primary factor affecting on water quality at P<sub>2</sub> site was identified as nutrients, while physical parameters, such as rainfall and inflow rate were also important factors. At the result of linear regression analysis particulate organic phosphorus (POP) vs total phosphorus (TP) showed very high correlation of 0.78. TP loading was increased annually from 1995 to 2006. Chlorophyll-*a* and nutrients show seasonality at P<sub>2</sub> site. Long term trend of Chlorophyll-*a* was increased by increase of TP at lake Paldang.

**keywords** : Chlorophyll-*a*, Lake Paldang, Phosphorus, Seasonal decomposition, Trend

## 1. 서론

팔당호는 수도권의 주요한 상수원으로 90년대에 적극적인 수질개선 대책이 수립되었고 현재는 개선 대책의 효과를 나타내고 있다. 그러므로 팔당호에 대한 수질평가는 매우 중요한데 장기적인 수질변동 해석을 통해 보다 효과적으로 평가될 수 있다. 시계열로 변화하는 환경자료는 일반적으로 환경 프로젝트를 디자인하거나 계획하는데 사용되며 수질을 평가하기 위한 여러 가지 통계적인 도구가 있다 (Bouza-Deano et al., 2008; Johnston and Shmagin, 2008). 그런데 시계열 자료를 추세 분석하는 방법에 대해서는 아직도 많은 논란의 여지가 있다. 시계열 자료의 추세분석방법으로는 크게 모수적인 방법(parametric method)과 비모수적인 방법(non-parametric method)이 있는데 모수적인 방법은 비모수적인 방법보다 파워풀(powerful)한 방법이나 데이터의 독립성과 정규성 및 선형성이 검증되어야 한다 (Bouza-Deano et al., 2008). 반면, 자료가 계절성을 가지거나 변수들 간에 서로 연관되어있고, 정규분포를 나타내지 않으면 비모수적인 방법이 사용되는데 수질자료는 계절적인 영향을 받아 수질변이를 유발함으로써 장기간의 수질경향을 쉽게 볼 수 없게 하고 경향분석의 효율을 감소시키므로 계절성이 있는 자료에 대하여는 계절성을 배제하는(박

선영, 1999) 계절 맨-켄달 검정법(seasonal Mann-Kendall test)을 사용하여 왔다. 그런데 이 방법은 대상 기간에 경향성이 변할 경우 이를 제대로 반영할 수 없다는 단점을 가지고 있다(김주화와 박석순, 2004). 비모수적인 다른 통계 방법으로 고전적인 시계열 분해법(time series decomposition method)이 있는데 이 방법은 자료의 계절성을 분해하고, 회귀모델을 적합 시켜 경향성을 종합적으로 판단할 수 있다.

한편, 팔당호는 자연호수와 달리 호 내 지점 간에 완전혼합이 이루어지지 않고 댐 앞 지점에 이르러 완전혼합이 이루어진다. 또한 상수원으로서 중요한 팔당호는 취수구의 위치가 모두 댐 앞 지점에 위치하고 있어 사실상 댐 앞 수질이 팔당호의 가장 중요한 대표 수질로서의 역할을 하고 있다. 유호식(2002)은 무수한 수질항목들 중에 핵심적인 것이 무엇인지 알아보기 위해 서울지역 한강수질항목을 대상으로 상관분석 및 주요인분석을 하였는데 본 연구에서도 팔당댐 앞 지점에서의 수질특성을 통계학적으로 분석하여 대표적인 수질특성을 요약하였다. 또한 댐 앞 지점에 영향을 미치는 호 내 지점 및 유입지점에 대하여 chlorophyll-*a* 농도와 조류 성장 및 증식의 주요한 원인 인자로 작용하고 있는 영양염류 농도의 장기변동추세를 분석하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 연구대상 지점 및 자료

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
chang0051@korea.kr

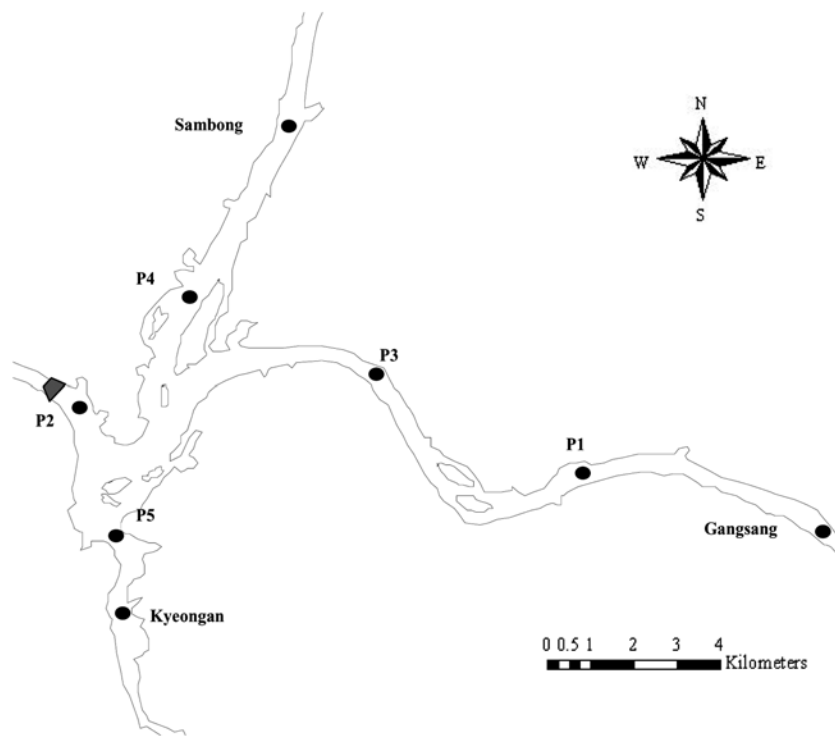


Fig. 1. Study sites.

Fig. 1에 연구대상 지점을 나타내었다. 본 연구에서는 한강물환경연구소에서 매주 및 매월 시료 채취하여 분석한 수질측정망의 1995년부터 2006년까지의 월평균 수질자료를 이용하였다. 팔당호의 대표적인 수질 특성을 조사하기 위하여 팔당댐 앞 지점의 수질자료를 이용하였고, 팔당댐앞(P<sub>2</sub>) 지점의 수질에 영향을 주는 요인을 알아보기 위하여 북한강으로부터의 유입지점인 삼봉지점, 남한강으로부터의 유입지점인 강상지점 및 경안천으로부터의 유입지점인 경안지점의 자료와 호소 내 지점으로 아신대 앞(P<sub>1</sub>), 월계사 앞(P<sub>3</sub>), 연구소 앞(P<sub>4</sub>), 팔당상수원사무소 앞(P<sub>5</sub>) 지점의 수질자료를 이용하였다.

## 2.2. 통계 분석

팔당댐 앞 수질의 특징을 요약·정리하기 위하여 주성분분석(principal component analysis) 및 상관분석을 하였다. 주성분분석은 다변량 해석의 여러 가지 방법 중에서도 기본적인 방법으로서 상호간에 상관성을 갖는 여러 종류의 특성 값들의 정보를 큰 손실 없이 서로 무상관한 소수개의 종합 특성값(주성분)으로 요약해 내는 과정이다. 또한 각 요인의 적재값이 높은 변수의 수를 최소화하는 직교 회전 방법인 varimax 방법을 사용하면 요인 해석을 단순화할 수 있다. 분석 자료로는 WT(water temperature), pH, DO(dissolved oxygen), BOD<sub>5</sub>, COD<sub>Mn</sub>, SS(suspended solid), T.coli.(total fecal coliforms), TN(total nitrogen), DTN(dissolved total nitrogen), TP(total phosphorous), DTP(dissolved total phosphorous), chlorophyll-*a*, EC(electrical conductivity), NO<sub>3</sub>-N(nitrate nitrogen), NH<sub>3</sub>-N(ammonia nitrogen), E.coli.(fecal coliforms), PO<sub>4</sub>-P(ortho phosphorous)

를 이용하였고, 그 외의 항목에 대하여는 계산 값을 이용하였다. DON(dissolved organic nitrogen)은 DTN에서 DIN(dissolved inorganic nitrogen)을 빼서 계산하였는데 DIN은 NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N(nitrite nitrogen), NH<sub>3</sub>-N의 농도를 합한 것이다. 이때 NO<sub>2</sub>-N은 자연수 중에서 산소 존재 하에 NO<sub>3</sub>-N으로 산화되므로 농도를 0으로 가정하여 계산하였다. PON(particulate organic nitrogen)은 TN에서 DTN을 빼면 PN(particulate nitrogen)이 나오는데 자연수 중에 거의 PON으로 존재하므로 PN을 PON으로 계산하였다. POP(particulate organic phosphorus)는 TP에서 DTP를 빼면 PP(particulate phosphorus)인데 자연수중 PP는 대부분 POP의 상태로 존재하므로 PP를 POP로 계산하였다. DOP(dissolved organic phosphorus)는 DTP에서 DIP(dissolved inorganic phosphorus)를 빼면 되는데 자연수의 DIP는 PO<sub>4</sub>-P의 상태로 존재하므로 DTP에서 PO<sub>4</sub>-P를 빼서 DOP를 구하였다. 또한 수리수문학적 특징 및 영향을 조사하기 위하여 국가수자원관리종합정보시스템(2008)의 팔당댐수문자료를 이용하였는데 이 자료는 2008년에 검보정된 것이다(Fig. 2).

한편, 팔당댐 앞 지점에서 TN, TP 및 chlorophyll-*a* 자료에 대한 계절성을 확인하기 위하여 Kruskal-Wallis 검정법을 이용하였고, box graph로 나타내었다. 또한 댐 앞 지점을 포함하여 수질에 영향을 미칠 것으로 생각되어지는 호내 지점과 북한강 남한강 경안천 유입지점에 대하여도 계절성을 확인하여 시계열 분석을 하였다. 시계열 자료의 변동에 영향을 주는 요인으로는 추세요인, 계절요인, 순환요인 등이 있다. 시계열자료에서 앞의 세가지 요인으로 설명될 수 없는 부분을 우연요인 혹은 불규칙요인이라고 부르며 이것을 흔히 무작위오차(random error)라고 한다. 시계

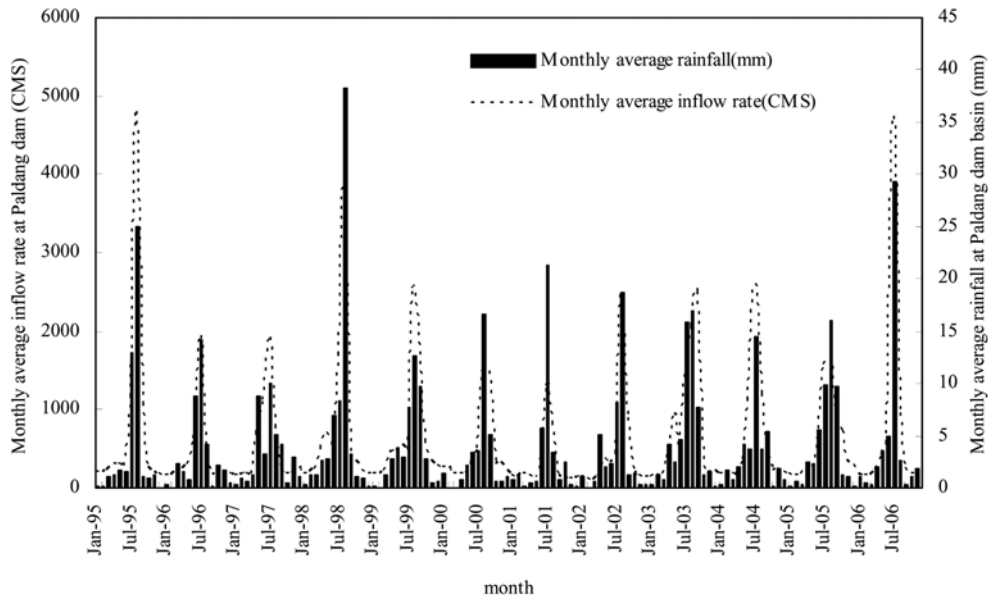


Fig. 2. Monthly average variations of hydraulic and hydrological characteristics at lake Paldang.

열 자료의 변동에 영향을 주는 4가지 요소가 어떻게 결합하는가에 관한 모형으로는 가법모형과 승법모형이 있는데, 본 연구에서는 승법모형을 사용하였다. 승법모형 식 (1)은 t시점에서의 실제농도를 각 변동요인들의 곱으로 취급한다(노형진, 2005).

$$X_t = TC_t S_t I_t, \quad t = 1, \dots, n \quad \text{(Multiplicative(승법) Model)} \quad (1)$$

TC<sub>t</sub> : trend cycle component

S<sub>t</sub> : seasonal component

I<sub>t</sub> : irregular or random component

계절성분(Seasonal factors)은 식 (2)와 같고, 추세 순환요인(Smoothed trend-cycle series)에 대한 알고리즘은 식 (3)과 같다. 추세순환요인은 계절조정 계열 SAS(Seasonally adjusted series)에 대한 3×3의 이동평균을 적용하여 얻어진다. 즉 이것은 계절효과를 제거한 후 남은 계열이다(허병희, 2007).

$$F_t = \text{medial average}(SI_{t+p}, SI_{t+2p}, \dots, SI_{t+qp}),$$

$$1 \leq t \leq L - [L/p]P$$

$$= \text{medial average}(SI_{t+p}, SI_{t+2p}, \dots, SI_{t+(q-1)p}),$$

$$L - [L/p]P < t \leq [p/2]$$

$$= \text{medial average}(SI_t, SI_{t+p}, \dots, SI_{t+(q-1)p}),$$

$$[p/2] < t \leq P$$

L=n-[p/2]+1, q=[L/p] if p is even and all points are weighted equally

L=n-[p/2], q=[(n-p/2)/p], otherwise

$$SAF_t = \sum_{i=1}^p F_t \frac{100p}{i}, \quad t=1, \dots, p \quad (2)$$

$$STC_t = \frac{1}{9} [(SAS)_{t-2} + 2(SAS)_{t-1} + 3(SAS)_t + 2(SAS)_{t+1} + (SAS)_{t+2}] \quad (3)$$

t = 2, ..., n-2

SAS<sub>t</sub> = (X<sub>t</sub>/SAF<sub>m</sub>)100 (Multiplicative Model)

m = t - [t/p]p, SAF : Seasonal Factors

불규칙요인 I<sub>t</sub>는 아래 식 (4)와 같다.

$$I_t = (SAS)_t / (STC)_t \quad (4)$$

t=1, ..., n

본 연구에서는 1995년에서 2006년까지의 TN, TP, chlorophyll-a에 대한 월평균 자료를 이용하여 계절분해 함으로써 원 자료를 계절요인(SAS), 불규칙요인(I<sub>t</sub>), 추세순환요인(STC)으로 나누었고, 추세순환요인에서 추세요인만을 회귀분석으로 곡선 추정하여 순환요인을 제거하고 추세성분만을 추출하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. P<sub>2</sub>지점에서의 주성분 분석 및 상관분석결과

팔당호는 하천형 호소이면서 유역면적이 넓어 외부오염 물질에 의한 영향이 큰 호소이다. 또한 물의 특징이 호소형 호소와는 달리 계절별로 영향을 많이 받고 있어 팔당호에서의 수질특성을 정의하기가 어렵다. 그러므로 팔당호내의 대표 수질을 나타내고 있는 댐 앞(P<sub>2</sub>) 지점에서의 수질특성을 알아보기 위하여 주성분 분석을 하였고 이를 Table 1에 나타내었다. 주성분 분석결과를 토대로 살펴보면 6개

**Table 1.** Rotated component pattern<sup>a</sup> at P<sub>2</sub> site

Item	Component					
	1	2	3	4	5	6
TP	.846					
SS	.804					
TOP	.748					
POP	.723					
PO <sub>4</sub> -P	.714					
SC	-.695					
E.Coli.		.771				
Rainfall		.749				
T.Coli.		.732				
Inflow		.715				
TON			.969			
PON			.752			
DON			.749			
DO				-.902		
WT				.843		
DOP						
NH <sub>3</sub> -N					.826	
EC					.671	
pH					.653	
COD						.888
Chl- <i>a</i>						.673
BOD						.616

Extraction method : Principal component analysis  
 Rotation method : Varimax with kaiser normalization  
 a. Rotation converged in 8 iterations.

의 요인으로 나누어지는데 TP와 같은 인계열 영양염류, 강수량 및 SS, 유량과 같은 물리적인 요인, 질소계열 영양염류, WT, DO와 같은 계절적인 요인, pH와 같은 생물화학적 요인, COD<sub>Mn</sub>, BOD<sub>5</sub>, chlorophyll-*a*와 같은 유기오염물질 요인 등으로 나타났다. 첫 번째 주성분 요인은 인계열 영양염류로 나타났고, 두 번째로는 강우량과 유입량과 같은 유량관련 요인이 주요하게 나타났다. 그리고 세 번째로는 질소성분이 주요한 요인으로 나타나 영양염류와 물리적인 요인이 팔당호에서의 주요한 수질 특성으로 나타났다.

한편, 1995년부터 2006년까지 팔당호의 유입량과 강수량 자료를 포함하여 팔당댐 앞 지점(P<sub>2</sub>)에서 여러 가지 수질 항목간의 Pearson 상관관계를 살펴보았다(Table 2). 그 결과 유입유량과 강우량은 0.884(p<0.01)의 높은 상관관계를 나타내었다. 또한 댐 앞(P<sub>2</sub>) 지점에서 첫 번째 주성분으로 나타난 TP와 유입유량은 상관계수가 0.537(p<0.01), TP와 SS는 0.662(p<0.01)로 높은 상관관계를 나타내었으며 TP와 POP는 0.881(p<0.01)로 매우 높은 상관관계를 나타내었고, SS와 POP는 0.711(p<0.01)의 높은 상관관계를 나타내었다. 한편, 강우량과 TP는 상관계수가 0.439(p<0.01)로 서로 상관관계가 있음을 나타내었고, 강우량과 SS는 0.366(p<0.01)으로 조금 낮은 상관관계를 나타내었다.

또한 국가수자원관리종합정보시스템(2008) 팔당댐수문자료를 이용하여 팔당댐유역 월평균 강우량과 유입유량을 비

**Table 2.** Pearson correlation coefficient among water quality parameters at P<sub>2</sub> site

		Inflow	Rainfall	TN	TP	Chl- <i>a</i>	SS	DON	PON	DOP	POP
Inflow	Pearson Correlation										
	Sig. (2-Tailed)										
	N										
Rainfall	Pearson Correlation	.884**									
	Sig. (2-Tailed)	.000									
	N	149									
TN	Pearson Correlation	.146	.154								
	Sig. (2-Tailed)	.076	.061								
	N	149	149								
TP	Pearson Correlation	.537**	.439**	.228**							
	Sig. (2-Tailed)	.000	.000	.005							
	N	149	149	149							
Chl- <i>a</i>	Pearson Correlation	-.096	.018	.128	.121						
	Sig. (2-Tailed)	.246	.829	.121	.143						
	N	149	149	149	149						
SS	Pearson Correlation	.481**	.366**	.134	.662**	-.049					
	Sig. (2-Tailed)	.000	.000	.103	.000	.549					
	N	149	149	149	149	149					
DON	Pearson Correlation	.161	.159	.231	.157	.026	.203				
	Sig. (2-Tailed)	.235	.241	.087	.248	.850	.133				
	N	56	26	56	56	56	56				
PON	Pearson Correlation	.032	-.049	.335*	.291*	-.164	.250	.212			
	Sig. (2-Tailed)	.813	.716	.011	.028	.222	.060	.120			
	N	57	57	57	57	57	57	55			
DOP	Pearson Correlation	.450**	.436**	.326*	.612**	-.258	.321*	-.181	-.117		
	Sig. (2-Tailed)	.000	.001	.013	.000	.051	.014	.181	.386		
	N	58	58	58	58	58	58	56	57		
POP	Pearson Correlation	.595**	.381**	.384**	.881**	-.105	.711**	.336*	.423**	.255	
	Sig. (2-Tailed)	.000	.003	.003	.000	.435	.000	.011	.001	.053	
	N	58	58	58	58	58	58	56	57	58	

\*\* .p<0.01  
 \* .p<0.05

교환 결과 시기별로 유사한 경향을 나타내었다(Fig. 2). 팔당호는 상류 댐의 영향을 많이 받는 하천형 호소인데 상류 댐 으로부터의 유입량은 주로 강우에 의해 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 한편, 수질평가에 있어 두개 이상 항목들 간의 관계를 규명지음으로서 이들 사이의 거동을 조사하는 기법이 자주 쓰이는데, 항목들 간의 거동을 조사하는 방법으로 회귀분석과 상관분석이 이용되어 왔고, 총인과 부유물질의 부하비율(kg/ton)은 연간 단위면적 당 부유물질의 부하량과 지수적인 관계에 있으며 탁도와 총인과는 양의 선형적인 관계가 있음이 밝혀졌다(전지홍 등, 2001). 따라서 본 연구에서도 P<sub>2</sub>지점에서 비교적 상관관계가 높았던 POP와 TP 그리고 POP와 SS의 관계를 선형회귀분석하였다(Fig. 3). 그 결과 TP와 POP는 결정계수 R<sup>2</sup>가 0.78로 높게 나타났고, SS와 POP는 결정계수 R<sup>2</sup>가 0.51로 나타났다. 이러한 결과는 종속변수 TP에 대한 독립변수 POP의 설명력이 78%이고 종속변수 SS에 대한 독립변수 POP의 설명력이 51%임을 나타내고 있다.

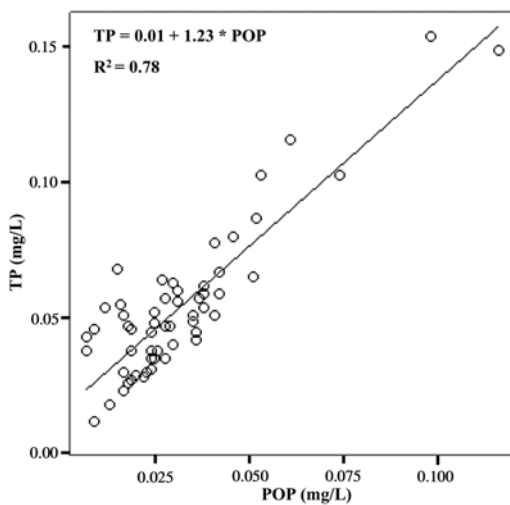
3.2. 항목별 계절별 변화

Table 3에 지점별 chlorophyll-*a*와 TN, TP 항목에 대한 계절성을 확인한 결과를 나타내었다. P<sub>4</sub>지점에서는 chlorophyll-*a*와 TN이 계절성을 나타내지 않았고, 삼봉, 강상 지점에서 TN이 계절성을 띄지 않았는데 강상지점은 이상 값을 7개 제거하면 통계량이 23.507(p<0.05)로 계절성을 나타내었다. 영양물질 중에서 가장 작은 변동 폭을 갖는 수질 항목인 총질소(나은혜와 박석순, 2003)는 조류의 영향을 많이 받는 남한강유입 후 호 내 지점(P<sub>1</sub>, P<sub>3</sub>)과 P<sub>2</sub> 지점에 비하여 조류 발생이 많지 않은 북한강유입지점인 삼봉과 북한강유입 후 호 내 P<sub>4</sub>지점에서 계절별 변동이 적어 계절성이 나타나지 않았다. 이러한 결과로부터 조류발생이 적은 북한강 유입 수계에서 변동 폭이 적은 TN항목이 계절성을

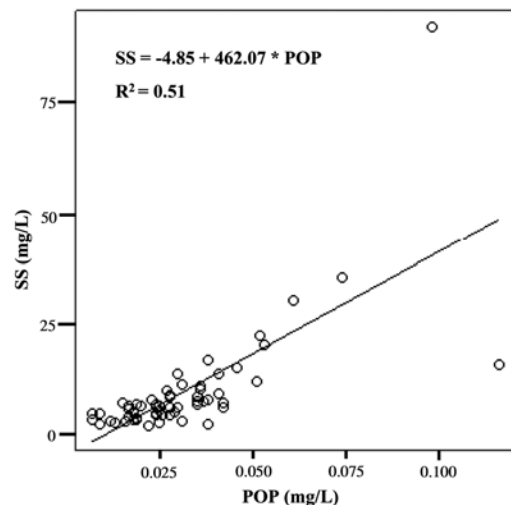
Table 3. Seasonality of water quality at lake Paldang

Site	Item	Seasonality test statistics	Seasonality
		(p-value) Kruskal-Wallis test statistics	
P <sub>1</sub>	chlorophyll- <i>a</i>	55.122(0.000)	Yes
	TN	25.888(0.007)	Yes
	TP	39.015(0.000)	Yes
P <sub>2</sub>	chlorophyll- <i>a</i>	33.808(0.000)	Yes
	TN	20.361(0.041)	Yes
	TP	58.300(0.000)	Yes
P <sub>3</sub>	chlorophyll- <i>a</i>	46.710(0.000)	Yes
	TN	26.673(0.005)	Yes
	TP	37.821(0.000)	Yes
P <sub>4</sub>	chlorophyll- <i>a</i>	16.803(0.114)	NO
	TN	7.637(0.745)	NO
	TP	33.692(0.000)	Yes
P <sub>5</sub>	chlorophyll- <i>a</i>	21.442(0.029)	Yes
	TN	32.310(0.001)	Yes
	TP	35.202(0.000)	Yes
Sambong	chlorophyll- <i>a</i>	27.999(0.003)	Yes
	TN	12.960(0.296)	NO
	TP	26.533(0.005)	Yes
Gangsang	chlorophyll- <i>a</i>	21.208(0.031)	Yes
	TN	11.963(0.366)	NO
	TP	38.497(0.000)	Yes
Kyeongan	chlorophyll- <i>a</i>	12.939(0.297)	NO
	TN	26.903(0.005)	Yes
	TP	23.352(0.016)	Yes

나타내지 않았다는 것을 알 수 있다. 한편, 경안지점에서 chlorophyll-*a*가 계절성을 나타내지 않은 것을 제외하고 다른 모든 지점에서 세 항목에 대하여 계절성을 나타내고 있었다. 이러한 결과는 팔당호의 수질이 계절성을 띄고 있다



(a) Particulate organic phosphorous (POP) vs total phosphorous (TP)



(b) Particulate organic phosphorous (POP) vs suspended solid (SS)

Fig. 3. Relationship between particulate organic phosphorous vs total phosphorous and particulate organic phosphorous vs suspended solid concentrations at P<sub>2</sub> site from 1995 to 2006.

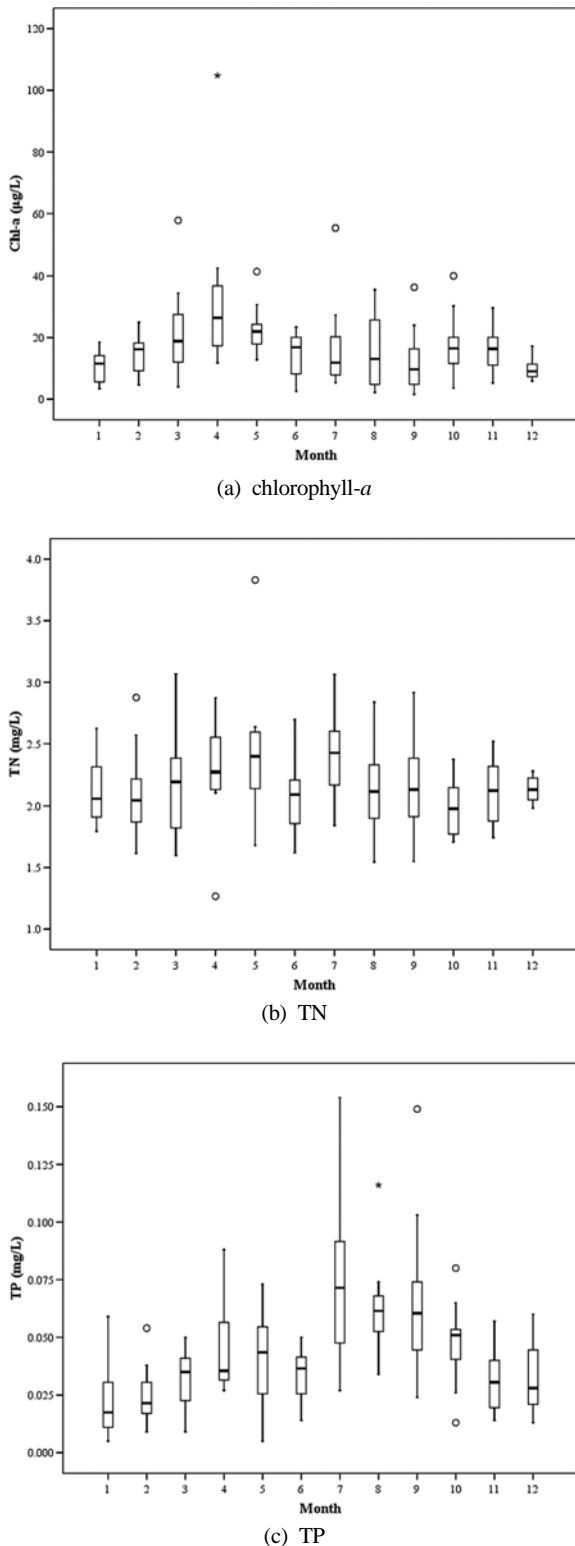


Fig. 4. Seasonal variation of water quality at P<sub>2</sub> site (1995~2006).

는 것을 시사한다. Fig. 4에 P<sub>2</sub>지점에서의 chlorophyll-a와 TN, TP 농도에 대한 1995년부터 2006년까지의 월별 변화를 box graph로 나타내었다. chlorophyll-a 농도는 겨울에서 봄철이 되면서 증가하여 4월에 가장 높은 중위수를 나타내었고 강우기가 시작되는 6월부터 9월까지 낮아져서 9월에

가장 낮은 중위수를 나타내었다. TP농도는 비강우기에는 낮은 중위수를 강우기인 7월과 8월, 9월에는 높은 중위수를 나타내었다. TN은 TP에 비하여 변동폭이 크지 않았으며 7월에 가장 높은 중위수를 나타내었다. 이러한 결과들로부터 P<sub>2</sub>지점은 계절성을 띄면서 수질이 변동한다는 것을 알 수 있고, 주요한 수질특성으로 나타난 총인은 주로 강우량과 유량이 증가하는 계절에 증가함을 알 수 있다.

### 3.3. 영양염류 및 클로로필a의 장기변동추세

#### 3.3.1. 지점별 chlorophyll-a 장기 추세

팔당호내 지점으로 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>, P<sub>5</sub> 지점과 팔당호 유입 지점으로 삼봉, 강상, 경안지점(K-K)에서 chlorophyll-a의 장기변동 추세를 분석하였다. 1995년부터 2006년까지의 월별 자료를 이용하여 계절분해를 하면 계절성분과 불규칙성분, 그리고 추세순환성분(STC)이 나오는데 추세순환성분에서 다시 추세(Trend)성분을 추출하여 각 지점별로 원자료 그래프와 추세순환 성분(STC) 및 추세곡선(Trend) 그래프를 나타내었다(Fig. 5).

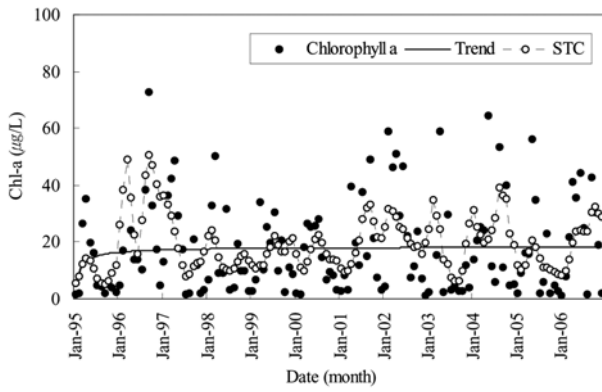
추세순환곡선으로부터 추세성분을 추출하기 위하여 회귀모형을 적합시킨 결과 P<sub>4</sub>지점과 경안천 지점은 p-value가 유의하지 않은 것으로 나타나 추세곡선에 대한 설명을 하기 어려웠다. 반면 다른 지점들은 p-value가 모두 유의하게 나타나 추세곡선이 유의하게 분석되었다(Table 4). 대표지점인 P<sub>2</sub>지점의 chlorophyll-a농도는 증가하는 경향을 나타내었으며 유입지점인 삼봉지점도 증가추세를, 남한강유입지점인 강상도 2006년에 증가하는 경향을 나타내었으며 같은 남한강 지점인 P<sub>1</sub>, P<sub>3</sub> 지점도 증가하는 경향을 나타내었다. 반면 P<sub>5</sub>지점은 2003~2004년까지 증가했다가 약간 감소하는 추세를 나타내었으나 1995년보다는 증가한 경향을 나타내었다.

#### 3.3.2. 지점별 TN의 장기 추세

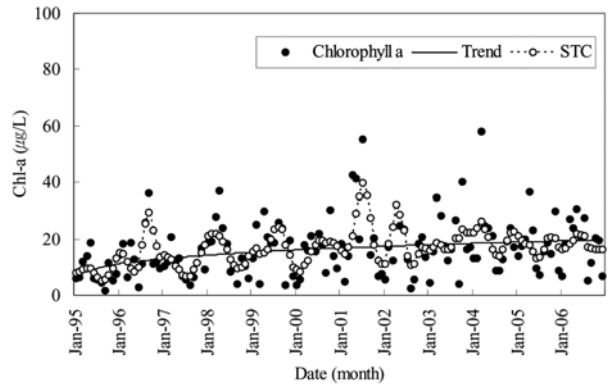
각 지점에서의 TN농도에 대하여 원자료 그래프와 추세순환 성분 및 추세곡선 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. TN의 경우 추세곡선을 구하기 위한 회귀분석 결과 모든 지점에서 p-value값이 유의하게 나타났다(Table 4). 팔당호로 유입되는 유기물질 및 영양물질 중에서 가장 작은 변동폭을 갖는 수질 항목은 총질소로 나타났고, 이러한 결과는 나혜와 박석순(2003)의 결과와도 일치하였다. TN도 소폭 증가 추세에 있기는 하지만 chlorophyll-a의 장기추세는 TP의 장기 추세와 잘 일치하고 있었고, 팔당호에서의 TN/TP비는 10이상으로 chlorophyll-a의 증가가 질소에 의해 제한되고 있지 않다는 것을 나타내었다(김범철 등, 2007; Ruley and Rusch, 2002).

#### 3.3.3. 지점별 TP의 장기 추세

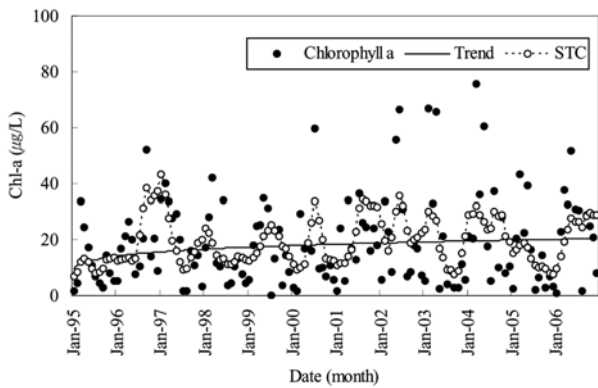
각 지점에서의 TP농도의 원자료 그래프와 추세순환 성분 및 추세곡선 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. TP의 경우 추세곡선을 구하기 위한 회귀분석 결과 강상지점을 제외하고 모든 지점에서 p-value값이 유의하게 나타났다(Table 4).



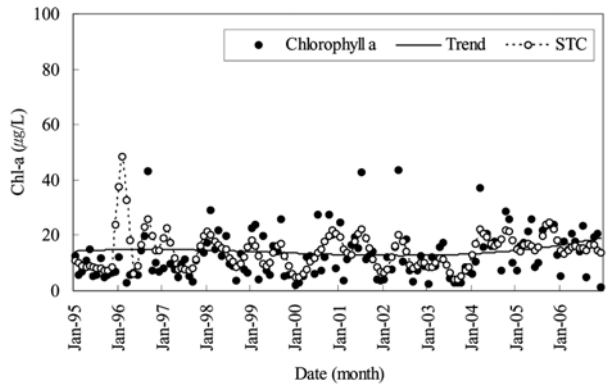
(a) P<sub>1</sub> R<sup>2</sup>=0.278 (p=0.001)



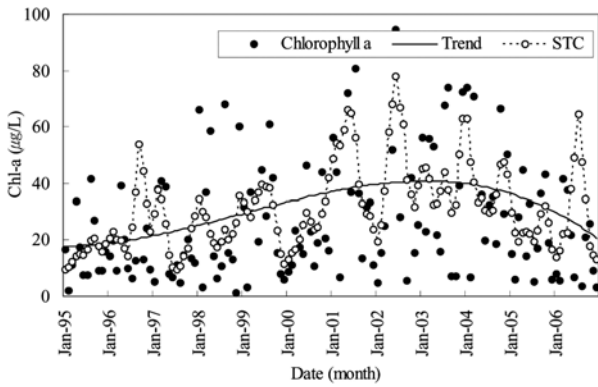
(b) P<sub>2</sub> R<sup>2</sup>=0.335 (p=0.000)



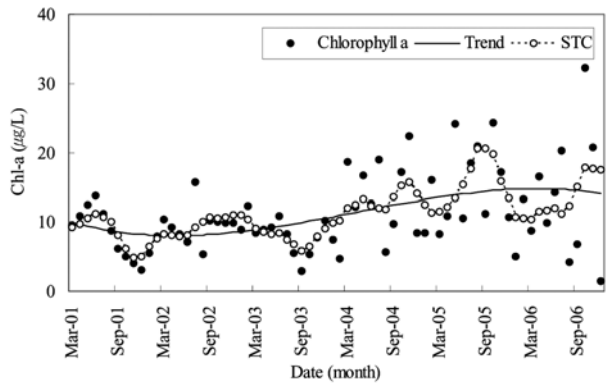
(c) P<sub>3</sub> R<sup>2</sup>=0.104 (p=0.104)



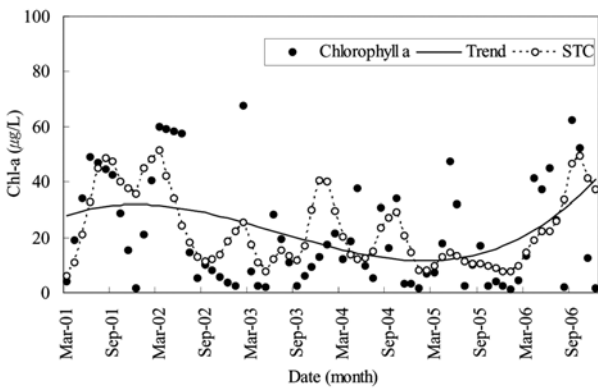
(d) P<sub>4</sub> R<sup>2</sup>=0.046 (p=0.083)



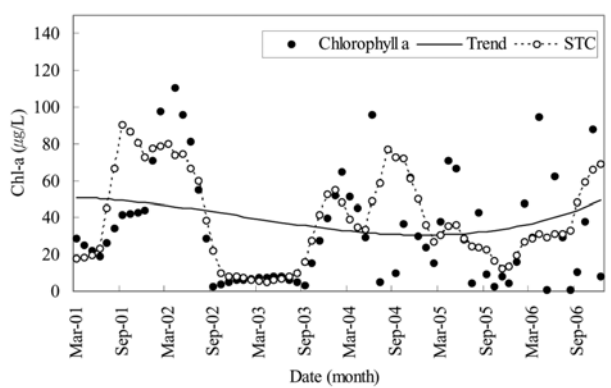
(e) P<sub>5</sub> R<sup>2</sup>=0.286 (p=0.000)



(f) Sambong R<sup>2</sup>=0.516 (p=0.000)

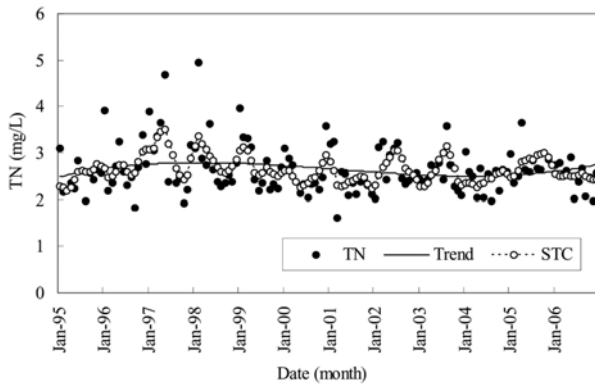


(g) Gangsang R<sup>2</sup>=0.363 (p=0.000)

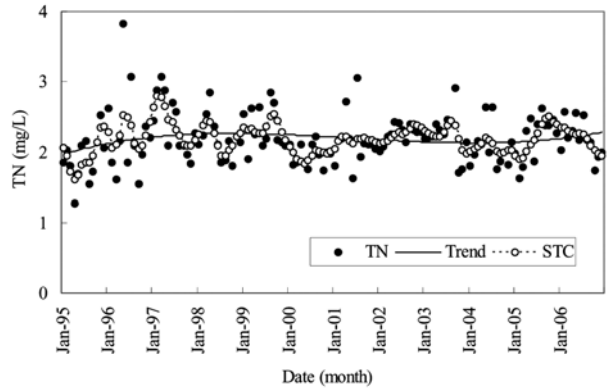


(h) Kyeongan R<sup>2</sup>=0.076 (p=0.152)

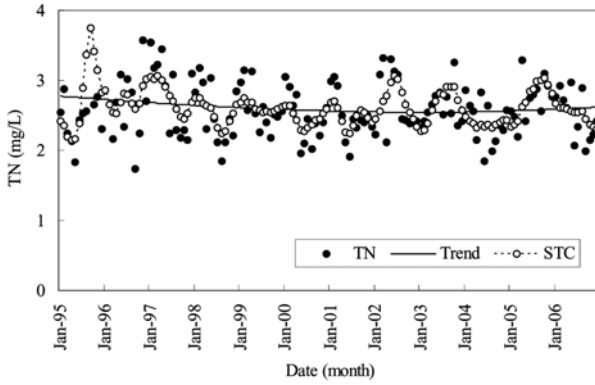
Fig. 5. Long term trend of chlorophyll-a at study sites.



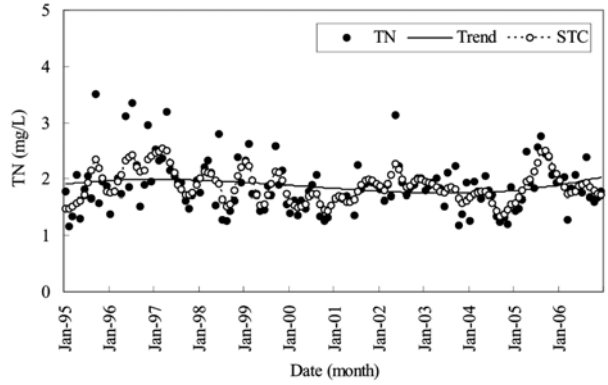
(a) P<sub>1</sub> R<sup>2</sup>=0.137 (p=0.000)



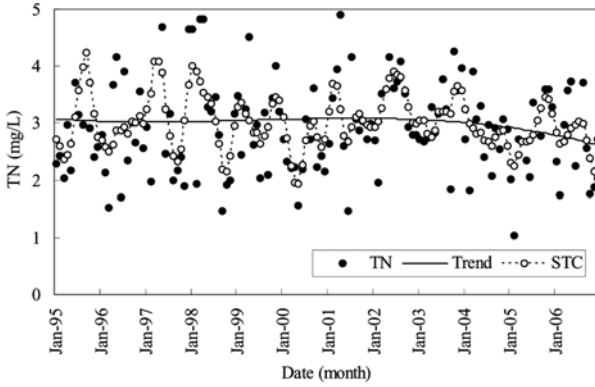
(b) P<sub>2</sub> R<sup>2</sup>=0.091 (p=0.004)



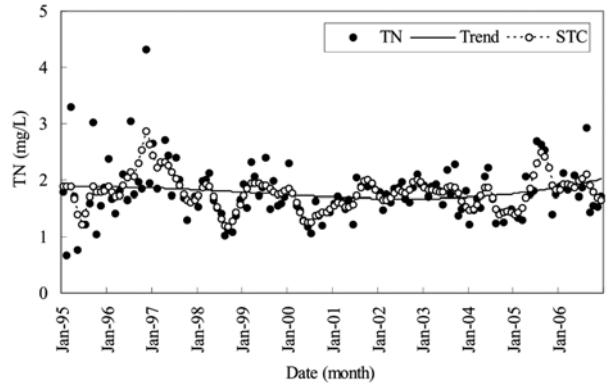
(c) P<sub>3</sub> R<sup>2</sup>=0.062 (p=0.029)



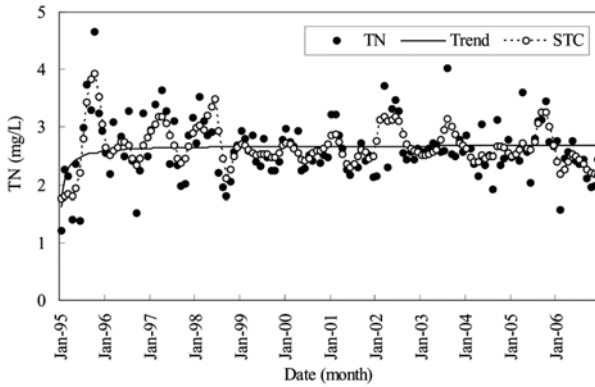
(d) P<sub>4</sub> R<sup>2</sup>=0.103 (p=0.002)



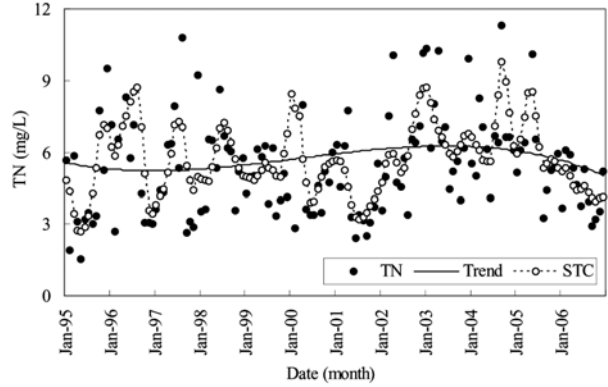
(e) P<sub>5</sub> R<sup>2</sup>=0.055 (p=0.048)



(f) Sambong R<sup>2</sup>=0.090 (p=0.004)



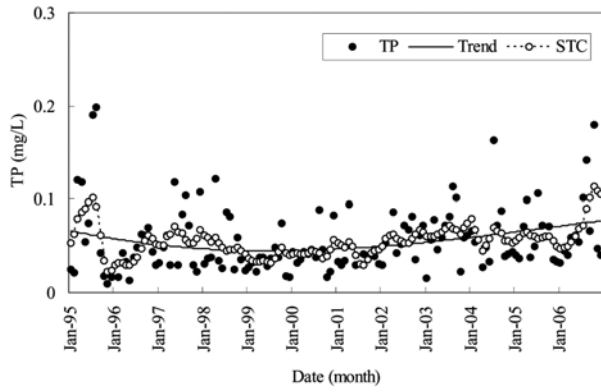
(g) Gangsang R<sup>2</sup>=0.140 (p=0.000)



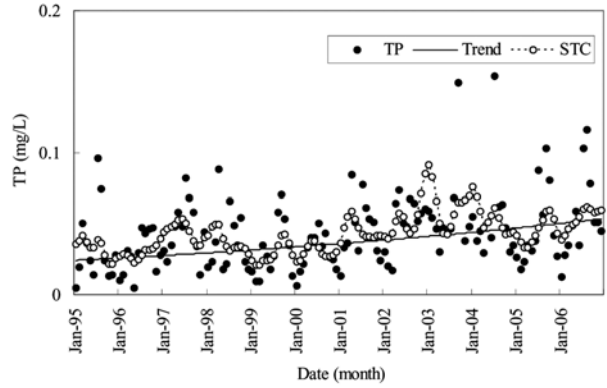
(h) Kyeongan R<sup>2</sup>=0.067 (p=0.022)

Fig. 6. Long term trend of TN at study sites.

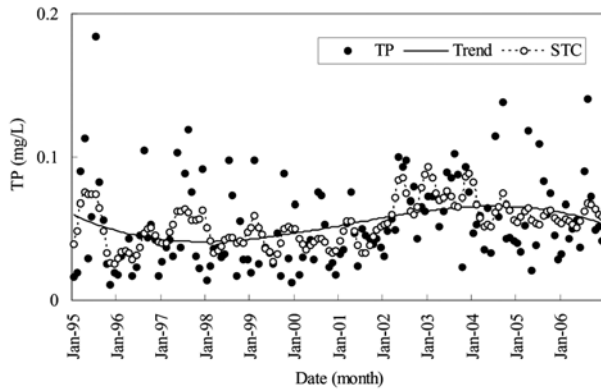




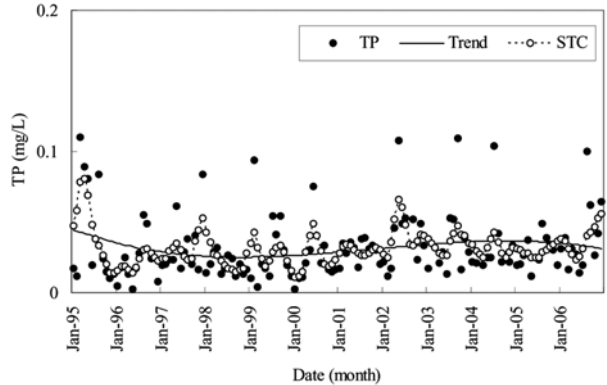
(a) P<sub>1</sub> R<sup>2</sup>=0.304 (p=0.000)



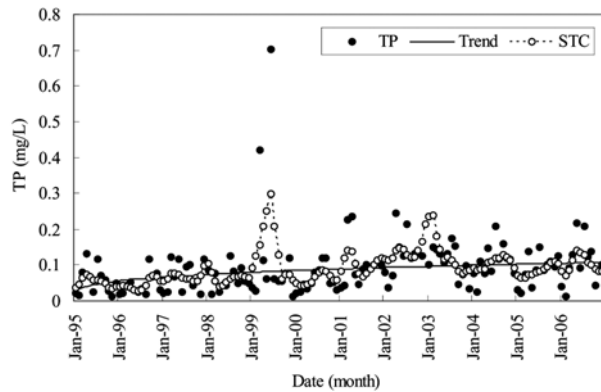
(b) P<sub>2</sub> R<sup>2</sup>=0.354 (p=0.000)



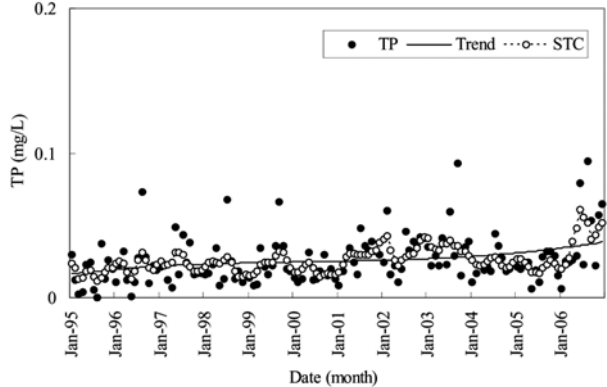
(c) P<sub>3</sub> R<sup>2</sup>=0.344 (p=0.000)



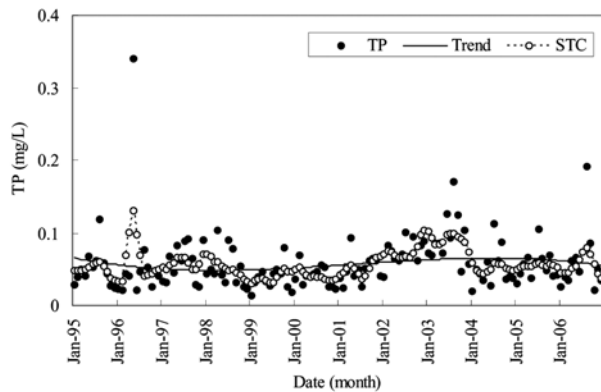
(d) P<sub>4</sub> R<sup>2</sup>=0.147 (p=0.000)



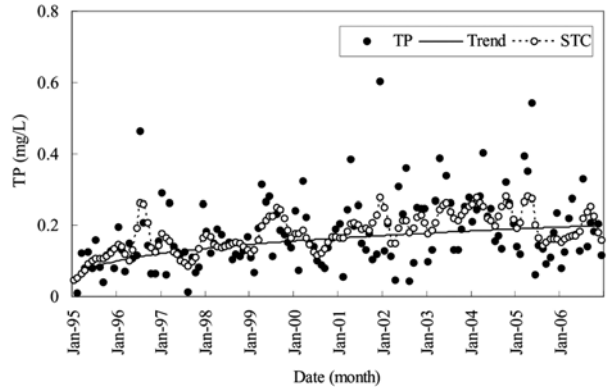
(e) P<sub>5</sub> R<sup>2</sup>=0.320 (p=0.000)



(f) Sambong R<sup>2</sup>=0.291 (p=0.000)



(g) Gangsang R<sup>2</sup>=0.026 (p=0.302)



(h) Kyeongang R<sup>2</sup>=0.191 (p=0.000)

Fig. 7. Long term trend of TP at study sites.

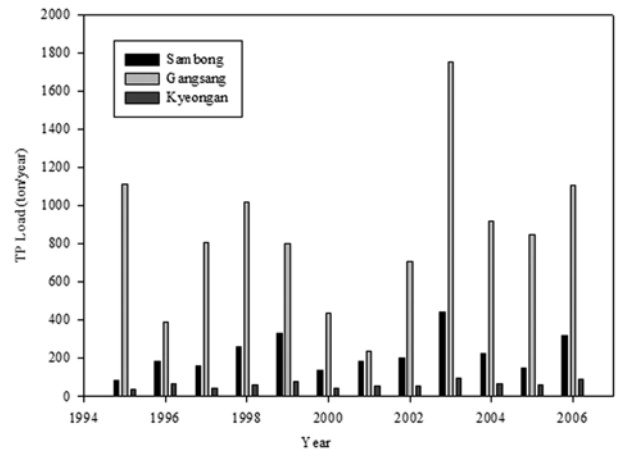
**Table 4.** Fitted formula of water quality trend at lake Paldang

Site	Item	Formula	R <sup>2</sup>	P
P <sub>1</sub> (a)	chlorophyll- <i>a</i>	$\ln(y)=2.905+(-1.406/x)$	0.278	0.001
	TN	$y=2.468+0.019x+0.000x^2+(1.54\times 10^{-6})x^3$	0.137	0.000
	TP	$y=0.068+(-0.001)x+1.02\times 10^{-5}x^2+(-2.4\times 10^{-8})x^3$	0.304	0.000
P <sub>2</sub> (b)	chlorophyll- <i>a</i>	$y=6.047x^{0.238}$	0.335	0.000
	TN	$y=1.968+0.015x+0.000x^2+(9.88\times 10^{-7})x^3$	0.091	0.004
	TP	$y=0.037+0.000x+1.06\times 10^{-5}x^2+(-4.8\times 10^{-8})x^3$	0.354	0.000
P <sub>3</sub> (c)	chlorophyll- <i>a</i>	$y=9.263x^{0.151}$	0.104	0.000
	TN	$y=2.775+(-0.004)x+(1.10\times 10^{-5})x^2+(6.78\times 10^{-8})x^3$	0.062	0.029
	TP	$y=0.061+(-0.001)x+2.27\times 10^{-5}x^2+(-1.0\times 10^{-7})x^3$	0.344	0.000
P <sub>4</sub> (d)	chlorophyll- <i>a</i>	$y=14.174+0.077x+(-0.002)x^2+(1.37\times 10^{-5})x^3$	0.046	0.083
	TN	$y=1.896+0.008x+0.000x^2+(1.04\times 10^{-6})x^3$	0.103	0.002
	TP	$y=0.045+(-0.001)x+1.51\times 10^{-5}x^2+(-6.1\times 10^{-8})x^3$	0.147	0.000
P <sub>5</sub> (e)	chlorophyll- <i>a</i>	$y=17.703+0.008x+(0.007)x^2+(-4.9\times 10^{-5})x^3$	0.286	0.000
	TN	$y=3.079+(-0.005)x+0.000x^2+(-7.9\times 10^{-7})x^3$	0.055	0.048
	TP	$y=0.027x^{0.276}$	0.320	0.000
Sambong (f)	chlorophyll- <i>a</i>	$y=10.279+(-0.336)x+0.014x^2+0.000x^3$	0.516	0.000
	TN	$y=1.866+0.002x+0.000x^2+7.57\times 10^{-7}x^3$	0.090	0.004
	TP	$y=0.016+0.000x+(-4.2\times 10^{-6})x^2+2.11\times 10^{-8}x^3$	0.291	0.000
Gangsang (g)	chlorophyll- <i>a</i>	$y=27.023+1.063x+(-0.065)x^2+0.001x^3$	0.363	0.000
	TN	$\ln(y)=-0.988+(-0.495/x)$	0.140	0.000
	TP	$y=0.067+(-0.001)x+(1.82\times 10^{-5})x^2+(-7.9\times 10^{-8})x^3$	0.026	0.302
kyeongan (h)	chlorophyll- <i>a</i>	$y=50.759+(-0.065)x+(-0.025)x^2+0.000x^3$	0.076	0.152
	TN	$y=5.586+(-0.033)x+0.001x^2+(-4.4\times 10^{-6})x^3$	0.067	0.022
	TP	$y=0.048x^{0.287}$	0.191	0.000

TP의 경우 P<sub>2</sub>지점에서는 지속적으로 증가추세를 나타내었다. 북한강 유입지점인 삼봉지점도 증가하는 경향을 나타내었고, P<sub>4</sub>지점은 일정한 수준을 나타내고 있었는데 이 지점에서의 설명력이 다른 지점에 비하여 매우 낮게 나타났는데, 추세순환곡선은 증가하는 추세를 나타내어 종합적으로는 증가하는 경향에 있다고 설명할 수 있다. 또한 P<sub>1</sub>은 증가하는 경향을 나타내었다. P<sub>3</sub>는 감소했다가 증가하여 일정한 수준을 나타내었다. 대표지점인 댐 앞 지점의 TP가 증가하는 경향을 나타내는 것은 유입유량이 많으면서 가까운 P<sub>1</sub>지점의 영향을 받는 것이다. 한편, 경안천 유입지점과 P<sub>5</sub>지점도 증가하는 경향을 나타내어 팔당호의 TP농도는 지난 10년간 증가하고 있음을 나타내었다.

**3.3.4. 북한강 및 남한강에서 총인의 유입부하량**

김동섭 등(1995)은 5월에서 9월까지 평균 chlorophyll-*a* 농도가 1988년에 비해 1993년에 약 2배로 증가한데 반하여 총인의 농도는 같은 기간동안 약 4배의 증가를 보였고, 이는 유역으로부터의 인부하량의 급증과 팔당호의 짧은 체류시간 때문이며, 팔당호의 부영양화 원인이 남북한강으로부터의 인의 과다유입으로 결론짓고 있다. 특히 우기인 7월에서 9월에 연간 총인 유입수량의 약 2/3가 일시에 유입되고 유입된 다량의 인은 많은 부분이 그대로 유출되지만 9월 이후에 체류시간이 길어지면서 호수 내에 침전되거나 조류에 의해 이용되므로 팔당호 내에서의 총인은 지속적으로 증가하게 된다고 보고하고 있다. 본 연구에서는 이 연구결



**Fig. 8.** Input loading of TP at lake Paldang.

과 이후 인부하량의 변화를 살펴보기 위하여 1995년부터 2006년까지 연간 총인 유입량을 Fig. 8에 나타내었다. 1995년에서 2006년까지 팔당호에서의 총인 유입부하에 대한 세 유입천의 영향을 비교해 본 결과 삼봉과 경안천의 경우 1995년에 비해 점차적으로 증가하고 있는 추세를 나타내고 있다. 1995년 삼봉에서의 연간 총인 유입량은 86 ton이었으나 2006년에는 316 ton으로 약 3.7배 증가하였고, 경안천의 경우 연간 총인 유입량이 1995년 39 ton이었으나 2006년에는 89 ton으로 약 2배 증가하였다. 한편, 강상이 가장 많은 부하량을 나타내었으나 강우량이 가장 많았던 2003년 1,754 ton으로 가장 높은 값을 나타내었고, 2006년 삼봉지점보다

5배 이상으로 높았다. 남한강의 경우 특히 저수기에 수질이 악화되고 있으므로 이를 해결하기 위하여 점오염원 특히 유역 내 하수처리장과 같은 대규모 배출원에 대한 화학적 고도처리가 기술적으로도 용이하고 비용도 효과적인 것으로 언급되고 있다(국립환경과학원, 2006). 또한 북한강에서의 인 유입의 주요인이 되고 있는 북한강 상류에서의 탁수 관리와 저감을 위한 대책이 선행되어야 한다.

#### 4. 결론

본 연구를 통해 복잡한 수질 기작을 가지고 있는 팔당호를 대상으로 1995년부터 2006년까지 영양염류 및 chlorophyll-*a*를 중심으로 장기 추세를 살펴보았고, 2006년까지 팔당호의 수질특성을 통계학적으로 고찰하여 수질관리에 대한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

- 1) 팔당호의 수질특성을 알아보기 위해 주성분 분석을 한 결과 각 지점에서 주성분 요인은 TP, POP 등과 같은 인계열 영양염류 오염물질과 유입량, 강우량 및 SS와 같은 물리적인 요인으로 나타났다. 이는 팔당호가 영양염류 오염물질에 대하여 비점오염원의 영향을 받고 있음을 시사한다.
- 2) 수질항목간의 상관관계를 살펴본 결과 TP와 SS가 0.662 ( $p < 0.01$ )의 상관관계를 나타내었으며 TP와 POP는 0.881 ( $p < 0.01$ ), SS와 POP는 0.711( $p < 0.01$ )의 매우 높은 상관관계를 나타내었다.
- 3) Kruskal-Wallis 검정결과 팔당댐 앞 지점에서 chlorophyll-*a*와 영양염류(TN, TP)는 계절성을 띠면서 수질이 변동한다는 것을 알 수 있었고, 주요한 수질특성으로 나타난 TP는 주로 강우량과 유량이 증가하는 계절에 증가하였다.
- 4) 팔당댐 앞 지점에서 chlorophyll-*a*의 장기변동추세를 살펴본 결과 지난 10년간 증가하는 경향을 나타내었고 TP도 증가 경향을 나타내었는데 이러한 결과는 팔당호의 TP농도가 지속적으로 증가추세에 있어 내부생산 유기물의 기원이 되는 chlorophyll-*a*의 농도를 증가시키고 있음을 의미한다.

#### 사 사

본 연구는 2007년 한강수계 환경기초조사사업 「수질환경 기준의 적용성 검토 및 목표수질달성도 평가」 사업의 일부로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

국가수자원관리종합정보시스템(2008). 댐수문자료. <http://www.wamis.go.kr>.

국립환경과학원 한강물환경연구소(2006). 남한강수계 오염물질 유출 및 수질변동 특성에 관한 연구(II).

김동섭, 김범철, 황길순, 박주현(1995). 팔당호의 부영양화 경향(1988-1994). *한국수질보전학회지*, **11**(4), pp. 295-302.

김범철, 사승환, 김문숙, 이윤경, 김재구(2007). 국내 호수의 제한영양소와 하수처리장 방류수 인 기준 강화의 필요성. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(4), pp. 512-517.

김주화, 박석순(2004). 비모수 통계기법을 이용한 낙동강 수계의 수질 장기 경향 분석. *수질보전 한국물환경학회지*, **20**(1), pp. 63-71.

나은혜, 박석순(2003). 로그선형모형을 이용한 팔당호 유입지류 수질의 연속성 시뮬레이션과 경향 분석. *한국육수학회지*, **36**(3), pp. 336-343.

노형진(2005). *Excel 및 SPSS를 활용한 다변량분석 이론과 실제*, 형설출판사.

박선영(1999). 계절 맨-켄달 기법을 이용한 국내 주요 호수의 수질경향분석. 석사학위논문, 이화여자대학교.

유호식(2002). 한강수질에 영향을 끼치는 요인들의 통계분석. *대한환경공학학회지*, **24**(12), pp. 2139-2150.

전지홍, 윤춘경, 함중화(2001). 비도시 유역에서 수질오염물질 사이의 상관관계 분석. *한국하천호수학회지*, **34**(3), pp. 215-222.

허명희(2007). *SPSS 시계열 분석과 결측값 분석*, (주)데이터솔루션.

Bouza-Deano, R., Ternero-Rodriguez, M., and Fernandez-Espinosa, A. J. (2008). Trend study and assessment of surface water quality in the Ebro River(Spain). *Journal of Hydrology*, **361**, pp. 227-239.

Johnston, C. A. and Shmagin, B. A. (2008). Regionalization, seasonality, and trends of streamflow in the US Great Lakes Basin. *Journal of Hydrology*, **362**, pp. 69-88.

Ruley, J. E. and Rusch, K. A. (2002). An assessment of long-term post-restoration water quality trends in a shallow, subtropical, urban hypereutrophic lake. *Ecological Engineering*, **19**, pp. 265-280.