

용담호 녹조현상의 원인 남세균 연구 (1) 질소고정 남세균 *Anabaena spiroides* v. *crassa* 종주와 영양염 제한

박종우¹ · 김영길² · 허우명³ · 김범철⁴ · 이원호^{1*}

¹군산대학교 해양학과, ²한국중합환경연구소,
³강원대학교 삼척캠퍼스 환경방재공학과, ⁴강원대학교 환경학과

Bloom-forming Cyanobacteria in Yongdam Lake (1) Nutrient limitation in a Laboratory Strain of a Nitrogen-fixing Cyanobacterium, *Anabaena spiroides* v. *crassa*

JONG WOO PARK¹, YOUNG GEEL KIM², WOomyung HEO³, BOMCHUL KIM⁴ AND WONHO YIH^{1*}

¹Department of Oceanography, Kunsan National University, Kunsan 573-701 Korea

²Korea Environmental Research Center for Hydrosphere, Ansan 425-817 Korea

³Department of Environmental Disaster Prevention Engineering, Kangwon National University, Samchock 245-711 Korea

⁴Department of Environmental Science, Kangwon National University, Choonchon 200-701 Korea

2000년 12월부터 담수를 시작한 용담호는 총 저수량 8.2억톤으로 국내 5위의 대규모 다목적댐 호수로서, 새만금 담수호에 유입되는 하천수의 최상류에 위치한 인공호이다. 새만금 방조제가 완공되어 수문을 조작하면, 용담호의 계절적인 식물플랑크톤 군집변화는 신생 새만금호의 녹조현상을 좌우하는 한 요인이 될 것이다. 용담호의 초기 담수화 과정 중 2002-2003년 하계에 남세균 녹조현상이 나타났으며, 녹조현상을 일으킨 주요 속은 *Anabaena*, *Microcystis*, *Aphanizomenon* 등이었다. 이 가운데 사상체 남세균인 *Anabaena* 속에는 영양세포 이외에 이질세포나 휴면세포 등의 특수기능 세포를 가진 종들이 포함되어 있다. 용담호 녹조현상이 나타난 현장의 시료에서 분리한 *Anabaena spiroides* v. *crassa*의 단중배양체인 KNU-YD0310 종주를 확립하였으며, 실내배양 실험을 통하여 이 종주의 영양염 요구를 연구하였다. 질소영양염 제한 조건에서는 이질세포의 영양세포에 대한 비율이 높았으며, 질소제한 정도에 따라 그 비율은 더욱 증가하였다. 질소고정능이 있는 KNU-YD0310는 질소제한 조건에서도 성장이 지속되나, 인의 경우에는 초기의 공급 농도에 비례하는 성장을 나타내었다. 인영양염 제한 조건에서는 휴면세포의 형성량이 증가하여, 인 제한의 경우에는 실험 종주가 세포대사를 억제하여 부적합한 환경조건에서의 생존기간을 연장시키는 적응전략을 가진 것으로 판단된다. 이와 같은 *Anabaena spiroides* v. *crassa*의 생리·생태적 특성은 향후 새만금 담수호의 녹조현상 예방대책 수립을 위한 수서생태학적 기준으로 활용될 수 있을 것이다.

Yongdam Lake is the fifth largest artificial lake in Korea newly formed by the first impounding the Yongdam Multi-purpose Dam on December, 2002. Yongdam Lake, with her total water storage of 820 million M/T, is located at the roof-top region of the streams flowing into the just-constructed new Saemankeum Lake. Seasonal succession of phytoplakton in Yongdam Lake might affect cyanobacterial blooms in Saemankeum Lake by inoculating seasonal dominants. During 2002-2003 when the first impounding after the construction of Yongdam Multi-purpose Dam was still undergoing, summer cyanobacterial blooms by *Anabaena*, *Microcystis*, and *Aphanizomenon* were observed. Among these three, filamentous *Anabaena* is well known to have its species with N₂-fixing ability and special cells such as heterocysts and akinetes as well as the vegetative cells. We established a clonal culture of *Anabaena spiroides* v. *crassa* (KNU-YD0310) from the live water samples collected at the bloom site of Yongdam Lake. The N- and P-nutrient requirement of the KNU-YD0310 was explored by the experimental cultivation of the laboratory strain. Ratio of heterocysts to vegetative cells increased as N-deficiency extended with its maximum at N₂-fixing condition. The strain KNU-YD0310 exhibited considerable growth under N-limiting conditions while its growth was proportional to the initial phosphate-P concentration under P-deficient conditions. Under P-limiting conditions akinete density increased, which could be interpreted as an adaptation strategy to survive severe environment by transforming into resting stage. The above eco-physiological characteristics of

*Corresponding author: ywonho@kunsan.ac.kr

Anabaena spiroides v. *crassa* might be useful as an ecological criterion in controlling cyanobacterial blooms at Shaemankeum Lake in near future.

Keywords: Cyanobacterial Bloom, Yongdam Lake, N₂-fixation, Inorganic nutrients, Laboratory strain

서론

용담호는 총 저수량 8.2억톤으로 국내 5위의 대규모 다목적 댐으로서, 새만금 담수호에 유입되는 하천수의 최상류에 위치한 인공호이다. 댐 건설이전에는 대청호로 유입되는 유량이 연간 32억톤이었으나, 이 가운데 약 50%(16억톤)를 전주 군산권의 용수로 공급하게 되었다(한국수자원공사, 2000). 따라서, 새만금 방조제가 완공되어 담수화가 진행되는 과정에서, 용담호의 계절적인 식물플랑크톤 군집변화는 신생 새만금호 내 상류수 유입지점 부근의 녹조현상을 좌우하는 한 요인이 될 수 있다.

용담호의 담수는 2000년 12월에 시작하여 2002년 8월에 완료되었으나, 담수 과정중인 2002년부터 녹조현상의 원인 남세균 생물종들이 출현하였다. 특히, 2002-2003년 하계에 남세균에 의한 녹조현상이 나타나 계절적으로 2-3주간씩 지속되었으며, 이 때 녹조현상을 일으킨 주요 속은 *Anabaena*(2002, 2003년), *Microcystis*(2002, 2003년), *Aphanizomenon*(2003년) 등이다(김, 2005). 이 가운데 영양염포 이외에 이질세포와 휴면세포를 갖는 사상체 남세균인 *Anabaena*속 생물종들이 최고 280,000 cells ml⁻¹의 밀도를 나타내었다(김, 2005).

용담호보다 20년 앞서 담수 완료한 소양호의 경우, 담수초기인 1973년에는 규조류 7종과 녹조류 6종만이 보고되어(조, 1974), 소양강 다목적댐 축조 이전인 1968년 춘천호에서 규조류가 우점 식물플랑크톤이라고 보고된 바와(조, 1968) 크게 다르지 않았다. 그러나 소양호에서도 1985년을 전후하여 *Anabaena*가 새로운 우점 식물플랑크톤 속으로 확인된 이래(Kim, 1987; 이 등, 1998), 호수내의 담수어류 양식에 따른 수중 인 농도의 증가가 새로운 환경문제로 부상하였다(이 등, 1990; 허 등, 1991; 허와 김, 1992; 이와 조, 1994). 이에 따라, 국내에서도 *Anabaena*의 종주를 이용한 연구가 진행되어, 인-질소 등의 영양염 요구 특성뿐만 아니라 이들의 세포의 물질(Choi et al. 1998) 및 엽록소 생성 효소(이 등, 1999; Lee and Yoo, 2001) 등과 같은 세포 물질 분자에 관한 보고가 있다.

방조제의 완성과 함께 조성될 새만금 신생 호수는 처음에는 기수성 호수로 시작하여, 해수 및 퇴적토 중의 염기가 수년에 걸쳐 용출되고 난 후에 전형적인 담수호로 바뀔 것이다(허와 오, 1997). 이 과정에서 초기에는 퇴적토 상층에서 용출된 인산염이 수중으로 공급되어 인 제한이 아닌 질소 제한 호수의 특징을 나타내고(박 등, 1997), *Anabaena*와 같이 질소고정능이 있는 녹조현상의 원인 생물종들이(맹, 1982) 매우 우점하게 될 가능성이 높다. 새만금 신생호에서 예견되는 이러한 현상이 피할 수 없는 단기적 자연현상이라 하더라도, 사전에 관련 녹조현상의 원인 생물종 대번식의 생태·생태적 특성을 파악하여 추후 대책수립에 활용토록 할 필요가 있다(최 등, 1997).

본 논문을 통해, 용담호 담수 직후인 2002-2003년의 녹조현상이 관측된 당시의 현장 시료에서 분리·확립한 *Anabaena spiroides*

v. *crassa*의 단중배양체를 이용하여 수행한 이 종주의 질소 및 인 영양염 요구에 관한 연구결과를 보고하고자 한다. 이를 위해, 질소 및 인 제한 조건에서 영양세포 개체군의 변동, 이질세포의 영양세포에 대한 비율의 변화, 휴면세포의 영양세포에 대한 비율의 변화 등을 연구하였다. 본 연구를 통해 규명된 *Anabaena spiroides* v. *crassa* 종주의 생리·생리적 특성은 향후 새만금 담수호의 녹조현상 예방대책 수립을 위한 원천자료로 활용될 수 있다.

재료 및 방법

생시료 채집 및 종주 확립

2003년 10월 용담호의 정점 1, 2, 및 3에서(Fig. 1) 현장 생시료(live sample)를 채수하여, 저온의 아이스박스에서 넣어 실험실로 운반하였다. 실험실 도착 직후, 24시간 이내에 단세포분리 작업을 수행하였다. 현장 생시료에서 *Anabaena spiroides* v. *crassa* 세포사를 하나씩 분리하기 위하여, 광학현미경하에서 모세관 피펫을 사용하는 작업을 수행하였다(Guillard, 1973). 분리한 세포를 CB media를 담아놓은 multi-well culture chamber에 하나씩 넣은 뒤,

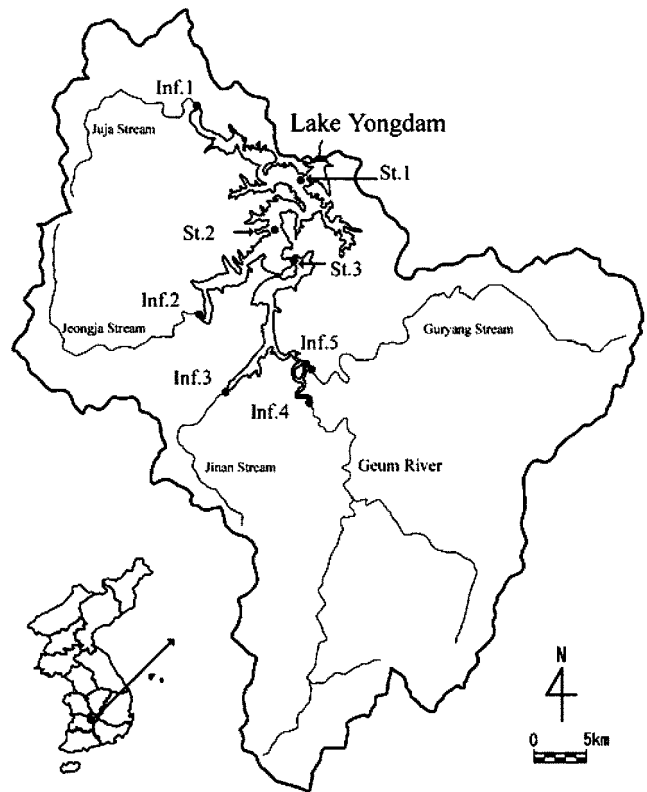


Fig. 1. Location of sampling stations (indicated by arrows) and dike (shown as a dark bar) at Yongdam Lake.

단일세포 기원의 배양체로 성장시켰다. 2-3주 후, 녹색의 세포 덩이가 육안으로 확인되면 약 2-3주 간격으로 계속하여 20배씩 희석하는 계대배양으로 단종배양체를 확립하였다(종주 명: *Anabaena spirooides* v. *crassa* KNU-YD0310). 배양실에서 이루어진 종주유지 및 실험배양 환경은 수온 20 °C 및 60 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 연속광 조건이었다.

배지 및 실험조건

담수 CB media(김 등, 1999)를 기본 배양액으로 사용하였으며, 인 및 질소 제한 실험에는 인산염 및 질산염 농도를 조절한 CB media를 제조하여 사용하였다(Table 1). 즉, 인산염(β -Sodium glycerophosphate) 및 질산염($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, KNO_3)을 각각 CB media 중의 농도를 기준으로 하여 0, 0.2, 1배로 조절하여, 영양염 제한 실험에 사용하였다(Table 1). 인산염 및 질산염의 3개 농도등급 각각에 대하여 한 쌍씩의 125 ml PC 배양병을 20 °C, 100 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 연속광 하에 두고 배양하였다. 실험배양 시작점을 포함하여 매 3일마다 하루 중 일정 시각에 3 ml씩 subsample한 후 Lugol's solution으로 고정하여 계수시료로 보관하였다. 계수판 Sedgwick-Rafter slide를 이용하여 광학현미경 100배율에서 세포수를 계수(counting)하였다.

이질세포 및 휴면세포의 계수

이질세포(heterocyst) 및 휴면세포(akinetete)는 크기, 색상, 투명도가 서로 다른 특징을 이용하여, 광학현미경 100배율에서 영양세포와 구별하여(Whitton and Potts, 2000) 계수하였다. 고정액인 Lugol's solution으로 고정된 시료를 관찰 할 경우, 영양세포는 작은 크기의 검고 불투명한 타원형체로, 이질세포는 중간크기의 밝고 투명한 구형체로 세포의 양끝에 polar plug(Sherman *et al.* 2000)

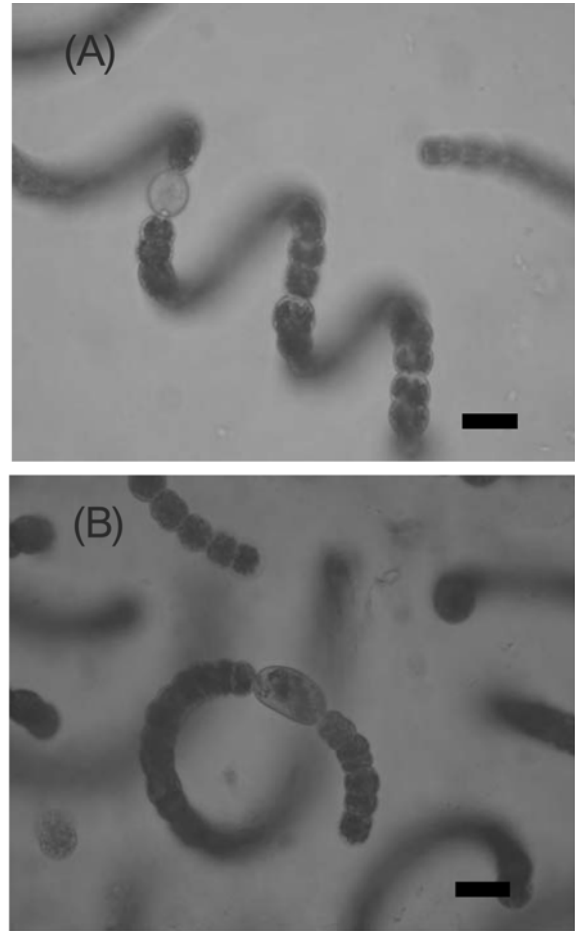


Fig. 2. Light microscopic image of a clonal culture of *Anabaena spirooides* v. *crassa* (KNU-YD0310 strain). Vegetative cells are relatively small and dark-brown colored when compared with the half-transparent cells of small and bright heterocysts (A) and large and pale akinetes (B). Scale bars = 10 μm .

를 가지며(Fig. 2A), 휴면세포는 영양세포의 3-5배 크기의 반투명한 타원형체로 나타나(Fig. 2B) 서로 쉽게 구별할 수 있다.

Table 1. Chemical composition of CB Medium.

| Compound | Concentration |
|--|-------------------|
| $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | 150 mg |
| KNO_3 | 100 mg |
| $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ | 40 mg |
| $\beta\text{-Na}_2\text{glycerophosphate}$ | 50 mg |
| Vitamin B ₁ | 10 μg |
| Vitamin B ₁₂ | 0.1 μg |
| Biotin | 0.1 μg |
| HCl-thiamine | 10 μg |
| PIV Metals | 3 ml |
| Bicine | 500 mg |
| Distilled water to | 997 ml |
| PIV Metals | |
| $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 196 mg |
| $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ | 36 mg |
| $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ | 22 mg |
| $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 4 mg |
| $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 2.5 mg |
| $\text{Na}_3\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ | 1000 mg |
| Distilled water to | 1000 ml |

($\text{NO}_3\text{-N}$: 21.6 mg/l, $\text{PO}_4\text{-P}$: max. 8.0 mg/l)

결과 및 고찰

실험배양체 개체군의 성장과 영양염 제한

질산염 및 인산염 3개의 농도 등급에서 3일 간격으로 확인한 한 영양세포의 농도 평균치의 변동을 Fig. 3에 제시하였다. 실험 시작점에서 1600 cell ml^{-1} 이던 초기 개체군 농도가 최대 194000 cells ml^{-1} 에 이르렀다(Table 2, 3). 인산염을 첨가하지 않은 실험구에서는 개체군의 성장이 전혀 나타나지 않았다(Fig. 3의 우측 맨 아래 점선, Table 3). 반면, 질산염을 전혀 첨가하지 않은 실험구에서는 개체군의 최대농도가 초기농도의 4.5배에 달하였고(Fig. 3의 좌측 맨 아래 점선), 최대성장률도 최적상태의 1/2을 초과하였다(Table 2). 이는 본 실험배양체의 질소 고정능을 입증하는 결과이며, 질소고정 환경에서는 질산염 공급 환경에 비해 배양체의 성장이 크게 낮아짐을 알 수 있다(Fig. 3의 좌측). 이로써, 신생 새만금호에서 인 영양염이 제한되지 않는 경우에는, 비록 질소 유입을 제한한다 하

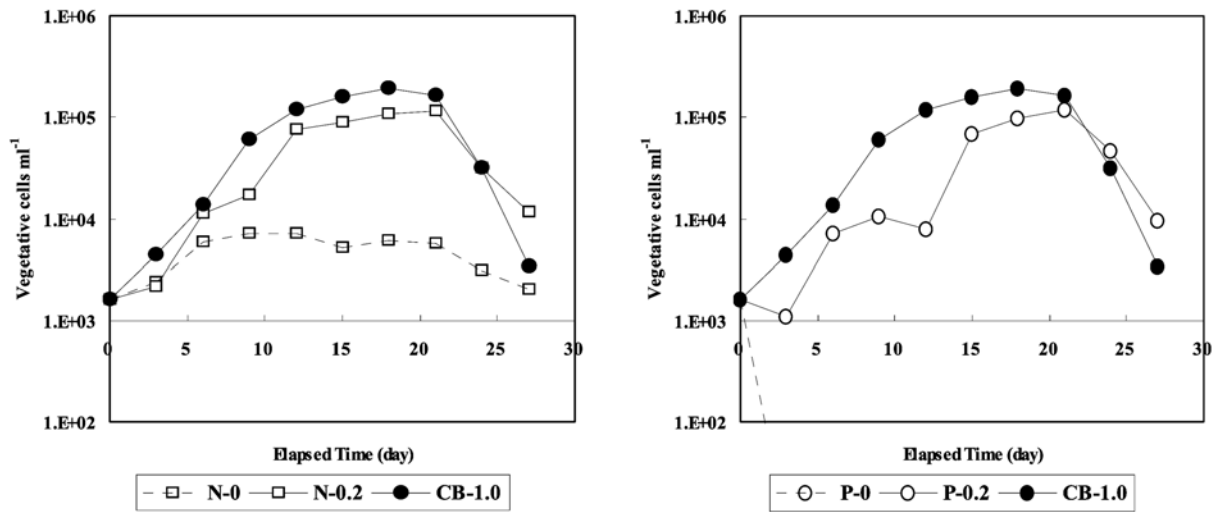


Fig. 3. Time course of N-limited (left) and P-limited (right) vegetative growth of *Anabaena spiroides* v. *crassa* (KNU-YD0310 strain; mean cell density). N-0 and P-0 means experimental CB-N and CB-P medium without any added nitrate-N and phosphate-P, respectively. One fifth of nitrate-N and phosphate-P for the enriched CB medium (CB-1.0 with 21.6 mg NO₃⁻-N l⁻¹ and 8.0 mg PO₄³⁻-P l⁻¹) was added to prepare medium N-0.2 and P-0.2, respectively.

Table 2. Maximum biomass yield and maximal growth rate of *Anabaena spiroides* v. *crassa* (KNU-YD0310 strain) under different NO₃⁻-N concentrations.

| NO ₃ ⁻ -N (mg l ⁻¹) | Y _{max} (cells/ml) | GR _{max} (divisions/d) |
|---|-----------------------------|---------------------------------|
| 0 | 7200 | 0.31 |
| 4.3 | 115000 | 0.46 |
| 21.6 | 193500 | 0.58 |

Table 3. Maximum biomass yield and maximal growth rate of *Anabaena spiroides* v. *crassa* (KNU-YD0310 strain) under different PO₄³⁻-P concentrations.

| PO ₄ ³⁻ -P (mg l ⁻¹) | Y _{max} (cells/ml) | GR _{max} (divisions/d) |
|--|-----------------------------|---------------------------------|
| 0 | 1626 | 0.00 |
| 1.6 | 118750 | 0.36 |
| 8.0 | 193500 | 0.58 |

더라도 대기중의 질소 기체를 이용한 *Anabaena*의 꾸준한 증식에 의해 녹조현상이 나타날 수 있다. 하구역 간적으로 인한 인공담수호의 탈염과정에서 호수 퇴적층의 상부에서 인산염이 용출될 수 있다는 시화호의 사례를 감안하면(박 등, 1997), 신생 새만금호의 탈염기간인 처음 수년 동안 *Anabaena* 등의 남세균류에 의한 단기적 천연 녹조현상은 불가피 할 것으로 예견된다. 또한 상류역 기원의 유입수 중에 포함된 질소 및 인 영양염이 새만금호에 추가적으로 공급될 경우, 유입수의 질소 및 인 영양염 농도에 관한 수질 기준의 적절성 여부에 따라 신생호의 인위적인 녹조현상 생성 여부가 크게 좌우될 것이다.

질소 영양염 제한과 이질세포 농도의 변동

이질세포 계수치의 평균값을 Fig. 4에 제시하였다. 질산염이 풍부한 경우(Fig. 4 좌측의 CB-1.0)보다 질산염의 농도가 CB media 중 농도의 1/5인 경우(Fig. 4 좌측의 N-0.2)에 이질세포 최대 생성

량은 더 많았으나, 그 시기는 21일 쯤 기록되어 15일째에 최대치를 기록한 CB-1.0의 경우보다 6일 더 늦었다(Fig. 4 좌측). 또한, 질산염을 전혀 첨가하지 않은 경우에는 이질세포 최대생성량은 적었으나, 그 시기는 가장 빨랐다(12일째). 특히, 이질세포와 영양세포의 비율은 질산염 제한이 심할수록 높고, 최대비율 도달시기도 빨라졌다(Fig. 5의 좌측). 질산염의 경우와는 달리, 인산염의 경우에는(Fig. 4 우측) 인산염의 농도가 높을수록 이질세포 최대 생성량이 많아지고 그 시기도 빨라졌다. 그러나, 이질세포와 영양세포의 비율은 인산염 제한 정도에 따른 차이가 뚜렷하지 않아(Fig. 5의 우측), 질산염 제한의 경우와 대조를 이루었다. 이러한 결과로부터, 본 실험종주는 수중의 질산 영양염이 제한되면, 부족한 질소 영양을 보충하기 위하여 질소 고정능이 있는 이질세포의 비율을 높여 적응할 수 있다(Zhang et al. 2006). 그러나 인 영양염의 농도를 제한한 경우에는 농도에 비례한 개체군 성장이 나타나고(Fig. 4 우측) 이질세포와 영양세포의 비율도 인산염 제한 정도에 따라 뚜렷한 차이가 없어(Fig. 5의 우측), 부족한 인 영양염을 보충할 수 있는 “질소 영양염이 부족한 경우 작동하는 질소 고정 작용과 견줄만한” 별도의 적응 기작은 없는 것으로 판단된다. 따라서 신생 새만금호의 천연적 녹조현상으로부터 인위적인 추가 증식요인 차단하기 위해서는 호수 유입수 중의 인산염 농도를 규제하여야 할 것이다.

인 영양염 제한과 휴면세포 농도의 변동

Fig. 6에 제시된 휴면세포 계수치의 평균값 변동을 보면, 인산염의 농도가 CB media 중 농도의 1/5인 경우(Fig. 6 우측의 P-0.2)에 가장 높은 휴면세포 최대 생성량을 나타내었다 (Van Dok and Hart, 1996). 이는 이질세포의 경우와는 정반대로(Fig. 4, 5)인 제한에 대한 생존전략(survival strategy)으로 해석된다(Olli et al., 2005). 인 영양염이 부족한 경우에 실험종주가 이를 보충할 수 있는 특별한 방법은 없으나, 그 대신 세포의 대사를 정지시켜(= 휴면세포의 형성) 인 영양염이 다시 공급될 수 있는 다음 시기까지 세포의 생존기간

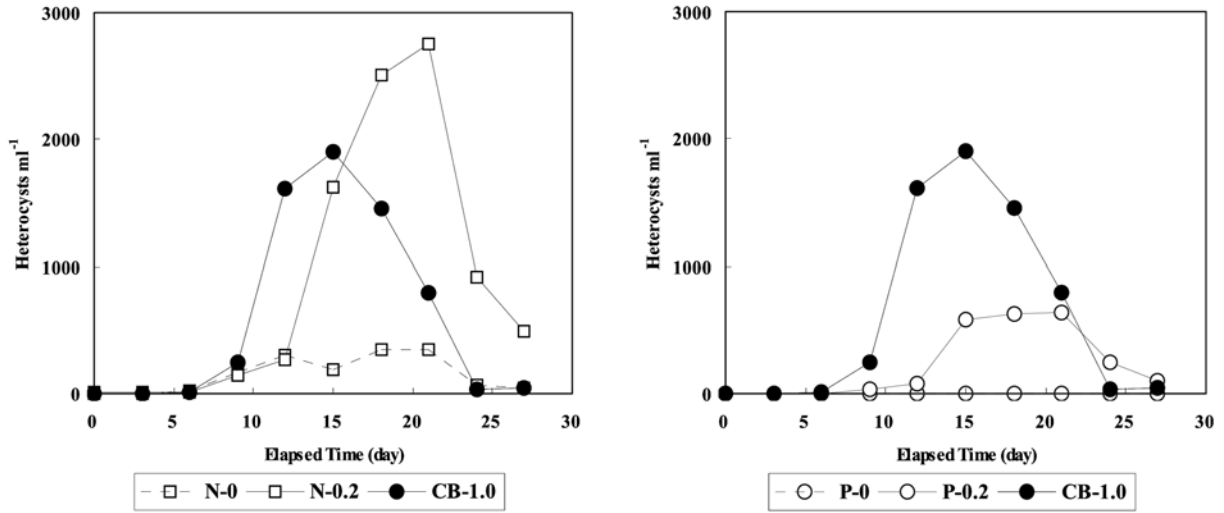


Fig. 4. Time course of mean heterocyst density under N-limited (left) and P-limited (right) condition by *Anabaena spiroides* v. *crassa* (KNU-YD0310 strain). N-0 and P-0 means experimental CB-N and CB-P medium without any added nitrate-N and phosphate-P, respectively. One fifth of nitrate-N and phosphate-P for the enriched CB medium (CB-1.0 with 21.6 mg NO₃⁻-N l⁻¹ and 8.0 mg PO₄³⁻-P l⁻¹) was added to prepare medium N-0.2 and P-0.2, respectively.

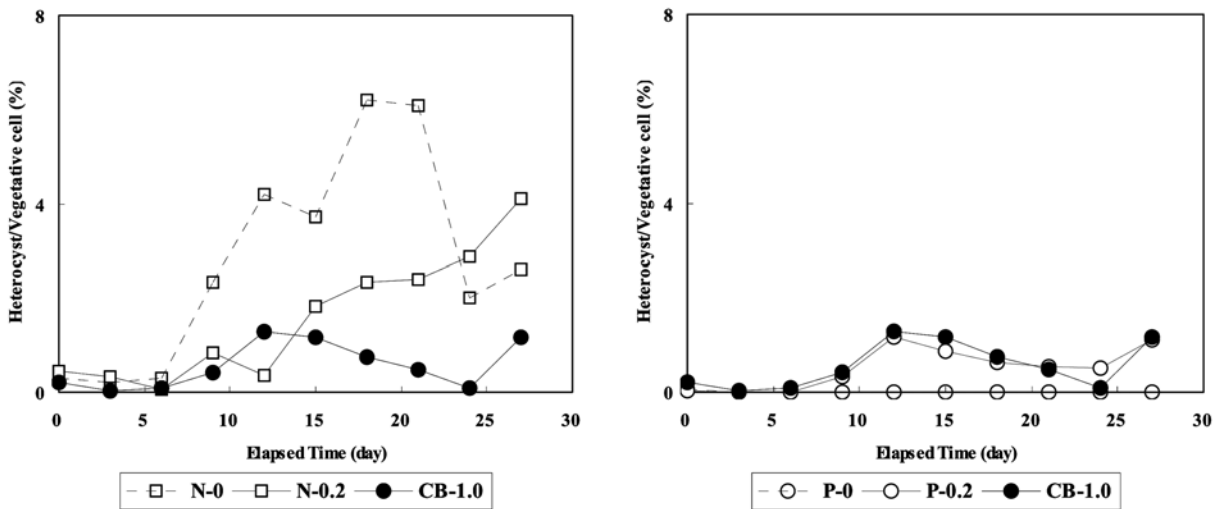


Fig. 5. Fluctuation of (Heterocysts)/(Vegetative cells) ratio in N-limited (left) and P-limited (right) condition by *Anabaena spiroides* v. *crassa* (KNU-YD0310 strain). N-0 and P-0 means experimental CB-N and CB-P medium without any added nitrate-N and phosphate-P, respectively. One fifth of nitrate-N and phosphate-P for the enriched CB medium (CB-1.0 with 21.6 mg NO₃⁻-N l⁻¹ and 8.0 mg PO₄³⁻-P l⁻¹) was added to prepare medium N-0.2 and P-0.2, respectively.

을 최대한 연장시킬 수는 있을 것이다. 따라서, 현장에서 *Anabaena* 와 같은 질소고정 남세균류에 의한 녹조현상을 방지하기 위해서는, 호수의 인산염 농도가 규제 수준 이하로 유지될 수 있도록 지속적인 노력을 기울여야 할 것이다.

신생 새만금호의 담수-탈염 초기의 천연적 녹조현상 생성 가능성

본 실험 중주를 분리한 시료원인 용담호는 2002년 12월부터 담수를 시작하여 2002년 8월에 완료하였으나, 담수 과정중인 2002년부터 이미 녹조현상의 원인 남세균 생물종들이 출현하였다. 이는 용담호보다 20년 앞서 담수 완료한 소양호의 경우와는 크게 다른 담수초기의 현상이다. 소양호에서는 담수완료 이후부터(조, 1968; 조, 1974) 1986년 이전까지 약 12년 동안 남세균이 아닌 녹

조류, 규조류, 와편모류 등이 우점하는 담수 초기기간을 거친 후에(Kim, 1987; 이 등, 1998), 남세균에 의한 대규모 녹조현상이 나타나기 시작하였다(이 등, 1990; 허 등, 1991; 허와 김, 1992; 이와 조, 1994). 이러한 차이는 초기 담수를 전후한 인 영양염의 공급 양상이 두 인공호에서 서로 달랐던 때문으로 사료된다. 첫째, 소양호의 경우에는 담수 직전 침수 예정지역 내에 존재하던 인 영양염 발생원이 극히 미미했던 반면, 용담호 수몰 지구 내에는 이전 주민의 집단거주 지역이 포함되어 있어 담수 직전까지 잔존하던 일부 인 영양염 발생원이 완전히 제거되지 못했던 것으로 판단된다. 둘째, 담수 시점에서 10여년 경과 후에 담수어류 가두리 양식 과정에서 발생한 인 유입부하량이 급증했던(허 등, 1992) 소양호에서는 달리, 용담호에서는 담수 직후부터 유입 지천들을

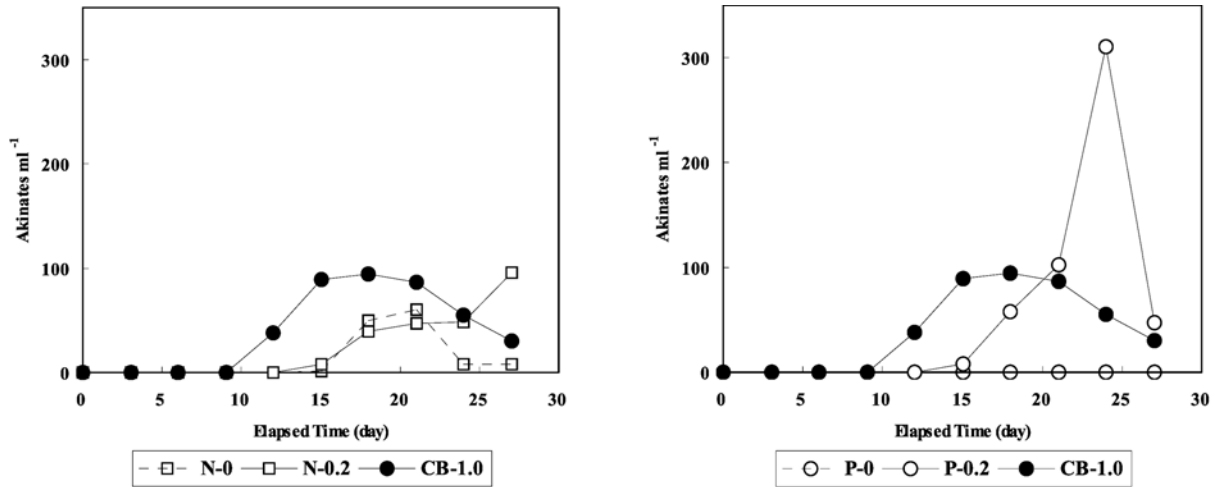


Fig. 6. Time course of mean akinete density under N-limited (left) and P-limited (right) condition by *Anabaena spiroides* v. *crassa* (KNU-YD0310 strain). N-0 and P-0 means experimental CB-N and CB-P medium without any added nitrate-N and phosphate-P, respectively. One fifth of nitrate-N and phosphate-P for the enriched CB medium (CB-1.0 with 21.6 mg NO₃⁻-N l⁻¹ and 8.0 mg PO₄³⁻-P l⁻¹) was added to prepare medium N-0.2 and P-0.2, respectively.

통한 인 및 부유물질 유입부하량이 총저수량에 비하여 상대적으로 크게 높았다(허 등, 2005; 유 등, 2005). 따라서 용담호의 인 농도를 적정 수준으로 조절하기 위해서는 유입지천의 수질관리와 용담호 내 인 농도가 높은 증층수의 차별적 방류 등과 같은 노력이 요구된다(허 등, 2005).

신생 새만금호는 하구역 환경에서 시작하여 방조제 완공 직후부터 탈염-담수화 되는 과정을 거쳐, 대규모 면적의 평균 수심이 낮은 담수호로 진화하게 된다(허와 오, 1997). 이 과정에서 위의 두 인공담수호에서는 찾아볼 수 없는 또 다른 인 유입부하가 발생할 수 있다. 하구역 기원 호수의 탈염과정 초기에는 수심이 상대적으로 깊은 수역을 중심으로 염분 경사에 의한 밀도 성층이 유지될 수 있다. 이러한 수역의 퇴적층 상부의 무산소 또는 미세산소 구역서는 인산염이 용출되어 수중으로 확산된다(박 등, 1997). 이와 같은 인 유입부하 발생으로 인해, 신생 새만금호의 담수 초기 수년 동안에는 천연적인 녹조현상이 생성될 가능성이 높다. 특히, 저염에 잘 적응된 하구성 질소고정 남세균 생물종들은(최 등, 2002; Kim *et al.*, 2004) 이 기간에 매우 우점적인 생태적 지위를 차지할 수 있다. 새만금 신생호에서 예견되는 이러한 현상이 비록 피할 수 없는 단기적 자연현상이라 하더라도, 본 연구를 통해 규명된 *Anabaena spiroides* v. *crassa* 종주의 인-질소 요구에 관한 생리·생태적 특성은 천연적인 녹조현상뿐만 아니라 향후의 인위적 영향으로 인해 형성되는 녹조현상에 대한 대책을 수립하기 위한 원천자료로 활용될 것이다.

사 사

본 연구는 2005년 군산대학교 지역혁신센터(새만금환경연구센터) 연구사업비의 지원으로 수행되었습니다. 연구 수행에 기술적인 도움을 주신 김형섭 박사님과 명금옥, 강이구 두분 동학께 깊이 감사드립니다. 또한 본 논문의 초고를 세심하게 검토해 주신 배재대학교 유순애 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

- 김범철, 김은경, 박호동, 전중균(공역), 1999. 호수의 독성 남조류. 동아기술.
- 김영길, 2005. 만경강 하구·용담호·부안호 식물플랑크톤의 생리·생태학적 연구. 군산대학교 대학원. 박사학위논문. 172면.
- 맹주선, 1982. 무기질소원의 종류에 따른 염조류 *Anabaena flos-aquae* 광합성의 특성. 한국식물학회지 **25**(4): 153-160.
- 박용철, 박준진, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희, 1997. 시화호 산화-환원 환경하의 용존 유·무기 화합물의 생지화학적 연구. 한국해양학회지 “바다” **2**(2): 53-68.
- 유순주, 채민희, 황종연, 이재안, 박종겸, 최태봉, 2005. 담수 이후 용담호 영양상태 변동 요인 분석. 수질보전/한국물환경학회지, **21**(4): 360-367.
- 이은주, 김범철, 조규송, 1998. 소양호 지류에서의(상갈리) 식물플랑크톤 군집구조 (1984-1997) 한국육수학회지 **31**(2): 119-128.
- 이은주, 김영건, 조규송, 1990. 소양호와 대청호에 있어서 부영양화 지표종의 출현 비교. 한국육수학회지, **23**(4): 291.
- 이은주, 조규송, 1994. 소양호 식물성플랑크톤의 연간변화. 한국육수학회지, **27**(1): 9-22.
- 이인철, 유순애, 김성진, 1999. 수 중 남조류 추출액에서 본 5-Aminolevulinic Acid Dehydratase의 금속요구성. *Algae*, **14**(4): 277-282.
- 조규송, 1968. 북한강수계의 3개인공호에 대한 육수학적연구. 제1보: 춘계 파로호, 춘천호 및 의암호의 환경요인과 Plankton에 관하여. 한국육수학회지 **1**(1): 25-32.
- 조규송, 1974. 소양강 다목적 Dam 호의 육수학적연구. 1.담수 초기의 육수조건과 plankton. 한국육수학회지 **7**(1-2): 63-70.
- 최애란, 박진홍, 이진애, 2002. 낙동강 하류역 남조 *Anabaena*의 개체군변동 및 독성 연구. *Algae*, **17**(2): 95-104.
- 최종기, 이은희, 노재훈, 허성희, 1997. 시화호와 시화호 주변해역 식물플랑크톤 대증식과 일차 생산력에 관한 연구. 한국해양학

- 회지 “바다” 2(2): 78–86.
- 허성희, 오임상, 1997. 인공호수 시화호와 주변해역의 생태계 연구: 서문. 한국해양학회지 “바다” 2(2): 49–52.
- 허우명, 권상용, 김영길, 이원호, 김범철, 2005. 용담호 소유역별 인 및 부유물질 유입부하량 산정. 한국육수학회지, 38(3): 322–333.
- 허우명, 김범철. 1992. 소양호 부영양화에 따른 인(P) 제한으로부터 질소(N) 제한으로의 변화. 한국육수학회지, 25(4): 301.
- 허우명, 김범철, 조규송. 1991. 소양호 부영양화에 따른 N/P 비의 변화와 남조류 Bloom. 한국육수학회지, 24(4): 283–288.
- 허우명, 김범철, 안태석, 이기중, 1992. 소양호 유역과 가두리로부 터의 인부하량 및 인수지(Phosphorus Budget). 한국육수학회지, 25(4): 207–214.
- 한국수자원공사, 2000. 용담다목적댐 건설사업 수질대책보고서. p. 17.
- Choi, C.W., S.A. Yoo, I.H. Oh and S.H. Park. 1998. Characterization of extracellular flocculation substances produced by a planktonic cyanobacterium, *Anabaena flos-aquae*. Biotechnology Letters, 20(7): 643–646.
- Guillard, R.R.L., 1973. Methods for microflagellates and nanoplankton. In (J.R. Stein ed.) Handbook of phycological methods, Cambridge University Press, New York, pp. 69–85.
- Kim, B.C., 1987. An ecological study of phytoplankton in Lake Soyang. Ph.D. Thesis, Department of Oceanography, Seoul National University, 125pp.
- Kim, Y.G., G.O. Myung, W. Yih and Y.K. Shin, 2004. Optimal growth conditions for the two euryhaline cyanobacterial clones, *Anabaena* sp. CB-MAL21 and CB-MAL22 isolated from Mankyong Estuary, Korea. Algae, 19(2): 145–148.
- Lee, I.C. and S.A. Yoo, 2001. Characterization of 5-Aminolevulinic Acis Dehydratase purified from *Anabaena cylindrica*. Algae, 16(1): 59–65.
- Olli, K., K. Kangro and M. Kabel, 2005. Akinete production of *Anabaena lemmermannii* and *A. cylindrica*(Cyanophyceae) in natural populations of n- and p-limited coastal mesocosms. J. Phycol. 41: 1094–1098.
- Sherman, D.M., D. Tucker and L.A. Sherman, 2000. Heterocyst development and localization of cyanophycin in N₂-fixing cultures of *Anabaena* sp. pcc 7120 (Cyanobacteria) J. Phycol. 36: 932–941.
- Van Dok, W., and Hart, B.T. 1996. Akinete differentiation in *Anabaena circinalis* (Cyanophyta). Journal of Phycology, 32: 557–565.
- Whitton, B.A. and M. Potts (ed.), 2000. The ecology of cyanobacteria. The diversity in time and space. Kluwer Academic Publishers, London. 669pp.
- Zhang, C., S. Laurent, S. Sakr, L. Peng and S. Bedu., 2006. Heterocyst differentiation and pattern formation in cyanobacteria: a chorus of signals. Molecular Microbiology, 59(2): 367–375.

2006년 4월 28일 원고접수

2006년 8월 17일 수정본 채택

담당편집위원: 강성호