

〈총 설〉

유글레나조류의 분류 및 생태와 환경 교육

김 준 태^{1,2} · 부 성 민^{2*}^{1,2}서산여자고등학교, ²충남대학교 자연과학대학 생물학과Taxonomy and Ecology of Euglenoids (Euglenophyceae)
and Their Application to Environmental EducationJun Tae Kim^{1,2} and Sung Min Boo^{2*}^{1,2}Seosan Girls' High School, Seosan and ²Department of Biology,
Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Abstract - Euglenoids occurring in freshwaters are indicator organisms to be used for assessing water quality and applying to environmental education. One hundred sixty eight taxa of euglenoids belonging to three orders, four families and nine genera occur in various waters, especially in eutrophicated and polluted places in Korea. Members of *Euglena* and *Strombomonas* are abundant in urban drainages and old ponds, and those of *Trachelomonas*, *Phacus*, and *Lepocinclis* often occur in stagnant waters such as natural wetlands and old swamps. Population size of some euglenoids is significantly correlated to nitrogenous nutrients. *Euglena caudata*, *E. deses*, *E. ehrenbergii*, *E. haemichromata*, *E. geniculata*, *E. viridis*, *Lepocinclis ovum*, *Strombomonas urceolata*, *Phacus trypanon*, *Trachelomonas hispida*, and *T. volvocina* cells in Korea bloomed in winter and spring, when other phytoplanktonic algae greatly decrease. Blooming of euglenoids indicates tolerance to pollutants and positive selection as a result of competition with other phytoplankton species. We developed a web site on green euglenoids (Yahoo.com: Science/Biology/Botany/Phycology/Biology of Green Euglenoids), which may be used for cyber education of water environment. We also presented a method for assessing water quality using diversity and population size of euglenoids, which is considered to be suitable for environmental education of polluted waters.

Key words : Blooming, Cyber education, Environmental education, Euglenoids, Euglenozoa, Pollution, Fresh waters, Web site

서 론

유글레나조류(euglenoids)는 남조류, 녹조류, 규조류와 더불어 수계에서 주요한 플랑크톤 군집을 이루며 수생 천이 단계를 구성하는 미세조류이다(Round 1981). 유글

레나조류는 단세포 생물로, 세포벽이 없고, 주피라는 단 백질막으로 싸여 있으며, 분류군에 따라 1~4개의 편모가 있으며 종분열에 의한 무성생식을 하고 성의 구별이 없다(Leedale 1967). 유글레나조류는 엽록소의 유무를 기준으로 독립영양균과 종속영양균으로 구분된다. 녹색 유글레나조류는 엽록체와 안점(stigma)있고, 광합성을 하며, 파라밀론이라는 독특한 탄소동화 산물이 있다. 무색 유글레나조류는 오랜 진화적 역사를 통해 엽록체를

* Corresponding author: Sung Min Boo, Tel. 042-821-6555, Fax. 042-822-9690, E-mail. smbboo@hanbat.chungnam.ac.kr

있는 것으로 추정되고 있다(Walne 1980).

우리나라에서 수환경의 관리는 농·공업용수의 공급은 물론, 식수원 유지에 매우 중요하다. 더욱이 수자원의 고갈은 심각한 사회 문제로 야기될 수 있으며, 각종 오염원에 노출되어 있는 지천의 관리도 매우 미흡한 실정이다. 도시하천과 많은 호소들은 생활하수 등으로 오염되어 있으며, 오염된 수환경에 대한 이해는 주로 물리, 화학적 자료에 의존하고 있다. 그러나 수환경을 올바르게 이해하기 위하여, 서식하는 수서생물에 대한 철저한 연구가 병행되어야 한다. 부영양화된 담수계에서 식물플랑크톤에 관한 연구는 남조류 *Microcystis*와 규조류 *Stephanodiscus* 등에서 활발히 수행되고 있다(Cho and Shin 1995; Lee et al. 1998).

유글레나조류의 출현과 분포는 오염과 관련되어 있으며(Nygaard 1949; Sládeček 1989), 특히 오염된 도시하천이나 부영양호에서 다양하게 출현한다(Pringsheim 1956; Munawar 1972; Round 1981; Xavier et al. 1991). 대부분의 미세조류가 용존 상태의 질소와 인에 영향을 받는 것처럼, 영양염류의 농도는 유글레나조류의 생육에 중요하다. 이로 인하여 유글레나조류의 발생 빈도는 자연적으로 혹은 인위적으로 부영양화가 발생하는 수계에서 높아진다.

우리나라에서 유글레나조류에 관한 연구는 주로 조류상, 유수학적, 생태학적 조사(예, 정과 장 1957; 조 등 1995)와 최근 저자들에 의해 분류, 생태 및 미세구조에 관한 연구가 집약적으로 수행되어 왔다(Kim and Boo 1996, 1998a, b; Kim et al. 1998, 1999, 2000a, b, c; Shin and Boo 1999, 2001; Shin et al. 2000). 이를 통해 유글레나조류의 종들이 도시 하천이나 오래된 방죽에서 다양하게 출현하며, 주로 겨울과 봄에 대발생(blooming)함을 관찰하였다. 유글레나조류는 부영양화 또는 오염된 수환경에 잘 적응하므로 수질의 평가는 물론, 효율적인 환경교육의 자료로 활용할 수 있는 원생생물이라고 판단된다. 본 논문에서는 다양한 담수계에 서식하는 유글레나조류의 분류 및 생태학적 연구결과들을 종합적으로 검토하고, 유글레나조류가 수환경 교육에 적합한 생물임을 고찰하고자 한다.

유글레나조류의 분류

유글레나조류는 역사적으로 많은 종속지적 연구를 통해 각 대륙으로부터 조류상이 보고되어 왔다. Huber-Pestalozzi(1955)는 이미 발표된 문헌들을 종합하여, 녹색 유글레나조류를 종 하위 분류군을 포함하여 1,023 분류군으로 정리하였다. 이 중 *Trachelomonas*속이 235 분

류군, *Phacus*속 150 분류군, *Euglena*속 101 분류군 등으로 주요 분류군을 이룬다. 무색 유글레나조류는 267 분류군으로 정리하였고, 이 중 *Petalomonas*속이 58 분류군으로 많았다. Huber-Pestalozzi의 정리가 기존 문헌의 많은 분류학적 혼란을 제거하였지만, 기재된 분류군의 수가 방대한 만큼 종에 대한 분류학적 신빙성은 여전히 문제점으로 남아 있다.

수환경을 연구하는 전문가들도 서로 다른 수환경에서 종의 외형에 대해 서로 다르게 접근함으로써 종의 동정에 주관성이 개입될 수 있다. 분류학적 분할론자들은 분류군들을 가능하면 세분하여, 많은 분류군들을 기재함으로써 종 다양성을 높인다(Pochmann 1942; Conforti and Tell 1986; Philipose 1988; Wolowski 1992). 이 결과, 많은 희귀종들이 등장하게 되고, 종의 분류학적 경계가 모호한 경우가 많게 된다. 반대로, 병합론자들에 의해 보고된 자료에는 분류군의 수가 적고 종의 생태학적 변이를 고려하고 있다. 예를 들면, Zakrys(1986)는 *Euglena acus*의 5 변종과 *E. acutissima*를 *E. acus*의 이명으로 처리하였다. Kim et al.(1998)은 *E. viridis*의 7 변종과 *E. stellata*를 *E. viridis*로, *E. geniculata*의 5 변종과 *E. schmitzii* 및 *E. terricola*를 *E. geniculata*의 이명으로 각각 처리하였다. 또한, Kim et al.(2000a)은 *Trachelomonas hispida* 6 변종은 생태적 변이에 기인한다고 주장하였으며, Kim et al.(2000b)은 *Phacus longicauda*에서 5개의 종하위분류군을 var. *longicauda*로, 5개의 유사종을 var. *tortus*로 이명 처리할 것을 주장하였다. 이와 같은 형태적 및 생태적 변이를 고려한 종의 분류학적 경계는 유글레나조류의 생물지리학적 분포를 결정하는데 중요하다. 광의의 종개념은 기재하는 종의 수는 적으나, 각 종의 분포역이 넓어지는 경향이 있고, 협의의 종개념은 특정 지역에만 분포하는(endemic distribution) 경향을 보여준다.

우리나라에서 유글레나조류의 분류는 정과 장(1957)이 서울 근교의 *Euglena*속 보고를 시작으로, 주로 조류상의 보고 차원에서 연구되었고, 최근 저자들에 의하여 집중적으로 연구되어(Kim and Boo 1998a; Kim et al. 1998a, 2000a, b), 현재 3목 4과 9속 168 분류군으로 정리하였다(Table 1). 이중에 유글레나목 유글레나과를 대상으로 저자들은 사이버 환경교육의 자료로 web site (Yahoo.com: Science/Biology/Botany/Phycology/Biology of Green Euglenoids 또는 <http://euglenoid.hihome.com>)를 개발하였다. 데이터베이스는 *Euglena*속 27 분류군, *Lepocinclis*속 18 분류군, *Phacus*속 27 분류군, *Strombomonas*속 9 분류군, *Trachelomonas*속 51 분류군 등 총 5속 312 분류군의 검색표, 종의 기재, 묘화 및 사진 자료

Table 1. Number of taxa of the representative euglenoids in Korean waters

Orders	Families	Genera	Number of species	References
Euglenales	Colaceae	<i>Colacium</i>	1	김영환 등 1996
	Euglenaceae	<i>Euglena</i>	31	Kim <i>et al.</i> 1998
		<i>Lepocinclis</i>	18	Kim 1998
		<i>Phacus</i>	35	Kim <i>et al.</i> 2000b
		<i>Strombomonas</i>	9	Kim and Boo 1998a
		<i>Trachelomonas</i>	70	Kim <i>et al.</i> 2000a
Eutreptiales	Eutreptiaceae	<i>Eutreptiella</i>	2	김영환 등 1996
Euglenomorphales		unknown		
Rhabdomonadales		unknown		
Sphenomonadales		unknown		
Heteronematales	Peranemaceae	<i>Anisonema</i>	1	김영환 등 1996
		<i>Peranema</i>	1	김영환 등 1996
Total 3	4	9	168	

를 신고 있다.

한국산 유글레나조류 분류의 문제는 무엇보다도 각종의 식별형질을 어떻게 인식하느냐 하는데 있다. 이는 형태적으로 단순한 단세포 생물의 분류에서 흔히 봉착하는 문제의 하나이며, 현재 70여 분류군이 보고된 *Trachelomonas*속에서 그 예를 볼 수 있다. *Trachelomonas*속은 전통적으로 원형질 외부의 피각(lorica)의 형태에 근거하여 종을 분류하여 왔으나, 피각의 분류학적 가치에 대해서는 여전히 의견이 다르다(Walne 1980). 둘째, 형태적으로 단순하므로 수렴진화의 결과를 인식하지 못하는 경우가 많아서, 계통적으로 다른 분류들을 동일 종으로 인식하는 오류를 범하기 쉽다. 셋째, 각 분류군에 대한 충분한 기재와 묘화 및 사진 등의 자료가 제시되어야 한다. 연구의 초창기에 대부분 그렇듯이 보고하는 종에 대한 간단한 기재는 후학들로 하여금 오히려 종의 동정에 혼동을 야기할 수 있고, 분류군의 수를 증가시키는 요인이 된다. 넷째, 일회성 관찰은 유글레나조류의 올바른 동정과 분류를 저해하는 요인이 된다. 저자들은 유글레나조류 시료를 냉암소에서 starvation시키면서 지속적으로 관찰한 결과, 분류학적으로 중요한 엽록체나 파라미론의 형태적 변이를 관찰한 바 있다. 예를 들면, *Euglena acus*는 일반적으로 세포내에 다수의 작은 원반형 엽록체들이 있으나, 냉암소에서 starvation시키면 탈색되어 무색 유글레나류인 *Astasia*종의 형태와 유사해진다. 이러한 관찰은 우리나라에서 연구가 미진한 무색 유글레나류의 분류학적 연구에 매우 중요하다. 또한 저자들은 현재 전주천에서 1년간 유글레나조류의 분류 및 생태학적 연구를 수행하고 있으며, 이를 통하여 동일 지역의 계절에 따른 변이를 인식하고자 한다. 다섯째로 한국산 유글레나조류의 조류상과 분류는 광범위한 수계에

서 연구되어 지역 변이를 인식하여야 한다. 저자들은 한국 전역의 58 수계에서 다양한 시료를 채집하여 수환경에 따른 종의 형태적 변이나 식별형질의 가소성을 검토한 바 있다. 예를 들면, 강릉 경포호에서 채집된 *Euglena viridis*는 다른 도시하천에서 채집된 종보다 세포가 크고, 엽록체의 열편이 적다(Kim *et al.* 1998). 따라서 산간 계류에서 인위적으로 교란된 도시 하천에 이르는 여러 지소에서 채집된 시료들을 관찰하므로써 유글레나조류를 올바르게 분류할 수 있다. 여섯째, 유글레나조류와 같이 형태적으로 단순한 단세포생물은 세포 미세구조의 분화가 다양하므로, SEM과 TEM등을 이용한 미세구조의 연구가 수반되어야 한다. 최근 저자들은 SEM 관찰을 통해 피각 형질의 변이를 집약적으로 검토함으로써 *Trachelomonas hispida*의 중하위 분류군들을 모두 이명으로 처리할 것을 제의하였다(Kim *et al.* 1999). 또한, TEM 연구를 통하여 하등한 무색 유글레나조류에서 보고된 가로무늬섬유(striated fiber)가 녹색 유글레나조류인 *Phacus trypanon*의 feeding apparatus에서도 잘 발달되어 있음을 관찰하고, 유글레나조류의 계통분류 체계의 새로운 개정을 주장하고 있다(Shin & Boo 2001). 마지막으로, 형태 및 미세구조의 연구가 DNA의 염기서열 분석등의 유전자 수준의 연구와 통합 정리될 때, 한국산 유글레나조류의 올바른 분류체계가 마련되고, 육수, 생태 및 환경 등의 관련 연구 분야에 일관된 자료와 정보를 제공하게 될 것이다.

유글레나조류의 분포와 생육지

유글레나조류의 분포는 수계의 특성, 즉 미소 생육지의 물리 및 화학적 환경에 따라 다르게 나타난다. *Euglena*

속과 *Strombomonas*속은 생활하수에 의한 오염이나 부영양화가 심한 도심의 하천과 연못에 많고, *Trachelomonas*, *Phacus*, *Lepocinclis*속은 자연늪이나 오래된 연못과 같은 정체 수역에서 다양하다. 특히, 자연늪의 경우 녹색 유글레나조류의 다양성을 확인할 수 있을 정도로 출현종이 많아서, Kim (1998)은 경남 일대의 5개 자연늪에서 하계에 1회 채집하여 113 분류군을 기재한 바 있다. 이는 유글레나조류의 다양성이 자연늪과 같이 인위적인 간섭이 적은 수계에서 다양한 생태적 지위가 마련되어 나타난 결과로 간주된다.

유글레나조류의 생육지는 염도를 기준으로 염수종, 기수종, 담수종으로 분류된다. 염수에 서식하는 유글레나조류는 대부분 *Eutreptia*와 *Eutreptiella*속에 해당한다. 이들은 해안가에서 대발생하기도 하며 규조류, 와편모조류 등과 더불어 계절적인 천이 과정에 참여하기도 한다 (Smayda 1980; Kato 1994). *Eutreptia*와 *Eutreptiella*를 제외한 녹색 유글레나조류가 염수에서 정상적인 생육지를 형성하는지는 논란이 되고 있으나, *Euglena obtusa*, *E. variabilis*, *E. mutabilis*가 염수에서 생육한다 (Gojdic 1953; Pringsheim 1956; Round 1981). 우리나라에서는 염수와 담수가 혼합되는 금강 하구연의 기수역에서 5속 27종의 유글레나조류가 확인된 바 있고, *E. viridis*와 *E. caudata* 개체군의 크기가 규조류나 녹색소구체 녹조류 등과 함께 계절적인 천이 단계를 구성할 정도로 크다고 보고한 바 있다 (조 등 1995; 김 등 1996b).

Euglena, *Trachelomonas*, *Lepocinclis*, *Phacus*, *Strombomonas*, *Colacium*속 등은 전형적으로 담수역에서 출현한다. 이들은 유기물질에 의한 부영양화 혹은 오염 정도가 심한 정체수역(예, 연못, 호수, 늪지)에서 주된 생육지를 이루고 있으며, 출현 빈도는 낮지만 강이나 산간계류와 같은 유수역에서도 발견된다 (김 등 1996b, c; Kim and Boo 1996; 부 등 1997; 김과 부 1998). 유글레나조류의 다양성은 흐르는 물보다는 고인 물에서 더 높아진다. 예를 들면, 금강 하류에서 출현종 수는 하구연 폐쇄 후 수계의 정체화가 이루어지면서 점차 증가하였다 (김 등 1996b). 담수계에서 대부분의 유글레나조류는 부유성으로 진광대 (euphotic zone)에서 유영운동을 하며, 일부는 저층의 진흙이나 침전물 표면에서 포복운동을 한다. 유영종들은 일주기성을 띠기도 한다. 예를 들면, *Euglena sanguinea*는 한 낮에 수표면에서 번무하여 물색을 적색으로 물들이지만 광량이 감소되면 분산된다 (Xavier et al. 1991). 이러한 현상은 실험실내에서도 관찰된다. 야외에서 채집된 시료를 메스실린더에 넣고 창가에 놓아두면, 낮에는 대부분 빛의 방향으로 이동하여 실린더 안쪽 표면에 밀집된 피막을 형성하나, 밤이 되면 분산된다.

Euglena deses, *E. ehrenbergii* var. *baculifera*, *E. obtusa* 등은 포복종 (creeping species)으로, 침전물 표면을 녹색으로 뒤덮을 정도의 피막을 형성하기도 한다. 포복종들은 세포 길이가 100 μm 이상되는 대형종들로 세포 길이의 약 1/5에 해당하는 매우 짧은 편모를 가지고 있다 (Kim 1998; Kim and Boo 1998b; Kim et al. 1998).

Euglena fusca, *E. velata*, *Trachelomonas reticulata* 등은 목본식물의 흠이나 구멍 속의 고인 물에서도 발견된다. Lackey (1968)는 그러한 생육지에서 유글레나조류가 모기 유충의 중요한 먹이원이 되어 미소 생태계 피라미드의 기반을 구축하게 된다고 보고한 바 있다. 이외에도 유글레나조류는 극지나 고지대의 만년설에도 서식하며, 대발생하여 눈의 색을 연두색으로 물들인다 (Smith 1950).

유글레나조류와 영양염류

수환경에서 유글레나조류의 생장에 필수적으로 고려되어야 할 원소는 질소, 인, 철, 망간 등이다. 용존 상태의 원소들은 영양소 측면에서 뿐만 아니라 세포의 구성 성분으로서도 이용된다. 물론, 미세조류 생육에 미치는 영향을 영양염류의 농도 자체만을 가지고 논의하기에는 불충분하다. 이들의 변화는 계절에 따른 수온의 변화나 인위적인 염류 부하량 등과 더불어 고려되어야 한다.

유글레나조류는 암모늄염, 아질산염, 질산염 상태로 질소를, 인산염 상태로 인을 이용한다. 영양염류중 특히 N:P 요인은 유글레나조류와 다른 미세조류와 경쟁, 배타 및 공존 등의 관계를 규명하는데 필수적이다 (Goldman 1978; Sommer 1989). 이와 같은 관계는 유글레나조류가 질소성 염과 인산염의 농도에 의존하여 남조류, 녹조류, 규조류와 더불어 계절적인 천이과정에 참여하는 것으로 알 수 있다 (Kim and Boo 1996, 1998b). 금강과 낙동강에서의 연구에 의하면, 하계에는 용존 질소량이 제한되어 남조류(예, *Microcystis* spp.)가 대발생하게 되고, 동계에는 온도와 영양염류 농도의 저하 및 규산염 농도의 증가와 같은 요인들에 의하여 *Stephanodiscus* spp. 등의 규조류가 대발생한다 (Cho and Shin 1995; 김 등 1996b; Lee et al. 1998). 금강에서 하구연 폐쇄 후, 규조류와 남조류가 겨울철인 1월과 여름철인 7월에 각각 번무하였으나, 녹색 유글레나조류의 출현종수와 개체수는 2월과 6월에 증가하므로써 다른 미세조류와의 공존을 피하고 있다 (김 등 1996b).

저자들은 (Kim and Boo 1998b) 우리나라의 주요 도시 하천에서 *Euglena geniculata*의 2가지 형태형을 관찰하였다. morphotype 1은 세포의 크기, 엽록체 특징, 편모 길이 등에서 *E. geniculata*의 전형적인 특징을 보이나,

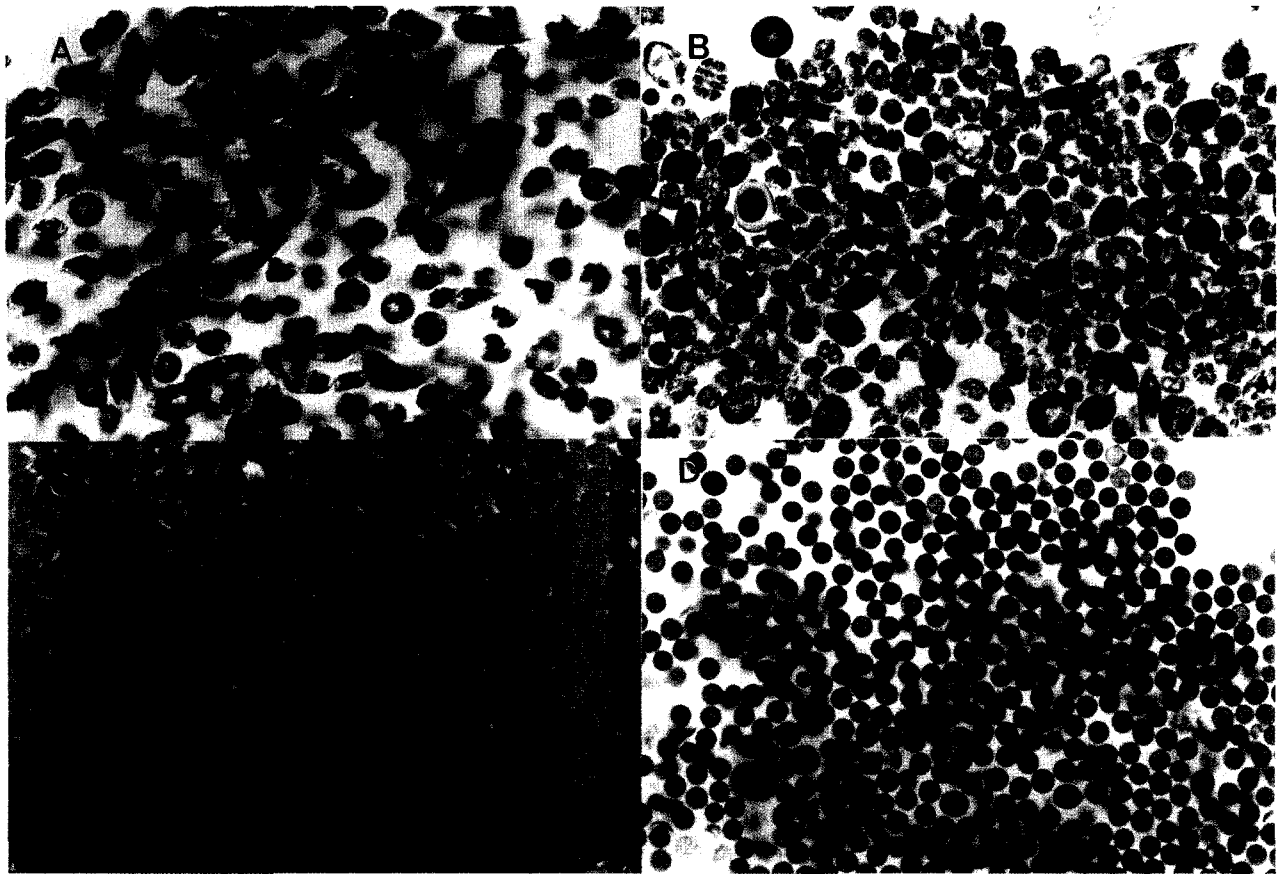


Fig. 1. Bloomed cells of some green euglenoid species. A. *Euglena viridis* in Cheonjucheon in 24 December, 1996. B. *E. haemichromata* in Kwangjucheon in 4 January, 1997. C. *E. sanguinea* in a small pond of Hongsung in 19 February, 2000. D. *Trachelomonas volvocina* in Yonghwa fishery pond of Iksan in 26 May, 1996.

morphotype 2는 세포가 크고, 엽록체가 갈라지고, 편모가 짧으며, 포복운동을 한다. 이러한 형태적 변이는 질산염의 농도와 밀접한 상관관계를 보이며, 오염된 수환경에서 빈번한 것으로 알려져 있다(Conforti 1998). 이는 유글레나조류의 형태변이가 영양염류에 대한 반응 등의 생리·생태적 요인들에 의존함을 보여준다.

철과 망간은 피각의 구성원소로서 *Trachelomonas*속과 *Strombomonas*속에 중요하다. 피각은 주피 외부에 유기 점액질층이 만들어진 다음 주변 환경에서 철과 망간이 침적됨으로써 형성되는데, 피각의 색과 구조는 수환경의 Fe:Mn 비율에 따라 다르게 나타난다(Leedale 1975; Donnelly and Walne 1979; Walne 1980). 수계에서 철의 함량이 높으면 피각은 보다 붉은색을 띠고 과립형이 되지만, 망간 함량이 높으면 무기질이 섬유상으로 침적된다.

유글레나조류의 대발생 (blooming)

유글레나조류의 개체군 크기는 수계 종류에 따라 달

라진다. 산간계류나 강과 같은 유수역에서 유글레나조류의 전체 개체수는 $100 \text{ cells ml}^{-1}$ 이하로 저조한 반면, 영양염류가 풍부한 도시하천에서는 $1,000 \text{ cells ml}^{-1}$ 이상으로 많아진다. 자연늪에서는 매우 다양한 출현 양상을 보이나 대발생은 관찰되지 않는 것은 자연늪이 자연적인 부영양화와 자정작용을 반복함을 대변하며, 반대로 도시하천에서 유글레나조류가 다양하고 개체수가 많은 것은 유글레나류가 오염원에 대해 내성을 갖거나, 다른 미세조류의 증식이 불리한 교란수계에서 경쟁적 우위를 점유한다는 것을 시사한다.

유글레나조류는 영양염류 부하량이 많은 정체수역이나 도시하천과 같은 오염수역에서 다른 미세조류의 출현을 배제시킬 정도로 대발생한다. 저자들은 대발생 유글레나조류로 *Euglena caudata*, *E. deses*, *E. ehrenbergii*, *E. haemichromata*, *E. geniculata*, *E. sanguinea*, *E. viridis*, *Lepocinclis ovum*, *Strombomonas urceolata*, *Phacus trypanon*, *Trachelomonas hispida*, *T. volvocina* 등을 확인한 바 있다(Kim and Boo 1996, 1998a, b; Kim 1998;

Kim et al. 1998, 1999, 2000a, b, c). Fig. 1은 저자들에 의해 확인된 *Euglena haemichromata*, *E. sanguinea*, *E. viridis*, *Trachelomonas volvocina*의 대발생 모습이다. *Euglena*종은 주로 도시하천과 같은 오염수역에서 1,000 cells ml⁻¹ 이상으로 번무하며, 수표면을 진한 녹색으로 물들일 정도로 대발생한다. *Trachelomonas volvocina*는 농업용 방죽이나 소규모의 양어장에서 5,000 cells ml⁻¹ 이상으로 대발생하여 수표면을 황갈색으로 물들인다. *Trachelomonas volvocina*에 의한 수체의 색조 변화는 연안에서 와편모조류의 대발생에 의한 적조현상과 대비되는 것으로 담수에서의 미세조류 대발생 제어 차원에서 주요한 분류군으로 검토되어야 할 것이다.

수계에서 유글레나조류의 우점현상은 질소와 인 등의 영양염류의 부하량이 많은 도시하천이나 도심의 연못에서 뚜렷하다. 이들 원소의 농도가 높고 다른 물리화학적 인 환경요인이 적당하다면 유글레나조류는 활발히 분열하게 되어 대발생한다. 저자들은 (Kim & Boo 1998b) 질소성 영양염류 농도가 높은 도시하천에서 겨울철에 *Euglena geniculata*의 대발생을 보고한 바 있으며, 전주천에서 1년동안의 지속적인 모니터링을 통해 겨울철에 암모늄염의 농도가 높아지면서 *E. geniculata*, *E. viridis*, *E. caudata*가 혼재되어 대발생하였고, 늦은 봄철에 질산염의 농도가 높아지면서 *E. deses*, *E. ehrenbergii*가 혼재되어 대발생한다는 결과를 얻었다(미발표). 이처럼 *E. geniculata* 개체군의 출현과 영양염류와의 관계는 이들 종을 이용한 수환경 진단이 가능함을 제시한다. 즉, 대발생 유글레나조류 개체군의 동태를 이용한 생물검정으로 도시하천과 같은 오염수역의 영양염류 부하량을 추정할 수 있고, 나아가 그 수역 부영양화 정도를 가늠할 수 있을 것이다.

최근 저자들은 오염된 수계에서 대발생한 *Euglena viridis*의 핵과 세포질에서 virus-like particles를 관찰하고, 이들간의 공생 및 기생에 관한 논의를 한 바 있으며 (Shin and Boo 1999), 유글레나조류의 세포내에 감염된 세균 및 수생균류의 미세구조의 연구 및 이들의 감염 경로와 기작을 추적하고 있다(미발표). 공생과 기생 분야의 연구는 유글레나조류를 비롯한 미세조류 대발생의 생리·생태적 제어 차원에서 중요하며, 앞으로 각광받는 연구 분야가 될 것으로 기대한다.

유글레나조류와 수질오염

수계의 오염원에 따라 유글레나조류의 종류상과 개체군 크기는 다르게 나타난다. 가축의 배설물에 의해 오염된 수역에서는 *Euglena*, *Cryptoglena*속의 종들이 번무

하는 경향이 있다. 이는 가축을 방목하거나 목장 인근에 위치한 연못이나 방죽에서 관찰된다. 동물의 배설물은 많은 양의 셀룰로오스와 셀룰로오스 유도체 및 환원성 질소를 포함한다. 이는 암모늄염이 풍부한 오염수계나 실험실 배양조건에서 유글레나조류가 활발히 증식한다는 것과 일치한다 (Leedale 1967; Munawar 1972; Xavier 1985). 밀집된 가옥이나 공동 주택 인근에 위치한 작은 도랑이나 하천에서는 유기 질소나 인 등이 다량 함유된 생활하수의 부하량이 높다. 이런 경우, 최초로 유입되는 유기물질은 세균에 의해 분해된 후에 유글레나조류에 이용된다. 즉, 오염원에 인접한 수역보다는 보다 멀리 떨어진 하류역에 유기물질의 분해산물들이 축적되면서 특정 분류군이 번무하게 된다. 인간활동에 의한 오염하수는 인산염이나 질산염과 같이 보다 산화된 형태의 염류들을 많이 포함하고 있다. 특이한 것은 생활하수에 의해 간섭을 받는 도시 하천에서 *Euglena* 이외에 *Strombomonas*종들이 번무한다는 것이다. 이러한 수계에서 *E. viridis*, *E. geniculata*, *E. caudata*, *E. deses*, *Strombomonas urceolata* 등도 자주 관찰하였다 (Kim and Boo 1998a; Kim et al. 1998).

유글레나조류는 다양한 유형의 오염원에 대해 다양한 생존전략을 가지고 적응한다. 이들은 산성 오염물질, 방사능 물질 및 섬유상 오염물질 등이 축적된 수역에서도 살아 남아, 다른 미세조류가 사멸되는 경우와 다르다 (Jahn 1951; Lackey 1968). 일부 오염원에 의해 개체군 크기는 작아질지라도, 순응기간이 지나면 곧 개체군 크기를 회복하는 능력을 가지고 있다. 이는 유글레나조류가 다른 미세조류의 출현이 매우 빈약한 교란 수계에서 오염원에 대해 내성을 가지고 활발히 증식하는 생물군임을 의미한다. 따라서, 오염된 수계에서 환경 스트레스에 적응하여 대발생하는 유글레나조류들은 유기물질에 의한 수질오염 정도를 나타내는 지표생물로서 환경교육에 적절한 생물이라고 판단된다.

전통적으로 유글레나조류는 많은 저자들에 의해 부수지수(saprobic index)의 척도를 나타내는 기준이 되었다 (Thunmark 1945; Nygaard 1949; Cassie 1979; Sládeček 1989). 예를 들면, Nygaard는 수계의 오염 정도를 판정하는 기준으로 유글레나조류를 다음과 같이 이용한 바 있다.

$$\text{유글레나조류 지수} = \frac{\text{유글레나조류}}{\text{남조류} + \text{녹조류}}$$

$$\text{복합지수} = \frac{\text{남조류} + \text{녹조} + \text{녹색소구체목} + \text{중심형 규조류} + \text{유글레나조류}}{\text{녹조 물면지말}(\text{desmid})}$$

본 논문에서는 우리나라 수계에서 선행된 연구 자료와

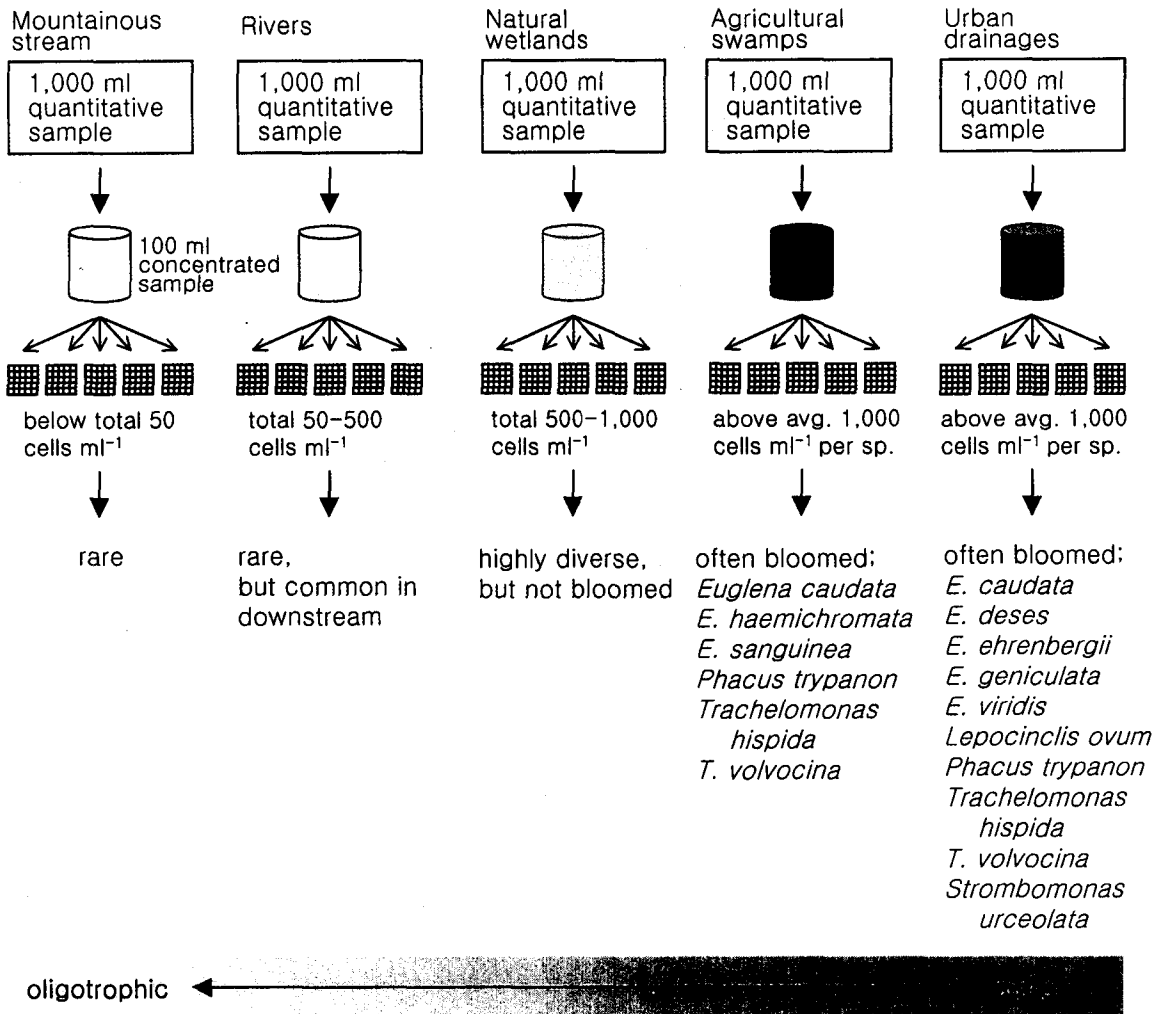


Fig. 2. Green euglenoids for assessing water quality in different waters. Green euglenoids rarely occur in mountainous stream and river and highly diverse in natural wetland. Some species bloom in turbulent agricultural swamps and polluted urban drainages in winter and spring.

저자들에게 축적하고 있는 자료들과(예, Kim & Boo 1996, 1998b) 선행된 외국의 자료(예, Sládeček 1989; Round 1981)들을 통합 분석하고, 유글레나조류의 종다양성과 개체군 크기에 근거한 수질의 평가 방안을 Fig. 2와 같이 제시한다. 이는 수계의 모든 식물플랑크톤의 연구 결과를 바탕으로 제시된 Nygaard (1949) 등의 수질 평가 지수에 비하여, 시간과 노력이 적게 들고 출현종에 대해 분류와 생태학적 일관성을 기할 수 있다는 점에서 적용상의 이점이 있다고 본다. 또한, 생활 용수 등이 직접적으로 유입되는 도시 인근의 오염된 하천에는 다른 미세조류들의 출현이 저조하고 상대적으로 유글레나조류가 흔히 출현한다는 점에서도 효율적인 방안이 될 것으로 사료된다. 수질오염의 진단은 산간 계류보다는 도시인의 생활에 밀접한 도시하천에서 많이 이루어져야 한다는

점에서 유글레나조류를 이용한 생물학적 평가는 유용하게 쓰일 것이다.

유글레나조류와 환경교육

우리나라의 환경교육은 1980년대 이후 학교교육에 제도화되기 시작하면서 환경에 대한 의식과 가치관 함양에 노력해 왔다. 그러나 환경교육의 인식은 지식이나 논리성 위주의 표피적인 행동 지향적 목표에 치중되어 왔고, 문제상황에 대한 해답을 찾기 위한 교육자료 및 매체 등의 교수·학습 방안의 실행은 부족한 실정이다. 이는 특히 환경을 구성하는 생물 구성원에 대한 학문적 지식이 여전히 부족하다는 점에서 하나의 원인을 찾을 수 있다.

올바른 환경교육은 환경을 구성하는 요인들을 충분히 인식하고, 구성 요인들간의 상호작용을 이해하는 단계에서 비롯된다. 특히, 환경을 구성하는 생물요인의 분류와 생태적 특징을 충분히 연구하여 기초적인 자료와 정보를 확보하는 일이 선결되어야 할 것이다. 유글레나조류를 이용한 수환경 교육은 문제 해결에 필요한 자료를 수집하는 과정을 강조함으로써 조작의 기능을 기르고 성취감을 체득함으로써 올바른 환경의식을 함양할 수 있다. 출현종들에 대한 분류 및 생태학적인 정보는 관련 자료나 도감(Gojdics 1953; Huber-Pestalozzi 1955; Pringsheim 1956; Kim 1998), 또는 저자들이 개발한 web site (Yahoo.com: Science/Biology/Botany/Phycology/Biology of Green Euglenoids)를 이용함으로써 일관된 자료와 정보로 환경을 이해할 수 있다. 또한, 모든 종들에 대해 액침, 슬라이드, 묘화 및 사진 등의 확증표본을 제작하는 과정에서 살아있는 수환경 교육이 이루어질 수 있을 것이다. 오염된 수계는 대발생한 유글레나조류의 개체군의 크기를 직접 측정하고 영양염류와의 상관관계를 파악함으로써 체험적인 환경교육의 장으로 활용될 수 있다. 유글레나조류에 의한 수계의 구분은 생물과 환경과의 관계를 명확히 하는 환경 가치 교육프로그램으로 이용될 수 있다. 생물과 환경과의 관계를 파악하는 교육활동을 통해 환경문제의 심각성을 피부로 느낄 수 있게 된다. 그러한 점에서 오염된 수환경에서 대발생하는 유글레나조류의 분류 및 생태학적 자료와 정보의 확보는 환경적으로 건전한 가치, 신념, 태도 및 윤리를 갖게 하고, 나아가 환경적으로 바람직한 의사결정과 실천적 활동을 이끌어내는 환경철학의 기반이 될 것이다.

결 론

기존의 수환경 교육은 물리·화학적 차원에서 이루어져 왔으나, 다양한 수계에서 서식하는 식물플랑크톤 등의 수생생물은 다소 도외시되어 왔다. 1990년대 이후로, 우리나라에서도 인공호소에서 흔히 발생하는 남조류와 규조류 등의 검토가 이루어져 왔으나, 이외의 미세조류에 관한 정보는 상대적으로 부족하며, 유글레나조류에 관한 것은 전무한 실정이다. 본 논문에서 수계의 부영양화 정도를 유글레나조류의 종 다양성과 개체수로 평가함으로써, 유글레나조류를 수환경의 지표생물로 적용할 것을 우리나라에서는 처음으로 제시하고 있다. 또한, 유글레나조류의 개체군 크기 변화를 모니터링함으로써 오래된 정체수나 인위적 간섭이 심한 도시하천에서 효율적인 수환경의 평가가 이루어질 수 있는 방안과 자료를 제시하였다. 유글레나조류의 분류와 생태에 대한 충분한

이해는 수환경을 구성하는 생물요인에 대한 인식을 고취시키고, 구체적인 환경 교수-학습의 자료로 활용되어 효율적인 환경교육의 학문적 기반이 될 것이다.

적 요

본 논문은 유글레나조류의 분류 및 생태에 관한 선행된 연구결과들을 종합 정리하고, 이를 환경교육에 접목하기 위한 것이다. 유글레나조류는 편모가 1~4개이며 다양한 수계에서 플랑크톤으로 생활하는 단세포 미세조류로서, 우리나라 전역에서 채집 조사된 종류는 종 하위 분류군을 포함하여 3목 4과 9속 168 분류군으로 정리된다. *Euglena*속과 *Strombomonas*속은 유기물 오염이 심한 도시 하천과 연못 등에 번무하였으며, *Trachelomonas*, *Phacus*, *Lepocinclis*속은 자연늪이나 오래된 연못과 같은 정체 수계에 많이 출현하였다. 유글레나조류의 개체군 크기는 질산염 등의 질소성 영양염과 유의한 상관관계를 보였다. *Euglena caudata*, *E. deses*, *E. ehrenbergii*, *E. haemichromata*, *E. geniculata*, *E. viridis*, *Lepocinclis ovum*, *Strombomonas urceolata*, *Phacus trypanon*, *Trachelomonas hispida*, *T. volvocina* 등은 주로 겨울과 봄철에 대발생을 하였다. 저자들은 유글레나조류를 환경교육의 적정생물의 하나로 인식하고, 그 기본자료로서 웹사이트(Yahoo.com: Science/Biology/Botany/Phycology/Biology of Green Euglenoids)를 개발하고, 유글레나조류의 출현종과 개체수에 근거하여 수환경을 평가하는 새로운 방안을 제시하였다. 유글레나조류의 분류 및 생태에 관한 충분한 이해에 입각한 수질의 평가는 기존의 물리·화학적 자료에 근거한 평가와 함께 환경교육의 주요 자료와 정보로 활용할 수 있으며, 수환경을 바르게 이해하는데 크게 기여할 것이다.

사 사

본 연구는 한림대학교 한림과학원 교사 연구과제(1996-1998)의 일부 지원으로 수행되었다. 본 원고를 정리하도록 배려하고 조언하여 주신 한양대학교 한명수 박사님과 생명공학연구소 오희목 박사님께 감사드린다.

인 용 문 헌

- 김영환, 이진환, 이준백, 이옥민. 1996a. 한국 생물 종 목록: 하등식물, 402-404 pp. (이인규, 최정일, 유종수, 이상돈 편). 자연보호중앙협의회. 서울.
- 김준태, 박유라, 조현실, 부성민. 1996b. 금강 수계에서 식물플

- 랑크톤의 군집구조. 한국육수학회지 29:187-195.
- 김준태, 부성민. 1998. 금강 하류에서 녹조류 녹색소구체목 개체군의 동태. 한국육수학회지 31:219-224.
- 김준태, 조현실, 부성민. 1996c. 보령 수계에서 식물플랑크톤의 종조성과 현존량. 충남과학연구지(충남대학교 기초과학연구소) 23:107-112.
- 부성민, 김준태, 조현실, 신웅기. 1997. 보령 지역 산간 계류에서 식물플랑크톤의 계절 변화. 한국육수학회지 30:167-174.
- 정영호, 장윤경. 1957. 서울 근교 유글레나속의 연구. 서울대 자연대 논문집 5:119-128.
- 조현실, 김준태, 부성민. 1995. 금강 수서생태계의 구조와 기능에 관한 연구: 식물플랑크톤. 환경연구 보고(충남대학교 환경문제연구소) 13:92-105.
- Cassie V. 1979. Algae in relation to water quality. Water and Soil Technical Publication. 18:21-30.
- Cho KJ and JK Shin. 1995. Persistent blooms of diatoms *Stephanodiscus hantzschii* f. *tenuis* and *S. parvus* in Naktong River. Korean J. Phycol. 10:91-96.
- Conforti V. 1998. Morphological changes of Euglenophyta in response to organic enrichment. Hydrobiologie. 369/370:277-285.
- Conforti V and G Tell. 1986. Les Euglenophytes de la Terre de Feu, Argentine. Nova Hedwigia. 46:305-3176.
- Donnelly LS and PL Walne. 1979. Comparative ultrastructure of three species of *Trachelomonas* (Euglenophyceae). ASB Bull. 26:46.
- Gojdics M. 1953. The genus *Euglena*. University of Wisconsin Press. Madison.
- Goldman CR. 1978. The use of natural phytoplankton population in bioassay. Mitt. Internat. Verein. Limnol. 21:364-371.
- Huber-Pestalozzi P. 1955. Das Phytoplankton Süßwassers, 4. Teil: Euglenophyceen. Die Binnengewasser 16:1-606.
- Jahn TL. 1951. Euglenophyta. pp. 69-81. In Manual of Phycology (Smith GM ed.). The Chronica Botanica Co. Mass., USA.
- Kato S. 1994. Three species of *Eutreptia* (Euglenophyceae) from Japan. Jpn. J. Phycol. 42:221-226.
- Kim JT. 1998. Taxonomic and floristic accounts of the green euglenoids (Euglenophyta) in Korean fresh waters. PhD thesis. Chungnam National University, Daejeon.
- Kim JT and SM Boo. 1996. Seasonal changes of the Euglenoid species and the biomass in the Kumgang river. Algae 11:375-379.
- Kim JT and SM Boo. 1998a. Floristic and taxonomic accounts of the genus *Strombomonas* (Euglenophyceae) from Korean fresh waters. Algae 13:275-282.
- Kim JT and SM Boo. 1998b. Morphology, population size and environmental factors of two morphotypes in *Euglena geniculata* (Euglenophyceae) in Korea. Algological Studies 91:27-36.
- Kim JT, SM Boo and A Coute. 2000a. Taxonomic and floristic accounts of the genus *Trachelomonas* Ehrenberg 1833 (Euglenophyceae) from Korea. Korean J. Limnol. 33:80-108.
- Kim JT, SM Boo and B Zakrys. 1998. Floristic and taxonomic accounts of the genus *Euglena* (Euglenophyceae) from Korean fresh waters. Algae. 13:173-197.
- Kim JT, SM Boo and B. Zakrys. 2000b. Contribution to the knowledge of the genus *Phacus* Dujardin 1841 (Euglenophyceae) in Korea. Nova Hedwigia. 71:37-67.
- Kim JT, W Shin and SM Boo. 1999. A taxonomic reappraisal of *Trachelomonas hispida* (Euglenophyceae) from Korean inland waters. Algae 14:1-7.
- Kim JT, W Shin and SM Boo. 2000c. Morphology and habitat conditions of *Phacus trypanon* (Euglenophyceae) from Korea. Algae. 15:17-22.
- Lackey JB. 1968. Ecology of *Euglena*. pp. 27-44. In The Biology of *Euglena* (Buetow DE ed.), Academic Press. New York.
- Leedale GF. 1967. Euglenoid Flagellates. Prentice-Hall, Inc., Engelwood Cliffs. New York.
- Leedale GF. 1975. Envelope formation and structure in the euglenoid genus *Trachelomonas*. Br. J. Phycol. 10:17-41.
- Lee JA, VC Srivastava, AR Choi, W Kim and MJ Park. 1998. Composition of microcystin from cyanobacterial water blooms of the Sonaktong Reservoir, Korea. Korean J. Limnol. 31:251-257.
- Munawar M. 1972. Ecological studies of Eugleninae in certain polluted and unpolluted environments. Hydrobiologia. 39:307-320.
- Nygaard G. 1949. Hydrobiological studies of some Danish ponds and lakes. II. Kon. danske Vidensk. Selsk. Biol. Skr. 7:1-293.
- Philipose MT. 1988. Contributions to our knowledge of Indian algae. III. Euglenineae. Part 3. The genera *Trachelomonas* Ehrenberg and *Strombomonas* Deflandre. Proc. Indian Acad. Sci. (Plant Science) 98:317-394.
- Pochmann A. 1942. Synopsis der Gattung *Phacus*. Arch. Protistenk. 95:81-252.
- Pringsheim EG. 1956. Contributions towards a monograph of the genus *Euglena*. Nov. Acta. Leopoldina, N. F. 18:1-168.
- Reynolds CS. 1984. Phytoplankton periodicity: the interactions of form, function and environmental variability. Freshwater Biol. 14:111-142.
- Round FE. 1981. The Ecology of Algae. Cambridge Univ. Press. Cambridge.
- Shin W and SM Boo. 1999. Virus-like particles in both nu-

- cleus and cytoplasm of *Euglena viridis* (Euglenophyceae). *Algological Studies* 95:125-131.
- Shin W, SM Boo and I Inouye. 2000. Ultrastructure of *Euglena anabaena* var. *minor* (Euglenophyceae). *Phycol. Res.* 48:19-25.
- Shin W and SM Boo. 2001. Ultrastructure of *Phacus trypanon* (Euglenophyceae) with an emphasis on striated fiber and microtubule arrangement. *J. Phycol.* 37: in press (February issue).
- Sládeček A. 1989. Microorganisms as indicators of water pollution, Protozoa as indicators of saprobity. *Recent Adv. Microbial Ecol. (ISME)* 5:402-406.
- Smayda TJ. 1980. Phytoplankton species succession. pp. 493-570. In *The Physiological Ecology of Phytoplankton* (Morris I ed.), Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Smith GM. 1950. *The Freshwater Algae of the United States*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Sommer U. 1989. Nutrient status and nutrient competition of phytoplankton in a shallow, hypertrophic lake. *Limnol. Oceanogr.* 34:1162-1173.
- Thunmark S. 1945. *Zur Soziologie des Süßwasser-Planktons*. Fine methodologisch-ökologische Studie. *Folia Limnol. Scand.* 3:1-66.
- Walne PL. 1980. Euglenoid Flagellates. pp. 165-212. In *Phytoflagellates* (Cox E ed.), Elsevier, North Holland.
- Wolowski K. 1992. Occurrence of Euglenophyta in the Trebon Biosphere Reserve (Czechoslovakia). *Algological Studies.* 66:73-98.
- Xavier MB. 1985. Estudo comparativo da flora de Euglenaceae pigmentadas (Euglenophyceae) de lagos parque Estadual das Fontes do Ipiranga, São Paulo, SP. 378 pp., Tese de Doutorado. Faculdade de Saude Publica da USP.
- Xavier MB, CSR Mainardes-Pinto and M Takino. 1991. *Euglena sanguinea* Ehrenberg bloom in a fish-breeding tank (Pindamonhangaba, Sao Paulo, Brazil). *Algological Studies.* 62:133-142.
- Zakrys B. 1986. Contribution of the monograph of Polish members of the genus *Euglena* Ehrenberg 1830. *Nova Hedwigia.* 42:491-540.

(Received 27 November 2000, accepted 11 December 2000)