

## 낙동강 부영양화와 수질환경요인의 통계적 분석

김미숙<sup>1,2</sup>, 정영륜<sup>\*2</sup>, 서의훈<sup>3</sup>, 송원섭<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>마산시 칠서정수장, <sup>2</sup>경상대학교 대학원 환경보전학과, 응용생명과학부(BK 21),  
<sup>3</sup>경상대학교 자연과학대학 수학·통계정보학부)

## Eutrophication of Nakdong River and Statistical Analysis of Environmental Factors

Mi Suk Kim<sup>1,2</sup>, Young Ryun Chung<sup>2\*</sup>, Euy Hoon Suh<sup>3</sup> and Won Sup Song<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Masan Chilseo Office of Waterworks, Haman 637-940, Korea

<sup>2</sup>Department of Microbiology, Environmental Protection & Division of Applied Life Science (Bk 21)  
Graduate school Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

<sup>3</sup>Department of Statistics, Division of Natural Science, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

Influences of various environmental factors on the eutrophication of Nakdong River were analyzed statistically using water samples collected from 1 January, 1999 to 30 September, 2001 at Namji area. The relationships between the concentration of chlorophyll *a* (eutrophication index) and environmental factors and were analyzed to develop a statistical model which can predict the status of eutrophication. The concentration of chlorophyll *a* ranged from 66.2 mg · m<sup>-3</sup> to 70.8 mg · m<sup>-3</sup> during dry winter season and the average concentration during this study period was 35.5 mg · m<sup>-3</sup>. Namji area of Nakdong River was in the hypereutrophic stage in terms of water quality. *Stephanodiscus* sp. and *Aulacoseira granulata* var. *angustissima* were dominant species during the winter to spring time and summer to autumn period, respectively. Based on the correlation analysis and the analysis of variance between chlorophyll *a* concentration and environmental factors, significantly high positive relationships were found in the order of BOD > pH > COD > KMnO<sub>4</sub> consumption > DO > conductivity > alkalinity. In contrast to these factors, significantly negative relationships were found as in the order of PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P > water level > the rate of Namgang-dam discharge > NH<sub>3</sub>-N > the rate of Andong-dam discharge > the rate of Hapchoen-dam discharge. Based on the factors analysis of environmental factors on the concentration of chlorophyll *a*, we obtained five factors as follows. The first factor included water level, pH, turbidity, conductivity, alkalinity and the rate of Namgang-dam discharge. The second factor included water temperature, DO, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N. The third factor included KMnO<sub>4</sub> consumption, COD and BOD. The fourth factor included the rate of Andong-dam discharge, the rate of Hapcheon-dam discharge, and the rate of Imha-dam discharge. The final factor included T-N, T-P and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P concentration. We derived two statistical models that can predict the occurrence of eutrophication based on the factors by factor analysis, using regression analysis. The first model is the stepwise regression model whose independent variables are the factors produced by factor analysis : chl *a* (mg · m<sup>-3</sup>) = 42.923 + (18.637 factor 3) + (-17.147 factor 1) + (-12.095 factor 5) + (-4.828 factor 4). The second model is the alternative stepwise regression model whose independent variables are the sums of the standardized main component variables: chl *a* (mg · m<sup>-3</sup>) = 37.295 + (7.326 Zfactor 3) + (-2.704 Zfactor 1) + (-2.341 Zfactor 5).

**Key Words:** algae, eutrophication, statistical analysis of factors, statistical model development

## 서 론

수계의 부영양화는 영양염, 특히 질소, 인 및 유기영양 물질의 과도한 유입으로 인해 조류 즉 식물플랑크톤 등이

\*Corresponding author (yrchung@nongae.gsnu.ac.kr)

대량번식 되는 현상으로 수질의 악화로 정수장의 여과지 폐쇄, 이취미장에 및 응집장애 등 심각한 문제가 야기되어 용수의 이용 및 공급에 막대한 지장을 초래하고 있다(국립환경연구원 1993; 박 1999). 특히, 낙동강수계는 대구·경북, 부산·경남권의 식수, 농·공업용수로 아주 중요한 역할을 하고 있으며, 낙동강환경관리청, 주변 지자체 등에서 수질보전을 위해 많은 노력을 기울이고 있으나 해마다 조류의 대발생이 되풀이되고 있는 실정이다.

일반적으로 하천의 수질환경평가 기준은 단일 항목 또는 2-3개의 항목만으로 조사·평가되고 있는데, 낙동강은 다른 하천에 비해 복잡한 유역이용 상황으로 인하여 수질이 계절별, 지역별로 다양한 양상을 띠고 있으며, 특히, 중·하류에서는 심각한 부영양화로 인해 단순히 2-3개의 수질항목만으로는 하천의 수질을 제대로 평가하거나 이용 관리하기에 많은 어려움이 있다(신과 백 1999). 또한 낙동강에 관한 연구가 지금까지 다각도로 진행되어 왔지만, 낙동강 수질을 결정하는 인자가 매우 다양하고 복잡하여 수질과 이들 환경요인들간의 체계적이고 정량적인 분석결과가 거의 없었다(Joo *et al.* 1997).

이러한 체계적인 수질분석자료의 부재는 낙동강수계의 효율적인 수질관리 사업을 추진시키지 못하는 문제점을 가져왔으며, 조사된 수질기초 자료 또한 활용을 제대로 못하고 있는 현실이다. 다행히 최근 들어 하천의 수질항목간의 복잡한 선형관계를 몇 개의 유형으로 분류한 후 오염 원인을 파악할 수 있는 통계분석법의 적용 등 수질특성을 해석하기 위한 노력이 확대되고 있다(오와 백 1984; 신 등 1998; 장 1999). 식물플랑크톤의 생산력 및 생물량은 다양한 환경요인에 의해 영향을 받고 서로 상관관계를 보이는 것으로 알려져 있다(Wafer *et al.* 1983).

따라서 본 연구에서는 낙동강 중·하류에 위치한 남지 지역의 부영양화에 관련된 수질영향인자를 조사하기 위하여 1999년 1월부터 2001년 9월까지 부영양화에 연관된 수질의 이화학적, 생물학적 환경요인의 변화를 측정하였고, 이들 환경요인의 변동에 따른 식물플랑크톤의 성장정도 와 이들의 증식에 기여하는 수질 환경요인간의 관계를 다각도로 분석하였다. 또한 다양한 통계적 방법을 이용하여 부영양화와 관련 있는 인자를 산정하고 이의 변동에 따른 부영양화의 정도를 예측할 수 있는 모형을 유도하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 수질환경요인 측정

본 연구에 사용된 시료는 1999년 1월부터 2001년 9월까지 낙동강 중·하류에 위치한 칠서취수장의 취수정에서

매일 또는 매주 간격으로 채수한 것을 사용하였으며, 수질 분석은 채수 즉시 실시하였다.

수질분석 조사항목 및 방법은 pH의 경우 pH meter (Istek 750P), 탁도는 Turbidimeter (HACH 2100N), 전기전도도는 Conductivity meter (CM-20E)를 이용하여 측정하였다. 질산성질소 농도( $\text{NO}_3\text{-N}$ )는 Ion/Liquid Chromatography (DIONEX LC20)를 이용하였고, 그 외 알카리도,  $\text{KMnO}_4$  소비량, COD, BOD, DO, 암모니아성질소 농도( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), 총질소 농도(T-N), 총인 농도(T-P), 인산염인 농도( $\text{PO}_4\text{-P}$ ), chlorophyll *a* 농도는 수질 오염공정시험법주해(최 1994), APHA(1989)의 Standard Method에 준하여 실시하였다. 취수 수위는 압력식 수위계로 실시간 측정하여 일별 산술평균을 이용하였다.

조류의 조사 및 동정은 조류의 농도에 따라 원심분리기 또는 자연침강법을 이용하여 농축한 후 광학현미경 (Nikon, Japan) 하에서 Sedgwick Rafter Chamber를 사용하여 검경하였다(이 1995). 종 동정은 Yamagishi and Akiyama (1988), 조 등(1991), 정(1993)의 도감을 참고로 하였다.

땀방류량이 낙동강 수질환경요인에 큰 영향을 미칠 것으로 생각되어 수량조절 및 수력발전 등 다목적댐으로 이용되고 있는 안동, 임하, 합천, 남강댐의 방류량을 1999년 1월부터 2001년 9월까지 한국수자원공사의 수문자료를 검색을 매일 이용하여 초당 평균방류량으로 구하였다.

### 2. 자료의 통계적 분석

식물플랑크톤에 관련되는 수질환경요인들의 관계를 알기 위해서 남지 지점에서 조사된 19개의 수질환경요인에 대한 자료를 이용하여 chl *a* 농도가  $25.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  이상으로 Harper(1992)의 기준에 의하여 과영양 상태일 때 수질 환경요인과 chl *a* 농도와 어떤 상관관계가 있는지 Pearson의 상관계수를 이용하여 상관분석을 하였다. 또한 부영양화 발생과 관련 있는 수질 환경요인을 찾기 위해 분산분석을 실시하였다. 조사한 시료를 부영양화 정도에 따라 6개의 그룹( $0\text{-}19.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $20.0\text{-}39.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $40.0\text{-}59.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $60.0\text{-}79.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $80.0\text{-}99.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  이상)으로 나누어 각 그룹에서 수질 환경요인들간의 평균차이를 알아보는 일원배치분산분석을 하였으며, 두 그룹간 차이의 유의성을 검증하기 위하여 Duncan의 다중비교방법을 사용하였다(강과 김 2001).

부영양화에 대한 모형의 개발을 위해서는 요인분석과 회귀분석을 실시하였다. 요인추출방법으로는 주성분 추출 방법(Principal Component Method)을 사용하였고, Varimax 회전방법으로 요인분석을 하였다(노 2001; 서 2001). 식물플랑크톤 생체량(chl *a* 농도)에 대한 예측모형

**Table 1.** Mean value and standard deviation of the environmental factors affecting eutrophication at Namji in the Nakdong River

Factors	chl <i>a</i> (mg · m <sup>-3</sup> )		Water temperature (°C)		Water level (m)		pH		Turbidity (NTU)		Conductivity (μs · cm <sup>-1</sup> )		Alkalinity (mg · L <sup>-1</sup> )		KMnO <sub>4</sub> consumption (mg · L <sup>-1</sup> )		COD (mg · L <sup>-1</sup> )		BOD (mg · L <sup>-1</sup> )	
	Mean	S.D.*	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Jan.	25.2	14.16	4.5	2.03	1.36	0.10	7.95	0.23	7.0	1.38	405.4	68.47	52.6	3.54	8.89	1.61	5.04	0.67	2.26	0.62
Feb.	43.1	22.86	5.1	1.36	1.38	0.21	8.16	0.32	8.2	6.24	450.1	62.57	53.1	3.89	9.94	2.10	5.82	0.78	3.25	0.93
Mar.	70.8	47.62	9.8	2.33	1.76	0.57	8.45	0.94	15.6	11.53	399.4	127.2	46.0	7.74	11.56	3.03	6.77	1.98	4.54	1.46
Apr.	66.2	44.33	16.0	2.33	1.69	0.82	8.55	0.88	14.6	16.13	390.8	128.5	48.9	10.9	11.52	2.23	6.86	1.74	5.02	1.93
May	45.2	26.60	21.9	2.01	1.45	0.73	8.23	0.55	11.3	3.16	447.7	168.3	52.8	9.52	11.28	2.07	6.46	1.33	4.20	1.08
Jun.	35.3	19.71	25.1	2.06	1.99	1.31	7.73	0.66	25.6	34.4	381.7	177.8	50.8	13.5	12.45	2.90	6.63	1.30	3.45	0.84
Jul.	31.5	20.03	26.9	2.66	2.88	1.23	7.34	0.53	43.1	58.10	193.6	55.61	37.7	8.45	11.93	4.30	5.98	2.17	2.00	0.90
Aug.	27.7	22.01	27.4	2.77	3.30	1.71	7.55	0.50	30.5	43.20	186.8	94.25	37.9	9.49	10.71	3.63	5.14	1.35	2.22	0.84
Sep.	25.6	30.14	23.6	2.46	4.21	2.58	7.54	0.73	37.2	45.20	214.5	183.9	37.4	15.9	10.23	3.37	5.05	1.89	2.37	1.39
Oct.	16.8	9.14	18.7	2.15	2.69	0.58	7.79	0.52	18.6	35.25	188.0	48.76	36.4	4.93	7.35	1.91	3.89	0.73	1.74	0.75
Nov.	15.0	3.27	13.0	2.08	2.06	0.27	7.87	0.20	6.5	1.64	229.5	35.98	41.4	6.21	6.83	1.01	3.80	0.68	1.58	0.45
Dec.	13.3	4.92	6.5	1.96	1.58	0.23	7.78	0.16	6.9	2.04	311.3	68.33	45.4	5.65	6.34	1.17	3.84	0.34	1.35	0.30

  

Factors	DO (mg · L <sup>-1</sup> )		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg · L <sup>-1</sup> )		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N (mg · L <sup>-1</sup> )		T-N (mg · L <sup>-1</sup> )		T-P (mg · L <sup>-1</sup> )		PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P (mg · L <sup>-1</sup> )		Andong-dam discharge rate (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )		Imha-dam discharge rate (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )		Hapcheon-dam discharge rate (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )		Nangang-dam discharge rate (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
Jan.	13.1	0.52	0.530	0.323	3.97	0.38	4.69	0.50	0.145	0.030	0.066	0.013	24.7	10.12	11.9	6.54	22.4	6.09	9.7	5.88
Feb.	13.1	0.68	0.480	0.258	3.83	0.45	5.37	0.58	0.162	0.041	0.068	0.011	28.3	6.63	9.9	4.79	21.6	5.06	11.0	7.00
Mar.	12.8	1.43	0.156	0.119	3.43	0.59	4.64	0.59	0.135	0.063	0.058	0.019	23.4	9.65	9.5	6.13	21.3	8.57	37.0	43.66
Apr.	11.4	2.01	0.047	0.040	2.80	0.36	4.24	0.68	0.122	0.025	0.063	0.019	23.5	6.29	20.3	13.81	23.2	0.02	30.4	59.05
May	10.0	2.38	0.057	0.060	2.70	0.37	4.08	0.92	0.118	0.045	0.053	0.021	29.1	14.90	13.8	11.77	21.6	0.02	17.1	20.73
Jun.	7.9	2.11	0.081	0.107	2.40	0.25	4.53	0.55	0.177	0.059	0.077	0.030	47.5	11.28	9.74	10.52	20.1	0.02	77.3	262.92
Jul.	7.0	1.10	0.058	0.031	2.11	0.51	4.74	1.24	0.160	0.061	0.075	0.032	42.6	7.65	10.7	13.10	22.1	0.03	230.2	375.31
Aug.	6.8	0.96	0.039	0.043	1.66	0.28	3.95	0.66	0.172	0.063	0.078	0.029	47.5	26.94	19.7	19.10	27.9	0.03	259.9	470.20
Sep.	7.6	1.31	0.052	0.059	1.85	0.44	3.91	0.77	0.163	0.032	0.063	0.022	40.2	36.31	51.7	68.35	48.1	0.03	257.3	414.21
Oct.	9.0	1.37	0.056	0.044	2.48	0.31	3.41	0.62	0.013	0.021	0.076	0.012	63.0	61.27	58.3	26.24	40.7	0.02	64.2	55.71
Nov.	10.6	0.84	0.069	0.036	2.96	0.43	3.75	0.33	0.097	0.016	0.072	0.010	58.4	33.86	12.4	14.75	43.2	0.01	51.2	104.82
Dec.	12.4	0.73	0.182	0.117	3.07	0.54	3.66	0.63	0.100	0.022	0.075	0.014	38.1	16.19	15.7	14.83	35.6	0.01	19.1	9.23

\*S.D.: Standard Deviation

을 개발하기 위해 종속변수를 식물플랑크톤 생체량으로 하고, 요인분석에서 얻은 5개의 요인점수를 독립변수로 하여 선형회귀분석을 실시하였다(정과 최 2001; 서 2001).

이를 위해 경상대학교 소재 통계상담실에 분석을 의뢰하였으며, 분석은 SPSS 10.0 한글판 통계패키지를 사용하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 수질 환경요인의 월별 변화

조사기간 동안 분석한 항목 중에 본 연구에 이용한 각 항목의 측정분석 실측치의 월별 평균값과 표준편차를 Table 1에 나타내었다. 수온은 전형적인 온대성 계절분포

를 보였으며, 각 항목의 농도변화는 갈수기와 풍수기와는 상이한 분포현황을 보였다. 수중의 식물플랑크톤 생체량을 간접적으로 나타내는 엽록소 *a*(Chl *a*) 양은 저온기인 3, 4월에는 평균 66.2-70.8 mg · m<sup>-3</sup>로 높게 나타났으나, 고온기인 6-9월에는 25.6-35.3 mg · m<sup>-3</sup>로 비교적 낮게 나타났다. 이는 여름철 잦은 집중강우로 인하여 식물플랑크톤의 밀도가 낮게 나타난 것으로 생각된다. 그러나 조사기간 중 연평균 Chl *a* 농도는 35.5 mg · m<sup>-3</sup>이었으며, 이는 OECD(1982)의 부영양화 기준으로 평가할 때 낙동강 중·하류의 남지 지점은 이미 과영양 단계(hypereutrophic state)에 도달한 것으로 나타났다.

Table 2. Change of dominant species of phytoplankton found at Namji in the Nakdong River

Month	Dominant species	Month	Dominant species	Month	Dominant species
1999. Jan.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	2000. Jan.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	2001. Jan.	<i>Stephanodiscus</i> sp.
Feb.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	Feb.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	Feb.	<i>Stephanodiscus</i> sp.
Apr.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	Apr.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	Apr.	<i>Stephanodiscus</i> sp.
Mar.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	Mar.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	Mar.	<i>Stephanodiscus</i> sp.
May	<i>Synedra acus</i>	May	<i>Stephanodiscus</i> sp. <i>Cyclotella meneghiniana</i>	May	<i>Stephanodiscus</i> sp. <i>Cyclotella meneghiniana</i>
Jun.	<i>Synedra acus</i> <i>Merisomopedia elegans</i> *	Jun.	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	Jun.	<i>Cyclotella meneghiniana</i> <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>
Jul.	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> <i>Oscillatoria</i> sp.*	Jul.	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	Jul.	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>
Aug.	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	Aug.	<i>Microcystis wesenbergii</i> * <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	Aug.	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>
Sep.	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> <i>Anabaena spiroides</i> var. <i>crassa</i> * <i>Oscillatoria</i> sp.*	Sep.	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	Sep.	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>
Oct.	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	Oct.	<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>		
Nov.	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	Nov.	<i>Cyclotella meneghiniana</i>		
Dec.	<i>Stephanodiscus</i> sp.	Dec.	<i>Stephanodiscus</i> sp.		

\*: Duration of dominant phytoplankton species' dominance was less than 10 days.

## 2. 식물플랑크톤 우점종의 월별 변화

조사기간 동안 식물플랑크톤 천이는 대부분 규조류에 속한 종이 전체 분류군 중에서 가장 큰 비율을 차지하였는데 (Table 2), 이는 신(1996a)의 연구결과와도 동일한 경향을 나타내었다. 저온기인 1-4월에는 *Stephanodiscus* sp.가 단독으로 우점하였으며, 5월, 6월에는 *Cyclotella meneghiniana*, *Synedra acus* 또는 *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, 7-9월에는 *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*, 11월에는 *Cyclotella meneghiniana*, 12월에는 *Stephanodiscus* sp. 순으로 우점종의 변이가 이루어졌다. 낙동강은 비교적 우속이 느려서, 갈수기인 겨울과 봄에는 규조류가 번성하며, 여름과 가을에는 녹조류나 남조류가 번성하는 '호수의 천이'를 오랫동안 보여왔다고 하였으나 (하 등 1995), 본 조사 기간 동안은 식물플랑크톤 천이는 연중 규조류가 우점하는 '강의 천이'를 나타냈다. 이는 조사 기간 동안 하절기의 빈번한 강우와 집중호우의 영향으로 녹조류나 남조류의 번성이 어려워, 여름과 가을에도 규

조류가 우점하는 '강의 천이'를 보인 것으로 판단된다.

## 3. 수질 환경요인들과 식물플랑크톤량과의 관련성 분석

남지 지점에서 조사된 19개의 수질환경요인에 대한 자료를 이용하여 식물플랑크톤에 관련되는 수질환경요인들의 관계를 알기 위해 상관분석을 하였고 (Table 3), 부영양화 정도에 따라 수질환경요인들의 차이를 알기 위하여 분산분석을 실시하였다 (Table 4).

### 1) 수온, 취수수위, pH 및 탁도

상관분석 결과 chl *a* 농도와 수온과의 상관성은 없었으며, 분산분석 결과는 chl *a* 농도가 100 mg·m<sup>-3</sup> 이상인 그룹에서 수온의 평균이 낮게 나타났으나, 다른 그룹에서는 유의성을 보이지 않았다. 일반적으로 식물플랑크톤의 chl *a* 농도는 수온이 상승할수록 비교적 증가하는 경향을 보인다고 하였으나 (Heinle 1969; 이 1999), 위의 결과로 볼 때 평균수온 14°C 정도의 저수온에서도 영양분 등의 조건이 맞으면 조류가 다량 번식할 수 있음을 알 수 있었다. 실제

Table 3. Correlation matrix between environmental factors and concentration of chlorophyll *a* at Namji in the Nakdong River

	chl <i>a</i>	Water temperature	Water level	pH	Turbidity	Conductivity	Alkalinity	KMnO <sub>4</sub> consumption	COD	BOD	DO	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	T-N	T-P	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	Andong-dam discharge rate	Imha-dam discharge rate	Hapcheon-dam discharge rate	Namgang-dam discharge rate	
chl <i>a</i>	-0.074																				
Water temperature	-0.298**	0.288**																			
Water level	0.744**	-0.180**	-0.524**																		
pH	-0.053	0.244**	0.482**	-0.289**																	
Turbidity	0.342**	-0.265**	-0.755**	0.477**	-0.250**																
Conductivity	0.209**	-0.100*	-0.749**	0.352**	-0.247**	0.791**															
Alkalinity	0.627**	0.055	-0.213**	0.403**	0.263**	0.417**	0.397**														
KMnO <sub>4</sub> consumption	0.742**	-0.045	-0.451**	0.662**	0.066	0.629**	0.517**	0.827**													
COD	0.748**	-0.209**	-0.501**	0.713**	-0.085	0.477**	0.408**	0.715**	0.831**												
BOD	0.371**	-0.815**	-0.245**	0.428**	-0.219**	0.212**	0.000	0.099*	0.214**	0.393**											
DO	-0.239**	-0.642**	-0.215**	-0.167**	-0.128**	0.192**	0.217**	-0.132**	-0.123**	-0.129*	0.364**										
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.066	-0.855**	-0.303**	0.118	-0.353**	0.336**	0.155	0.133	0.146	0.356**	0.701**	0.535**									
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.090	-0.314**	-0.024	-0.019	0.11	0.149	0.045	0.162	0.087	0.065	0.257**	0.247**	0.330**								
T-N	-0.155	0.091	0.304**	-0.245**	0.090	-0.138**	-0.088*	-0.011	-0.093	-0.134	-0.163*	0.066	-0.035	0.300**							
T-P	-0.649**	-0.001	0.380**	-0.513**	0.084	-0.323**	-0.159*	-0.356**	-0.505**	-0.464**	-0.265**	0.141	-0.172	0.102	0.304**						
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	-0.228**	0.253**	0.385**	-0.324**	0.058	-0.434**	-0.328**	-0.102*	-0.260**	-0.253**	-0.223**	-0.172**	-0.159	0.018	-0.048	0.198*					
Andong-dam discharge rate	-0.089*	0.108*	0.274**	0.020	0.023	-0.256**	-0.262**	-0.245**	-0.202**	-0.152**	-0.079	-0.152**	-0.122	-0.189*	-0.190*	0.155*	-0.030				
Imha-dam discharge rate	-0.149*	-0.004	0.418**	-0.150**	0.012	-0.429**	-0.490**	-0.309**	-0.386**	-0.261**	0.073	-0.148**	-0.065	-0.153	-0.012	0.166*	0.254**	0.299**			
Hapcheon-dam discharge rate	-0.280**	0.433**	0.766**	-0.478**	0.397**	-0.686**	-0.699**	-0.250**	-0.423**	-0.527**	-0.425**	-0.257**	-0.421**	-0.033	-0.052	0.254**	0.308**	0.193**	0.208**		
Namgang-dam discharge rate																					

\*p < 0.05, \*\*p < 0.01

**Table 4.** One-way analysis of variance of environmental factors affecting concentration of chlorophyll *a* at Namji in the Nakdong River

Variables	chl <i>a</i> concentration(mg · m <sup>-3</sup> )							
	F	p-value	0-19.9	20.0-39.9	40.0-59.9	60.0-79.9	80.0-99.9	over 100
Water temperature(°C)	5.677	0.000**	16.2 <sup>ab</sup>	16.7 <sup>ab</sup>	19.9 <sup>c</sup>	18.6 <sup>bc</sup>	15.4 <sup>a</sup>	14.6 <sup>a</sup>
Water level(m)	49.740	0.000**	2.90 <sup>c</sup>	1.79 <sup>b</sup>	1.72 <sup>ab</sup>	1.42 <sup>ab</sup>	1.40 <sup>ab</sup>	1.32 <sup>a</sup>
pH	269.359	0.000**	7.49 <sup>a</sup>	7.83 <sup>b</sup>	8.01 <sup>c</sup>	8.62 <sup>d</sup>	8.89 <sup>e</sup>	9.258 <sup>f</sup>
Turbidity(NTU)	17.523	0.000**	29.8 <sup>b</sup>	12.2 <sup>a</sup>	10.5 <sup>a</sup>	11.1 <sup>a</sup>	10.4 <sup>a</sup>	11.2 <sup>a</sup>
Conductivity(s · cm <sup>-1</sup> )	76.759	0.000**	239.7 <sup>a</sup>	353.8 <sup>b</sup>	361.1 <sup>b</sup>	410.2 <sup>c</sup>	459.3 <sup>d</sup>	492.3 <sup>d</sup>
Alkalinity(mg · L <sup>-1</sup> )	61.663	0.000**	39.39 <sup>a</sup>	48.54 <sup>b</sup>	49.55 <sup>bc</sup>	51.59 <sup>cd</sup>	51.54 <sup>cd</sup>	54.39 <sup>d</sup>
KMnO <sub>4</sub> consumption(mg · L <sup>-1</sup> )	42.879	0.000**	9.23 <sup>a</sup>	9.561 <sup>a</sup>	10.65 <sup>b</sup>	11.74 <sup>c</sup>	12.48 <sup>c</sup>	14.11 <sup>d</sup>
COD(mg · L <sup>-1</sup> )	119.117	0.000**	4.82 <sup>a</sup>	5.28 <sup>b</sup>	5.79 <sup>c</sup>	6.83 <sup>d</sup>	7.42 <sup>e</sup>	8.72 <sup>f</sup>
BOD(mg · L <sup>-1</sup> )	96.118	0.000**	1.76 <sup>a</sup>	2.74 <sup>b</sup>	3.48 <sup>c</sup>	4.48 <sup>d</sup>	5.20 <sup>e</sup>	6.053 <sup>f</sup>
DO(mg · L <sup>-1</sup> )	29.162	0.000**	9.4 <sup>a</sup>	9.99 <sup>ab</sup>	10.2 <sup>b</sup>	11.4 <sup>c</sup>	11.9 <sup>c</sup>	12.8 <sup>d</sup>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N(mg · L <sup>-1</sup> )	7.578	0.000**	0.175 <sup>a</sup>	0.134 <sup>c</sup>	0.134 <sup>bc</sup>	0.097 <sup>ab</sup>	0.076 <sup>ab</sup>	0.049 <sup>a</sup>
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N(mg · L <sup>-1</sup> )	1.009	0.414	2.99 <sup>a</sup>	2.60 <sup>a</sup>	2.42 <sup>a</sup>	2.67 <sup>a</sup>	2.60 <sup>a</sup>	2.99 <sup>a</sup>
T-N(mg · L <sup>-1</sup> )	0.414	0.838	4.28 <sup>a</sup>	4.24 <sup>a</sup>	4.44 <sup>a</sup>	4.09 <sup>a</sup>	4.55 <sup>a</sup>	4.33 <sup>a</sup>
T-P(mg · L <sup>-1</sup> )	1.803	0.115	0.172 <sup>a</sup>	0.142 <sup>a</sup>	0.163 <sup>a</sup>	0.149 <sup>a</sup>	0.156 <sup>a</sup>	0.129 <sup>a</sup>
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P(mg · L <sup>-1</sup> )	16.875	0.000**	0.087 <sup>e</sup>	0.073 <sup>d</sup>	0.069 <sup>cd</sup>	0.056 <sup>bc</sup>	0.047 <sup>b</sup>	0.032 <sup>a</sup>
Andong-dam discharge rate(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	13.333	0.000**	44.3 <sup>c</sup>	34.7 <sup>b</sup>	35.4 <sup>b</sup>	33.5 <sup>b</sup>	23.0 <sup>a</sup>	25.3 <sup>a</sup>
Imha-dam discharge rate(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	12.595	0.000**	26.8 <sup>b</sup>	15.5 <sup>a</sup>	12.3 <sup>a</sup>	10.6 <sup>a</sup>	11.6 <sup>a</sup>	12.4 <sup>a</sup>
Habcheon-dam discharge rate(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	16.546	0.000**	33.6 <sup>b</sup>	25.1 <sup>a</sup>	22.1 <sup>a</sup>	21.0 <sup>a</sup>	21.9 <sup>a</sup>	22.1 <sup>a</sup>
Namgang -dam discharge rate(m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	15.710	0.000**	170.1 <sup>b</sup>	38.6 <sup>a</sup>	37.2 <sup>a</sup>	19.3 <sup>a</sup>	20.6 <sup>a</sup>	10.4 <sup>a</sup>

i) \*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ .

ii) Results of the Duncan's Multiple Comparision test: Different character means that the mean value is significantly different.  $a < b < c < d < e < f$ .

로 동절기의 우점종인 *Stephanodiscus* sp.의 최대성장온도는 13°C이고, 수온이 3°C 정도의 온도에서도 다른 조건이 적당하게 유지된다면 충분한 성장을 보인다고 하였다(신 1998).

Chl *a* 농도와 취수 수위와의 상관계수는 (-)0.298이며, 분산분석 결과 chl *a* 농도가 20 mg · m<sup>-3</sup> 미만인 그룹에서 수위의 평균이 가장 높고, chl *a* 농도가 100 mg · m<sup>-3</sup> 이상인 그룹에서 수위의 평균이 가장 낮은 것으로 나타나 (-)의 연관성이 유의하게 나타났다. 이러한 결과는 여름 강우로 유량이 풍부해져서 취수 수위가 높아졌고, 영양물질, 식물플랑크톤의 양이 희석되었기 때문에 식물플랑크톤의 농도가 낮게 나타난 것으로 보인다.

Chl *a* 농도와 pH의 상관계수는 (+)0.744이며, 분산분석 결과 chl *a* 농도는 20 mg · m<sup>-3</sup> 미만인 그룹에서 pH의 평균이 가장 낮았고, chl *a* 농도가 100 mg · m<sup>-3</sup> 이상인 그룹에서 pH의 평균이 가장 높은 것으로 나타나 (+)의 연관성이 유의하게 나타났다. 이는 대청호 조류증식과 pH 변화와 유사한 경향으로 식물플랑크톤이 증식함으로써 광합성 작용에 의해 수중의 탄산염 및 중탄산염이 흡수되어 pH가 증가한 것으로 보여진다고 하였으며, 또한 pH가 높아짐으로써 금속류와 착물로 존재하던 인의 용출이 가속되어 식

물플랑크톤의 성장이 촉진된다고 하였다(전과 박 1989; 금강수질검사소 1995).

수중의 탁도 유발 물질은 물의 투명도와 빛의 수중 투과 깊이에 영향을 미치며 조류의 성장에 필수적인 햇빛의 양에 영향을 주는 것으로 알려져 있다(신 1996b). 그러나 상관분석 결과 chl *a* 농도와 탁도는 상관성이 없었으며, 분산분석 결과 chl *a* 농도가 20 mg · m<sup>-3</sup> 미만인 그룹에서 탁도의 평균값이 가장 높았으나, 다른 농도 그룹에서는 유의한 차이를 보이지 않았다. 이는 탁도가 높은 경우에만 조류의 광합성에 필수적인 광량이 제한되어 식물플랑크톤의 농도가 낮게 나타난 것으로 보인다.

## 2) 전기전도도, 알카리도, 유기물질 및 용존산소

Chl *a* 농도와 전기전도도, 알카리도의 상관계수는 각각 (+)0.342, (+)0.209으로 상관성이 있었으며, 분산분석 결과에서도 chl *a* 농도가 20 mg · m<sup>-3</sup> 미만인 그룹에서 전기전도도, 알카리도의 평균값이 가장 낮았고, chl *a* 농도가 100 mg · m<sup>-3</sup> 이상인 그룹에서 전기전도도, 알카리도의 평균이 가장 높게 나타나 (+)의 연관성이 유의하게 나타났다. 이는 수계가 정체되고 갈수기일 때는 수량이 부족하여 용존성 물질이 증가되면서 전기전도도, 알카리도가 증가되고 식물플랑크톤의 농도 또한 증가된 것으로 판단된다.

Chl *a* 농도와 유기물질을 나타내는  $\text{KMnO}_4$  소비량, COD, BOD와의 상관계수는 각각 (+)0.627, (+)0.742, (+)0.748로서 높은 상관성을 보였다. 분산분석 결과 이들 각각의 평균값은 chl *a* 농도가  $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  미만인 그룹에서 이들 각각의 평균이 가장 낮았으며, chl *a* 농도가  $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  이상인 그룹에서  $\text{KMnO}_4$  소비량, COD, BOD의 평균이 가장 높은 것으로 나타나 (+)의 연관성이 유의하게 나타났다. 이는 과량의 유기물질 유입에 의하여 식물플랑크톤의 과다성장이 일어나게 되며, 이렇게 생성된 식물플랑크톤 역시 유기물의 공급원이 되어 수계의 유기탄소(algal carbon) 농도가 증가한 것으로 생각된다(김 등 1996).

### 3) 용존산소량과 영양염류

Chl *a* 농도와 용존산소량의 상관계수는 (+)0.371이었으며, 분산분석 결과 chl *a* 농도가  $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  미만인 그룹에서 용존산소의 평균이 가장 낮았고, chl *a* 농도가  $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  이상인 그룹에서 용존산소량의 평균이 가장 높은 것으로 나타나 (+)의 연관성이 유의하게 나타났다. 이러한 결과는 식물플랑크톤의 광합성 작용에 의해 수중의 용존산소량이 증가된 결과로 보여진다.

Chl *a* 농도와 영양염류 중 암모니아성질소( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) 농도와의 상관계수는 (-)0.239이며, 분산분석 결과 chl *a* 농도가  $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  미만인 그룹에서 암모니아성질소 농도의 평균이 가장 높았으며, chl *a* 농도가  $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  이상인 그룹에서 암모니아성질소 농도의 평균이 가장 낮은 것으로 나타나 (-)의 연관성이 유의하게 나타났다. 그러나 질산성질소( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) 농도는 chl *a* 농도와 상관성이 없었으며, 분산분석 결과에서도 유의성을 나타내지 않았다. 이는 조류 생장의 질소원으로서 암모니아성질소가 주요 영양분임을 나타내는 것으로 낙동강 담수조류의 실내배양에서 낙동강의 중·하류 구간의 식물플랑크톤 증식시 암모니아성질소의 농도는 지속적으로 감소하는 반면, 질산성질소 농도는 거의 변동이 없었다는 실험결과와 일치하였다(조와 신 1997).

Chl *a* 농도와 총질소(T-N), 총인(T-P) 농도와의 상관성은 없었으며, 분산분석 결과에서도 유의성이 없었다. 이는 낙동강 중·하류의 영양염류 농도가 이미 호수의 영양상태 분류에서 과영양 상태(hypereutrophic state)인 총질소  $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 총인  $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 을 훨씬 초과하여 더 이상 총질소와 총인은 조류생장의 제한요인으로 작용하지 못한 것으로 판단된다(Forsberg and Lyding 1980). 특히, 조사 기간 동안 연중 N:P 비가 16 이상으로 상회하여, 이미 질소성분은 과잉 공급상태인 것으로 판단된다(Hamilton and Preslan 1970).

인산염인( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) 농도는 chl *a* 농도와 (-)0.649의 높은

상관관계를 가지며, 분산분석 결과에서도 chl *a*의 농도가  $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  미만인 그룹에서 인산염인 농도의 평균이 가장 높았고, chl *a* 농도가  $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  이상인 그룹에서 인산염인 농도의 평균이 가장 낮은 것으로 나타나 (-)의 상관성이 높았다. 이러한 결과는 인산염인이 식물플랑크톤 증식시 영양물질로 이용되어 감소한 것으로 판단되며, 조류의 지수적 증가로 암모니아성 질소와 인산염인이 조류체내로 흡수되어 농도가 현저히 감소되었기 때문일 것으로 생각된다(조와 신 1996). 또한 인산염인 농도와 암모니아성질소 농도가 다른 영양염류와는 달리 chl *a* 농도와 (-)의 상관성을 보이는 것은 인산염인과 암모니아성질소는 식물이 쉽게 이용할 수 있는 형태로서 식물플랑크톤 등 수중 식물의 증가에 따라 식물체내로 쉽게 변환이 이루어지기 때문이라고 생각한다(Kappers et al. 1980). 더욱이 chl *a* 농도와 인산염인 농도와의 상관계수가 (-)0.649로 암모니아성질소 농도와의 상관계수 (-)0.239보다 매우 높은 것으로 보아, 낙동강에서의 식물플랑크톤 대발생은 암모니아성 질소보다는 인산염인이 상대적으로 더욱 중요한 요인이라는 연구와도 일치한다(Schindler et al. 1971; 송 등 1995).

### 4) 댐방류량

우리나라의 하천이나 호수의 수질은 강수량이나 유량과도 밀접한 관계를 보이고 있기 때문에(전 1996), 유량에 영향을 미칠 것으로 판단되는 낙동강 수계의 상류지역 댐들의 방류량과 식물플랑크톤생성량을 조사하였다.

남강댐 방류량과 chl *a* 농도와의 상관관계는 (-)0.280이며, 분산분석 결과에서 chl *a* 농도가  $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  미만인 그룹에서 남강댐 방류량의 평균이 높게 나타났고 그 외 집단에서는 유의성을 보이지 않았다. 안동댐 방류량과 chl *a* 농도와의 상관계수는 (-)0.228이며, chl *a* 농도가  $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  미만인 그룹에서 안동댐 방류량의 평균이 가장 높게 나타났고 chl *a* 농도가  $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  이상인 그룹에서 안동댐 방류량의 평균값이 낮은 것으로 나타나 (-)의 연관성이 유의하게 나타났다. 그러나 남강댐과 안동댐과는 달리 합천댐과 임하댐의 방류량은 chl *a* 농도와 낮은 상관관계로서 임하댐 방류량과는 (-)0.089, 합천댐과는 (-)0.149이며, 분산분석 결과 chl *a* 농도가  $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  미만인 그룹에서 합천댐 방류량과 임하댐 방류량의 평균이 가장 높게 나타났고, 그 외 집단에서는 유의성을 보이지 않았다.

위의 결과로 볼 때 상류댐 방류로 인하여 하천의 유량이 증가되면 영양물질의 희석, 식물플랑크톤량의 희석 등으로 인해 식물플랑크톤의 농도가 낮아짐을 알 수 있었다. 특히, 남강댐, 안동댐 방류량은 낙동강 부영양화와 관계가 깊은 것으로 나타났다. 식물플랑크톤의 생물량이 현저히

**Table 5.** Pattern matrix between environmental factors affecting concentration of chlorophyll *a* at Namji in the Nakdong River

Variables	Component				
	1	2	3	4	5
Water temperature	-0.050	-0.940	0.114	-0.037	0.110
Water level	-0.793	0.159	0.122	0.360	0.257
pH	0.696	0.105	0.398	-0.115	-0.391
Turbidity	-0.700	-0.101	0.478	-0.025	0.202
Conductivity	0.738	0.106	0.315	-0.360	-0.047
Alkalinity	0.800	0.021	0.175	-0.334	-0.052
KMnO <sub>4</sub> consumption	-0.173	-0.046	0.893	-0.102	0.190
COD	0.175	-0.026	0.929	-0.158	0.031
BOD	0.547	0.075	0.624	-0.211	-0.257
DO	0.338	0.809	0.077	-0.027	-0.321
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-0.035	0.714	-0.052	-0.149	0.352
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.072	0.912	0.039	-0.070	-0.036
T-N	0.072	0.325	0.186	-0.272	0.492
T-P	-0.112	-0.125	0.247	-0.024	0.796
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	-0.238	-0.087	-0.200	0.206	0.769
Andong-dam discharge rate	-0.147	-0.097	-0.169	0.674	0.174
Imha-dam discharge rate	-0.117	-0.075	-0.019	0.883	-0.052
Hapcheon-dam discharge rate	-0.267	-0.026	-0.147	0.759	-0.102
Namgang-dam discharge rate	-0.791	-0.117	-0.078	-0.006	-0.090

증가하기 시작할 때 남강 및 안동댐의 방류량을 늘리는 것이 이들의 대발생을 감소 또는 중단시킬 수 있는 방안으로 여겨진다.

#### 4. 수질 환경요인들의 요인분석

남지 지점에서 조사된 19개의 수질환경요인에 대한 자료를 이용하여 요인분석을 실시하여 추출된 5개 요인과 수질 환경요인의 관계를 설명하기 위해 회전시킨 결과는 Table 5와 같다. 제1요인은 취수 수위, pH, 탁도, 전기전도도, 알카리도, 남강댐 방류량과 높은 인자부하량을 보이고 있으며, 이들은 취수 수위(수량수리인자)와 관련 있는 특징을 보였다. 제2요인은 수온, DO, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N과 높은 인자부하량으로 수온과 상관성이 높은 것으로 보이며, 제3요인은 KMnO<sub>4</sub> 소비량, COD, BOD와 높은 인자부하량으로 '유기물인자'와 상관성이 높은 것으로 보여진다. 제4요인은 안동댐, 합천댐, 임하댐 방류량과 높은 인자부하량으로 '상류댐 방류량인자'와 관련성이 있는 것으로 보이며, 제5요인은 T-N, T-P, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P와 높은 인자부하량으로 '영양염류인자'와 상관성이 높은 것으로 보인다. 특히, 남강댐 방류량은 '상류댐 방류인자'가 아닌 '수량수리인자'로 분류된 것은 남강댐의 방류는 다른 댐과는 달리 취수원에 도달하는 시간이 짧아 물량 손실량이 적으며, 집중 강우시 방류량이 상대적으로 매우 높아 본 취수원의 수량에 미치는 영향력이 높은 것에 기인하는 것으로 사료된다.

#### 5. 부영양화에 대한 회귀모형개발

식물플랑크톤 생체량(chl *a* 농도)에 대한 예측모형을 개발하기 위해 종속변수를 식물플랑크톤 생체량으로 하고, 요인분석에서 얻은 5개의 요인점수(Table 6)를 독립변수로 하여 선형회귀분석을 실시하였다.

##### 1) 단계적 회귀모형(Stepwise regression model)

회귀분석을 실행한 결과, 독립변수들 간에 관련성이 있다고 판단되기 때문에 단계적 회귀분석 방법을 통하여 중요한 변수들만을 선택하였다. 분석결과 식물플랑크톤의 생체량을 나타내는 chl *a* 농도의 추정 모형은 아래와 같다.

$$[Y=42.923+(18.637 \times \text{요인3})+(-17.147 \times \text{요인1})+(-12.095 \times \text{요인5})+(-4.828 \times \text{요인4})]$$

$$Y(\text{종속변수}): \text{chl } a \text{ (mg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)}$$

여기서 요인 3의 계산 값은 아래와 같으며, Table 6의 요인별 점수를 참고로 하여 나타내었다.

$$[(\text{요인3})=(0.013 \times \text{수온})+(0.111 \times \text{수위})+(0.144 \times \text{pH})+(0.203 \times \text{탁도})+(0.062 \times \text{전도도})+(0.004 \times \text{알카리도})+(0.349 \times \text{KMnO}_4 \text{ 소비량})+(0.352 \times \text{COD})+(0.222 \times \text{BOD})+(0.053 \times \text{DO})+(-0.033 \times \text{NH}_4^+\text{-N})+(0.030 \times \text{NO}_3^-\text{-N})+(0.028 \times \text{T-N})+(0.070 \times \text{T-P})+(-0.075 \times \text{PO}_4^{3-}\text{-P})+$$



**Table 6.** Scores matrix between environmental factors affecting concentration of chlorophyll *a* at Namji in the Nakdong River

Variables	Component				
	1	2	3	4	5
Water temperature	-0.062	-0.325	0.013	-0.041	0.043
Water level	0.182	0.021	0.111	0.081	0.016
pH	-0.158	-0.010	0.144	0.108	-0.112
Turbidity	0.249	0.031	0.203	-0.079	-0.036
Conductivity	-0.192	-0.023	0.062	-0.018	0.078
Alkalinity	-0.231	-0.060	0.004	-0.013	0.093
KMnO <sub>4</sub> consumption	0.075	0.019	0.349	0.043	0.037
COD	-0.184	-0.001	0.352	0.076	0.008
BOD	-0.101	-0.006	0.222	0.060	-0.079
DO	-0.003	0.259	0.053	0.071	-0.120
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.030	0.249	-0.033	-0.053	0.189
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0.040	0.310	0.030	0.020	0.002
T-N	-0.036	0.107	0.028	-0.075	0.270
T-P	-0.104	-0.026	0.070	0.048	0.421
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	-0.106	-0.008	-0.075	0.095	0.414
Andong-dam discharge rate	-0.125	-0.003	0.022	0.355	0.123
Imha-dam discharge rate	-0.131	0.013	0.121	0.492	0.009
Hapcheon-dam discharge rate	-0.032	0.052	0.060	0.369	-0.052
Namgang-dam discharge rate	0.324	0.021	0.053	-0.164	-0.205

**Table 7.** Regression coefficients for concentration of chlorophyll *a* at Namji in the Nakdong River by Stepwise regression method

Model	B	S. E	Beta	t	p-Value
Constant	42.923	1.249		34.374	
Factor1	-17.147	1.252	-0.519	-13.694	0.000**
Factor3	18.637	1.252	0.564	14.885	0.000**
Factor4	-4.828	1.252	-0.366	-9.660	0.000**
Factor5	-12.095	1.252	-0.146	-3.856	0.000**

\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $P < 0.01$ .

$(0.022 \times \text{안동댐방류량}) + (0.121 \times \text{임하댐방류량}) + (0.060 \times \text{합천댐방류량}) + (0.053 \times \text{남강댐방류량})$

단계적 회귀분석모형의 회귀계수(비표준화 계수)와 베타계수(표준화 계수) 회귀계수에 대한 t통계량 값과 유의확률을 Table 7에 나타내었다.

Table 7에서 요인 2를 제외한 회귀계수(요인 1, 3, 4, 5)들은 유의확률이 0.05보다 작아 유의하였다. 베타계수로 본 독립변수들의 상대적인 영향력은 요인 3(유기물)이 가장 크고, 다음이 요인 1(수량수리), 요인 4(댐 방류량), 요인 5(영양염류) 순이었으며, 요인 1과 요인 4, 요인 5는 음의 방향으로 종속변수(chl *a* 농도)에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 추정된 회귀모형의 타당성에 대해 분산분석표를 통해 검정한 결과 F 통계량은 129.318(유의확률 0.000)로서 매우 유의하고, R<sup>2</sup>는 0.742로 설명력이 좋은 것

으로 나타났다(서 2001).

## 2) 다른 회귀모형 (alternative stepwise regression model)

단계적 회귀분석에 의해 회귀모형을 유도하였으나, 비록 그 모형이 유의하고 설명력이 좋다하더라도 실제로 적용하기에 매우 복잡하다. 따라서 요인분석 결과 각 요인을 주로 나타내는 변수만을 합해서 요인 변수를 만든 다음, 이 변수를 사용하여 회귀모형을 개발하였다. 이 때 변수들의 단위가 크게 다르기 때문에, 각 변수들을 표준화시켜서 만든 표준화변수 값을 사용하였다(원과 정 2001). 식물플랑크톤의 생체량을 나타내는 chl *a* 농도의 추정모형은 아래와 같다.

$$[Y = 37.295 + (7.326 \times Z_{\text{요인3}}) + (-2.704 \times Z_{\text{요인1}}) + (-2.341 \times Z_{\text{요인5}})]$$

**Table 8.** Regression coefficients for concentration of chlorophyll *a* at Namji in the Nakdong River by alternative stepwise regression method

Model	B	S.E	Beta	t	p-Value
Constant	39.946	1.473		14.716	0.000**
Factor1	-2.704	0.331	-0.388	12.472	0.000**
Factor3	7.326	0.587	0.573	27.120	0.000**
Factor5	-2.341	0.719	-0.148	-8.166	0.000**

\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $P < 0.01$ .

Y(종속변수): chl *a* ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

[Z요인 1 = Z수위 + ZpH + Z탁도 + Z전기전도도 + Z알카리도 + Z남강댐방류량]

[Z요인 3 = ZKMnO<sub>4</sub> 소비량 + ZCOD + ZBOD]

[Z요인 5 = ZT-N + ZT-P + ZPO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P]

$$Z = (x - \bar{x}) \cdot s^{-1}$$

여기서 Z수위는 수위를 표준화한 값이다.

(x: 데이터 값,  $\bar{x}$ : 데이터의 평균 s: 데이터의 표준편차)

표준화시킨 모형의 회귀계수(비표준화 계수)와 베타계수(표준화계수), 회귀계수에 대한 t 통계량 값과 유의확률은 Table 8에 나타내었다.

Table 8에서와 같이 5개의 요인 중 유의확률이 0.05보다 작은 3개의 요인만 유의하였다. 베타계수로 본 종속변수(식물플랑크톤 생체량)에 대한 독립변수들의 상대적인 영향력은 요인 3(유기물)이 가장 크고, 다음이 요인 1(수량수리), 요인 5(영양염류) 순이다. 수량수리인자와 영양염류인자는 음의 방향으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 추정된 회귀모형의 타당성에 대한 검정으로 분산분석표를 통해 검정한 결과 F 통계량은 116.413(유의확률 0.000)로서 매우 유의하고, R<sup>2</sup>는 설명력이 좋은 0.670으로 나타났다(서 2001).

현재까지 이러한 chl *a* 농도의 추정모형에 대한 보고는 윤(1992), 국립환경연구원(1997)이 있었으며, 이들의 연구에서는 수온, 암모니아성질소 및 질산성질소 등 몇 가지의 환경요인만을 이용하여 모형을 유도하였으나, 본 연구에서는 부영양화에 영향을 줄 것으로 생각되는 19개의 요인들을 이용함으로써 보다 다양한 환경변동에 따른 chl *a* 농도를 추정할 수 있으리라 판단된다. 따라서 이 추정모형을 이용하여 어떤 환경요인이 낙동강 부영양화에 더 중요한 영향을 미치는가를 판별하여 부영양화 사전제어에 활용할 수 있을 것이다.

**결 론**

낙동강 수계 남지 지점의 부영양화에 미치는 여러 가지

수질 환경요인 들의 영향을 종합적으로 분석하기 위하여 1999년 1월 1일부터 2000년 9월 30일까지 시료를 채취·분석하여 부영양화의 지표가 되는 chl *a* 농도와 관계를 통계적 방법으로 분석하였다. chl *a* 농도와 유의성이 높은 수질 환경요인 인자를 선정하고 이의 변동에 따른 부영양화의 정도를 예측할 수 있는 모형을 유도하기 위해 수행한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

조사기간 동안 chl *a* 농도는 연평균 35.5  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 으로 식물플랑크톤 생체량이 높은 상태를 유지하고 있었으며, 낙동강 중·하류의 남지 지점은 이미 과영양 단계(hypereutrophic state)에 도달한 것으로 나타났다. 식물플랑크톤 분포는 대부분 규조류에 속한 종(*Stephanodiscus* sp., *Aulacoseira granulata* var. *angustissima*)이 전체 분류군 중에서 가장 큰 비율을 차지하는 것으로 나타났다.

Chl *a* 농도와 수질 환경요인과의 상관분석 및 분산분석을 실시한 결과 chl *a* 농도와 양의 상관성이 높은 인자는 BOD > pH > COD > KMnO<sub>4</sub> 소비량 > DO > 전기전도도 > 알카리도 순이었고, 음의 상관성이 높은 수질환경요인은 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P > 취수수위 > 남강댐 방류량 > NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N > 안동댐 방류량 > 합천댐 방류량 순이었다.

Chl *a* 농도에 미치는 수질 환경요인의 영향 정도에 따른 요인분석 결과 5개의 요인으로 분류할 수 있었다. 제1요인은 취수 수위, pH, 탁도, 전기전도도, 알카리도, 남강댐 방류량이고, 제2요인은 수온, 용존산소량(DO), 암모니아성질소 농도(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N), 질산성질소 농도(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)이며, 제3요인은 KMnO<sub>4</sub> 소비량, COD, BOD, 제4요인은 안동댐 방류량, 합천댐 방류량, 임하댐 방류량이고, 제5요인은 총질소(T-N), 총인(T-P), 인산염인(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)으로 분류되었다.

요인분석 결과를 바탕으로 수질 환경요인의 변동에 따른 부영양화의 변화를 예측할 수 있는 모형을 회귀분석방법으로 다음과 같이 유도하였다.

1. 요인분석으로 산출된 요인점수들에 의한 회귀모형:  

$$[\text{chl } a(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}) = 42.923 + (18.637 \times \text{요인3}) + (-17.147 \times \text{요인1}) + (-12.095 \times \text{요인5}) + (-4.828 \times \text{요인4})]$$

2. 변수들의 합으로 만든 요인변수에 의한 회귀모형:

$[chl\ a(mg \cdot m^{-3}) = 37.295 + (7.326 \times Z\text{요인 } 3) + (-2.704 \times Z\text{요인 } 1) + (-2.341 \times Z\text{요인 } 5)]$ 로 나타났다.

## 참고문헌

강병서, 김계수. 2001. SPSS와 인터넷을 이용한 현대통계분석. 무역경영사. 603 pp.

국립환경연구원. 1993. 호소 만입부에서의 조류 대량증식 제어기술 개발(Ⅲ). pp. 65-67.

국립환경연구원. 1997. 호수의 조류대발생 예측기법에 관한 연구-대청호를 중심으로. 국립환경연구원보. 19: 419-429

금강수질검사소. 1995. 대청호 수질보전 종합대책에 관한 연구 (I) 국립환경연구원보. 17: 293-314.

김범철, 김동섭, 황길순, 최광순, 허우명, 박원규. 1996. 부영양화한 낙동강 수계에서 유기물오염에 대한 조류1차생산의 기여도. *Algae* 11: 231-237.

노형진. 2001. 한글 SPSS 10.0에 의한 조사방법 및 통계분석. 형설출판사 660 pp.

박재림. 1999. 낙동강 하류에서 식물플랑크톤 생산력과 수질변화의 관계. *한국환경과학회지* 8: 101-106.

서의훈. 2001. SPSS 10.0 한글판을 이용한 SPSS 통계분석. 자유아카데미. 335 pp.

송교욱, 서인숙, 신성교, 이석모, 박청길. 1995. MBOD법에 의한 낙동강의 조류증식 제한인자 추정. *한국환경과학회지* 4: 469-479.

신성교. 1996b. 자생 BOD를 고려한 낙동강의 수질관리, 부산수산대학교 대학원 박사학위 논문.

신성교, 박청길, 송교욱. 1998. 주성분분석을 이용한 낙동강하구해역의 수질평가. *한국환경과학회지* 7: 171-176.

신성교, 백경훈. 1999. 통계분석법을 이용한 낙동강 수질특성 평가. 부산시 수질개선대책 세미나 pp. 115-131.

신윤근. 1996a. 섬강 상류의 식물플랑크톤상 연구. *한국육수학회지* 29: 143-157.

신재기. 1998. 낙동강 부영양화에 따른 담수조류의 생태학적 연구. 인제대학교 대학원 박사학위논문.

오영민, 백성욱. 1984. 주성분분석을 이용한 하천수질 자료의 분석. *대한환경과학회지* 6: 56-62.

원태연, 정성원. 2001. 한글SPSS10K 통계조사분석. SPSS아카데미. 520 pp.

윤양호. 1992. 다변량분석에 의한 여수연안해역 식물플랑크톤 군집의 변동특성. *한국수질보전학회지* 8: 141-149.

이문호. 1995. 조류에 의한 수질조사법. *동화기술*. 205 pp.

이진애. 1999. 낙동강 수계의 남조류 군집특성. 부산시수질개선대책 세미나. pp. 17-39.

장주형. 1999. 다변량 해석에 의한 낙동강 하구해역 수질특성의 평가. 부경대학교 석사학위논문.

전상호. 1996. 한국의 주요 호수 및 강물의 오염 특징과 개선 방안, 수질개선 차원의 호수, 강의 퇴적물 처리를 위한 새로운 기술적 접근, 국회환경포럼, pp. 1-14.

전상호, 박용안. 1989. 소양호 퇴적물에 함유된 인의 존재 형태와 용출가능성에 대하여. *한국육수학회지* 22: 262-271.

정준. 1993. 한국의 담수조류도감. 아카데미서적. 496 pp.

정충영, 최이규. 2001. 한글 SPSS 10.0 SPSSWIN을 이용한 통계분석. 무역경영사. 435 pp.

조경제, 신재기. 1996. 낙동강 담수조류 N, P 요구도 분석을 위한 bioassay. *한국육수학회지* 29: 263-273.

조경제, 신재기. 1997. 낙동강 중·하류에서 무기 N.P 영양염의 변동. *한국육수학회지* 30: 85-95.

조규송 외 10인. 1991. 호수환경조사법. 동화기술. pp. 159-177, 235-257.

최규철. 1994. 수질오염공정시험법주해. 동화기술. 578 pp.

하경, 김현우, 주기재. 1995. 낙동강 하류 (물금)의 식물성 플랑크톤 천이 기작, 인제대학교 환경연구소 제4회 심포지움발표논문집. 낙동강 수질 부영양화와 조류, 인제대학교 환경연구소 기초과학 연구소, pp. 21-27.

APHA. AWWA WPCF. 1989. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 17th ed. APHA. Washington, DC.

Forsberg C. and Ryding S.O. 1980. Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste receiving lakes, *Arch Hydrobiol.* 89: 189-207.

Hamilton R.O. and Preslan J. 1970. Observation on heterotrophic activity in the eastern tropical Pacific. *Limnol. Oceanog.* 15: 395-401.

Harper D. 1992. *Eutrophication of freshwater*. Chapman and Hall. 327 pp.

Heinle D.R. 1969. Effects of elevated temperature on zooplankton. *Chesapeake Sci.* 10: 186-209

Joo G.J., Kim H.W., Ha K. and Kim J.K. 1997. Long-term trend of the Eutrophication of the lower Nakdong River. *Korean J. Limnol.* 30: 472-480.

Kappers F.I. 1980. The Cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* and the nitrogen cycle of the hypertrophic lake Brille (The Netherlands). In: Barica J., Mur L.R. and Junk W. (eds), *Developments in Hydrobiology*. Vol. 2, pp. 37-48.

OECD. 1982. *Eutrophication of Waters: Monitoring, Assessment and Control*, Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris, France, 154 pp.

Schindler D.W., Armstrong F.A.J., Holmgren S.K. and Brunskill G.J. 1971. Eutrophication of Lake 227, experimental lake area, Northwestern Ontario Canada, by addition of phosphate and nitrate. *J. Fish. Res. Bd. Canada* 28: 1763-1782.

Wafer M.V.M., Le Corre. P.I. and Birrien J.I. 1983. Nutrients and primary production in permanently well-mixed temperate coastal water. *Estuarine Coastal and Shelf Sci.* 17: 431-446

Yamagishi T. and Akiyama M. 1988. *Photomicrographs of the freshwater algae*. Uchida Rokakulo, Tokyo. Volume 1-12.