Korean J. Limnol. 38 (3) : 429~434 (2005)

임하댐의 탁수 형성후 식물플랑크톤 군집 동태

박정원* · 이경락 · 최재신 · 김한순

(경북대학교 자연과학대학 생물학과)

Dynamics of Phytoplankton Community after Formation of Turbid Water in Lake Imha. ***Park, Jung-Won*, Kyung Lak Lee, Jae-Sin Choi and Han Soon Kim (Department of Biology, College of Natural Science, Kyungpook National Univ., Taegu 702-701, Korea)***

The dynamics of phytoplankton community after the formatiom of turbidity was assessed at Dam barrage of Lake Imha from May 2003 to July 2004. The maximum turbidity of 1221 NTU during September and October 2003 was well correlated with heavy precipitation caused by Typoon Maemi. A total of 102 phytoplankton taxa was identified and the most abundant phytoplankton group was Bacillariophyceae with 63 taxa, followed by Chlorophyceae with 23 taxa, Cyanophyceae with 9 taxa, 3 taxa each of Synurophyceae and Cryptophyceae and Euglenophyceae with 1 taxon. The total standing crops ranged between 270 indls. mL^{-1} and 4,515 indls. mL^{-1} during the investigation periods. The three species, *Cryptomonas ovata*, *Cyclotella* sp. and *Microcystis aeruginosa* predominated in sequence after the decrease of turbidity.

Key words : dominant species, Lake Imha, phytoplankton, turbid water

서 론

수중의 일차 생산자로 수계 생태계의 중요한 위치를 차지하고 있는 식물플랑크톤은 물리·화학적 요인에 따라 시·공간적 분포의 생태적 특성을 분명히 나타내며, 수질의 변화에 민감하게 반응하므로 수환경 변화를 모니터링 하는데 중요하게 이용되고 있다(Harper, 1992).

하천수의 효율적 및 다목적 이용을 위해 축조된 댐은 수계의 환경을 정수 상태로 변화시키므로 기존 하천형 식물플랑크톤 군집은 호소성 식물플랑크톤 군집으로 변화된 수계 환경의 특성을 나타낸다(Maitland, 1990). 그리고 하계의 장마와 집중호우 등은 저수량에 커다란 변화를 일으키고(김 등, 1997), 하천 주변의 여러 물질을 유입케 하여 댐 내의 물리화학적 변화를 일으켜 식물플랑크톤 군집의 구조에 커다란 영향을 준다(Eloranta, 1993; Holzmann, 1993).

1992년도에 완공된 다목적댐인 임하호에 대해 하천 생태계가 호수 생태계로 변화될 때의 식물플랑크톤 군집의 변화(김과 정, 1993; 김 등, 1995; 김 등, 1997), 완전히 호수화 되었을 때의 식물플랑크톤 군집 구조(박 등, 1999) 등 담수 초기부터 식물플랑크톤에 대한 연구가 계속 이루어져 왔다.

2002년 9월 태풍 매미에 동반된 집중 강우로 인해 임하호에 발생한 심한 탁수가 2003년 4월까지 지속되었으며, 또 2004년 6월의 많은 강우로 인해 고농도의 탁수가 다시 발생하여 장기간에 걸쳐 지속되고 있다. 장기간 지속된 고농도 탁수는 미관상 혹은 정수처리에서 사회적 관심을 불러 왔으며(허 등, 2004), 수계 생물의 종조성이나 군집구조에 미치는 영향에 대한 연구의 필요성이 대두되어 왔다.

고농도 탁수는 대량의 영양염류와 유기물질을 함유하고 있으며, 투명도 저하, 댐 내의 용존산소 결핍 및 정수장의 여과 장애 등을 유발하는 것으로 알려져 있으나

* Corresponding author: Tel: 053) 950-5344, Fax: 053) 953-3066, E-mail: algaekr@yahoo.co.kr

(Horne and Goldman, 1994; 신 등, 2003; 한국수자원공사, 2004; 박 등, 2005), 탁수의 발생이 수계 생물에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 연구는 매우 미진하다. 따라서 본 연구는 임하댐에서 장기간 지속된 고농도의 탁수 발생이 식물플랑크톤 군집에 어떠한 변화를 미치는지를 파악하고자 한다.

재료 및 방법

임하호에서 탁수 발생 전 · 후에 식물플랑크톤 군집의 변화를 비교하기 위하여 2003년 5월부터 2004년 7월까지 댐축 지점에서 매월 시료를 채집하였다(Fig. 1). 강수량은 기상청의 자료를 이용하였고(http://kma.go.kr), 온도와 pH (265A, Orion), EC (Check mate 90, Corning) 및 탁도 (YSI6600, YSI)는 현장에서 측정하였다. 총 질소와 총 인은 고압증기 멸균기로 120°C에서 30분간 가열한 후 총 질소는 과황산 분해법으로, 총 인은 아스코르빈산 환원법으로 측정하였다 (APHA, 1995). Chl *a*는 GF/C로 여과하여 standard method (APHA, 1995)에 따라 분석하였다.

식물플랑크톤의 시료는 1 L용 채수병을 이용하여 정량 채집하였고, 채집한 시료는 현장에서 Lugol's 용액으로 고정하였으며, 정성 채집은 플랑크톤네트 (Rhigosha N_{xxx}25)를 이용하였다. 출현종은 광학현미경 (Labophot, Nikon) 400～1,000배하에서 동정 · 분류하였다.

현존량은 정량 채집한 시료를 1주일간 방치한 후, 상등액을 사이펀으로 제거하여 50 mL로 농축하였으며, 농축된 시료 1 mL를 취하여 Sedgwick-Rafter chamber에서 골고루 분산시켜 100칸을 계수하여 산출하였다. 규조류는 $KMnO_4$법 (Hendey, 1974)으로 세정한 후 영구표본을 제작하여 동정 및 분류하였다.

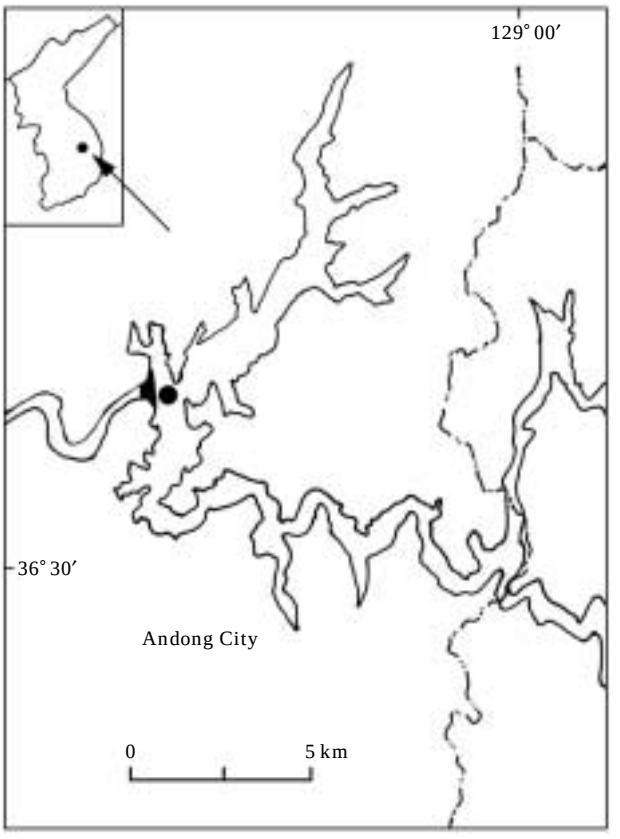

Fig. 1. A map showing the sampling station in Lake Imha.

결과 및 고찰

조사기간 동안 임하호의 월 강수량은 5.4～405.4 mm (평균 142.1 mm)의 범위를 나타냈었다. 2003년은 5월부터 9월까지 158.8～405.4 mm, 그리고 2004년은 6월과 7월에 291.2～302 mm로 강수량이 집중되었다 (Fig. 2). 수온은 4.6～32.8°C (평균 19.48°C)로 2월에 가장 낮고 7월에 가장 높았다 (Table 1). pH는 7.2～9.6 (평균 8.06)의 범위였고, 탁수가 대발생한 2003년 9월부터 11월까지는 6.8～7.4의 값을 보였으나, 탁도가 많이 낮아진 2004년 3월부터 pH가 7.84～9.56으로 증가하였다. 전기전도도는 100.1～180.7 μS cm^{-1} (평균 140.7 μS cm^{-1}) 였다. 전기전도도는 탁수가 발생한 시점인 2003년 6월에 최대치를 보였으나 7월부터 감소하였으며 탁수가 매우 감소한 2004년 4월까지의 전기전도도는 100.1～139.3 μS cm^{-1}로 낮은 값을 나타내었다. 전반적으로 탁수 발생 이전이 후

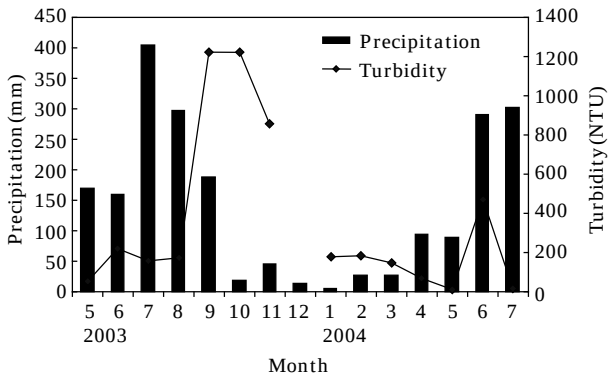

Fig. 2. Variations of precipitation and turbidity in Lake Imha from May 2003 to July 2004.

Table 1. The environmental factors at Dam barrage in Lake Imha from May 2003 to July 2004.

	Max.	Min.	Mean±SD
Water temperature (°C)	32.8	4.6	19.48±8.79
pH	9.56	6.82	8.06±0.9
EC (μS cm^{-1})	180.7	100.1	140.7±21.57
Chl.-*a* (μg L^{-1})	376	0.35	95.21±3

Max.: maximum, Min: minimum, SD: standard deviation

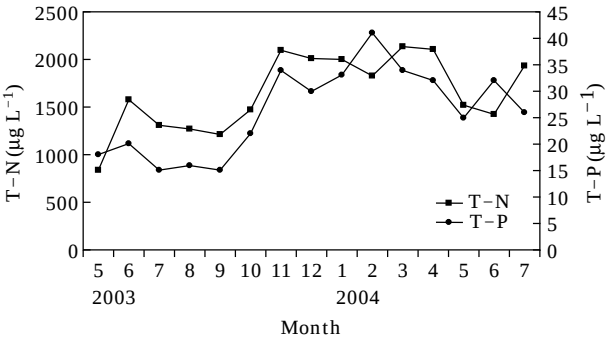

Fig. 3. Variations of T-N and T-P in Lake Imha from May 2003 to July 2004.

에 비해 다소 낮은 전기전도도 값을 나타냈다. 탁수 발생 시 전기전도도의 낮은 값은 현탁 물질의 입자표면에 전해질 물질이 흡착된 결과로 여겨진다(김, 1999). Chl. *a*는 0.35～376 μg L^{-1} (평균 95.21 μg L^{-1})로 변화의 폭이 매우 컸으며, 탁도가 낮아진 2004년 4월부터 조금씩 증가하여 *Microcystis aeruginosa*가 대발생한 7월에는 376 μg L^{-1}로 급격하게 증가하였다.

탁도는 7.9～1,221 NTU (평균 354.64 NTU) 범위였고, 2003년 9월의 태풍(매미)에 동반된 집중 호우시기에 최대 탁도(1,221 NTU)를 보였으며, 10월까지 높게 유지되었다(Fig. 2). 임하댐에서 탁수를 유발하는 물질은 임하호 유역의 중상류 지역에 넓게 분포한 풍화된 점토가 근원으로, 입자의 크기는 2～100 μm까지 다양하고, 5～9 μm 크기의 입자가 대부분이다(허 등, 2004). 총 질소는 834～2,134 μg L^{-1} (평균 1,648.27 μg L^{-1})의 범위로 탁도가 최대인 10월부터 증가하여 탁도가 감소한 2004년 4월까지 높은 값을 유지하였다(Fig. 3). 총 인은 15～41 μg L^{-1} (평균 26.23 μg L^{-1})의 범위였고 총 질소와 마찬가지로 탁도가 최대인 10월부터 탁도가 낮아진 2004년 4월까지 높은 값을 유지하였다(Fig. 3). 최대 탁도 발생 이전인 2003년 5월부터 8월까지 총 질소는 평균 1,249.25 μg L^{-1}, 총 인은 평균 17.25 μg L^{-1}이고, 최대 탁도가 감소하기 시작한 2003년 11월부터 식물플랑크톤 현존량이 전

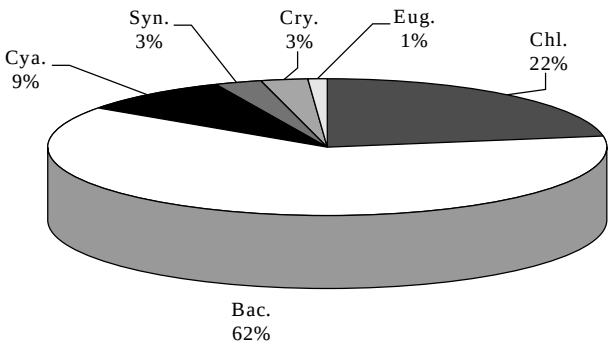

Fig. 4. Composition percentages (%) of species number of phytoplankton in Lake Imha from May 2003 to July 2004 (Chl.: Chlorophyceae, Bac.: Bacillariophyceae, Cya.: Cyanophyceae, Syn.: Synurophyceae, Cry.: Cryptophyceae, Eug.: Euglenophyceae).

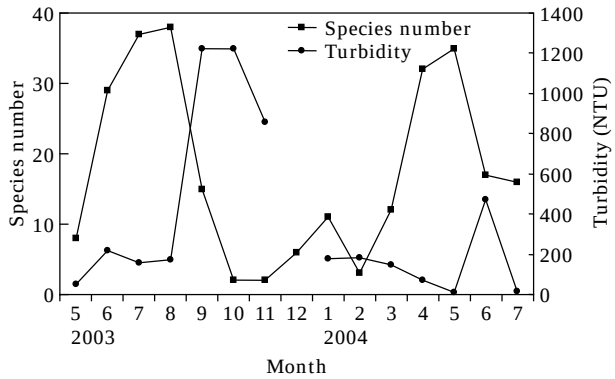

Fig. 5. Variations of species number of phytoplankton and turbidity in Lake Imha from May 2003 to July 2004.

혀 조사되지 않았던 2004년 2월까지 총 질소는 평균 1,981.75 μg L^{-1}, 총 인은 평균 34.5 μg L^{-1} 값을 보였다. 최대 탁수 발생 이후가 이전에 비해 총 질소는 평균 1.6배, 총 인은 평균 2배 정도 높게 나타났다. 총 질소와 총 인의 증가는 집중 강우로 인해 호수내로 유입된 점토입자에 질소와 인이 흡착되어 있었기 때문으로 생각된다(Harper, 1992; 김과 김, 2004; 사 등, 2004).

본 조사에서 출현한 식물플랑크톤은 모두 102종류였다. 이 중 규조강이 63종류로 가장 많이 출현하였으며, 녹조강이 23종류, 남조강이 9종류, 시누라조강과 은편모조강이 각각 3종류 그리고 유글레나조강이 1종류가 출현하여 규조강이 전체 출현 종의 50% 이상을 차지하였다(Fig. 4). 기존의 조사(김과 정, 1993; 김 등, 1995; 김 등,

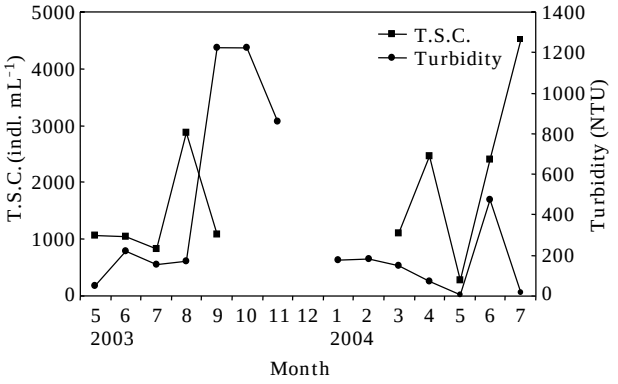

Fig. 6. Variations of total standing crop (T.S.C.) and turbidity in Lake Imha from May 2003 to July 2004.

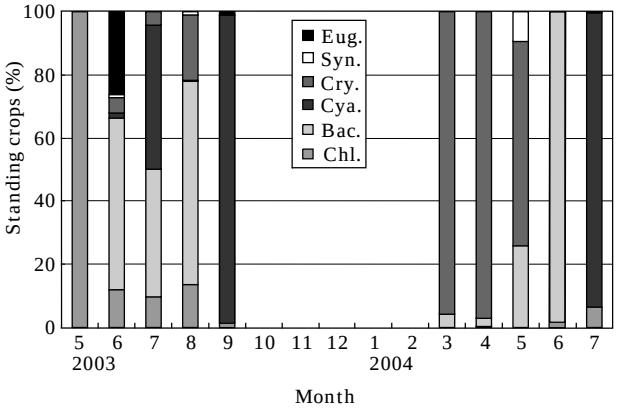

Fig. 7. Relative compositions (%) of standing crops of phytoplankton community in Lake Imha from May 2003 to July 2004 (Chl.: Chlorophyceae, Bac.: Bacillariophyceae, Cya.: Cyanophyceae, Syn.: Synurophyceae, Cry.: Cryptophyceae, Eug.: Euglenophyceae).

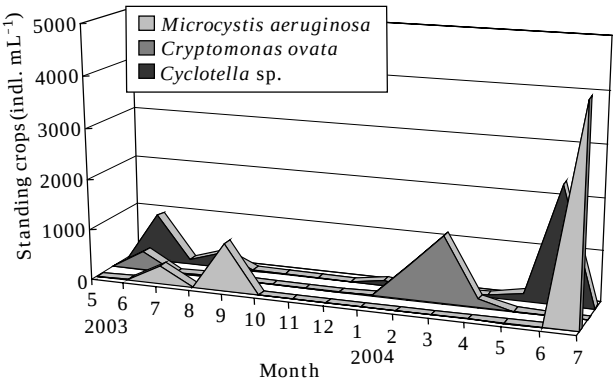

Fig. 8. Variations of standing crops of dominant species in Lake Imha from May 2003 to July 2004.

1997; 박 등, 1999)에서 출현하지 않았던 시누라조강과 은편모조강이 본 조사에서 새로이 확인되었다.

출현 종수의 변화에서, 2003년 6월에서 8월에는 28~39종류가 출현하였고, 탁도가 높은 9월에서 11월까지는 2~15종류, 탁도가 감소한 2004년 1월에서 3월까지는 3~12종류가 출현하였다(Fig. 5). 그리고 탁도가 더욱 낮아지고 수온이 15°C 이상인 2004년 4월부터 출현 종수가 32 종류 이상으로 증가하였다. 탁도와 출현 종수의 상관관계에서 $r = -0.47$ ($p < 0.05$)로 역의 상관을 나타냈다.

1992년부터 본 조사까지 계속 출현한 종은 녹조강의 *Eudorina elegans, Pediastrum duplex, Oocystis lacustris, Monoraphidium contortum, Scenedesmus quadricauda,* 와편모조강의 *Ceratium hirundinella,* 남조강의 *Microcystis aeruginosa, Oscillatoria agardhii* 등 모두 8종류였으며, 탁수가 형성된 기간에만 출현한 종은 녹조강의 *Chlamydomonas* sp., *Carteria peterhofiensis, Volvox globator, Monoraphidium indicum, Closterium sinense* 등 5종류, 유글레나강의 *Trachelomonas* sp., 시누라조강의 *Mallomonas tonsurata, Mallomonas akrokomos* 등 2종류, 은편모조강의 *Cryptomonas erosa, Cryptomonas ovata, Chroomonas acuta* 등 3종류, 남조강의 *Anabaena flos-aquae, Aphanizomenon flos-aquae* 등 2종류, 그리고 규조강의 *Cyclotella* sp., *Achnanthes delicatula, Navicula mutica, Nitzschia acicularis* 등 16종을 포함한 총 29종류였다. 규조류 중 중심규조목인 *Cyclotella asterocostata*는 기존의 조사(김 등, 1997)에서 현존량이 높았던 분류군이었으나 본 조사에서는 전혀 출현하지 않았고, *Cyclotella* sp.와 *Stephanodiscus hantzschii*가 본 조사에서 처음으로 출현하였다.

총 현존량 변화에서 최대 탁수 발생 이전인 2003년 5월부터 8월까지 총 현존량은 825~2,868 indls. mL^{-1}였으며, 탁도가 낮아진 2004년 3월부터 1,110 indls. mL^{-1} 이상으로 증가하였으나 5월에는 현존량이 갑자기 감소하였다(Fig. 6). 2003년 10월부터 이듬 해 2월까지는 높은 탁도로 인해 현존량을 계수할 수 없었다. 총 현존량과 탁도의 상관관계는 $r = -0.33$ ($p < 0.05$)으로 낮은 역의 상관을 보였다. 각 강의 현존량은 녹조강이 2003년 5월에 1,054 indls. mL^{-1}로 최대치를 나타낸 후 6월부터 현존량이 급격히 감소하였으며, 2004년 4월에 가장 적은 5 indls. mL^{-1}를 나타내었다(Fig. 7). 규조강은 2004년 3월에 45 indls. mL^{-1}에서 2004년 6월에 2,365 indls. mL^{-1}의 값을

Table 2. Variations of dominant species at Dam barrage in Lake Imha.

Year	Dominant species
1992(Kim *et al*., 1997)	*Achnanthes minutissima, Cyclotella pseudostelligera*
1993(Kim *et al*., 1997)	*Anbaena solitaria* f. *planktonica, Cyclotella comta, Cyclotella ocellata, Cyclotella pseudostelligera*
1994(Kim *et al*., 1997)	*Aulacoseira distans* var. *alpigena, Cyclotella ocellata, Phacotus lenticularis*
1996(Park *et al*., 1999)	*Aulacoseira ambigua, Elakatothrix gelatinosa, Oocystis lacustris, Cyclotella asterocostata*, Cyclotella pseudostelligera*, Scenedesmus grahneisii**
2003～2004	*Cyclotella* sp. *Cryptomonas ovata, Microcystis aeruginosa*

*: Subdominant species.

보였으며, 은편모조강은 탁도가 많이 감소한 2004년 3월과 4월에 현존량이 높았고 그 이후 현존량이 급속히 감소하였다. 각 식물플랑크톤 군집의 변화에 있어서 탁수 형성시에는 규조류가 현존량의 대부분을 차지하였으나, 탁도가 낮아진 2004년 3월부터 은편모조강의 현존량이 급속히 증가하였고, 6월 이후부터는 규조강에 이어서 남조강이 차례로 증가하였다.

조사된 우점종 중 *M. aeruginosa*는 2003년은 9월에 930 indls. mL^{-1}였으며 2004년 7월에 4,200 indls. mL^{-1}로 우점하였다(Fig. 8). 규조강의 *Cyclotella* sp.는 25～2,310 indls. mL^{-1} 범위를 나타내었으며, 2004년 2월과 3월을 제외하고 조사기간 내내 출현하였고, 특히 2004년 6월 많은 강우량(291.2 mm)에 의해 탁도가 471 NTU까지 증가한 시기에 우점하였으며, 탁도가 낮아진 7월에는 출현만 하였다. *Cyclotella* sp.가 우점하였던 2003년과 2004년의 6월에 pH는 8.7～9.47, 수온은 24.5～25.2°C, EC는 176.8～180.7 μS cm^{-1}, 탁도는 220～471.3 NTU의 범위를 나타내었으며, 총 질소와 총 인의 평균 농노는 각각 1500.5 μL^{-1}와 26 μg L^{-1}을 나타내었다. *Cryptomonas ovata*는 2003년 6월, 2004년 2월과 3월에 높은 현존량을 보였으며, 특히 탁도가 많이 낮아진 2004년 3월에는 우점종으로 나타났다. 본 종의 발생시에는 은편모조강의 *Cryptomonas erosa*와 *Chroomonas acuta*가 함께 출현하였고 두 종 역시 *C. ovata*와 같은 시기에 현존량이 높았다. *Cryptomonas ovata*의 현존량이 가장 높았던 2004년 3월과 4월의 총 질소(평균 2,119 μg L^{-1})와 총 인(평균 33 μg L^{-1})은 최대 탁수 발생 이전인 2003년 5월부터 8월까지의 총 질소(평균 1,249.25 μg L^{-1})에 비해 평균 1.7배, 그리고 총 인(평균 17.25 μg L^{-1})은 평균 1.9배 정도 높았다.

1992년부터 1994년까지 임하댐의 댐축에서 우점종으로 출현한 종류는 규조강의 *Cyclotella*속과 *Achnanthes minutissima, Aulacoseira distans* var. *alpigena*, 남조강의 *Anbaena solitaria* f. *planktonica*와 녹조강의 *Phacotus lenticularis* 등이었고, 1996년에는 녹조강의 *Elakatothrix gelatinosa*,*Oocystis lacustris*와 규조강의 *Aulacoseira ambigua*가 우점종이었다(Table 2). 본 조사에서 우점종으로 출현한 *Microcystis aeruginosa*는 1994년 현존량이 0.1 indls. mL^{-1} 이하거나 전혀 조사되지 않았고(김 등, 1997), 1996년 현존량의 구성비는 1% 이하로 조사되었다(박 등, 1999). 규조강의 *Cyclotella* sp.와 은편모조강의 *Cryptomonas ovata*는 기존의 보고에서 출현하지 않았던 종류들이며, 1996년의 아우점종 중 *Cyclotella asterocostata*와 *Scenedesmus grahneisii*는 본 조사에서 전혀 출현하지 않았고, *Cyclotella pseudostelligera*는 본 조사에서 0.5～66 indls. mL^{-1}로 낮은 현존량을 나타내었다.

본 연구 결과 기존의 조사에 비해 출현 종의 변화, 시누라조강과 은편모조강 등 새로운 분류군의 출현, 우점종의 변화 등 식물플랑크톤 군집에 변화가 있는 것으로 나타났다. 이러한 식물플랑크톤 군집의 변화는 다른 요인도 있겠지만 부분적으로는 높은 탁도의 영향을 받은 것으로 판단되며, 탁수에 의한 식물플랑크톤 천이 및 군집 동태를 명확히 규명하기 위해서는 추후의 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 임하호의 고탁수 발생에 따른 식물플랑크톤 군집의 변화를 조사하기 위하여 2003년 5월부터 2004년 7월까지 댐축 지점에서 매월 채집하였다. 2003년 9월과 10월의 가장 높은 탁도(1221 NTU) 형성은 태풍(매미)에 동반된 집중 호우 시기와 일치하였다. 출현한 식물플랑크톤은 모두 102분류군이고, 이 중 규조강이 63종류로 가장 많이 출현하였으며, 녹조강이 23종류, 남조강이 9종류, 시누라조강과 은편모조강이 각각 3종류 그리고 유글레나

조강이 1종류가 출현하였다. 총 현존량은 270～4,515 indls. mL^{-1}였고, 은편모조강의 *Cryptomonas ovata*, 규조강의 *Cyclotella* sp. 그리고 남조강의 *Microcystis aeruginosa* 등은 고탁수의 감소후 차례로 우점하였다.

인 용 문 헌

김용재. 1999. 덕동호의 식물플랑크톤 군집과 LTSI에 의한 호소의 영양상태평가, 한국조류학회지 **14**: 161–167.

김용재, 정 준. 1993. 임하호의 식물플랑크톤 군집 분석, 한국육수학회지 **26**: 175–196

김용재, 최재신, 김도한, 정 준. 1995. 임하호의 식물플랑크톤 군집의 생태학적 고찰, 한국육수학회지 **28**: 61–77

김용재, 최재신, 김한순. 1997. 임하호의 식물 플랑크톤 군집구조, 한국육수학회지 **30**: 307–324

김윤희, 김범철. 2004. 대형댐에서 부유물질의 중층이동과 모델링, 한국생물과학협회 학술발표 대회초록집 **8**: 31

박재충, 박정원, 신재기, 이희무. 2005. 인공호에서 몬순과 태풍 강우에 의한 고탁수층의 이동과 소멸특성, 한국육수학회지 **38**: 105–117

박정원, 신종학, 이갑숙. 1999. 하계 임하호에서 식물플랑크톤 군집의 구조, 한국환경생물학회지 **17**: 95–115

사승환, T. Masusa and Y. Hosoi. 2004. 농업유역으로부터 유출되는 부유물질의 특징과 부영양화에 미치는 잠재적 영향 평가, 한국생물과학협회 학술발표대회초록집 **8**: 32

신재기, 강창근, 황순진. 2003. 팔당호에서 수중 탁도의 일 변동과 고탁수의 입자 분포, 한국육수학회지 **36**: 257–268

한국수자원공사. 2004. 안동댐 비점오염물질 유입특성 및 저감방안조사 보고서(2차년도).

허우명, 권상용, 이요상. 2004. 낙동강 상류 지역의 탁수발생 실태. 제59회 한국생물과학협회 학술 발표대회 **8**: 30

APHA, AWWA, WPCF. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th ed. APHA, Washington, DC.

Eloranta P. 1993. Diversity and succession of the phytoplankton in a small lake over a two-year period. *Hydrobiologia* **249**: 25–32

Harper, D. 1992. Eutrophication of Freshwaters. Chapman & Hall, London.

Hendey, N.I. 1974. The permanganate method for cleaning freshly gathered diatom. *Microscopy* **32**: 423–426.

Holzmann R. 1993. Seasonal fluctuations in the diversity and compositional stability of phytoplankton communities in small lakes in upper Bavaria. *Hydrobiologia* **249**: 101–109.

Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. Limnology, 2nd ed. McGraw–Hill, Inc. New York.

Maitland, P.S. 1990. Biology of Fresh Waters. 2nd ed. Chapman and Hall, New York.

(Manuscript received 3 August 2005,
Revision accepted 9 September 2005)