

대청호의 남조세균 일주 수직분포

박종근^{1*} · 김연숙² · 이정준³ · 장성현³ · 이정호³

(¹한국수자원공사 수자원연구원 수돗물분석연구센터, ²경북대학교 생물학과, ³대구대학교 생물교육과)

Diel Vertical Distribution of Cyanobacteria in Lake Daecheong

Jong-Geun Park^{1*}, Yeoun Suk Kim², Jung Joon Lee³,
Sung Hyun Chang³ and Jung Ho Lee³

¹Water Analysis & Research Center, KIWE, KOWACO, Daejeon 306-711, Korea,

²Department of Biology, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

³Department of Biology Education, Daegu University, Kyongsan 712-714, Korea

Cyanobacteria regulate their buoyancy in response to changing environmental conditions. This process is essential for cyanobacterial development and can account for their dominance in eutrophic waters in summer. The present investigation was conducted to understand the 24-hour vertical distribution of cyanobacteria and water quality characteristics in Lake Daecheong. Water samples were collected and analyzed at depth intervals of 2 or 3 m and at an interval of three hours for a day on August 28, 2001 and September 24, 2002. In 2001 the accumulated standing crop of *Microcystis* spp. from surface to a depth of 6 m was 94.9%. *Microcystis* spp. showed no vertical migration below the thermocline. *Microcystis* spp. had maximum density near the surface, but shifted to 2 m depth at 2 p.m. A dense population of *Anabaena* spp. accumulated near the surface from 2 to 5 p.m. in 2002.

Key Words: *Anabaena* spp., cyanobacteria, Lake Daecheong, *Microcystis* spp., vertical migration

서 론

우리나라의 많은 댐저수지에서는 여름철에 남조세균(cyanobacteria) 수화가 반복하여 발생하고 있는 것이 현실이다. 남조세균 수화는 호소 영양단계 상승에 따른 부영양화의 상징적 현상으로, 심한 이취미를 유발시키며 독성물질을 생성하는 등, 수자원으로서의 가치와 수중생태계의 균형과 질서를 파괴한다(Horne and Goldman 1994). 남조세균 수화는 기본적으로 부영양화된 수계가 지닌 환경요인과 *Microcystis* 속이 가진 생리·생태적 특성에 기인한다. 여름철 댐저수지에서의 남조세균 수화 발생의 주요 원인은 질소와 인을 중심으로 한 영양염의 작용, 수온 상승으로 인한 수온성층 형성, 혼합층(mixing zone)과 유평대(euphotic zone) 간의 상호관계 변화 등으로 대변될 수 있다(Fay 1983; Klapper 1991; Pearl 1996; Mur *et al.* 1999).

인공호수와 같은 정체된 수계의 주요한 특징은 빛, 온도, 용존 물질 및 생물군집의 분포가 강 또는 하천과는 달리 계절적으로 종종 수직구배를 이룬다는 점이다(Kimmel *et al.* 1990). 수직적 구배를 이루는 생물군집 중, 대부분의 부유성 남조세균은 부력조절 능력이 있어 영양염류가 풍부한 수층과 광합성에 필요한 빛이 있는 수층인 유평대로의 주기적인 이동이 가능하다. 이러한 부력조절은 속(genus)에 따라 다르지만, 압력의 변화에 적응할 수 있는 위공포(pseudovacuoles)와 세포내 탄수화물의 저장(ballast effect)에 따른 세포내 밀도의 변화에 의한 것으로 알려져 있다(오 등 1995; 김과 문 2000; Oliver and Ganf 2000; Rabouille *et al.* 2003).

대청호에서 남조세균 수화 발생에 대한 보고는 김 등(1984)에 의해 최초로 보고되어진 이래, 남조세균에 대한 생태학적 연구가 다양한 접근법과 관점을 가지고 수행되었다(오 등 1995; 김과 김 1997; 오 등 1997; 오 등 1998; 이 등 2003; Ahn *et al.* 2003; 정 등 2005; 이 등 2005). 식물플랑크톤 수직분포에 대한 연구로는 남조세균을 대상으로 한 연구(오 등 1995; 오 등 1998; 김과 문 2000)와 규조류와 편모조류를

*Corresponding author (gogun@kowaco.or.kr)

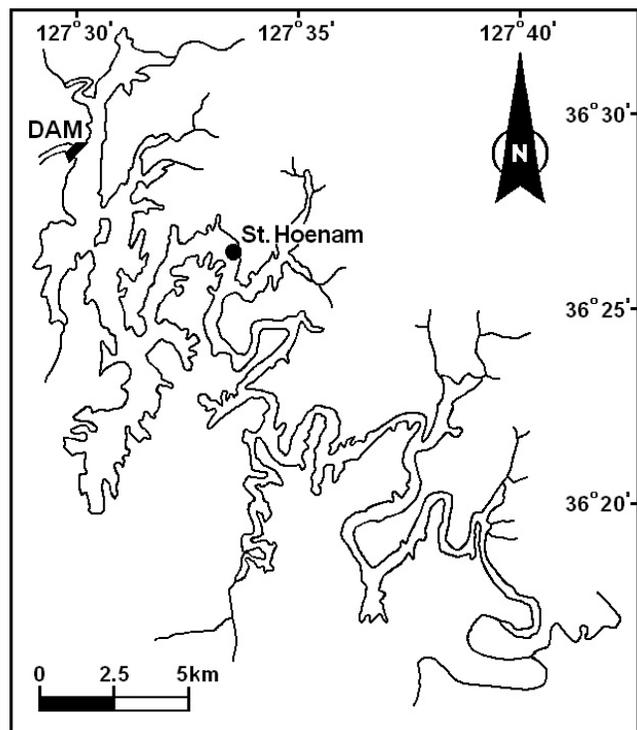


Fig. 1. Map showing the sampling site in Lake Daecheong.

대상으로 한 연구(이 등 2000; Kim and Takamura 2002)가 있다.

매년 여름철에 남조세균 수화 발생을 겪고 있는 우리나라에서는 인공호의 수화 원인 생물인 남조세균을 중심으로 생태계에 대한 거시적인 조사와 다양하고 세부적인 방법으로 연구할 필요성이 있다. 그리고 남조세균 수화와 관련된 국내 호소의 수직 분포에 대한 생태학적 자료의 축적이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 남조세균 수직 분포 변화를 중심으로 24시간 거동 특성을 조사·연구하여 댐저수지의 수질관리에 있어 가장 큰 문제인 남조세균 수화 특성과 기작을 이해하고자 하였다.

재료와 방법

대청호는 금강수계에 대청댐을 건설하면서 생성된 인공호로 전라북도 장수군 신무산을 발원으로 하여 3도 12군에 걸쳐 있으며, 유역 면적은 4,314 km², 유로 총 길이는 251 km 이고, 대청댐의 저수용량 14억9천만 m³이다. 조사수역은 충청북도 보은군에 위치한 회남교 정점에서 수행하였다(Fig. 1). 식물플랑크톤 24시간 수직 분포 조사는 2001년 8월 28일과 2002년 9월 24일에 오전 11시부터 다음날 오전 8시까지 수심 2 m 또는 3 m 간격으로 3시간마다 조사하였다. 질소와 인 계열, 엽록소 *a*와 금속 성분에 대한 수심별 분포 조사는 2002년도에만 실시하였다.

식물플랑크톤 현존량을 구하기 위해 시료를 루골(Lugol)

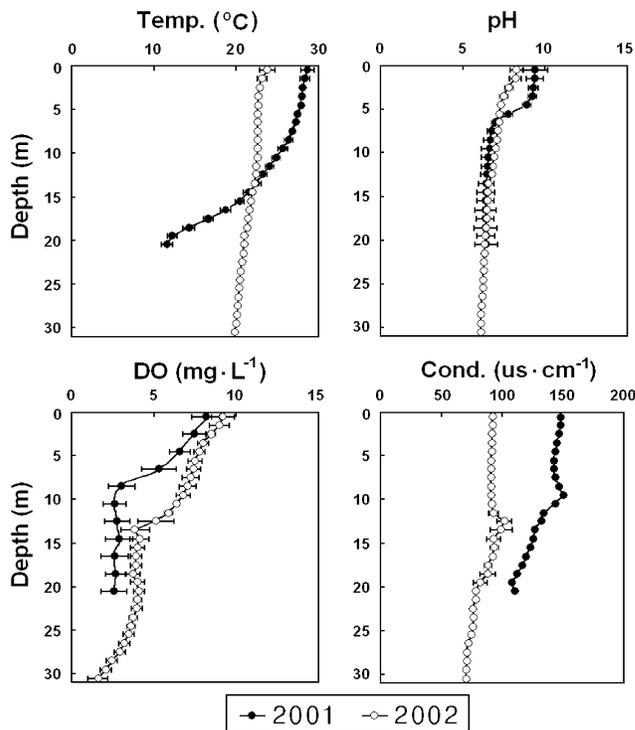


Fig. 2. Vertical profiles of temperature, pH, dissolved oxygen and conductivity during the time-course of 24 hour in Lake Daecheong. Each circle and bar represents a mean value and standard deviation of 8 measurements in a day.

용액으로 고정된 후 자연침강법을 사용하여 농축하였으며, Sedgwick-Rafter chamber를 사용하여 계수하였다(Schoen 1988). 식물플랑크톤의 동정은 Prescott(1962)와 Komárek (1999) 등의 도감을 참조하였다.

수질 환경요인 중 수온, 수소이온농도(pH), 용존산소(DO), 전기전도도는 현장에서 다항목수질측정기 YSI 6000 UPG(Yellow Springs Instruments Inc., USA)로 측정하였다. 질소, 인 및 엽록소 *a*의 수질분석은 환경부(2000)와 APHA *et al.*(1998)를 준하였다. 구리(Cu), 아연(Zn), 망간(Mn) 그리고 철(Fe)은 Inductively Coupled Plasma-mass Spectrometer(ICP-MS) Elan 6000(PerkinElmer, USA)을 사용하였고, 마그네슘(Mg)과 칼슘(Ca)은 Atomic Absorption Spectrometer(AAS) SpectrAA-300(Varian, Australia)을 이용하여 측정하였다.

결 과

2001년 8월 28일 조사정점의 수심은 22 m이었으며, 수온 범위는 10.7-29.9°C로 표층과 수심 20 m의 수온 차이는 평균 17.0 ± 1.3°C이었다(Fig. 2). 수심 변화에 따른 수온성층 현상은 뚜렷하게 관찰되지 않았으나, 표층부터 수심 7 m까지는 평균 0.1-0.3°C·m⁻¹, 그 이후부터 수심 20 m까지는 0.5-2.3

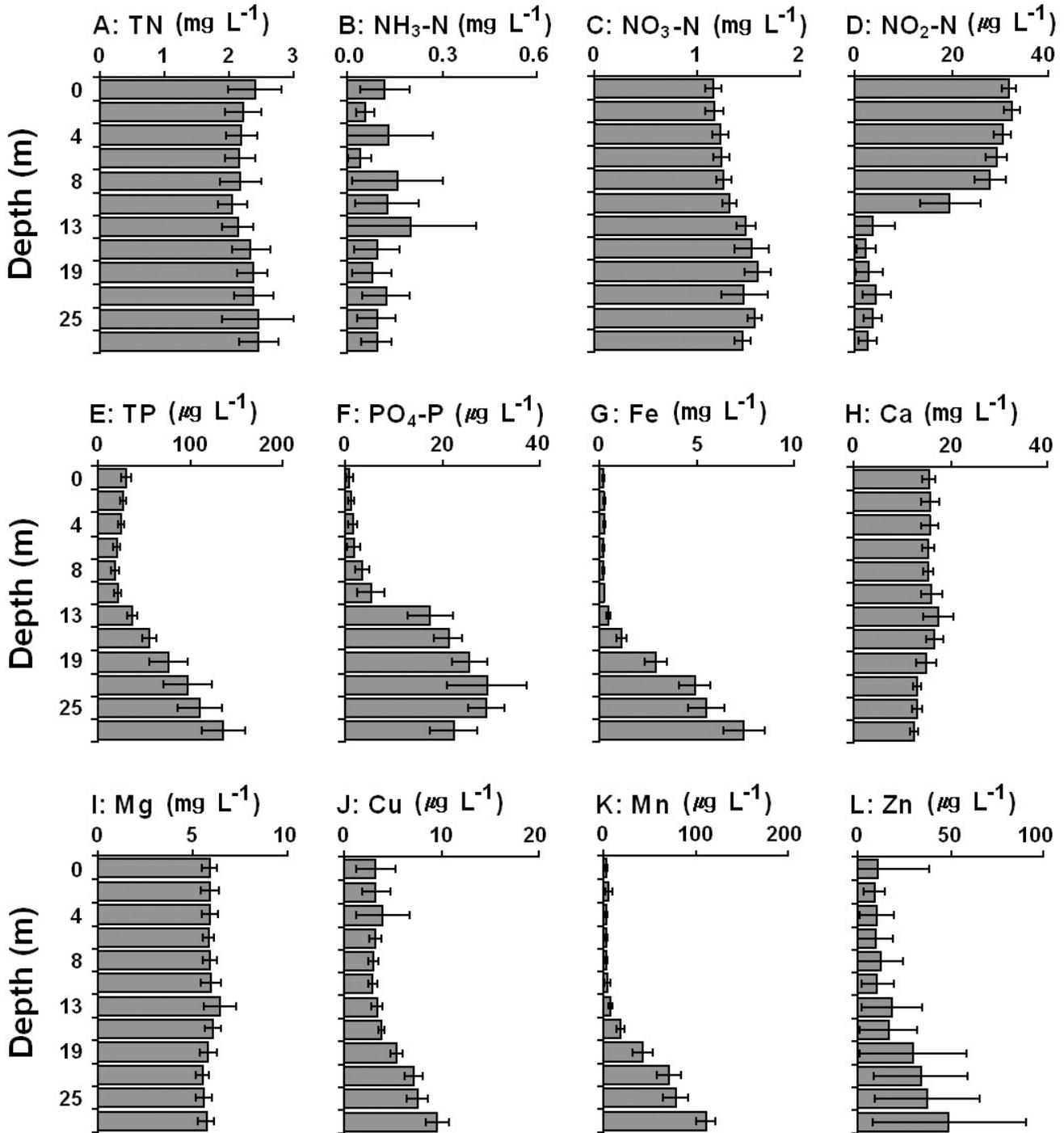


Fig. 3. Vertical profiles of mean value of water quality factors during the time-course of 24 hour from September 24 in 2002. Each error bar represents standard deviation of 8 measurements in a day.

°C·m⁻¹씩 점차적으로 수온이 감소하였다. 수온이 25°C인 이상인 수심은 표층수부터 수심 9 m까지이었으며, 수심 15 m의 수온은 평균 20.5 ± 0.5°C이었다. pH는 표층수에서 수심 3 m까지 평균 9.2-9.5의 범위이었다다가, 수심 4-6 m 사이에서 급감하여 수심 7 m에서 평균 6.8 ± 0.1이었다. 용존산소는 표층수부터 수심 2 m까지 7.3-9.5 mg·L⁻¹의 분포를 보이다가 수심 4-10 m에서는 1 m당 평균 0.2~1.1 mg·L⁻¹로 감소

하여 수심 20 m에서는 평균 2.6 ± 0.8 mg·L⁻¹이었다. 전기전도도는 105~153 µS·cm⁻¹의 범위로 수심이 깊어질수록 전기전도도는 낮아졌으나, 수심 6-9 m에서 약간의 증가세를 보였다(Fig. 2).

2002년 9월 24일 조사정점의 수심은 31 m이었으며, 24시간 동안 평균 표층수온은 23.8 ± 1.0°C로, 표층수와 수심 30 m 간의 수온차이는 3.9 ± 0.9°C였다(Fig. 2). 표층수의 pH는

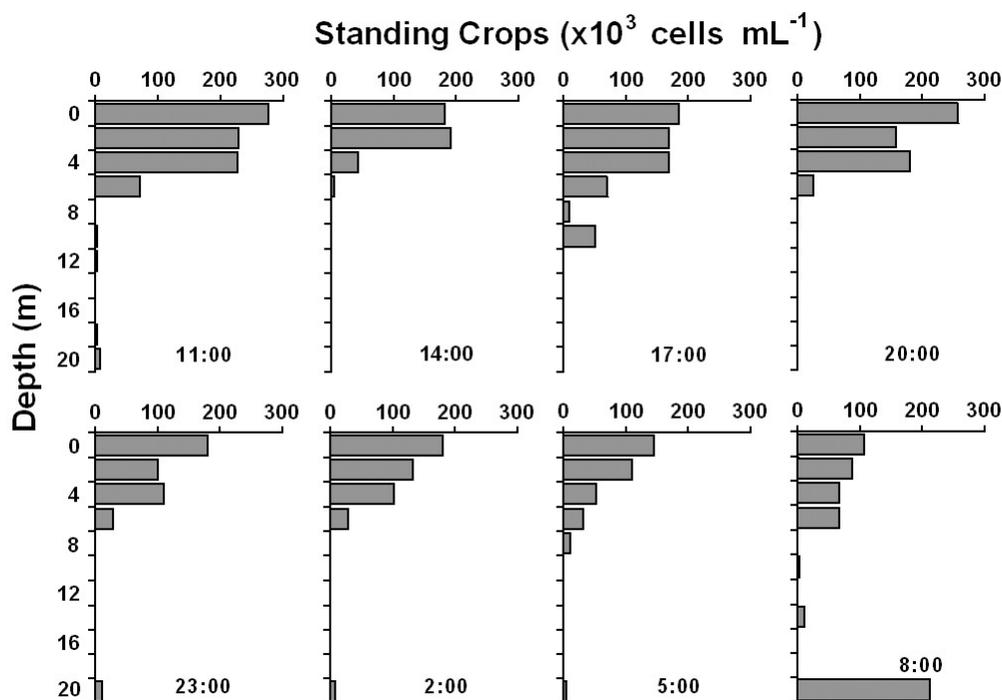


Fig. 4. Vertical profiles of *Microcystis* spp. abundance during the time-course of 24 hour from August 28 in 2001.

평균 8.3 ± 0.4 이었고 수심 4 m에서는 평균 7.3 ± 0.1 로 수심 1 m당 $0.2-0.4 \cdot \text{m}^{-1}$ 의 비율로 감소하였다. 이 후의 수심부터는 약 $0.1 \cdot \text{m}^{-1}$ 이하의 비율로 감소하여 수심 30 m에서는 pH 6.1 ± 0.1 이었다. 시간에 따른 pH 변화도 수심 3 m 이내에서만 0.5-1.1의 변동 폭을 보이고, 수심 4 m 이하에서는 0.2 이하였다. 표층수의 용존산소 평균값은 $9.2 \pm 0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 수심에 따라 지속적으로 감소하여 수심 30 m에서는 $1.6 \pm 0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 이었다. 전기전도도는 $69-116 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 의 범위로 2001 년도의 조사에 비해서는 낮았지만, 수심에 따른 변화는 2001 년도와 같은 양상으로 수심 9-12 m에서는 일시적인 증가세를 보였다. 이 후 수심 30 m에서 전기전도도 평균값은 $70 \pm 1 \mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$ 로 낮아졌다.

영양염류에 대한 분석은 2002년 조사에서만 수행하였다. 질소(N) 계열 중, 총질소(TN)와 암모니아성질소($\text{NH}_3\text{-N}$)는 수심에 따라 일정한 변화는 보이지 않았다. 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$)는 수심이 깊어질수록 농도가 증가하여, 수심 13 m 이하부터는 평균 $1.45-1.59 \text{ mg NO}_3\text{-N} \cdot \text{L}^{-1}$ 이었다. 그러나 질산성질소($\text{NO}_2\text{-N}$)는 수심 10 m 이하부터 급격히 감소하였다(Fig. 3A, B, C, D). 총인(TP), 용존무기인($\text{PO}_4\text{-P}$)의 경우는 수심이 깊어질수록 농도가 증가하였다(Fig. 3E, F). 표층수의 TP의 평균농도는 $30.2 \pm 5.8 \mu\text{g P} \cdot \text{L}^{-1}$ 이었으며, 수심 1 m당 $0.7-2.6 \mu\text{g P} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 비율로 수심 8 m까지 감소하였다. 이 후 수심 28 m까지 $1.2-8.5 \mu\text{g P} \cdot \text{L}^{-1}$ 비율로 증가하여 28 m의 평균 TP 농도는 $135.8 \pm 23.8 \mu\text{g P} \cdot \text{L}^{-1}$ 였다. 용존무기인도 총인과 같이 수심 10 m부터 농도가 증가하여 수심 30 m

에서는 평균 농도 $22.4 \pm 4.8 \mu\text{g PO}_4\text{-P} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 분석되었다.

금속성분 중 철(Fe), 구리(Cu), 망간(Mn), 아연(Zn)은 수심이 깊어짐에 따라 증가하는 양상을 보였지만(Fig. 3G, J, K, L), 칼슘(Ca)과 마그네슘(Mg)은 수심에 따른 농도 변화 폭이 작았다(Fig. 3H, I). 특히, 철과 망간의 경우는 수심 13 m까지 그 평균 농도가 각각 $0.19-0.47 \text{ mg F} \cdot \text{L}^{-1}$, $3.8-8.0 \mu\text{g Mn} \cdot \text{L}^{-1}$ 의 상대적으로 낮은 분포를 보였다. 이 후의 수심부터는 급격히 증가하여, 수심 28 m에서는 평균농도가 각각 $7.41 \pm 1.05 \text{ mg F} \cdot \text{L}^{-1}$ 과 $111.1 \pm 10.4 \mu\text{g Mn} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 증가하였다.

2001년 8월에 3시간 간격으로 24시간 조사한 식물플랑크톤 현존량은 표층부터 수심 6 m까지의 누적현존량이 전체의 94.9%이었으며, 이 중 *Microcystis* spp.가 조사 수심별로 93.4-99.3%이었다. *Microcystis* spp. 수심별 평균 현존량 중, 표층수에서 $1.9 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ (표준편차(SD): 5.5×10^4)로 가장 높았고, 수심 6 m와 8 m에서는 각각 $4.1 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ (SD: 2.5×10^4), $3.5 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ (SD: 4.1×10^3)로 급격히 감소하였다(Fig. 4). 표층수의 *Microcystis* spp. 현존량은 11시에 $2.7 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 로 최대였고 이후 14시와 17시에는 $1.8 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 로 다소 낮아졌다. 20시에는 $2.6 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 로 다시 증가한 *Microcystis* spp. 현존량은 시간이 경과함에 따라 감소하여 08시에는 $1.1 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 이었다. 수심 6 m까지의 *Microcystis* spp. 누적 현존량은 11시에 $8.2 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 로 가장 높았다가 시간이 지남에 따라 감소하였다. 또한 11시부터 05시까지의 표층수,

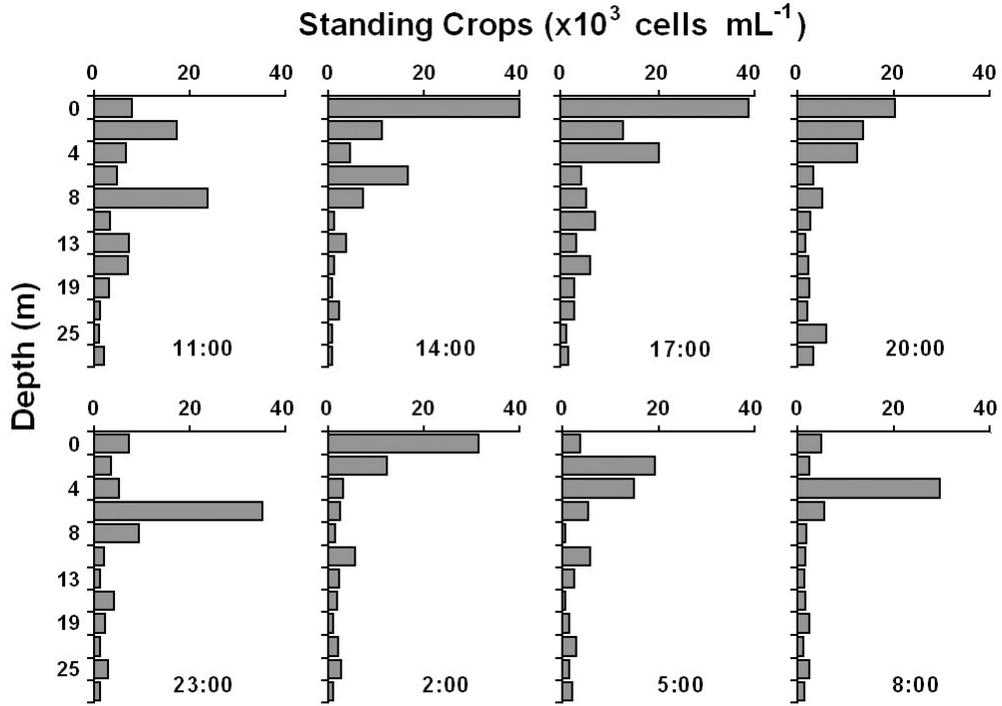


Fig. 5. Vertical profiles of total standing crops of phytoplankton during the time-course 24 hour from September 24 in 2002.

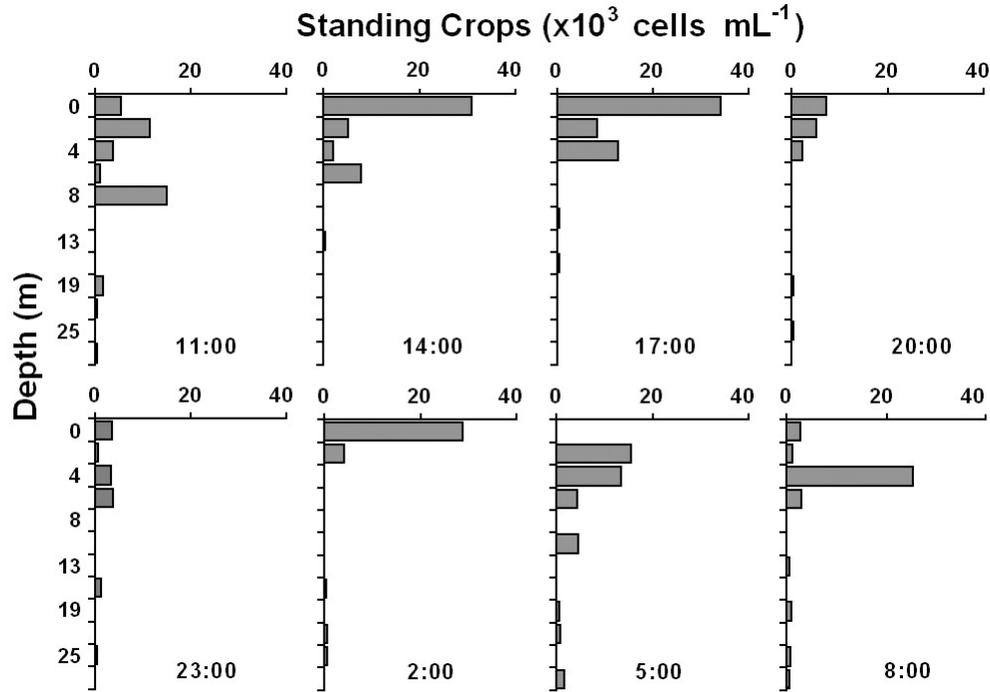


Fig. 6. Vertical profiles of *Anabaena* spp. abundance during the time-course 24 hour from September 24 in 2002.

수심 2 m와 4 m의 *Microcystis* spp. 현존량은 수심 6 m 값의 1.6-40.2배이였지만, 08시에는 그 값이 1.0-1.6배로 낮아졌고, 수심 20 m에서 $2.1 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 의 이례적인 값이 분석되었다.

2002년 9월 24일부터 실시한 24시간 식물플랑크톤 조사는

2001년과는 차이가 있었다. 표층수부터 수심에 따른 식물플랑크톤 누적현존량은 수심 10 m에서 82.1%, 수심 19 m에서 92.4%로 2001년에 비하면 수심에 따라 넓게 분포하고 있었다(Fig. 5). 또한 2001년에는 *Microcystis* spp.가 주요종이었으나, 2002년에는 *Anabaena* spp.였다. 식물플랑크톤 현존량은

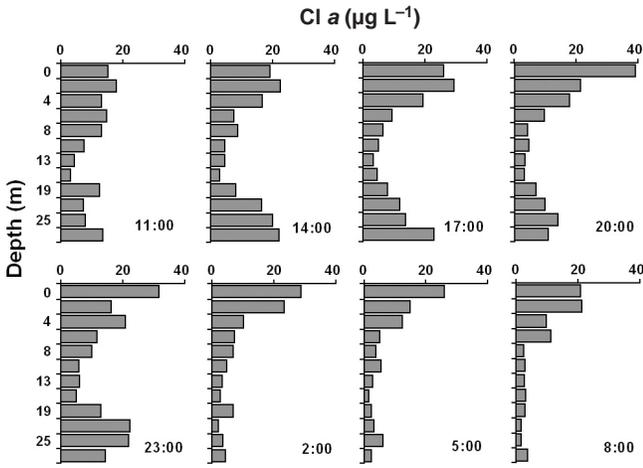


Fig. 7. Vertical profiles of chlorophyll *a* during the time-course 24 hour from September 24 in 2002.

14시, 17시와 02시에 표층수에서 각각 4.0×10^4 cells·mL⁻¹, 3.9×10^4 cells·mL⁻¹, 3.1×10^4 cells·mL⁻¹로 높았고, 11시에는 수심 8 m, 23시에는 수심 6 m, 05시에는 수심 2 m, 08시에는 수심 6 m에서 다른 수심에 비해 높았다(Fig. 5). 총현존량 대비 남조세균의 구성비는 70.2-79.9%이었고, *Anabaena* spp.는 총누적현존량의 45.8%이었다. 조사시간에 따른 *Anabaena* spp. 현존량의 변화는 14시와 17시에 각각 3.1×10^4 cells·mL⁻¹, 3.4×10^4 cells·mL⁻¹로 표층수에 집중되는 현상이 있었다(Fig. 6). *Anabaena* spp. 현존량이 표층수 보다 높고 5,000 cells·mL⁻¹ 이상인 시간과 수심은 11시에 수심 8 m, 05시에 수심 2 m와 4 m, 08시에 수심 4 m이었다.

2002년 수심별 엽록소 *a* 평균 농도 중에 표층수는 15.2-38.8 µg·L⁻¹로 높았고, 수심 13 m에서 2.8-6.1 µg·L⁻¹로 가장 낮았다(Fig. 7). 표층수의 엽록소 *a*는 11시에 15.2 µg·L⁻¹에서 시간이 경과함에 따라 증가하여 20시에 38.8 µg·L⁻¹로 24시간 조사동안 최대였고, 이후 점차 감소하여 8시에는 20.8 µg·L⁻¹로 감소하였다. 24시간 조사동안 수심 2 m부터 수심 13 m까지는 수심이 깊어짐에 따라 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 그러나 수심 16 m부터 수심 28 m까지의 엽록소 *a*는 11시부터 23시까지의 수심이 깊어짐에 따라 증가하였으나, 2시부터 8시까지의 수심에 따른 뚜렷한 농도 변화가 없었다(Fig. 7).

고 찰

수체의 정체가 심화되게 되면 물 보다 비중이 큰 식물플랑크톤 대부분의 종은 침강에 의한 생육 제한으로 현존량 감소가 일어나게 된다(Sze 1993; Horne and Goldman 1994). 그러나 일부 남조세균은 위공포를 형성하여, 수 표면에 부유하거나 또는 적당한 깊이까지 침강하는 수직 일주 운동이 가능하

다(Carmichael 1994). 또한 *Microcystis* 속은 다른 조류에 비해 영양염의 제한을 상대적으로 적게 받기 때문에 낮은 질소 농도에서도 개체군 생장이 양호하다고 알려져 있다(Hecky and Kilham 1998). 이러한 특성들로 인하여 *Microcystis* 속은 표층수 부근에 집중적으로 모여 다른 조류와의 경쟁이 없는 환경에서 증식이 가능하다(Henderson-Sellers and Markland 1987).

2001년 8월 조사와 2002년 9월 조사에서 남조세균 종조성과 수직분포는 차이를 보였다. 이는 2001년 8월에는 부분적인 수온성층 현상이 있었으나, 2002년 9월에는 수온성층이 파괴되는 시기였던 것이 주요 원인으로 사료된다. 식물플랑크톤 우점종은 2001년에 *Microcystis aeruginosa* (Kützing) Kützing으로 24시간 조사동안 표층부터 수심 6 m 이내에 집중되어 있었고, 2002년은 *Anabaena spiroides* var. *crassa* Lemmermann로, 14와 17시 그리고 02시에 표층수에 집중되었다.

2001년 8월의 *Microcystis* spp. 분포는 수심 6 m 이내에서 전체현존량의 94.3%로 수온약층 이하로 수직이동하지 않았고, 최대 분포수심은 14시에 수심 2 m을 제외하고는 모두 표층(0.3 m)이었다. 이는 오 등(1995)의 연구에서 1993년 8월의 *Microcystis* sp. 분포는 수심 4 m 이내에 95% 이상 존재하고, 최대 분포수심이 06시에 수심 4 m, 14시에 수심 0.1 m 그리고 그 이외의 시간에는 수심 1 m로 변화가 있었다는 보고와는 부분적으로 일치하였다. 그러나 햇빛이 강한 14시의 최대분포 수심은 다소 차이를 보인다.

2002년 9월의 *Anabaena* spp.는 일주성 수직이동을 보여 수온성층이 형성된 시기의 *Microcystis* spp.의 분포와는 차이가 있었다. *Anabaena* spp.는 낮 시간인 14시와 17시에는 표층수에 집중되어지고, 05시부터 11시까지 수심 2 m부터 8 m까지 하강하는 변화를 보였다. 오 등(1998)의 연구에서도 수온성층이 파괴되는 1995년 9월의 *Microcystis* sp.의 분포가 밤에는 수심 4 m로 이동하고, 낮 시간에는 0.1 m에 분포한다는 보고와 부분적으로 일치하였다.

2002년 9월의 엽록소 *a*와 식물플랑크톤 분포 양상을 보면, 표층부터 수심 10 m까지 식물플랑크톤이 활발히 활동하는 영역으로 판단된다. 일반적으로 한여름까지 혼합층에서는 영양물질이 고갈된다는 보고와 같이(Kimmel et al. 1990), 식물플랑크톤 생장에 필수적인 총인과 용존무기인의 경우 수심 10 m까지의 농도가 그 이하의 심층보다 상대적으로 낮았다(Fig. 3E, 3F). 철(Fe)과 망간(Mn)은 담수에서 조류 생장을 조절할 수 인자(Kalff 2002)일 수 있다고 하였다. 본 연구에서도 철과 망간은 표층부터 수심 10 m까지는 그 이하의 심층보다 낮은 농도임을 확인할 수 있어 식물플랑크톤 활동과 연관이 있음을 알 수 있었다(Fig. 3G, 3M).

DO의 경우 수심 10 m부터 13 m에서 급속히 감소하여 수

심 14 m부터는 평균 $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 이하의 낮은 값을 보인 것으로 보아, 수심 14 m부터는 호흡 등에 의한 산소소모량이 급격히 증가하였기 때문으로 판단된다. 엽록소 *a*의 값은 11시부터 23시 조사까지 수심 13 m까지 감소하다가 그 이하부터 증가하였는데, 이는 침강되는 식물플랑크톤 때문인 것으로 사료된다. 오 등(1998)은 수심 20 m에서 조사되는 엽록소는 성층과피로 인한 수층의 혼합에 의한 것이라고 해석하였다.

Fay(1983)는 식물플랑크톤 성장기에 암모니아와 질산염이 표층에서 점차 감소하고, 이러한 질소의 고갈은 *Anabaena* 속의 군집 내 구성비가 높아지는 중요한 인자라고 하였다. 그러나 본 연구에서는 *Anabaena* spp.는 전체 식물플랑크톤 군집의 45.8%로 군집 내 구성비는 높아졌으나, 총질소는 전 수층에 걸쳐 평균 $2.1\text{--}2.5 \text{ mg N} \cdot \text{L}^{-1}$ 로 분포하고 있었다. 암모니아성질소와 질산성질소의 경우도 *Anabaena* spp.가 $5,000 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 이상 조사된 곳이 있는 수심 8 m 이내의 분포와 그 이하의 분포는 뚜렷한 차이는 없었다. 이는 대청호의 총질소는 남조세균 수화 발생이 가능한 최저 농도 $0.3 \text{ mg N} \cdot \text{L}^{-1}$ 을(Klapper 1991) 6배 이상 상회하는 높은 농도로 식물플랑크톤에 필요한 질소 영양분을 항상 제공하고 있었기 때문에 *Anabaena* spp.의 등장은 다른 원인에 의한 것으로 사료된다. 다만 아질산성질소의 경우는 수심 13 m부터는 표층수 농도보다 1/7-1/14로 감소하였는데 이는 유기물을 분해하는 세균에 의한 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사 연구과제(WRRI-WR-01-20, WRRI-WR-02-7)에 의해 수행하였습니다. 논문 교정에 수고를 아끼지 않으신 심사위원께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김동근, 서운수, 송준상, 이문호, 최제덕, 박건현, 최광수. 1984. 대청호 부영양화에 관한 종합연구. 국립환경연구소, 서울. 192 pp.
- 김명운, 김상중. 1997. 대청호 cyanobacteria 대발생 지역에서 환경요인의 일일 변화 및 탄소의 흐름. 한국육수학회지 **30**: 1-7.
- 김한순, 문주환. 2000. 공산호에서 수화발생동안 *Microcystis aeruginosa* 수직분포의 변동. 한국육수학회지 **33**: 119-127.
- 오광철, 오희목, 이진환, 맹주선. 1995. 대청호 식물플랑크톤의 일 주성 수직이동. 한국육수학회지 **28**: 437-446.
- 오희목, 박준홍, 윤무환, 맹주선. 1997. 대청호 수화발생시 수층 인 농도와 cyanobacteria의 다중인산염 분포 관계. 한국육수학회지 **30**: 97-106.
- 오희목, 이석준, 박정호, 맹주선. 1998. 대청호 성층과피시 cyanobacteria의 수직분포 및 세포내 인의 조성. 한국육수학회지 **31**: 54-61.

- 이정준, 이정호, 박종근. 2003. 대청호의 남조류 수화 발달과 환경요인 변화와의 상관관계. 한국육수학회지 **36**: 269-276.
- 이정호, 백인호, 김철호. 2000. 식물플랑크톤 분포도에 따른 운문호의 선택취수 수심 결정. 한국육수학회지 **33**: 311-318.
- 이지민, 이정준, 박종근, 이정호, 장천영, 윤성명. 2005. 대청호 남조류 대발생기의 동물플랑크톤相 및 *Microcystis aeruginosa*와 물벼룩류 개체군 변동의 상관관계. 한국육수학회지 **38**: 146-159.
- 정승현, 안치용, 최에란, 장감용, 오희목. 2005. 대청호에서 강우와 식물플랑크톤 군집의 관계. 환경생물학회지 **23**: 57-63.
- 환경부. 2000. 수질오염공정시험방법. 환경부고시 제99-208호.
- Ahn C.Y., Kim H.S., Yoon B.D. and Oh H.M. 2003. Influence of rainfall on cyanobacterial bloom in Daechung Reservoir. *Korean J. Limnol.* **36**: 413-419.
- APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association) and WEF (Water Environment Federation). Glesceri L.S., Greenberg A.E. and Eaton A.D. 1998. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 20th ed.* American Public Health Association, Washington D.C.
- Carmichael W.W. 1994. The toxins of cyanobacteria. *Sci. Am.* **270**: 64-72.
- Fay P. 1983. *The Blue-green.* Edward Arnold, London.
- Hecky R.E. and Kilham P. 1988. Nutrients limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnol. and Oceanogr.* **33**: 796-822.
- Henderson-Sellers B. and Markland H.R. 1987. *Decaying Lakes: The Origins and Control of Cultural Eutrophication (principles and techniques in the environmental science).* John Wiley & Sons, Chichester.
- Horne A.J. and Goldman C.R. 1994. *Limnology.* McGraw-Hill, New York.
- Kalff J. 2002. *Limnology: Inland Water Ecosystems.* Prentice Hall, New Jersey.
- Kim H.S. and Takamura N. 2002. Diel vertical distribution of phytoflagellates in a small artificial pond. *Algae* **17**: 1-9.
- Kimmel B.L., Lind O.T. and Paulson L.J. 1990. Reservoir primary production. In: Thornton K.W., Kimmel B.L. and Payne F.E. (eds), *Reservoir Limnology: Ecological Perspectives.* John Wiley & Sons, New York. pp. 133-194.
- Klapper H. 1991. *Control of Eutrophication in Inland Waters.* Ellis Horwood, New York.
- Komárek J. and Anagnostidis K. 1999. *S Wasserflora von Mitteleuropa Cyanoprokaryota 1 Teil Chroococcales.* Gustav Fisher, Germany.
- Mur L.R., Skulberg O.M. and Utkilen H. 1999. Cyanobacteria in the environment. In: Chorus I. and Bartram J. (eds), *Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management.* E & FN Spon, London. pp. 15-40.
- Oliver R.L. and Ganf G.G. 2000. Freshwater blooms. In: Whitton B.A. and Potts M. (eds), *The Ecology of Cyanobacteria: Their Diversity in Time and Space.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. pp. 149-194.
- Pearl H.W. 1996. A comparison of cyanobacterial bloom dynamics in freshwater, estuarine and marine

environments. *Phycologia* **35**: 25-35.

Prescott G.W. 1962. *Algae of the Western Great Lakes Area with an Illustrated Key to the Genera of Desmids and Freshwater Diatoms*. Wm. C. Brown Company Publisher, Dubuque.

Rabouille S., Thibault J.M. and Salenon M.J. 2003. Simulation of carbon reserve dynamics in *Microcystis* and its influence on vertical migration with Yoyo model. *C. R. Biologies* **326**: 349-361.

Schoen S. 1988. Cell counting. In: Lobban C.S., Chapman D.J. and Kremer B.P. (eds), *Experimental Phycology: A Laboratory Manual*. Cambridge University Press, New York. pp. 16-22.

Sze P. 1993. *A Biology of the Algae*. Wm. C. Brown Publishers, Dubuque.

Received 9 January 2006

Accepted 6 February 2006