

낙동강 하류지역의 식물플랑크톤 우점종 군집 변화: 2002년~2012년 Changes of Dominant Phytoplankton Community in Downstream of the Nakdong River: From 2002 to 2012

손 희 종
Hee-Jong Son

부산광역시 상수도사업본부 수질연구소
Water Quality Institute, Busan Water Authority

(2013년 3월 27일 접수, 2013년 4월 22일 채택)

Abstract : The changes of phytoplankton community in downstream of the Nakdong River from 2002 to 2012 was investigated. Phytoplankton biomass (chlorophyll-a concentration) was gradually increased, but dominant species cell number was gradually decreased. In changes of percentage of dominant species cell number from 2002 to 2012, Diatoms was gradually decreased, but blue-green algae was gradually increased. In changes of annual percentage of dominant period, Diatoms showed high percentage from November to May, and dominant period (%) of diatoms was 56%~74% from June to September, also dominant period of diatoms was about 300 days every year. Percentage of dominant species cell number and dominant period of blue-green algae was 68%~94% and 26%~36% from June to September, respectively. And green-algae showed low percentage from April to September. In the transition patterns of diatoms and blue-green algae, *Stephanodiscus* spp. was the highest dominant species, from December to May, and *Aulacoseira* spp. and *Fragilaria* spp. were showed high dominant percentage from May to October. In the case of blue-green algae, *Microcystis* spp. was the highest dominant species, from May to November, also in the case of green algae, *Actinastrum* spp., *Pediastrum* spp., *Micractinium* spp. and *Pandorina* spp. were dominant species from April to September.

Key Words : Downstream of Nakdong River, Phytoplankton, Dominant Species, Community, Diatoms, Blue-Green Algae

요약 : 2002년부터 2012년까지 낙동강 하류 물금지역에서의 식물플랑크톤 우점종의 군집비율 변화를 조사한 결과, 식물플랑크톤 생체량(클로로필-a 농도)은 점진적인 감소 추세를 보인 반면, 우점종의 개체수는 증가 추세를 나타내었다. 식물플랑크톤 중 별도로 우점종의 연도별 개체수 비율변화에서 규조류는 감소 추세를 보인 반면, 남조류는 증가 추세를 나타내었다. 또한, 우점기간의 경우 매년 우점기간의 75% 이상을 규조류가 차지하였다. 연중 식물플랑크톤 비율변화에서 규조류는 11월에서 5월까지 매우 높은 우점비율을 보였고, 6월부터 9월까지도 우점일수의 56%~74%를 차지하여 연중 규조류가 300일 정도 우점하였다. 남조류는 6월부터 9월까지 개체수 및 우점기간의 68%~94% 및 26%~36%를 차지하였으며, 녹조류는 4월부터 9월까지 낮은 우점률을 나타내었다. 규조류와 남조류 우점종들의 연중 천이패턴은 규조류의 경우 12월~5월은 *Stephanodiscus* spp., 5월~10월은 *Aulacoseira* spp.와 *Fragilaria* spp.가 대부분 우점하였으며, 남조류의 경우 5월~11월에 *Microcystis* spp.가 대부분을 우점하였다. 또한, 녹조류는 4월~9월에 *Actinastrum* spp., *Pediastrum* spp., *Micractinium* spp. 및 *Pandorina* spp.가 우점하였다.

주제어 : 낙동강 하류, 식물플랑크톤, 우점종, 군집, 규조류, 남조류

1. 서론

낙동강 수계는 대구·경북과 부산·경남지역의 대도시를 경유하여 흐르는 인구 1천만의 식수원으로 국내 최대 수자원의 하나이다. 낙동강 본류의 총 연장은 약 520 km에 이르며, 유역면적은 전체 국토의 약 25%에 해당되고, 낙동강 하구언의 건설(1987년 10월 완공) 이후에는 갈수기에 물 흐름이 정체현상이 일어나고 있다. 또한, 낙동강 중상류의 대도시에서 유출되고 있는 공장폐수 및 생활오수 등 다량의 영양염의 유입에 의한 부영양화 현상의 가속화로 식물플랑크톤 현존량의 증가와 종조성의 변화를 초래하였으며, 매년 하절기에는 남조류, 동절기에는 규조류의 대번식으로 인하여 수자원의 이용에 많은 어려움이 있다.¹⁾

식물플랑크톤은 수중 생태계의 기초가 되는 1차 생산자로서 전체 생태계의 구조 변화 및 발전 방향을 결정지를 뿐만

아니라, 수질환경 변화에도 민감하여 어떤 단일 생물군보다도 수환경 변화의 지표성에 있어 중요하게 활용되고 있다.²⁾ 그러므로 특종 수역의 현재는 물론 장래의 수환경 변화 양상을 파악하기 위해서는 당연히 식물플랑크톤의 면밀한 조사는 요구되지 않을 수 없으며, 낙동강과 같은 중요한 수자원의 경우에는 장기적 생태계 보전 및 수질 변화의 원활한 관리를 위해서는 식물플랑크톤의 조사는 더욱 그 중요도가 강조된다. 특히, 낙동강 하류는 부산광역시를 비롯한 영남지역의 생활용수 및 농공업용수의 취수원이기 때문에 낙동강의 식물플랑크톤을 중심으로 장기적이며 거시적인 조사는 효율적 수질관리의 목적을 달성하기 위해 필수적이 과정이며, 수생태계의 환경생태학적 측면에서도 그 역할이 매우 중요하다.^{1,3,4)} 그러나 낙동강 하류지역에 대한 식물플랑크톤에 관한 연구는 단기적으로 수행된 결과들이 대부분이며,^{3,5)} 비교적 장기적으로 낙동강 하류의 식물플랑크톤 변화에 대해 연

† Corresponding author E-mail: menuturk@hanmail.net Tel: 051-669-4635 Fax: 051-669-4669

구한 결과는 1990년대 초반에서 2000년대 초반까지의 낙동강 하류의 식물플랑크톤 변화 관한 Joo 등⁶⁾ 및 Sin 등¹⁾의 보고만 있을 뿐 최근의 변화양상에 대해 평가한 연구로는 본 연구가 처음인 실정이다.

따라서 본 연구에서는 점차 수질이 개선되고 있는 낙동강 하류지역의 2002년부터 2012년까지의 장기적인 식물 플랑크톤의 농도변화와 식물플랑크톤의 우점종 변화를 고찰하여 낙동강 하류지역의 장기적인 환경생태학적인 변화 경향을 평가하여 낙동강 하류의 수환경 변화의 모니터링에 있어 기초자료로 활용하고자 수행되었다.

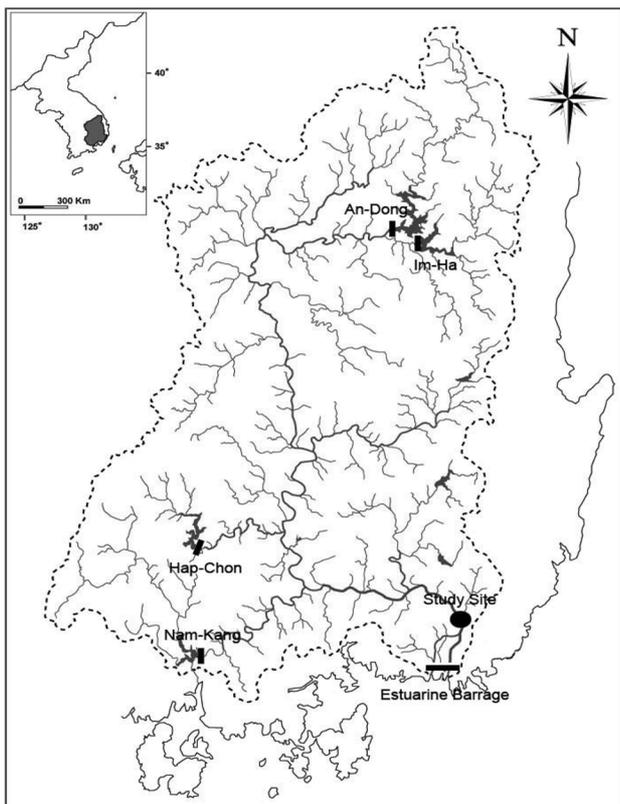


Fig. 1. Map of the Nakdong River basin and study sites (■ : dam, ● : Mulgum study site).

2. 실험재료 및 방법

낙동강 하류의 수질조사 지점(Fig. 1)은 부산시 H 60만 톤/일의 처리용량을 가진 정수장의 취수구(물금 취수장)이며, 2002년 1월부터 2012년 12월까지 주 5회 시료를 채수하였다. 채수한 시료는 변질을 막기 위해 ice box에 보관하며 1시간 이내로 실험실로 이송하여 클로로필-a 농도, 식물플랑크톤 개체수 및 종동정을 하였다. 클로로필-a 농도는 조류농도 분석기(bbe fluorometer, Moldaenke, Germany)를 이용하여 측정하였다. 식물플랑크톤 우점종의 개체수 및 우점종 동정은 시료를 균일하게 혼든 후, 1 mL를 취하여 Sedwick-Rafter counting chamber를 사용하여 Schoen의 방법⁷⁾으로 계수하여 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 식물플랑크톤 농도 및 우점종 개체수 변화

낙동강 하류 물금지역의 식물플랑크톤 농도(클로로필-a 농도) 및 식물플랑크톤 우점종 개체수 변화를 2002년부터 2012년까지의 장기적으로 평가한 것을 Fig. 2(a)~(d)에 나타내었다. Fig. 2(a)는 2002년부터 2012년까지의 식물플랑크톤 농도의 월평균, Fig. 2(b)는 2002년부터 2012년까지의 식물플랑크톤 농도의 연평균을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)의 월별 클로로필-a 평균농도 변화를 보면 12월(130 mg/m³)부터 3월(76 mg/m³)까지 다른 월에 비해 월등히 높은 클로로필-a 농도를 나타내고 있다. 이 시기는 낙동강 하류의 유량 및 강우량이 급격히 감소되는 갈수기이기 때문에 영양염류 및 식물 플랑크톤 농도의 농축효과로 인하여 다른 계절에 비해 비교적 높은 클로로필-a 농도를 나타낸다.⁸⁾ 또한, Fig. 2(b)에 나타난 2002년부터 2012년까지의 연도별 평균 클로로필-a 농도 변화를 살펴보면 점차적으로 클로로필-a 농도가 감소하는 경향을 나타내어 2011년도와 2012년도에는 18 mg/m³와 34 mg/m³의 농도를 나타내었다. 낙동강 하류의 장기적인 수질과 식물 플랑크톤 생체량 변동에 대해 조사한 손의 연구결

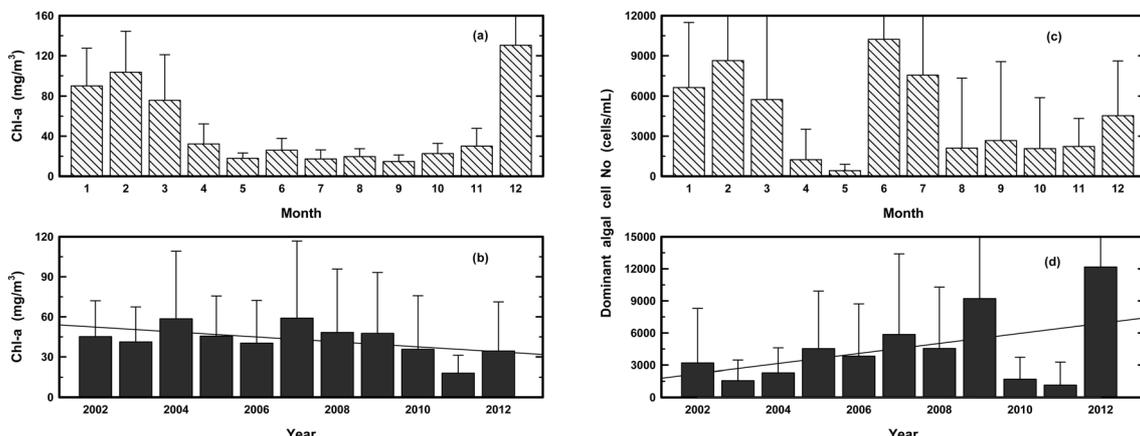


Fig. 2. Annual and monthly change of chl-a ((a), (b)) and dominant algal cell number ((c), (d)) at Mulgum from 2002 to 2012 (mean±s.d.).

과⁸⁾에서 BOD, COD, NH₃-N, T-N 및 T-P 등과 같은 수질오염 물질들의 농도가 1995년부터 2012년까지 점진적으로 감소하며, 특히 제한 영양염으로 작용하는 인(T-P)의 농도 감소가 클로로필-a 농도 감소에 많은 영향을 미친 것으로 보고하고 있으나 Aizaki 부영양화 지수(Trophic State Index, TSI) 평가에서는 점진적인 클로로필-a 농도 감소에도 불구하고, 연중 부영양(eutrophic) 상태를 나타내고 있기 때문에 장기적인 수질개선 대책이 필요한 것으로 보고하였다.⁸⁾

월별 식물플랑크톤 우점종의 평균 개체수 변화를 나타낸 Fig. 2(c)를 보면 12월부터 3월까지 그리고 6월부터 7월까지의 식물플랑크톤 우점종의 평균 개체수가 다른 월에 비해 높게 나타나고 있다. 월별 평균 클로로필-a 농도를 나타낸 Fig. 2의 (a)와 비교해보면 Fig. 2(c)의 6월과 7월의 평균 우점종 개체수의 경우는 월별 평균 클로로필-a 농도(Fig. 2 (a))와는 많은 차이를 나타낸다. 이 시기는 남조류가 번성하는 시기로 남조류의 수화(water bloom)시에는 갑작스럽게 개체수가 수만 cell/mL까지 증가하며, 일시적인 강우나 일조량 등의 감소에 의해서 급격한 개체수의 감소도 나타내기 때문에 월평균에 의한 정확한 상관성 평가는 어렵다고 판단되며, Fig. 2(a)와 (c)의 클로로필 농도와 우점종의 개체수와의 상관도(r^2)는 0.15로 나타났다. 또한, Fig. 2(d)에 나타난 연도별 식물플랑크톤 우점종의 평균 개체수의 경우도 Fig. 2(c)의 연도별 평균 클로로필-a 농도와 비교하여 식물플랑크톤의 평균 우점종 개체수는 점점 증가하는 경향을 나타낸 반면 클로로필-a 농도의 경우는 반대로 감소 경향을 나타내어 서로 상반되는 경향을 보였으며, 상관성(r^2)은 0.02로 거의 상관성이 없는 것으로 나타났다.

3.2. 연도별 및 월별 식물플랑크톤 종별 우점비율 변화

낙동강 하류 물금지역의 식물플랑크톤 종류별 우점비율 변화를 2002년부터 2012년까지의 장기적으로 평가한 것을 Fig. 3(a)~(d)에 나타내었다. Fig. 3(a)는 식물플랑크톤 종별로 우점종 개체수의 연평균 비율변화를 나타낸 것으로 규조류(diatoms)의 연평균 개체수 비율이 2005년에 전체의 85%

에서 2012년에는 32%까지 감소하여 점차 감소하는 추세를 나타내었으나 남조류의 경우는 2005년(15%) 이후부터 연평균 개체수가 점점 증가하여 2012년에는 68%까지 증가하였다. 또한, 녹조류의 경우는 2004년에 일시적으로 연평균 개체수 비율이 전체의 29% 정도로 증가하였으나, 대체로 낮은 비율을 나타내었다. Fig. 3(b)는 식물플랑크톤 종류별로 우점종의 연평균 우점기간 비율변화를 나타낸 것으로 전체 우점기간의 75% 이상을 규조류가 차지하는 것으로 나타났다.

식물플랑크톤 종류별로 우점종의 월평균 개체수 및 우점기간 비율변화를 나타낸 Fig. 3(c)와 (d)를 보면 11월부터 5월까지의 규조류가 거의 우점하고 있으며, 수온이 상승하는 6월부터 9월까지는 남조류가 최소 68%~최대 94% 정도의 개체수 우점률을 나타내었으며, 녹조류 또한 8월과 9월에 14%~30% 정도의 개체수 우점률을 보였다. 수온이 낮아지는 10월부터 다시 규조류의 개체수 우점률이 높아지는 경향을 나타내었다. 특히, 우점종의 월평균 우점기간 비율변화를 나타낸 Fig. 3(d)에서 볼 수 있듯이 연중 11월부터 5월까지는 전체 우점기간의 대부분을 규조류가 차지하였으며, 수온이 상승하는 6월에서 9월까지도 우점일수의 56%~74% 정도를 차지하여 1년 중 규조류가 약 300일 정도로 우점하는 것으로 나타났다. 따라서 하절기에는 남조류가, 그리고 나머지 계절에는 규조류가 우점하는 전형적인 온대 수계의 천이패턴을 보여 일반적인 하천에서의 식물플랑크톤 종구성의 변화와 낙동강 하류에서의 식물플랑크톤 종들의 변화가 대체로 일치하였다.⁹⁻¹¹⁾

낙동강 하류 물금지역의 식물플랑크톤 종류별 우점종의 개체수 및 우점기간의 비율변화를 2002년부터 2012년까지의 장기적으로 평가한 것을 Fig. 4(a)~(f)에 나타내었다. Fig. 4(a)~(c)는 식물플랑크톤 종류별 우점종의 개체수 월평균 우점 비율변화를 나타낸 것으로 규조류 중(Fig. 4(a))들의 경우 1~2월에는 *Stephanodiscus* spp.가 100%의 개체수 우점률을 나타내었으며, 3월부터 수온의 상승으로 인해 *Stephanodiscus* spp.의 개체수 우점률이 낮아지면서 *Asterionella* spp., *Aulacoseira* spp., *Cyclotella* spp., *Dictyosphaerium* spp., *Fragilaria*

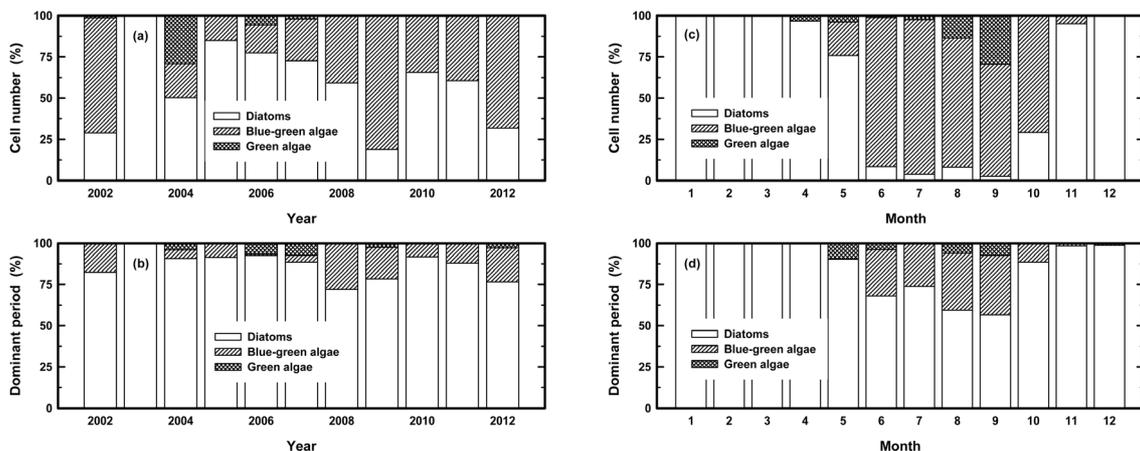


Fig. 3. Annual and monthly change of percentage for cell number ((a), (c)) and dominant period ((b), (d)) of dominant algal classes at Mulgum from 2002 to 2012.

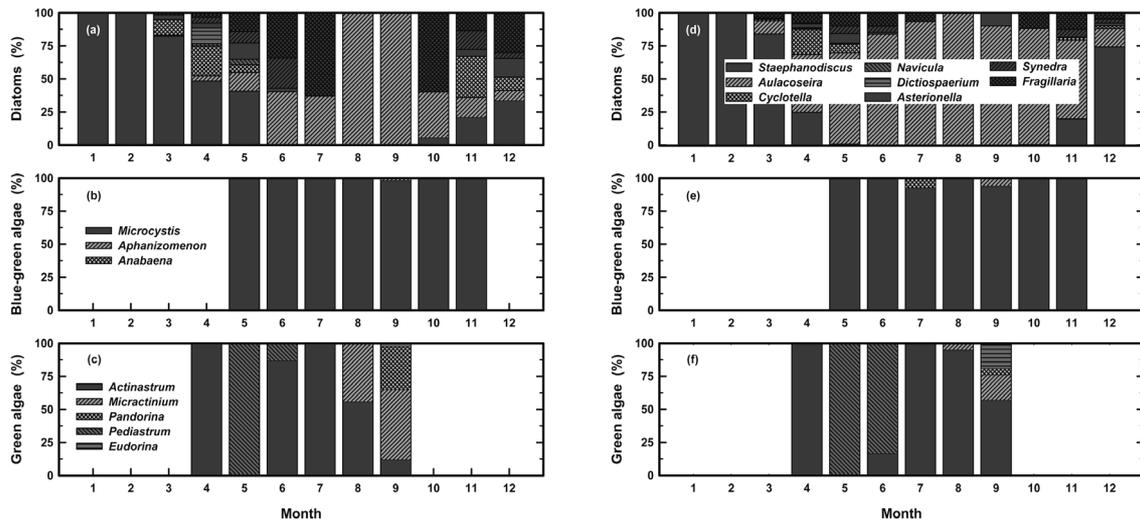


Fig. 4. Monthly change of percentage for cell number ((a), (b), (c)) and dominant period ((d), (e), (f)) of dominant algal species at Mulgum from 2002 to 2012.

spp., *Navicula* spp. 및 *Synedra* spp.들의 개체수 우점비율이 증가하다가 8월과 9월에는 *Aulacoseira* spp.가 100%의 개체수 우점률을 나타내었다. 10월부터 수온의 하락으로 인해 *Cyclotella* spp., *Fragilaria* spp., *Stephanodiscus* spp. 등의 우점률이 증가하였다. 또한, 식물플랑크톤 종류별 우점종의 우점기간의 비율변화를 나타낸 Fig. 4(d)의 경우 전체적인 추세는 Fig. 4(a)의 우점종의 개체수 비율변화와 유사하지만 *Stephanodiscus* spp.와 *Aulacoseira* spp.가 연중 우점기간의 대부분을 차지하였다.

남조류에 대해 나타낸 Fig. 4(b)와 (e)를 보면 남조류가 출현한 5월부터 11월까지 *Microcystis* spp.가 개체수 및 우점기간에서 월등한 우점비율을 차지하였으며, 비교적 고수온기인 6월~9월에서 우점종의 월평균 개체수 비율(Fig. 3(c))에서 80% 이상을 차지하여 *Microcystis* spp.의 일반적 생육양상과 일치하였다.¹²⁾ 또한, 녹조류의 경우(Fig. 4(c)와 (f)), 4월~8월은 *Actinastrum* spp.와 *Pediastrum* spp.가 개체수 및 우점기간에서 월등한 우점비율을 차지하였고, 9월에는 *Micractinium* spp., *Pandorina* spp. 및 *Eudorina* spp.의 우점비율이 증가하였다.

4. 결론

2002년부터 2012년까지 낙동강 하류 물금지역에서의 식물플랑크톤 우점종의 군집비율 변화를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 2002년부터 2012년까지 식물플랑크톤 생체량은 점진적인 감소 추세였던 반면, 우점종의 개체수는 증가 추세를 나타내었다.
- 2) 식물플랑크톤 종류로 우점종의 연도별 개체수 비율변화에서 규조류는 감소 추세를 보인 반면, 남조류는 증가 추

세를 나타내었다. 또한, 우점기간의 경우 매년 우점기간의 75% 이상을 규조류가 차지하였다.

3) 연중 식물플랑크톤 비율변화에서 규조류는 11월에서 5월까지 매우 높은 우점비율을 보였고, 6월부터 9월까지도 우점일수의 56%~74%를 차지하여 연중 규조류가 300일 정도 우점하였다. 남조류는 6월부터 9월까지 개체수 및 우점기간의 68%~94% 및 26%~36%를 차지하였으며, 녹조류는 4월부터 9월까지 낮은 우점률을 나타내었다.

4) 규조류와 남조류 우점종들의 연중 천이패턴은 규조류의 경우 12월~5월은 *Stephanodiscus* spp., 5월~10월은 *Aulacoseira* spp.와 *Fragilaria* spp.가 대부분 우점하였으며, 남조류의 경우 5월~11월에 *Microcystis* spp.가 대부분을 우점하였다. 또한, 녹조류는 4월~9월에 *Actinastrum* spp., *Pediastrum* spp., *Micractinium* spp. 및 *Pandorina* spp.가 우점하였다.

KSEE

참고문헌

1. Sin, Y., Lee, C., Cho, K. and Song, E., "Trends of phytoplankton community and water quality and implications for management in estuarine river systems," *Kor. J. Limnol.*, **38**(2), 160~180(2005).
2. Canter-Lund, H. and Lund, J. W. G., *Freshwater Algae-Their Microscopic World Explored*, Biopress Ltd, Bristol, p. 360 (1995).
3. Chung, J. M., Choi, C. M. and Moon, S. G., "The structure of phytoplankton community in the middle-lower part of the Nakdong River," *J. Kor. Environ. Sci. Soc.*, **10**(1), 41~45 (2001).
4. Park, H. K., Byeon, M. S., Kim, E. K., Lee, H. J., Chun, M. J. and Jung, D. I., "Water quality and phytoplankton distribution pattern in upper inflow rivers of Lake Paldang," *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **20**(6), 615~624(2004).

5. Lee, J. H., Kwon, J. N. and Yang, S. Y., "Seasonal variation of phytoplankton community in the Nakdong River," *Algae*, **17**(4), 267~273(2002).
6. Joo, G. J., Kim, H. W., Ha, K. and Kim, J. K., "Long-term trend of the eutrophication of the lower Nakdong River," *Kor. J. Limnol.*, **30**, 472~480(1997).
7. Schoen, S., "Cell counting," In *Experimental Phycology A Laboratory Manual*, Christopher, S. L., David, J. C. and Bruno, P. K. (Eds), Cambridge Univ. Press, London, pp. 16~22(1988).
8. Son, H. J., "A study on long-term variations of phytoplankton biomass and water quality in the downstream of Nakdong River," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*,(submitted).
9. Hutchinson, G. E., *A Treatise on Limnology*, Vol. 2, John Wiley & Sons. Inc., New York, p. 115(1967).
10. Fogg, G. E., *Algal Cultures and Phytoplankton Ecology*, 2nd Ed. Univ. Wisconsin Press, London, p. 175(1975).
11. Park, H. K., Lee, H. J., Kim, E. K. and Jung, D. I., "Characteristics of algal abundance and statistical analysis of environmental factors in Lake Paldang," *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **21**(6), 584~594(2005).
12. Park, H. D. and Watanabe, M. F., "Toxic Microcystis in eutrophic lakes," In *Toxic Microcystis*, Watanabe, M. F., Harada, K., Carmichael, W. W. and Fujita, H. (Eds), CRC Press, Boca Raton, pp. 56~77(1996).