

수원 일월저수지에서 *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing 수화현상 시 환경요인들의 변화

김지은 · 박정원¹ · 조기안² · 김시균*

(서경대학교 화학생명공학과, ¹국립공원연구원 유류오염연구센터, ²초당대학교 환경보건학과)

Variations of Environmental Factors during Water Bloom by *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing in Ilwol Reservoir, Suwon. Kim, Ji-Eun, Jung-Won Park¹, Ki-An Jo² and Si-Kyoon Kim* (Division of Chemical & Biological Engineering, Seokyeong University, Seoul 136-704, Korea; ¹National Park Research Institute, Oil Pollution Research Center, Taean, Chungcheongnam-do 357-914, Korea; ²Department of Environment Health, Chodang University, Muan, Jeollanam-do 534-701, Korea)

Variations in environmental factors were followed in Ilwol reservoir, Suwon, during bloom of *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing, Cyanophyta from August to October, 2011. *M. aeruginosa* dominated the water column throughout the investigation period. The water temperature varied from 25.7°C to 28.4°C, pH 8.40 to 11.17, COD_{Cr} 4.25 to 72.00 mg L⁻¹, electrical conductivity 333.1 to 749.0 µg cm⁻¹, and Chl-*a* 22 to 185 mg L⁻¹. In particular, the high levels of COD_{Cr} is likely indicate high contribution of autochthonous organic matters in the reservoir. TN varied from 28.86 to 56.75 mg L⁻¹, TP 0.20 to 1.24 mg L⁻¹, Fe 0.11 to 1.05 mg L⁻¹, and Si 3.13 to 7.46 mg L⁻¹. These increases imply constant accumulation in Ilwol reservoir, and reinforce the idea of autochthonous organic matters input in the reservoir. The Korea Trophic Status Index (TSI_{KO}) varied from 37.19 to 147.22. Trophic levels varied from mesotrophic to hypertrophic level, and differed spatio-temporally. Therefore, it is concluded that TSI_{KO} is useful for analyzing trophic status of reservoirs.

Key words : water bloom, environmental factors, TSI_{KO}, Ilwol reservoir

서 론

도시 지역 주변에 위치한 농업용 저수지는 도시의 확장으로 인해 그 기능이 상실되고, 인구집중으로 인한 도시의 확장과 도심을 흐르는 하천수의 유입으로 수질은 질적으로 매우 열악한 상태를 보여 왔다. 그러나 삶의 질

이 향상됨에 따라 도심 내에 위치한 저수지도 쾌적한 환경으로 변화가 요구되었다. 최근 저수지 주변의 환경 정화 및 정리는 도시인들의 삶의 질을 향상시키는데 일조하고 있고 저수지 자체의 기온 저감 역할이 부각되어 휴식공간의 역할을 담당하고 있다(Han *et al.*, 2002; Zheng *et al.*, 2010). 이와 같이 도시민들은 도심 내에 위치한 저수지의 주변 환경 변화에 대해서는 많은 관심을 가지고

* Corresponding author: Tel: +82-10-6226-1954, Fax: +82-2-940-7189, E-mail: skyoon@skuniv.ac.kr

질적인 변화를 추구하였으나, 저수지 내로 유입되는 하천 수질의 문제점에 대해서는 무관심해 왔다. 저수지 내로 유입되는 하천수는 대부분 도심을 가로질러 유입되기 때문에 하천수가 정수 과정을 거쳤다 하더라도 많은 유기물을 함유하고 있고, 또한 하천 주변의 정수를 거치지 않은 가정하수가 유입되어 저수지 내로 혼합된다. 따라서 저수지의 수질은 유기물이 높거나 영양물질이 다량으로 누적되는 부영양화를 초래한다(Cho *et al.*, 2012).

부영양화는 호수의 발달과정에서 아주 긴 시간이 걸리는 자연적인 현상이나, 저수지같이 인공적으로 담수화된 곳에서 영양 물질이 증가하는 부영양화는 저수지 주변에서 비점오염원과 하천수 유입으로 빠른 시간 내에 나타난다. 수체가 질소와 인 같은 영양염 농도가 증가되어 부영양화되면 수체 내에 서식하는 소수의 식물플랑크톤이 대량 증가하는 수화현상이 발생함으로써 저수지의 경관과 수질관리에 많은 문제점을 야기한다(Takamura and Watanabe, 1987). 저수지 내 부영양화에 따른 수화현상의 발생은 미관적·경관적으로 도시민들에게 불쾌감을 초래하므로 이를 개선하기 위한 많은 비용을 부담하게 된다. 최근 국내 저수지에서 발생하는 수화현상 원인 중은 대부분 남조류인 것으로 파악되고 있다. 따라서 남조류 대 발생에 대한 생태, 생리적 연구, 질소와 인과 같은 영양염과의 관계, 미량원소와 수화현상과의 상관관계, 그리고 독성연구까지 국내·외적으로 연구가 활발하게 진행되었다(Miyazaki *et al.*, 1989; Watanabe *et al.*, 1991; Oh and Kim, 1995; Shin and Cho, 1997; Park and Kwon, 1998).

수화현상은 부영양화와 연계되어 있어 저수지 관리를 과학적으로 하기 위해서는 수질의 부영양화에 대한 정량·정성적 분석이 필요하게 되었고, 현재 국내에서 적용하고 있는 호소 부영양화 평가는 주로 TSI, LTSI 방법을 사용하였다(Harper, 1992; Heo *et al.*, 2000). 국내에 적용하여 활용하고 있는 호소 부영양화 평가인 TSI, LTSI 방법은 비점오염물 유입과 같은 외부기원 유기물의 기여도가 낮은 자연 호를 대상으로 도출된 방법이다(Aizaki *et al.*, 1981; Yoshimi, 1987; Yang and Dickman, 1993). 반면 국내의 호소는 인공호가 대부분이므로 외부기원 유기물의 기여도가 매우 크다. 따라서 인공호가 대부분인 국내의 호소에 자연호를 대상으로 도출된 부영양화 평가 방법을 적용하기에는 한국 실정에 맞지 않으므로, 한국형 부영양화 지수 개발이 꾸준히 제기되었다(Kim *et al.*, 2012).

본 연구는 *Microcystis aeruginosa* Kütz에 의한 수화현상이 지속되는 기간에 물리 및 화학적 환경요인들의 변화상과 식물플랑크톤의 군집변동을 조사하여 수화가 발

생된 지역에 수질관리를 위한 자료를 확보하고, 현재 개발된 한국형 부영양화 지수를 본 연구 대상지에 적용하여 향후 본 한국형 지수의 활용을 위한 자료 축적의 일환으로 실시하였다.

재료 및 방법

1. 조사지 개황

경기도 수원시 천천도에 위치한 일월저수지는 수원 서호와 함께 조선조 정조대왕이 수원 화성을 축성했을 때 가뭄 극복을 위해 만든 것으로 일명 '만석거(萬石渠)'로도 불린다. 1970년대 초에는 이들 저수지 주변에는 백로, 왜가리, 나비, 청둥오리, 너구리 등 생태계가 풍부했다.

과거에는 광주군 일왕면과 수원군 반월면의 경계 지점으로서 두 지역의 농업용수로 사용되었으나 주변이 도시화 되면서 2005년 5월 공원으로 조성되었다. 일월저수지의 북쪽으로 울전천이 유입되며, 이 저수지에서 시작된 일월천이 남서쪽으로 흘러가 황구지천으로 유입된다. 저수지 둘레는 약 1.9 km, 유역 면적이 277 ha, 저수량은 29만 톤, 만수 면적은 18만 m²이다. 저수지 내에는 환상덩굴, 줄, 달뿌리풀, 미국가막살이, 큰고랭이, 부들 그리고 갈대 같은 식물이 서식하고 있으며 주로 울전천이 유입되는 주변부에 분포하고 있다(Han *et al.*, 2002). 본 연구가 시작되기 전 2010년도까지의 저수지의 수질환경은 COD_{Mn}의 농도가 10 mg L⁻¹ 이상으로 상당히 오염이 진행되고 있는 상황이었다.

2. 시료 채수

본 조사는 경기도 수원시에 위치한 일월저수지(126° 58' 21.13"E, 37° 17' 23.74"N)에 3개의 정점을 선정하여 2011년 8월부터 10월까지 매주 1회, 총 8회에 걸쳐 채수하였다(Fig. 1). 정점 1(St. 1: 126° 58' 24.93"E, 37° 17' 17.01"N)은 수원시의 도심을 가로 지른 하천수와 저수지 내 수체가 서로 만나 합쳐지는 지점으로 하천수의 영향을 가장 많이 받는다. 정점 2(St. 2: 126° 58' 31.44"E, 37° 17' 09.80"N)는 수체가 거의 정지되어 있는 지점으로 주변의 농경지가 분포한다. 정점 3(St. 3: 126° 58' 19.31"E, 37° 17' 10.31"N)은 저수지 내 물이 유출되는 지점이다.

3. 환경요인 조사방법

조사 지역의 강우량 자료는 기상청의 자료를 인용하였으며(http://www.kma.go.kr/weather/observation/past_

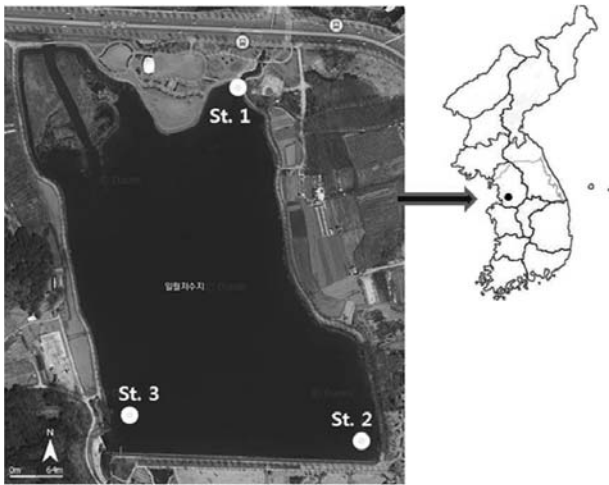


Fig. 1. The location of sampling points in Ilwol reservoir.

cal.jsp?stn=119&yy=2011&mm=8&obs=1&x=16&y=8), 수질분석을 위한 시료는 멸균 채수병을 이용하여 수심 30 cm에서 채수하였다. 수질환경요인 중 pH와 수온, 전기전도도는 다항목측정기(model 1230, ORION)를 이용하여 현장에서 측정하였다. COD_{Cr}, 총 질소(Total Nitrogen; TN), 총 인(Total phosphorus; TP), 총 철(Total Iron; Fe), Silica (SiO₂) 등은 HACH社의 DR/2010을 이용하여 측정하였다. Chlorophyll *a*는 흡광광도법에 준하여 측정하였다(APHA, 1985).

4. 식물플랑크톤 조사

정량분석을 위하여 시료는 수심 30 cm에서 1L 멸균 채수병을 이용하여 채수하였다. 채수한 시료는 즉시 실험실로 이동하여 Lugol's solution과 Formalin으로 고정하였다. 고정한 시료는 상온에서 72시간 이상 침전시킨 후, 상등액을 제거하여 100 mL로 농축하였다. 농축된 시료는 충분히 혼든 후 1 mL을 취하여 Sedwick-Rafter Chamber에 골고루 분산시킨 후 단위 부피당 세포수(cells mL⁻¹)을 현존량으로 계산하였다. *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing의 개체수 산정은 먼저 400배 하에서 군체의 크기를 모니터상에서 측정한 후, 측정된 군체 내 세포 수는 모니터상에서 산정하였다(Nikon ELIPSE 80i, Japan). 이어서 생물현미경 200배하에 산정된 군체는 세포수로 다시 환산하였다. 식물플랑크톤 중 동정은 녹조류 중 녹색소구체목은 Komarek and Fott (1983), 남조류는 Komarek and Anagnostidis (2001), 규조류는 Krammer and Lange-Bertalot (1986, 1988, 1991a, 1991b), 그 외 분류군은 John *et al.* (2002)을 참고하였다.

Table 1. Classification of the Korean trophic state index (TSI_{KO}).

TSI _{KO} value	Classification of TSI _{KO}
TSI _{KO} ≤ 30	Oligotrophic
30 < TSI _{KO} ≤ 50	Mesotrophic
50 < TSI _{KO} ≤ 70	Eutrophic
70 < TSI _{KO}	Hypertrophic

5. 영양단계 분석

일월저수지에 적용한 영양단계 분석은 금강 수계의 호소를 대상으로 평가한 한국형 부영양화 지수 (TSI_{KO}) 법을 적용하였다(Kim *et al.*, 2012). 한국형 부영양화 지수 (TSI_{KO}) 법은 COD, Chl-*a*, T-P 등의 항목을 이용하여 각 항목의 부영양화 지수를 계산한 후, 이 값을 하나의 식에 대입하여 값을 나타내는 것이다. 이 값을 바탕으로 4단계의 영양단계로 구분하여 호소의 영양상태를 평가하였다 (Table 1).

각 항목의 부영양화 지수 계산식

$$\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{COD}) = 5.8 + 64.4 \log(\text{COD mg L}^{-1}) \quad (1)$$

$$\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{TP}) = 114.6 + 43.3 \log(\text{TP mg L}^{-1}) \quad (2)$$

$$\text{TSI}_{\text{KO}}(\text{Chl-}a) = 12.2 + 38.6 \log(\text{Chl-}a \text{ mg m}^{-3}) \quad (3)$$

각 항목의 부영양화 지수 값이 산출되면 종합 TSI_{KO} 값은 다음의 식에 의해 계산한다.

$$\begin{aligned} \text{종합 TSI}_{\text{KO}} &= 0.5 \text{TSI}_{\text{KO}}(\text{COD}) + 0.25 \text{TSI}_{\text{KO}}(\text{Chl-}a) \\ &+ 0.25 \text{TSI}_{\text{KO}}(\text{TP}) \end{aligned} \quad (4)$$

결과 및 고찰

1. 물리 화학적인 환경변화

조사 기간 중에 내린 강우량을 보면 8월 중순에 가장 많은 강우량을 보였고, 9월 이후부터는 매우 적었다(Fig. 2). 8월 16일에 102.50 mm로 가장 많은 비가 내렸으며, 8월의 평균 강우량은 32.29 mm로, 9월의 평균은 3.25 mm에 비해 약 9.9배 정도로 많은 비가 내렸다. 강우는 다량의 외부의 유입물질을 포함하여 저수지와 같은 정체된 수역에 모이기 때문에 저수지 내 여러 환경요인들에 증가에 영향을 많이 준다. 본 조사에서 강우량이 가장 많았던 8월 16일의 영향을 받은 8월 19일의 경우 COD는 세 정점에서 모두 증가하여 외부 유기물질의 증가로 판단되나 기타 요인들은 각 정점 별로 증가하기도 하였으나 오히

려 감소하는 경우도 강우량이 여러 환경요인들의 증가에 영향을 준 것에 대해 정확하게 분석하기는 어려웠다.

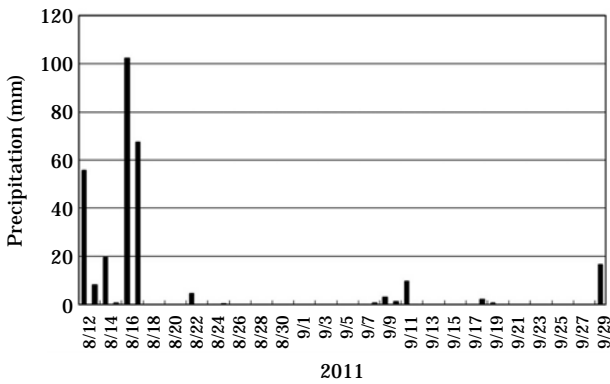


Fig. 2. The change of precipitation at sampling period in Ilwol reservoir.

수온은 월별 평균 22.6~31.0°C의 범위였으며, 조사 기간 동안 10월 5일에 정점 3에서 22.5°C로 가장 낮았고, 9월 2일에 정점 2에서 33.2°C로 가장 높았다(Table 2). 각 정점의 평균 수온은 25.7~28.4°C였으며, 물의 흐름이 대부분 정체되어 있는 정점 2가 정점 1과 3에 비해 약간 높았다. 9월 11일에 세 정점의 수온이 25.0°C 전후로 갑자기 낮아진 원인은 알 수 없다. 세 정점 모두 9월 16일을 기점으로 감소하였으며, 10월 5일부터는 세 정점의 수온이 22.5~22.6°C로 정점간의 차이는 없었다. 수온은 *Microcystis* 속의 현존량 증가에 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있고, 실제로 많은 조사에서 20.0°C부터 현존량이 증가하기 시작하여 25°C부터 급격하게 증가하는 것으로 보고되었다(Kim *et al.*, 1999). 본 조사에서 수온이 많이 감소한 9월 24일부터는 *M. aeruginosa*의 현존량도 감소할 것으로 예상되었으나, 현상 유지하거나 오히려 증가하

Table 2. Conditions of environmental factors of each station in Ilwol reservoir from August to October 2011.

Factors/Stations	8/12	8/19	8/26	9/02	9/11	9/16	9/24	10/05
W.T. (°C)	1	27.0	26.6	28.0	27.7	23.7	27.6	23.8
	2	27.9	28.4	30.5	33.2	25.1	32.6	26.3
	3	24.9	27.2	29.5	32.2	24.2	28.0	22.5
pH	1	—	7.37	8.04	10.27	8.00	8.10	8.27
	2	—	9.12	9.41	9.88	9.26	9.64	10.88
	3	—	8.60	9.72	8.33	9.32	9.66	10.77
COD (mg L ⁻¹)	1	4.0	8.0	4.0	0	3.0	7.0	2.0
	2	39.0	248.0	10.0	39.0	31.0	93.0	29.0
	3	9.0	13.0	6.0	46.0	36.0	23.0	35.0
EC (μS cm ⁻¹)	1	231.0	236.0	1,020.0	920.0	926.0	701.0	693.0
	2	158.0	156.0	185.0	255.0	315.0	423.0	498.0
	3	731.0	154.0	198.0	322.0	328.0	370.0	480.0
TN (mg L ⁻¹)	1	7.0	16.0	5.0	6.0	1.0	147.0	99.0
	2	121.0	30.0	87.0	1.0	46.0	31.0	9.0
	3	92.0	5.0	2.0	9.0	2.0	7.0	5.0
TP (mg L ⁻¹)	1	0.9	0.38	0.02	0.07	0.07	0.01	0.04
	2	2.24	5.80	0.04	0.30	0.33	0.55	0.11
	3	1.46	0.36	0.08	0.23	0.57	0.10	0.03
TN/TP	1	8	42	250	86	14	14,700	2,475
	2	54	5	2,175	3	139	56	82
	3	63	14	25	39	4	70	167
Fe (mg L ⁻¹)	1	0.08	0.27	0.05	0.06	0.03	0.01	0.04
	2	0.83	2.46	0.17	0.67	0.63	2.30	0.61
	3	0.38	0.26	0.17	0.49	0.74	0.31	0.40
Si (mg L ⁻¹)	1	9.62	4.79	8.48	9.27	9.93	4.60	6.82
	2	2.61	2.96	2.15	3.04	4.18	1.75	3.21
	3	2.92	2.33	2.74	2.64	4.12	2.55	4.95
Chl. a (μg L ⁻¹)	1	17.0	69.5	19.6	33.0	12.7	9.5	6.8
	2	245.1	666.6	30.1	71.9	81.2	113.8	107.5
	3	56.3	65.1	36.9	103.5	124.4	69.5	71.1

Table 3. The correlations between standing crops of *Microcystis aeruginosa* and environmental factors ($p < 0.01$).

	pH	EC	COD	TN	TP	Chl- <i>a</i>	Fe	Si
<i>Microcystis aeruginosa</i>	0.51	0.75	0.86	0.17	-0.02	0.14	0.52	0.34

는 것으로 나타나 수온이 22°C 이상이 계속 유지된다면 *M. aeruginosa*의 현존량 감소에는 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

pH는 수계의 탄소원과 관계가 있고, 식물플랑크톤의 광합성 활동에 많은 영향을 받는다. 전 정점에서 평균 8.36~10.22로 측정되었고, 8월 19일에 정점 1에서 7.37로 조사 기간 중 가장 낮았으며, 10월 5일에 정점 2에서 11.17로 가장 높았다(Table 2). 정점 2와 3은 조사 초기에 비해 후반으로 갈수록 높아졌으며, 정점 1은 9월 2일에 갑자기 높아졌다가 이후는 감소하였다. 정점 1에서 9월 11일 이후의 pH는 8.0~8.48 정점 2와 3에서 9월 24일과 10월 5일에 pH가 각각 10.77, 11.17로 매우 높게 관찰되었다. 이 시기에 *M. aeruginosa*의 현존량은 정점 2와 3에서 높은 수준을 유지하고 있는 반면 정점 1은 현존량이 조사되지 않아 *M. aeruginosa*의 활발한 광합성 작용이 정점 2와 3의 pH를 증가시키는데 일조하였을 것으로 판단된다. 실제로 pH와 *M. aeruginosa*의 현존량 증가는 상관관계수($r=0.52$, $p < 0.01$)가 높았다(Table 3).

COD_{Cr}는 월별 평균 6.7~89.7 mg L⁻¹였으며, 9월 2일에 정점 1에서 0 mg L⁻¹이었고, 8월 19일 정점 2에서 248.0 mg L⁻¹ 최대값을 나타냈다(Table 2). 조사 정점별 변화는, 정점 1은 0~8.0 mg L⁻¹, 정점 2는 10.0~248.0 mg L⁻¹, 정점 3은 6.0~46.0 mg L⁻¹으로 정점 1의 값이 정점 2와 3에 비해 낮았다. 그리고 정점 2의 최소값과 최대값은 24.8배, 정점 3은 7.7배 정도의 차이가 나 정점 2의 변화가 매우 심했다. 저수지 내 외부기원 유기물은 주로 유역의 하천에서 기원을 두며, 강우 시에는 초기 강우에 의해 대부분 유입되고 그 이후부터는 더 큰 비가 내려도 유입량은 적다(Kim *et al.*, 1998). 반면 내부생성 유기물은 식물플랑크톤 증·감에 영향을 받고 조류의 대 발생 시 수계에 많은 유기물을 유입시킨 것과 같은 결과를 가져와 수계의 부영양화 정도에 따라 전체 유기물 양을 크게 좌우하는 것으로 알려져 있다(Kwag and Ahn, 1998). 정점 1은 하천수 유입지점이므로 측정된 COD_{Cr} 값은 외부 유입물질과 저수지 내 물질의 값으로 사료되고, 외부 유입물질의 영향을 거의 받지 않는 정점 2와 3의 값은 내부생성 유기물로 파악된다. 정점 1의 값은 평균 4.25 mg L⁻¹이고 정점 2는 평균 72.0 mg L⁻¹, 그리고 정점 3은 평균 24.88 mg L⁻¹로 정점 2와 3의 값은 강우 시 외부 물질

의 이입 등을 고려하면 전적으로 내부생성 유기물이라 단정할 수는 없으나, 정점 2는 정점 1에 비해 그 값이 16.9배, 정점 3은 5.9배 정도로 높아 정점 2와 3은 내부생성 유기물의 기여도가 높은 것으로 판단된다. 그리고 COD_{Cr}와 *M. aeruginosa*의 현존량과의 상관관계($r=0.86$, $p < 0.01$)도 매우 높아 일월저수지에서는 조류의 대 발생이 내부기원 유기물 생성에 많은 기여를 한 것으로 사료된다(Table 3).

전기전도도는 수계에 전류가 흐르는 정도를 나타내는 항목으로 특히 부착 규조류를 이용한 유기오탁의 정도를 파악할 때 유용하게 활용된다(Lee and Chung, 1992; Chung *et al.*, 1993). 본 조사대상지에서 평균 154.0~1,020.0 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 의 범위로 8월 26일 정점 3에서 최고의 값이 관측되었다(Table 2). 정점 1이 정점 2와 3에 비해 높았고, 8월 26일에 비정상적으로 증가하였으며 이후부터 조금씩 감소하였으나 정점 2와 3에 비해서는 계속 높은 값을 유지하였다. 정점 2와 3은 조사 후반기로 갈수록 계속 증가하였다. 정점 1에서 8월 26일 이후부터 693.0~1,020.0 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 이상의 높은 수치를 나타낸 것은 전해성 물질이 많은 하천수가 유입된 것으로 사료되고, 8월 12일에 정점 3에서 731.0 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 로 높은 수치를 나타낸 것은 저수지 내부 변화에 의해 전해성 물질이 증가한 것으로 추정되나 정확한 원인은 알 수 없다. 그러나 전기전도도와 *M. aeruginosa*의 현존량 증가는 상관관계($r=0.75$, $p < 0.01$)가 높아 *M. aeruginosa*가 사멸되면서 용해된 물질도 상당한 영향이 있었을 것으로 생각된다(Table 3).

총 질소(TN)는 월별 평균 5.33~87.67 mg L⁻¹였고, 정점 별 평균은 28.88~56.75 mg L⁻¹이었다(Table 2). 정점 1의 9월 11일과 정점 2의 9월 2일에 1.0 mg L⁻¹로 가장 낮았으며, 9월 16일 정점 1에서 147.0 mg L⁻¹로 최대값이었다. 또한 정점 2와 3에서 8월 12일 이후부터 감소하였다가 10월 5일에 갑작스럽게 증가하였으며, 정점 1은 9월 16일에 갑작스럽게 높아졌다가 이후부터는 감소하였다. 소규모 저수지인 충남일대의 저수지는 2007년 10월에 0.07~2.6 mg L⁻¹, 2004년 조사된 수원 지역의 소규모 저수지의 9월에는 0.55~6.3 mg L⁻¹이었으며, 그 중 일월저수지는 3.44 mg L⁻¹이었다(Park *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2008; Song *et al.*, 2011). 본 조사의 평균값은 2004년도에 조사된 일월저수지 값에 8.37~16.5배 정도로 매우

높았다.

총인(TP)은 월별 평균 $0.05 \sim 2.18 \text{ mg L}^{-1}$ 였고, 9월 16일 정점 1에서 0.01 mg L^{-1} 로 가장 낮았으며, 8월 19일 정점 2에서 5.8 mg L^{-1} 로 가장 높았다(Table 2). 전 조사 기간 동안 평균적으로 정점 2가 1.24 mg L^{-1} 로 정점 1와 3에 비해 3.4~6.2배 정도 높았으며, 전 정점은 조사 초기에 비해 후반으로 갈수록 계속 낮은 값을 유지하였다. 2004년 9월에 본 저수지에서 0.14 mg L^{-1} 로서(Park *et al.*, 2008) 본 조사의 평균값이 1.4~8.86배 정도 높았다. 정점 2에서 8월 19일 TP가 높은 것은 조사 이전에 많은 강우가 내리 저수지 주변에서 유입된 TP가 정체 수역인 정점 2에서 많이 누적되었기 때문으로 사료된다. 마찬가지로 정점 2가 정점 1과 3에 비해 TP가 높은 이유도 정점 2가 정체되어 있다는 환경적 특성 때문으로 사료된다.

TN/TP의 비는 월별 평균 20~4,942로 시기별 값의 범위가 상당히 컸으며, 9월 2일에 정점 2에서 3으로 가장 낮았고, 9월 16일에 정점 1에서 14,700으로 가장 높았다(Table 2). TN/TP의 비는 남조류의 성장에 영향을 주는 항목 중 가장 논란이 많다. TN/TP의 비가 낮으면 남조류의 대발생을 유도한다는 보고가 있는 반면, 상관성이 없다는 보고도 있다(Smith, 1983; Pick and Lean, 1987; Choi *et al.*, 2002; Han *et al.*, 2002). 따라서 일월저수지처럼 TN이나 TP가 이미 대량으로 누적되어 있는 지역에서 TN/TP의 비가 과연 남조류의 대발생 유지에 유의성을 가지는지는 재검토가 있어야 할 것으로 생각된다. TN/TP와 *M. aeruginosa*의 현존량과의 상관성은 유의성이 없었다.

대양에서 질소와 인이 풍부함에도 불구하고 식물플랑크톤의 개체군이 낮은 원인은 철이 제한요인으로 작용하기 때문이며, 담수호에서 인이 풍부하여도 식물플랑크톤의 개체군 성장이 낮은 이유는 철이 제한요인으로 작용하기 때문이다(Martin, 1992; Sterner *et al.*, 2004; Graham *et al.*, 2009). 본 조사지역에서의 Fe는 월별 평균 $0.13 \sim 1.00 \text{ mg L}^{-1}$ 였으며, 9월 16일 정점 1에서 0.01 mg L^{-1} 로 가장 낮았고, 8월 19일 정점 2에서 2.46 mg L^{-1} 로 가장 높았다(Table 2). 정점 2에서 Fe의 평균값은 1.05 mg L^{-1} 으로 정점 1과 3에 비해 2.8~9.6배 정도 높았다. 거제도 연초 댐에서 철의 양은 $0.002 \sim 0.165 \text{ mg L}^{-1}$ 로(미발표자료) 일월저수지는 평균 0.11~1.05배로 높았다. 본 연구에서 남조류 개체군 성장과 철의 상관관계 분석에서 양의($r=0.52$, $p<0.01$) 관계이므로 앞으로 남조류 대발생의 연구 시 철의 역할에 대한 지속적인 관심이 필요한 것으로 사료된다(Table 3).

규산염(Si)은 식물플랑크톤 중 규조류의 피각을 구성하는 중요한 물질로 규조류 성장과 증식에 관련된 연구

를 많이 하는 항목으로 남조류와는 관계가 없는 것으로 알려져 있다. 본 조사대상지에서의 Si의 농도는 평균 $2.97 \sim 6.08 \text{ mg L}^{-1}$ 였으며, 9월 16일 정점 2에서 1.75 mg L^{-1} 로 가장 낮았고, 9월 11일 정점 1에서 9.93 mg L^{-1} 로 최대치를 나타냈다(Table 2). 정점 1에서 Si의 평균값은 7.457 mg L^{-1} 로 정점 2와 3에 비해 2.2~2.4배 정도 높았다. 정점 1에서 Si의 높은 값은 Si가 하천 유입수에 상당량이 포함되어 유입되었기 때문으로 사료된다. Sigeo *et al.* (1999)은 에너지 분산형 X선 측정기(EDS)를 이용한 남조류 *Anabaena flos-aquae*의 세포 내 원소 분포를 분석한 결과 규소가 각 세포마다 불균등하게 분포하고, 규소의 세포 내 불균등 분포는 *A. flos-aquae*가 호수 내 수직이동과 연관이 있을 것이라고 보고하였으며, 안동의 농업용 저수지 연구에서 Si와 *Microcystis aeruginosa*간에 상관관계가 매우 높다는 보고도 있다(Kwon *et al.*, 2011). 본 조사에서도 Si와 *M. aeruginosa*와 상관관계가 있었다($r=0.34$, $p<0.01$) 앞서의 연구에서 Si와 남조류가 서로 연관이 있다는 보고와 본 조사에서 나온 양의 결과는 앞으로 남조류의 생리·생태적 연구에서 Si의 역할에 대한 조사가 필요함을 의미한다(Table 3).

Chl-*a*는 월별 평균 $29.0 \sim 267.0 \mu\text{g L}^{-1}$ 였으며, 9월 24일 정점 1에서 $6.8 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 낮았으며, 8월 19일 정점 2에서 $666.6 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높은 값을 나타냈다(Table 2). 정점 2의 평균값이 $185.2 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 정점 1과 3에 비해 2.41~8.3배 정도 높았다. 정점 2에서 Chl-*a*의 평균값이 높은 것은 하천의 유입이 있는 정점 1과 저수지의 유출이 있는 정점 3에 비해 환경적으로 정체되어 있는 수역이며 *Microcystis aeruginosa*의 현존량이 높았기 때문으로 사료된다. Chl-*a*는 식물플랑크톤의 총 현존량 변동과 유사한 경향이였다.

2. 식물플랑크톤의 군집변동

조사기간 동안 출현한 담수조류는 녹조류가 19종류(58%), 남조류와 규조류가 각각 6종류(18%), 유글레나류와 은편모조류가 각각 한 종류씩(3%) 출현하여 모두 13속 33종류가 출현하였다(Fig. 3). 이 중 녹조류가 가장 많이 출현하였고, 녹조류의 *Scenedesmus* 속이 모두 11종류로 가장 많이 출현하였다. 세 정점에서 모든 조사기간에 출현한 종은 없었고, 남조류의 *Microcystis aeruginosa*, *Pseudoanabaena limnetica* (Lemmermann) Komárek 그리고 *Raphidiopsis curvata* F.E. Fritsch & M.F. Rich 등 3종류는 정점 2와 3에서 조사 기간 내내 출현하였으며, 정점 1에서는 9월 2일 이전까지는 출현하였고, 이후부터

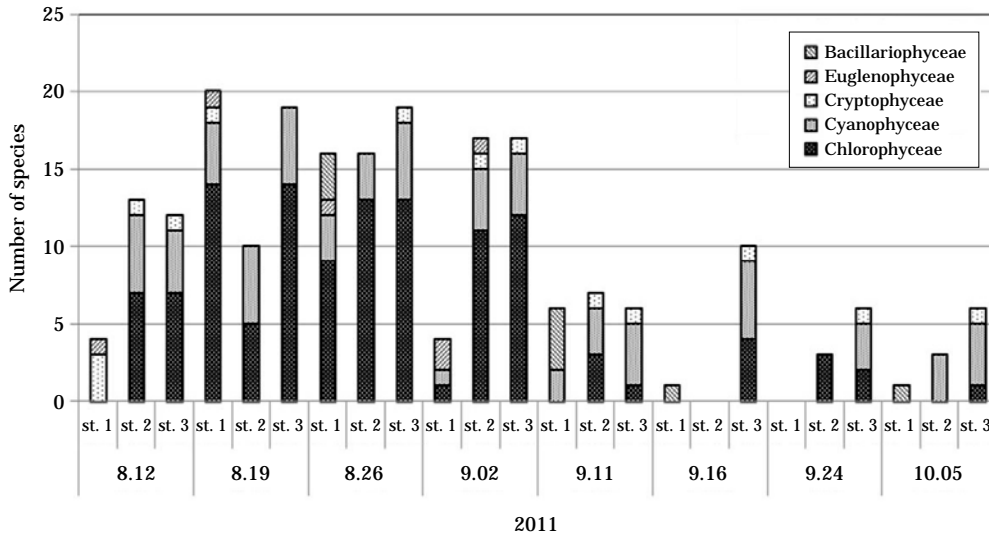


Fig. 3. The species number of phytoplankton at each station appeared in Ilwol.

는 전혀 출현하지 않았다. 남조류 3종류가 정점 1에서 9월 2일 이후부터 출현하지 않는 것은 정점 3에서 저수지 내 물이 지속적인 유출로 인한 수량의 감소 및 하천수 유입으로 정점 1주변에 서식하던 남조류가 정점 2와 3으로 이동하였기 때문으로 사료된다. 규조류는 정점 1에서 8월 26일부터 출현하였고, 정점 2와 3에서는 관찰되지 않았다.

식물플랑크톤의 총 현존량은 9월 16일에 정점 2에서 1,058,040 cells mL⁻¹로 최대였으며, 9월 24일 정점 1에서 전혀 출현하지 않았다(Fig. 4). 정점 3에서 총 현존량은 조사 시점부터 꾸준히 증가하는 경향을 나타냈고, 정점 2는 8월 26일에 가장 낮았다가 9월 16일에 최대였으며, 외부 하천의 직접적인 영향을 받는 정점 1은 전반적으로 정점 2와 3에 비해 매우 낮았다. 녹조류의 현존량은 정점 3에서 8월 19일과 8월 26일, 정점 2에서는 8월 26일, 그리고 정점 1에서는 8월 19일에 2,080~2,640 cells mL⁻¹로 가장 높았다. 남조류는 정점 2와 3에서 전 조사기간 동안 현존량이 높았으며, 정점 1은 8월 12일과 8월 19일에 현존량이 높았고 8월 26일부터 급속히 감소하였다. 규조류는 정점 2와 3에서는 조사기간 동안 출현되지 않았고 정점 1에서는 남조류 현존량이 높았던 8월 12일과 8월 16일은 중 관찰이 되지 않았으며, 8월 26일에 4,490 cells mL⁻¹로 가장 높았고 9월 2일부터 감소하였다. 총 현존량의 상대비율에서 남조류의 현존량이 96.4~99.9%로 총 현존량의 대부분이었고, 녹조류는 0~1.8%, 규조류가 0~0.26%, 유글레나류와 은편모조류는 각각 0~0.02%였다. 정점별 식물플랑크톤 군집의 현존량 상대비율에서 대부

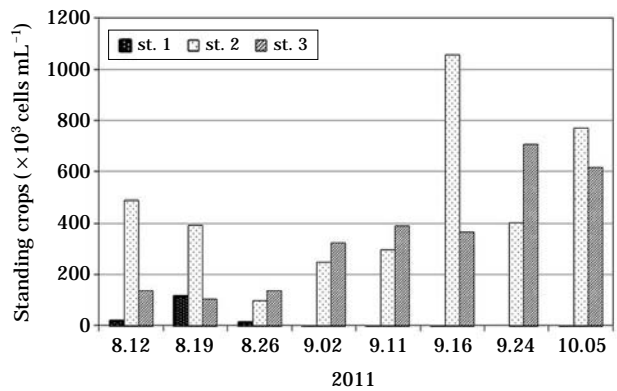


Fig. 4. The changes of total standing crops of phytoplankton during sampling in Ilwol reservoir.

분의 정점은 남조류의 현존량이 가장 높은 비율을 차지 하였으나 정점 1에서 9월 2일부터 규조류 현존량의 상대 비율은 100%를 차지하였다(Fig. 5). 규조류의 현존량 상대비율이 100%를 차지한 것은 다른 식물플랑크톤의 출현하지 않고 규조류만 출현하였기 때문이다.

Microcystis 속은 *Microcystis aeruginosa*와 *Microcystis wesenbergii* (Komárek) Komárek 등 두 종이 출현하였으나, *M. wesenbergii*의 현존량은 총 현존량의 0.04~0.68%로 매우 낮아 현존량 언급에서 제외하였다. 정점 2와 3에서 우점종으로 출현한 *M. aeruginosa*의 현존량 증가는 총 식물플랑크톤의 현존량 증가와 유사하였다. *M. aeruginosa*의 현존량은 9월 16일 정점 2에서 1,057,500 cells mL⁻¹로 최고치를 나타냈으며, 정점 3에서는 조사 시점부터 지

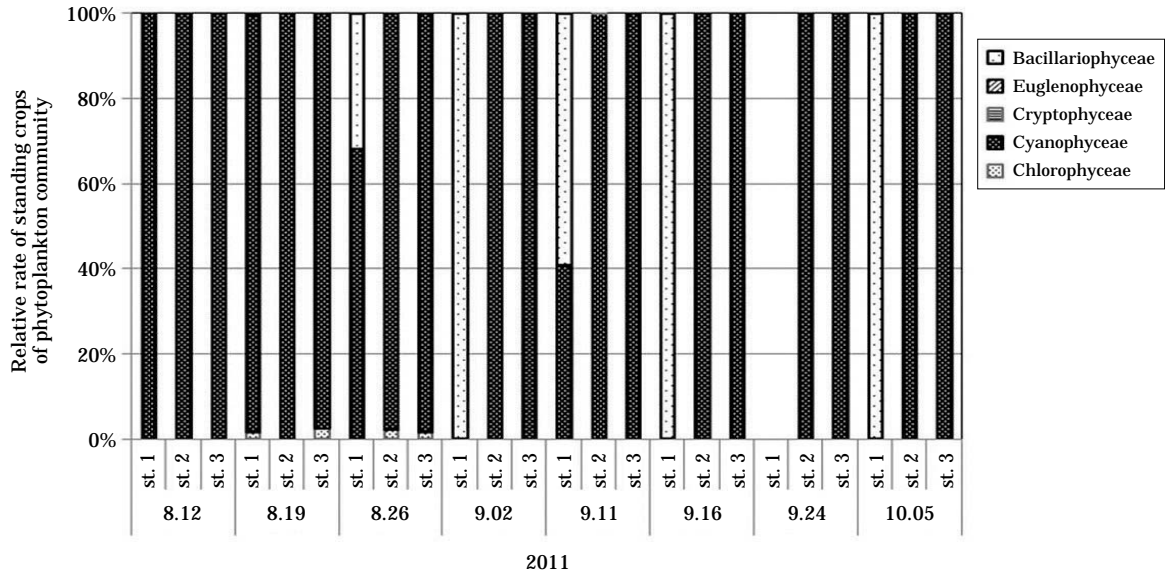


Fig. 5. Relative rate of the standing crops of phytoplankton community appeared in Ilwol reservoir.

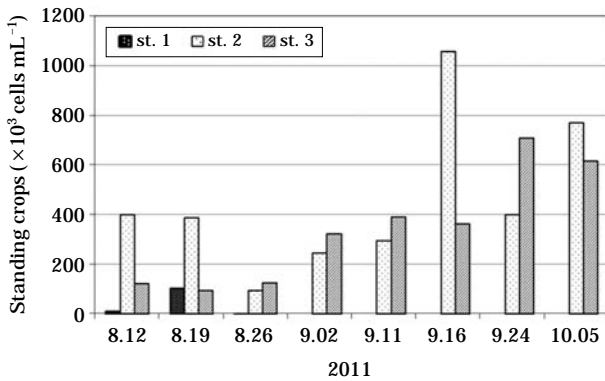


Fig. 6. The changes of standing crops of *Microcystis aeruginosa* at sampling period in Ilwol reservoir.

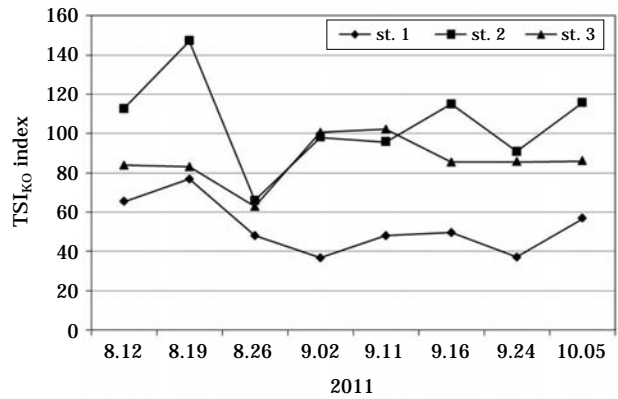


Fig. 7. The changes of TSI_{KO} value at sampling period in Ilwol reservoir.

속적으로 증가한 반면, 정점 2에서는 증·감의 변동이 있었으며 정점 1에서는 9월 2일 이후부터는 *M. aeruginosa*가 전혀 출현하지 않았다(Fig. 6) *M. aeruginosa*의 현존량은 총 현존량의 평균 45.9~98.4% 정도를 차지하여 실질적으로 *M. aeruginosa*가 관찰된 식물플랑크톤 전체의 대부분을 차지하였다. 2004년 일월저수지의 식물플랑크톤 조사에서 우점종은 녹조류의 *Scenedesmus spinosus*, *Scenedesmus quadricauda*, 남조류의 *Oscillatoria limnetica*, *Synechocystis pevalekii* 등이었고, *M. aeruginosa*는 우점종으로 언급되지 않았다(Park et al., 2006). 2004년 조사(Park et al., 2006)에서 우점종으로 출현하지 않았던 *M. aeruginosa*가 어느 시기부터 우점종으로 출현하였는지는 알 수 없으나 본 종의 녹조현상은 이미 일월저수지

가 심각한 수질 상태임을 나타낸다. 일월저수지의 환경요인들과 현존량 그리고 우점종은 수질오염의 억제를 위한 여러 가지의 대책이 필요한 것으로 판단된다.

3. 영양단계 평가

한국형 부영양화 지수를 일월저수지에 적용하여 영양 단계를 평가한 결과는 Fig. 7과 같다. 정점 1에서 영양화 지수는 37.19~76.91, 정점 2는 65.94~147.22 그리고 정점 3은 62.90~102.29였다. 부영양화 지수를 근거로 한 영양화 평가에서 정점 2와 3은 8월 26일만 부영양화였고, 나머지 조사시기는 모두 과영양화로 평가되었다. 정점 1은 8월 12일과 10월 5일은 부영양화, 8월 19일은 과영양

화, 그리고 8월 26일부터 9월 24일까지는 중영양화였다. 8월 19일 정점 1에서 과영양화는 Chl. a 값이 높은 것과, 8월 26일 정점 2와 3에서 부영양화는 COD, TP 그리고 Chl. a의 값이 다른 조사시기에 비해 낮았기 때문이다. 한국형 부영양화 지수를 이용한 영양단계 평가에서 정점 1의 중 영양화는 유입되고 있는 하천수에 유·무기물 양이 낮은 것과 그에 따른 식물플랑크톤 현존량이 낮았기 때문으로 사료되며, 정점 2의 과영양화는 조사 지점이 정체되어 있는 안정된 지역으로 증가된 식물플랑크톤 현존량, 누적된 유·무기물 양이 표현된 것으로 사료된다. 정점 3의 과영양화는 수계 내의 환경요인들과 식물플랑크톤 개체군이 유출 직전에 조사되었기 때문으로 생각된다. 일월저수지의 2004년 조사에서는 전 조사시기에 과영양화 단계로 조사되었으나 (Park et al., 2006) 본 조사에서는 중영양, 부영양 그리고 과영양화로 나타나 같은 저수지 내에서도 조사시기 및 조사지점에 따라 영양단계가 다르게 분석되었다. 2004년과 본 조사에서 영양화의 차이는 조사 시점과 기간 그리고 평가방법이 달랐기 때문으로 생각된다. 본 한국형 영양단계 평가는 기존의 분석 항목 중 투명도 대신에 COD 항목을 사용하므로 본 평가 방법의 활용성을 위해서는 보다 많은 자료가 축적되어야 할 것으로 사료된다. 특히 월별 조사 및 한 저수지 내에서도 수역별 조사를 실시하여 기존 부영양화 지수와 비교평가가 필요할 것으로 사료된다. 이러한 자료가 축적되면 외부 유입물질의 기여도가 높은 국내 저수지의 수질 관리를 위한 개선 사업에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 수원 일월저수지에서 수화현상 시 환경요인들의 변화와 한국형 부영양화 지수를 이용하여 영양단계를 평가하였다. 수화현상 중은 남조류의 *Microcystis aeruginosa* Kütz.였으며 조사기간 내내 우점하였다. 수온은 평균 25.7~28.4°C, pH는 8.4~11.17, COD_{Cr}는 4.25~72.0 mg L⁻¹, 전기전도도는 333.1~749.0 μS cm⁻¹, Chl-a는 22.0~185.0 mg L⁻¹였다. 정체 수역인 정점 2에서 COD_{Cr}는 다른 정점에 비해 2.9배 정도로 높아 내부기원 유기물의 기여도가 높은 것으로 판단된다. 영양염인 TN은 평균 28.86~56.75 mg L⁻¹, TP는 0.2~1.24 mg L⁻¹로 매우 높았고, Fe는 0.11~1.05 mg L⁻¹이었고, Si는 3.13~7.46 mg L⁻¹이었다. TN과 TP는 일월저수지 내에 지속적으로 누적된 것으로 파악되었고, Fe도 높은 농도가 유지되었

다. 한국형 부영양화지수는 37.19~147.22였다. 영양단계는 중영양에서 과영양 단계로 평가되었고, 같은 저수지 내에서도 시기 및 지점에 따라 영양단계가 다름을 나타내므로 많은 자료가 추적된다면 한국형 영양단계 분석은 저수지의 영양단계 분석 시 매우 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

인 용 문 헌

- Aizaki, M., A. Otsuki, T. Fukushima, M. Hosomi and K. Muraoka. 1981. Application of Carlson's trophic state index to Japanes Lake and relationships between the index and other parameters. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* **21**: 675-681.
- APHA. AWWA. WPCF. 1985. Standard Method. For the examination of water and waster. 16th. APHA., New York.
- Cho, D.H., K.H. Lee, S.H. Han, J.H. Song, S.J. Kwon, B.J. Kim, K.J. Lee and J.B. Lee. 2012. A study on the characteristics of water quality and eutrophication in Wangsong Reservoir and its inflow Streams. *Journal of Korean Society Water and Wastewater* **26**: 201-206.
- Choi, A.R., J.H. Park and J.A. Lee. 2002. Population dynamics and the toxin of *Anabaena* in the lower Naktong River. *Algae* **17**: 171-185.
- Chung, J., J.S. Choi and J.H. Lee. 1993. Assessment for water quality of the Kumho River using epilithic diatom assemblage index to organic water pollution (DAIpo). *Korean Journal of Limnological Society* **11**: 43-58.
- Graham, L.E., M. Graham and L.W. Wilcox. 2009. *Algae*. 2nd ed. Pearson Edu. Inc., USA.
- Han, Y.H., D.Y. Kim and W.Y. An. 2002. Wetland environment of vegetation development of the Ilwol Reservoir. *The Korea Society of Environmental Restoration Technology* **5**: 9-16.
- Harper, D. 1992. *Eutrophication of Freshwater-Principles, Problems and Restoration*. Chapman Hall, New York.
- Heo, W.M., S.Y. Kwon, B.C. Kim and J.H. Park. 2000. Long variation of quality in Lake Andong. *Korean Journal of Limnological Society* **33**: 260-266.
- John, B., A. Whitton and A.J. Brook. 2002. *The Freshwater Algal Flora of the British Isles*. Cambrage Univ., UK.
- Kim, B.C., K.S. Choi, C.G. Kim, U.H. Lee, S.S. Kim and J.C. Park. 1998. The distribution of dissolved and particulate organic carbon in Lake Soyang. *Korean Journal of Limnological Society* **31**: 17-24.
- Kim, E.S., K.B. Sim, S.D. Kim and H.I. Choi. 2012. Water

- quality assessment for reservoir using the Korean trophic state index. *Journal of Korean Society on Water Environment* **28**: 78-83.
- Kim, W.H., A.R. Choi and J.A. Lee. 1999. The Occurrence of microcystins in the Nakdong River. *Algae* **14**: 237-245.
- Komárek, J. and B. Fott. 1983. Das phytoplankton des süß assers systematik und biologie. Teil. 7. Chlorophyceae (Grünalgen Ordnung: Chlorococcales). E. Schweiz. Verl. Stuttgart, Germany.
- Komárek, J. and K. Anagnostidis. 2001. Süß wasserflora von mitteleuropa. Band 9/1. Cyanoprokaryota 1. Teil: Chlorococcales. E. Schweiz. Verl. Stuttgart, Germany.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1986. Süß wasserflora von Mitteleuropa. Band 2/1. Bacillariophyceae 1. Teil: Naviculaceae (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Ilenhauer, eds.). Gustav Fischer Verlag. Stuttgart, Germany.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1988. Süß wasserflora von Mitteleuropa. Band 2/2. Bacillariophyceae 2. Teil: Bacillariaceae Epithemiaceae, Surirellaceae (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer, eds.). Gustav Fischer Verlag. Stuttgart, Germany.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1991a. Süß wasserflora von Mitteleuropa. Band 2/3. Bacillariophyceae 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer, eds.). Gustav Fischer Verlag. Stuttgart, Germany.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1991b. Süß wasserflora von Mitteleuropa. Band 2/4. Bacillariophyceae 4. Teil: Achnanthaceae. Kritische Ergänzungen zu *Navicula* (Lineolatae) und *Gomphonema* (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer, eds.). Gustav Fischer Verlag. Stuttgart, Germany.
- Kwag, N.T. and T.Y. Ahn. 1998. Increase of the autochthonous organic matter by the eutrophication in Cheonho Reservoir. *Korean Journal of Limnological Society* **31**: 266-272.
- Kwon, O.C., J.W. Park, G.Y. Chung, J.E. Lee and E.W. Seo. 2011. Effect of environmental factors on the growth of *Microcystis aeruginosa* (Cyanobacteria) in agricultural Reservoirs. *Korean Journal of Life Science* **21**: 1183-1189.
- Lee, J.H. and J. Chung. 1992. Station variation of epilithic diatom according to pollution degree from the Kumho River. *Korean Journal of Limnology* **25**: 31-40.
- Martin, J.H. 1992. Iron as a limiting factor in oceanic productivity. p.137-155. *In*: Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea (Falkowski, P.G. and A. Woodhead, eds.). Plenum Press, New York, USA.
- Miyazaki, T., M. Watase and K. Miyake. 1989. Change in activities of inorganic carbon and ammonium uptake by phytoplankton from May to August, and their relation to water temperature in Lake Nakanuma, Japan. *Japanese Journal of Limnological Society* **50**: 289-298.
- Oh, H.M. and D.H. Kim. 1995. Short-term prediction of the blue-green algal bloom in Daechung Reservoir. *Korean Journal of Limnological Society* **28**: 127-135.
- Park, C.W. and D.K. Kwon. 1998. A study on early development of water bloom by blue-green algae in Lake Hapchon I. Relationship between increasing standing crop of *Microcystis aeruginosa* Kütz. and concentration of K^+ , Na^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} in water system. *Korean Journal of Limnological Society* **31**: 97-102.
- Park, J.H., B.R. Moon and O.M. Lee. 2006. The Phytoplankton compositions and trophic states at several lakes of Suwon-si, Korea. *Algae* **21**: 217-228.
- Park, J.W., S.H. Yu, S.Y. Kim, J.E. Lee and E.W. Seo. 2008. Effect of turbid water on the phytoplankton community in Imha reservoir. *Korean Journal of Life Science* **18**: 1671-1678.
- Pick, F.R. and D.R.S. Lean. 1987. The role of macronutrients (C, N, P) in controlling cyanobacterial dominance in temperate lakes. *N.Z.J. Mar Freshwat Res* **21**: 425-434.
- Shin, J.K. and K.J. Cho. 1997. Distribution and population dynamics of *Microcystis* (Cyanophyta) in the Nakdong River. *Algae* **12**: 283-290.
- Sigeo, D.C., J. Teper and E. Levado. 1999. Elemental composition of the cyanobacterium *Anabaena flos-aquae* collected from different depths within a stratified lake. *European Journal of Phycology* **34**: 477-485.
- Smith, V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science* **221**: 669-671.
- Song, S.H., J.W. Kim, H.N. Kim, D.S. Kong and O.M. Lee. 2011. Water assessment using trophic status index and attaches diatom index in 10 reservoirs including Ye-dang Reservoir of Chungcheongnam-do. *Korean Journal of Limnological Society* **44**: 155- 171.
- Sterner, R.W., T.M. Smutka, R.M.L. McKay, Q. Xiaoming, E.T. Brown and R.M. Sherrell. 2004. Phosphorous and trace metal limitation of algae and bacteria in Lake Superior. *Limnology and Oceanography* **49**: 495-507.
- Takamura, N. and M. Watanabe. 1987. Seasonal change in the biomass of four species of *Microcystis* in Lake Kasumigaura. *Japanese Journal of Limnological Society* **48**: 139-144.
- Watanabe, M.F., M. Watanabe, T. Kato, K.I. Harada and M. Suzuki. 1991. Composition of cyclic peptide toxic among strains of *Microcystis aeruginosa* (blue-green algae, cyanobacteria). *The Botanical Magazine Tokyo*

104: 49-57.

Yang, J.R. and M. Dickman. 1993. Diatom as indicators of Lake Trophic Static in Central Ontario, Canada. *Diatom. Research* **8**: 179-193.

Yoshimi, H. 1987. Simultaneous construction of single parameter and multiparameter trophic static indices. *Water Research* **12**: 1505-1511.

Zheng, H.Y., W.C. Jin, K.S. Lee and S.N. Oh. 2010. A Study

on air temperature-reducing effects by irrigation reservoir. *The Korea Society of Environmental Restoration Technology* **13**: 32-39.

(Manuscript received 10 May 2013,
Revised 27 May 2013
Revision accepted 10 June 2013)