

〈Review paper〉

N : P ratio 조절에 의한 미세조류 성장과 경쟁 제어

안 치 용 · 이 재 연 · 오 희 목*

한국생명공학연구원 환경바이오연구센터

Control of Microalgal Growth and Competition by N : P Ratio Manipulation

Chi-Yong Ahn, Jae-Yon Lee and Hee-Mock Oh*

*Environmental Biotechnology Research Center,
Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology, Daejeon 305-806, Korea*

Abstract - Microalgae can grow autotrophically with the supply of light, carbon dioxide and inorganic nutrients in water through photosynthesis. Generally, microalgal growth is limited by the concentrations and relative ratio of nitrogen (N) and phosphorus (P) among the nutrients in the aquatic environment. Each microalga has its specific optimum N : P ratio resulting in dominance in a particular water having similar nutrient composition. Algal bloom is an immense growth of certain microalga commonly cyanobacterium and can be sequestered by reducing the limiting nutrient, generally P in the freshwater. Moreover, dominance of a less toxic blooming strain can be established by manipulating N : P ratio in the water. On the other hand, microalgal biomass of a certain species can be enhanced by increasing limiting nutrient and adjusting the N : P ratio to the target species. The above-mentioned eco-physiological features of microalgae can be more completely interpreted in connection with their genomic informations. Consequently, microalgal growth regulation which can be achieved on the basis of its eco-physiological and further genomic insights would be helpful not only in the control of algal bloom, but also for an increased yield of algal biomass.

Key words : limiting factor, optimum N : P ratio, algal bloom, algal biomass, species competition

서 론

조류(algae)는 광합성 생물로서 뿌리, 줄기, 잎의 구분이 없으며, 주로 수중에 서식한다는 면에서 육상의 식물과 구분될 수 있다. 조류는 크기에 따라 육안으로 구분되는 대형조류와 미세조류로 구분한다. 미세조류는 또한

원핵생물(prokaryote)에 해당하는 남조류(blue-green algae, cyanobacteria)와 진핵생물(eukaryote)에 해당하는 녹조류(green algae), 규조류(diatoms), 와편모조류(dinoflagellate) 등으로 구분할 수 있다. 남조류는 약 35억 년 전에 지구에 출현하여 산소를 공급함으로써 다양한 생명체가 탄생할 수 있는 기반을 만들어 주었으며(Schopf 2000), 현재도 지구상 광합성의 30~50%를 조류가 담당하는 것으로 알려져 있다(Sze 1998).

최근 미세조류가 전 세계적으로 각광받기 시작한 것은, 2008년 석유파동 이후 신재생에너지로서 미세조류

* Corresponding author: Hee-Mock Oh, Tel. 042-860-4321,
Fax. 042-879-8103, E-mail. heemock@kribb.re.kr

바이오연료에 대한 가치가 재확인되었기 때문이다. 그러나 다른 한편에서는 수질오염의 가중에 따른 부영양화로 녹조, 적조 발생이 여전히 환경문제로 상존하고 있다. 이와 같은 상황에서 미세조류는 광합성 작용에 의하여 대기 중의 이산화탄소 농도를 낮추고, 배지의 무기영양염류로 하·폐수 중의 질소(N)와 인(P) 등을 이용할 수 있고, 생산된 biomass는 바이오연료로 전환될 수 있으므로, 현재 인류가 당면한 기후, 환경, 에너지 문제의 동시 해결에 기여할 수 있다.

상기의 역할을 효과적으로 수행하기 위해서는 미세조류의 대량 배양이 신속히, 효율적으로 진행되어야 한다. 특정 미세조류의 우점에 관련하여 Hutchinson (1961)에 의해 제기된 “플랑크톤 역설 (the paradox of the plankton)”을 풀기 위해 많은 연구자들이 다양한 이론을 제시하였다. 미세조류는 적당한 햇빛과 영양염류만 있으면 살 수 있으므로, 가장 권위 있던 경쟁적 배제 (competitive exclusion) 이론에 따르면 최적의 한 두 종만이 경쟁에 살아남고, 나머지 종들은 도태되어야 마땅함에도, 물속에는 수많은 미세조류가 공존하는 현상은 기존의 이론으로는 제대로 설명되지 않았다. Rhee (1978)는 종에 따른 최적 영양염류 요구비율의 차이가 특정 환경에서 종간경쟁을 결정한다고 하였고, Tilman (1982)은 mechanistic theory에서 서로 다른 영양염류에 의해 제한받을 경우, 다양한 미세조류 종들이 공존할 수 있음을 밝힘으로써 이러한 역설을 설명하였다. 특히 이중에서도 많은 양을 필요로 하는 영양염류이기 때문에 쉽게 공급이 부족할 수 있는 N과 P의 비율이 가장 중요하게 인식되어 이에 대한 연구가 활발히 진행되었다.

따라서 본 연구에서는 특정 종이 우점하는 미세조류의 대량증식을 억제하기 위하여, 또는 특정 미세조류의 생산성을 높이기 위하여 미세조류 구성성분 중 절대량 및 상대적 비율이 매우 중요한 영양염류인 N과 P의 역할에 대하여 고찰하고자 한다.

본 론

1. Redfield ratio

미세조류는 수중 식물과 같이 수중생태계에서 1차 생산자의 중요한 기능을 수행하며, 성분은 식물과 유사한 것으로 볼 수 있다. Table 1은 식물체를 구성하는 주요 원소의 종류 및 구성비 그리고 수중에 존재하는 이들 원소의 함량비를 나타내었다 (Valentyne 1974). 식물체

Table 1. The listed elements are required for plant growth (after Valentyne 1974)

Element	Demand by plants (%)	Supply in water (%)	Demand supply ratio
O	80.5	89.0	1
H	9.7	11.0	1
C	6.5	.0012	5,000
Si	1.3	.00065	2,000
N	.7	.000023	30,000
Ca	.4	.0015	< 1,000
K	.3	.0023	1,300
P	.08	.000001	80,000
Mg	.07	.0004	< 1,000
S	.06	.06	.0004
Na	.04	.0006	< 1,000
Fe	.02	.00007	< 1,000

구성에 중요한 원소 중에서 P, N, K는 식물 생장에 필요량에 대한 수중 존재량이 1/80,000, 1/30,000, 1/1300로서 상대적으로 아주 적은 양이 분포하는 것으로 조사되었다. 즉, 이들 원소가 흔히 조류를 포함한 식물생장의 제한요소 (limiting factor)로 작용하며, 광이 충분한 조건에서 조류의 생산성을 결정할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 식물 또는 조류의 성장을 촉진하기 위해서는 부족한 이들 무기 영양염류를 외부로부터 비료 등의 형태로 공급해 주어야 할 것이다.

Redfield (1934)는 바다에서 미세조류와 해수 시료를 채취하여 주요 성분인 C, N, P의 성분비를 조사한 결과 2가지 시료 모두 106:16:1 (원자수, 질량의 경우는 42:7:1)의 비로 구성되어 있음을 보고하였다. 미세조류 체내 N:P ratio와 해수의 N:P ratio가 일치하는 이유에 대해 많은 과학자들은 우연의 일치라거나, 해수의 영양분 비율이 미세조류에 반영된 결과라는 안이한 해석을 내놓았으나, Redfield (1958)는 미세조류가 해수의 N:P ratio를 자신에 맞게 조절한 결과라는 획기적인 결론을 제시하였다. P는 강을 통해 유입되는 양에 의해 물리적으로 결정되는데 비해, N은 생물체에 의해 질소고정 또는 탈질 과정을 통해 공기로부터 공급되거나 다시 방출될 수 있으므로 P의 농도에 맞추어 N의 농도가 조절된 결과라는 것이었다. 즉, 환경은 미세조류가 서식할 수 있도록 조건을 형성하고, 미세조류는 또한 환경에서 이용 가능한 조건형성에 영향을 준다. 따라서 미세조류는 해수로부터 C, N, P를 균형적으로 흡수하고, 세포성분을 구성한다는 것이다. 이것은 생태계에서 생물과 환경간의 상호작용의 기본원리이며, Redfield ratio는 미세조류의 생리·생태연구에 큰 영향을 주었다.

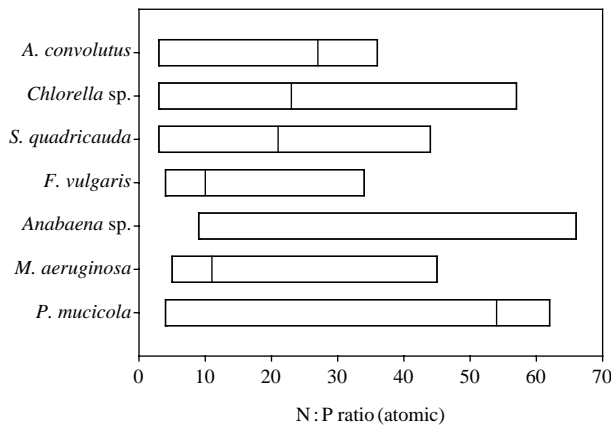


Fig. 1. N : P atomic ratios of seven unialgal microalgae, *Ankistrodesmus convolutus*, *Chlorella sp.*, *Scenedesmus quadricauda*, *Frustulia vulgaris*, *Anabaena sp.*, *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium mucicola*. The left end of the bar is the ratio of N-limited culture; the right end, the ratio of P-limited culture; and bold column, the optimum ratio at $\mu=0$ (after Oh and Rhee 1991).

2. Optimum N : P ratio

물속에는 다양한 미세조류가 분포하고 있다. 미세조류의 생존에 중요한 환경요인으로는 수온, 광질, 광량, 다양한 영양염류 등으로 볼 수 있으며, 이들이 공존할 수 있는 것은 계절적, 공간적, 영양적으로 각기 생태적 지위 (ecological niche)를 달리하기 때문에 가능한 것이다.

미세조류의 생장에 많이 소요되는 원소는 C, H, O, N, P, K 등에서 C, H, O 등은 물과 대기 중의 이산화탄소로부터 계속적으로 공급되므로 결국 N, P, K 등의 공급에 의해 미세조류의 생장이 조절될 수 있다. 특히 N은 단백질 합성의 주요 성분이며, P는 DNA, RNA, ATP 등의 구성 물질로서 조류와 식물의 생장에 필수적 요소이다 (Conley *et al.* 2009). 따라서 N, P의 절대량을 증가시키므로서 미세조류의 생장을 왕성하게 할 수 있을 것이다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 미세조류의 성분을 조사해보면 각기 다른 N:P ratio의 특성을 보였다(Oh and Rhee 1991). 녹조류인 *Ankistrodesmus*, *Chlorella*, *Scenedesmus*, 규조류인 *Frustulia*, 남조류인 *Anabaena*, *Microcystis*, *Phormidium*은 각기 특징적인 N:P ratio의 범위 및 optimum N:P ratio의 특성을 나타내었다. 그러나 *Anabaena*는 자체 질소고정능에 의하여 N을 공급받을 수 있으므로 optimum N:P ratio를 구하기 어려웠다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 *Scenedesmus*를 chemostat으로 다양한 배지의 N:P ratio에서 배양하여 steady-state 세포의 N, P 함량을 분석하였다. 배지의 N:P ratio가 증

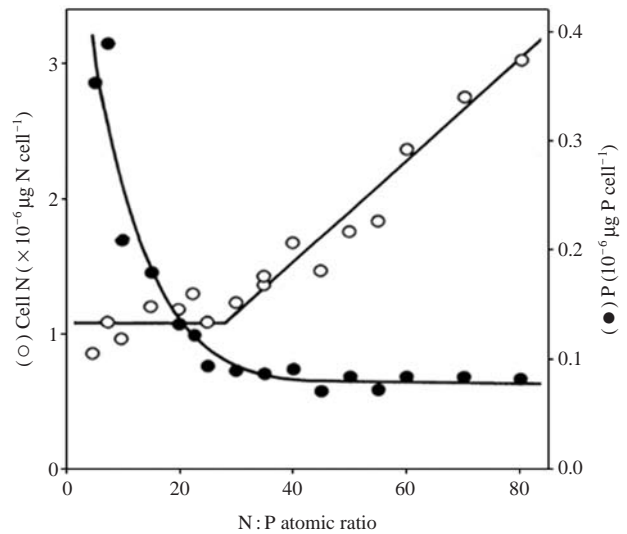


Fig. 2. Cell quotas for N and P determined at a single steady-state growth rate for *Scenedesmus sp.* grown with different N : P nutrient ratios in the incoming media (after Rhee 1978).

가함에 따라 *Scenedesmus*는 N-제한 상태로 유지되다가 N:P ratio (atomic)가 약 30인 부분에서 P-제한 상태로 전환됨을 볼 수 있으며, 이와 같은 전환시기의 N:P ratio를 optimum N:P ratio로 정의하였다(Rhee 1978). 즉, 미세조류가 여분의 N 또는 P를 세포에 저장하지 않고 생존에 필요한 최소한의 N, P를 유지한다고 하였을 때, N과 P의 비율 optimum N:P ratio로 볼 수 있다.

3. Interspecies competition

미세조류의 종간경쟁을 여러 가지 측면에서 설명할 수 있다. 즉, 계절적, 공간적, 영양적 측면에서 종간경쟁이 일어날 것이고, 이들의 결과로 미세조류는 각기 생태적 지위를 달리함으로써 수환경에서 공존하게 된다. 미세조류는 일반적으로 계절에 따른 수온, 광도 등의 변화에 의하여 봄, 여름에는 녹조류, 여름에는 남조류, 가을과 겨울에는 규조류로의 계절적 천이 (seasonal succession)를 보인다. 미세조류는 또한 부유성 조류와 부착성 조류로 공간적 분포의 차이를 보이기도 한다.

영양염류 특히 optimum N:P ratio의 차이에 의한 종간경쟁의 경우는 Table 2에서와 같이 Rhee (1978)의 논문에서 잘 설명되고 있다. Optimum N:P ratio (atomic)가 각각 10, 20인 미세조류 A와 B 개체군이 함께 존재하는 수계의 N:P ratio가 10과 20 사이일 경우, 미세조류 A는 P에 의해 제한받고, B는 N에 의해 제한받으므로 두 종은 공존이 가능하나, P를 첨가하면 N:P ratio는 감소하

Table 2. Competitive exclusion and coexistence of organism A and B (after Rhee 1978)

N:P	0	10	20	30	
	Organism A dominant	↑	P-limited A & N-limited B coexist	↑	Organism B dominant
		Optimal N:P for A		Optimal N:P for B	

여 미세조류 A 개체군에 유리하게 되고, 미세조류 B 개체군은 경쟁에서 밀리게 된다. 반면에 배지에 N을 추가하는 경우 미세조류 A 개체군이 줄고 미세조류 B 개체군이 우점하게 된다. 따라서 P와 N을 함께 처리하는 경우의 미세조류 biomass는 P와 N을 각기 처리하였을 때의 합보다 많게 된다.

Ahn *et al.* (2002)은 담수수계에서 흔히 관찰되는 *Ankistrodesmus convolutus*, *Chlorella vulgaris*, *Chlamydomonas* sp.의 3종을 대상으로 P-제한의 chemostat 실험을 통하여 P 흡수력의 일주기 차이가 종의 성장과 중간경쟁을 결정하는 주요 요인임을 보고하였다. 한 가지 영양염류에 의해 제한받는 조건에서도 흡수 시간대를 달리함으로써 경쟁을 완화하고 공존의 가능성이 높아질 수 있음을 이론과 실험으로 증명하였다.

4. Control of algal bloom

미세조류는 수중에서 1차생산자의 기능을 수행하는 생태계의 핵심 구성원이다. 그러나 호소 부영양화에 의한 조류의 대량증식 현상인 녹조(綠潮, green tide, algal bloom)의 문제는 1) 조류가 너무 많이 증식하고, 2) 이취미(taste and odor)와 독소 등으로 수질을 악화시킬 수 있는 남조류, 규조류 등의 특정 조류가 절대적으로 우점하는 것이다. 따라서 녹조의 문제점을 해결하기 위해서는 다음과 같은 처방을 고려할 수 있다.

1) N과 P의 절대량 줄이기

과거에 호소에서 미세조류 생장의 제한요인은 C라는 견해도 있었으나, Schindler (1974)의 캐나다 Lake 226 그리고 다년간에 걸친 Lake 304의 실험결과 C, N, P를 첨가한 호수에서는 조류 증가에 따른 엽록소-a 농도가 하절기에 크게 증가하였으나, C, N만을 첨가한 해에는 엽록소-a 농도 증가가 거의 없었다(Fig. 3). 즉, 하절기 높은 수온기에 미세조류 대량증식은 P에 의한 것임을 명확히 보여주었다. 이후로 대부분의 호수에서 광이 충분한 상태에서 미세조류의 생장은 대부분 P에 의하여 제한되는 것으로 받아들여지게 되었다.

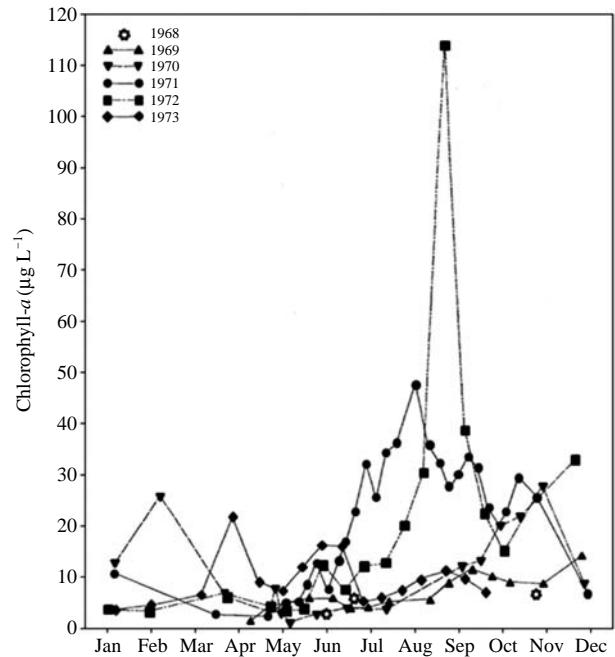


Fig. 3. Chlorophyll-a concentrations in lake 304. In 1968, 1969, and 1970 the lake was not fertilized. In 1971 and 1972, it received annual additions of 0.40 g of phosphorus, 5.2 g of nitrogen, and 5.5 g of carbon per square meter. In 1973, additions of nitrogen and carbon were continued at the same rate but phosphorus was not added (after Schindler 1974).

이와 같은 사실에 대한 확증연구로서 Schindler *et al.* (2008)은 캐나다의 Lake 227을 1969~2005년에 걸쳐 37년간 조사한 결과 N 공급을 감소시키는 것에 의해서는 호수의 부영양화를 줄이지 못함을 보고하였다. 즉, 남조류의 성장 시 N이 부족한 경우 질소고정 남조류에 의하여 호수의 N 농도가 증가하였다. 따라서 수십 년에 걸친 대규모 현장실험과 여러 사례연구의 결과로서 부영양화를 줄이기 위하여 호소 및 유역관리의 핵심은 P 유입을 줄이는 것이라고 결론지었다(Schindler 2012).

한편 Conley *et al.* (2009)은 수심이 낮은 호수에서 P의 유입을 제한하는 것만으로는 남조류의 bloom을 제어하지 못함을 보고하였다. 즉, *Microcystis*는 gas vesicle(기낭)을 지니고 있으므로 자체의 부력을 조절하여 수체에서 수직이동에 의하여 저니(sediment)로부터 P를 공급받고, 수표면으로 부상하여 활발한 광합성과 증식에 의해 bloom을 형성할 수 있는 것이다. 따라서 *Microcystis* 또는 질소고정 남조류를 효과적으로 제어하기 위해서는 N과 P를 동시에 저감해야 한다고 주장하였다. 또한 Smith and Schindler (2009)에 의하면 수중 영양염류의 증가는 병원균을 포함한 비-영양염류성 오염자의 밀도,

조성, 독성, 생존 등에도 영향을 주지만, 세균의 활성을 증가시켜 phenol과 같은 독성물질의 생분해를 촉진할 수도 있다고 한다. 따라서 앞으로의 수질관리는 bloom 제어는 물론이고, 독성물질 분해, 병원균 저감 등을 종합적으로 고려하여 최적 수준의 영양염류 부하를 산정하고, 실천하는 통합적, 전략적 접근이 필요하다.

2) 목적 종과 다른 N:P ratio 조절

호소에서 번성하는 미세조류의 optimum N:P ratio는 수중 N:P ratio와 유사할 때 최적의 성장을 보이게 된다. 따라서 N 또는 P의 첨가에 의하여 물의 N:P ratio를 조절하고, 이에 따라서 최적 성장 종(species)이 변경되며, 결국 다른 종이 우점하게 될 것이다. 부영양 호소에서 주로 출현하는 남조류의 독소, 이취미 물질 생산 등이 우려된다면, 이와 같은 영양염류의 조성변화에 의하여 위해성이 적거나 없는 미세조류로의 인위적 천이를 유도하는 것도 가능하다. 실제로 부영양 호소 관리기술 중에 선택적 영양염류 첨가(selective nutrient addition)는 비제한 영양염류를 추가함으로써 수중 영양염류의 비를 변화시켜 위해성이 적은 방향으로 조류의 군집변화를 유도하는 방법이다(Holdren *et al.* 2001).

5. Microalgal mass-cultivation

미세조류 biomass를 산업적으로 활용하기 위해서는 효과적 배양기술에 의하여 미세조류 biomass의 생산성을 크게 높여야 한다. 일례로 현재의 미세조류 바이오디젤은 원유 유래 바이오디젤에 비하여 4~5배의 생산가로 경쟁력을 확보하기가 어려운 실정이다(Oh 2011). 따라서 경제성 확보를 위한 다양한 방법 중에서 미세조류 biomass의 생산성 향상을 위하여 다음과 같은 방법을 고려할 수 있다.

1) N과 P의 절대량 증대

조류의 체내 성분 중 C, N, P의 성분비는 평균 106:16:1(원자수, 질량의 경우는 42:7:1)로 알려져 있다(Redfield 1958). 즉, 조류 biomass의 생산을 높이기 위해서는 C, N, P와 같은 주요 영양염류의 절대량 그리고 상대적 공급량이 적절하게 이루어져야 한다. Pate *et al.* (2011)은 이와 같은 조류의 성분비를 기준으로 조류 biomass 1톤을 생산하기 위해서는 88 kg N 그리고 12 kg P가 필요하다고 추산하였다. 조류 biomass의 약 50%가 오일성분으로 가정하면, 조류 오일 1L를 생산하기 위해서 0.16 kg N 그리고 0.022 kg P가 필요하게 된다. 유사한 연구로서 Yang *et al.* (2011)은 조류의 오일함량을 20%로 가정할

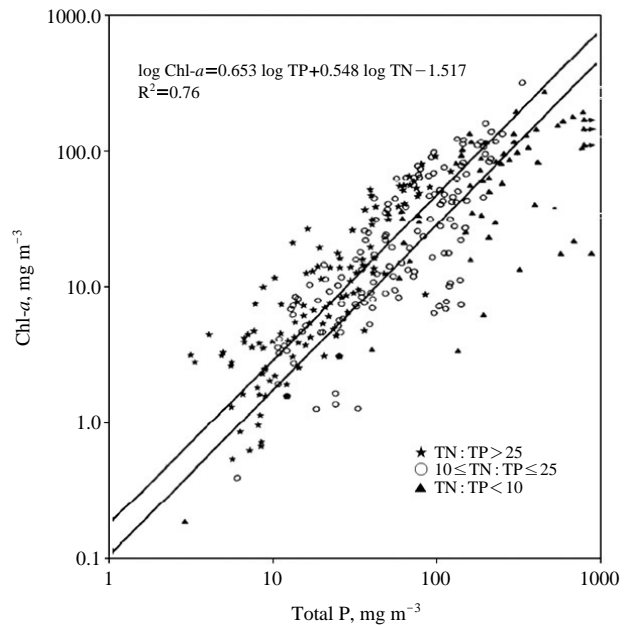


Fig. 4. Correlation of growing season mean Chlorophyll-*a* and mean total phosphorus (TP) in 127 north latitude lakes (after Smith 1982).

경우, 조류 바이오디젤 1L 생산을 위해서는 0.29 kg N 그리고 0.063 kg P가 필요한 것으로 보고하였다.

자연상태에서 조류의 성장을 결정하는 인자를 찾기 위하여 Smith(1982)는 127개의 호수를 대상으로 총인과 미세조류의 양을 대표하는 엽록소-*a* 농도의 관계를 조사하여, 조류의 biomass는 수중 총인의 농도에 비례적으로 증가하는 것을 보였다(Fig. 4). 따라서 미세조류 biomass의 증대를 위해서는 많은 경우에 있어서 조류 성장의 제한요인으로 작용하는 P의 절대량을 높여야 한다. 그러나 N:P ratio가 낮게 유지되는 상태에서는 N이 미세조류 biomass 생산의 제한요소로 작용하게 된다.

2) 목적 종과 배지의 N:P ratio 일치

Woertz *et al.* (2009)은 배지 중의 N:P ratio는 배양되는 미세조류의 세포내 N:P ratio를 결정하게 된다고 하였다(Fig. 5). 즉, 특정의 optimum N:P ratio를 갖는 미세조류를 배양하고자하면 배지 중 N 또는 P의 양을 조절하여 조류의 N:P ratio에 맞추는 것이 필요하다. 이와 같은 배지 내 영양염류의 비를 조절하는 전략적 접근에 의하여 원하는 특정 미세조류 종을 우점하게 할 수 있다.

미세조류 바이오디젤의 생산성은 조류의 종, 성장률 그리고 지질함량에 의하여 변화하게 된다. 조류의 지질함량은 일반적으로 N 제한 상태(low N:P supply ratio)에서 P 제한 상태(high N:P supply ratio)보다 3배 정도 높

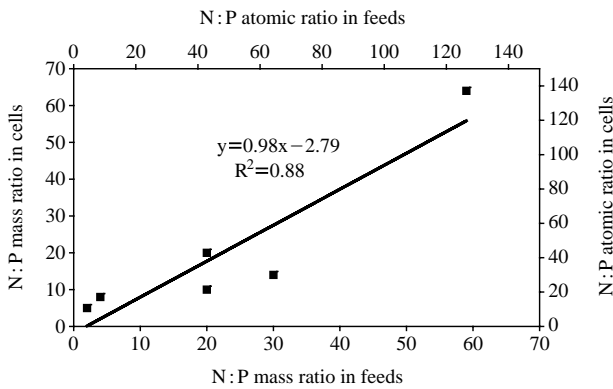


Fig. 5. The linear relationship between N:P ratio in feed to N:P ratio assimilated by cells (after Woertz *et al.* 2009).

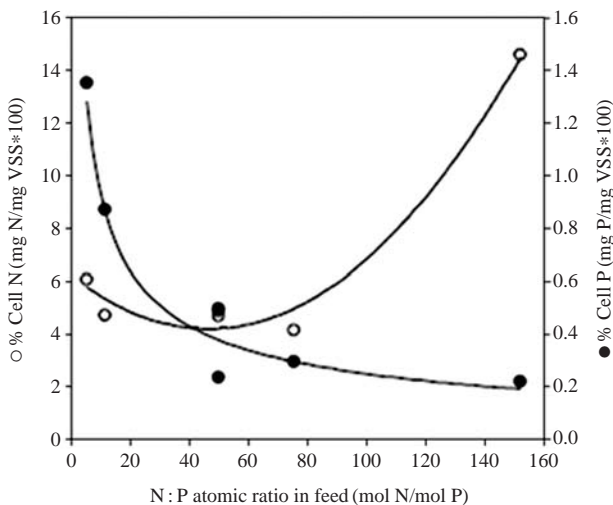


Fig. 6. Cellular N and P concentrations as a function of N:P ratio in the wastewater treatment (after Lundquist 2009).

은 것으로 알려져 있다 (Richardson *et al.* 1969). 따라서 최상의 지질생산성을 달성하기 위하여 미세조류의 생장률과 지질함량을 동시에 고려한 N, P 공급 전략이 필요하다. Sardans *et al.* (2012)은 N:P ratio가 낮은 상태로 영양염류를 공급하면 생장률이 높은 생물이 우점하며, 또한 N:P ratio는 생물 유전체의 진화방향을 결정하는 중요한 역할을 하는 것으로 보고하였다.

부영양호의 녹조발생에 대하여 많은 연구를 수행한 바 있는 Smith *et al.* (2010)은 최근에 개방형 pond에서 미세조류의 대량배양으로 생산된 바이오연료는 화석연료에 비하여 오염물질 배출이 적고, 미세조류 배양은 농작물에 비해 물 사용량이 적다는 생태적 장점을 강조하였다. 즉, 미세조류는 지속가능한 미래 에너지자원으로서

많은 잠재력이 있으며, 최적 생산을 위해서는 영양염류 제한, N:P ratio, food chain 등 생태학의 여러 핵심원리들이 잘 적용되어야 한다.

또한 21세기 에너지기후시대 (Energy-Climate Era)에 들면서 미세조류의 바이오연료 생산이 주목받게 되면서 미세조류 연구개발이 활발히 수행되고 있다. 일례로 미세조류를 이용한 하·폐수 고차처리 연구를 수행하고 있는 Lundquist (2009)는 부영양 호소에서 조류의 생장억제를 위해 1978년 발표된 N:P ratio 이론 (Rhee 1978)이 30년이 지난 2008년에 미세조류 biomass를 증산하기 위한 조류의 성장촉진에 그대로 적용될 수 있음을 보였다 (Fig. 6).

결론

1970년대 북미에서 호소의 부영양화에 의한 남조류 bloom을 해결하기 위하여, 조류학 전반 특히 생리·생태적 분야에서 큰 학문적 발전을 보게 되었다. 2000년대에 들어 화석연료의 고갈에 대비하여 대체에너지 자원으로 조류 바이오연료가 주목을 받게 되었다. 즉, 조류 생장의 생리적, 생태적 기작에 대한 충분한 이해가 조류의 성장저해 뿐만 아니라 조류의 성장 촉진에도 잘 활용될 있음을 알 수 있다.

근래에 급속히 발전하고 있는 생물의 유전체 분석 및 해석 기술을 도입하여, 상기와 같은 외적 변화를 미세조류의 내적 분자수준의 변화와 연계하여 해석하고 이해한다면 미세조류의 생장 억제와 촉진 등 성장조절에 획기적인 전기를 마련할 수 있을 것으로 생각한다. 이를 바탕으로 전 세계적 환경문제로 등장한 녹조, 적조 문제의 해결, 지구온난화 기체인 이산화탄소의 저장, 하·폐수의 고차처리 등에 기여하고, 한편으로는 미세조류의 대량배양에 의한 바이오연료 생산 등 다양한 유용물질의 생산에 폭넓게 활용될 수 있다.

결론적으로 미세조류는 수중에서 이산화탄소, 무기 영양염류가 공급되고 광을 이용하여 광합성 작용에 의하여 성장한다. 일반적으로 미세조류는 수중의 다양한 영양염류 중에서 N과 P의 농도 또는 N:P ratio에 의하여 생장이 조절된다. 미세조류는 각기 다른 최적 N:P ratio를 보이며, 이와 유사한 영양염류의 조성을 갖는 수체에서 우점하게 된다. 담수에서 녹조는 특정 남조류, 규조류 등의 대량 증식으로 나타나며, 일반적으로 P와 같은 영양염류의 제한에 의하여 저장할 수 있다. 조류 제어에 관한 여러 방법 중에서 수중의 N:P ratio를 변화시킴으

로서 독성 조류 종을 비독성의 다른 조류 종으로 변화를 유도할 수 있다. 한편 조류 biomass를 증산하기 위하여 제한 영양염류를 추가하거나, 목표 종의 N:P ratio에 맞도록 조정하는 방법이 있다. 미세조류의 생리·생태적 특성은 최근에 가능하게 된 미세조류의 유전체 정보를 활용하여 더욱 잘 이해될 수 있다. 따라서 미세조류의 생리·생태적, 유전체적 통찰에 의하여 가능한 미세조류의 생장조절은 녹조제어 뿐만 아니라 미세조류 대량배양에 의한 조류 biomass의 증산에도 유용하다고 할 수 있다.

사 사

본 연구는 미래창조과학부 글로벌프린티어연구개발사업 차세대바이오메스연구단(ABC), KIST 주요사업(과제번호 2E24280) 그리고 환경부 Eco-STAR project(수생태복원사업단)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Ahn C-Y, A-S Chung and H-M Oh. 2002. Diel rhythm of algal phosphate uptake rates in P-limited cyclostats and simulation of its effect on growth and competition. *J. Phycol.* 38: 695-704.
- Conley DJ, HW Paerl, RW Howarth, DF Boesch, SP Seitzinger, KE Havens, C Lancelot and G Likens. 2009. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus. *Science* 323:1014-1015.
- Holdren C, W Jones and J Taggart. 2001. Managing Lakes and Reservoirs. *N. Am. Lake Manage. Soc. and Terrene Inst.*, in coop. with Off. Water Assess. Watershed Prot. Div. U.S. Environ. Prot. Agency, Madison, WI.
- Hutchinson GE 1961. The paradox of the plankton. *Am. Nat.* 95:137-145.
- Lundquist T. 2009. Interdisciplinary algae production research. The 3rd Algae Biomass Summit (ABS 2009). Oct. 6~9, 2009. San Diego, USA.
- Oh H-M. 2011. Status and prospect of biofuel R&D for microalgal biomass. *News Inform. Chem. Eng.* 29:355-360.
- Oh H-M and G-Y Rhee. 1991. A comparative study of microalgae isolated from flooded rice paddies: light-limited growth, C fixation, growth efficiency and relative N and P requirement. *J. Appl. Phycol.* 3:211-220.
- Pate R, G Klise and B Wu. 2011. Resource demand implications for U.S. algae biofuels production scale-up. *Appl. Energ.* 88:3377-3388.
- Redfield AC. 1934. On the proportions of organic derivations in sea water and their relation to the composition of plankton. pp. 177-192. In James Johnstone Memorial Volume (Daniel RJ ed.). University Press of Liverpool.
- Redfield AC. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.* 46:205-221.
- Rhee G-Y. 1978. Effects of N:P atomic ratios and nitrate limitation on algal growth, cell composition and nitrate uptake. *Limnol. Oceanogr.* 23:10-25.
- Rhee G-Y and IJ Gotham. 1980. Optimum N:P ratios and coexistence of planktonic algae. *J. Phycol.* 16:486-489.
- Richardson B, DM Orcutt, HA Schwertner, CL Martinez and HE Wickline. 1969. Effects of nitrogen limitation on the growth and composition of unicellular algae in continuous culture. *Appl. Microbiol.* 18:245-250.
- Sardans J, A Rivas-Ubach and J Penuelas. 2012. The elemental stoichiometry of aquatic and terrestrial ecosystems and its relationships with organismic lifestyle and ecosystem structure and function: a review and perspectives. *Biogeochemistry* 111:1-39.
- Schindler DW. 1974. Eutrophication and recovery in experimental lakes: Implications for lake management. *Science* 184:897-899.
- Schindler DW. 2012. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. *Proc. R. Soc. B*: 279:4322-4333.
- Schindler DW, RE Hecky, DL Findlay, MP Stainton, BR Parker, MJ Paterson, KG Beaty, M Lyng and SEM Kasian. 2008. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 105:11254-11258.
- Schopf JW. 2000. The fossil record: Tracing the roots of the cyanobacterial lineage. pp. 13-35. In *The Ecology of Cyanobacteria* (Whitton BA and M Potts eds.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Smith VH. 1982. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis. *Limnol. Oceanogr.* 27:1101-1112.
- Smith VH and DW Schindler. 2009. Eutrophication science: Where do we go from here? *Trends Ecol. Evol.* 24:201-207.
- Smith VH, BSM Sturm, FJ deNoyelles and SA Billings. 2010. The ecology of algal biodiesel production. *Trends Ecol. Evol.* 25:301-309.
- Sze P. 1998. *A Biology of the Algae*. WCB/McGraw-Hill, Boston.
- Tilman D. 1982. *Resource Competition and Community Structure*. Princeton University Press, Princeton, 296 pp.
- Vallentyne JR 1974. The algal bowl: lakes and man. *Misc. spec. publ.* 22. Dep. Environ. Fish. Res. Board Ca., Ottawa.

Woertz I, L Fulton and T Lundquist. 2009. Nutrient removal and greenhouse gas abatement with CO₂ supplemented Algal High Rate Ponds. Water Environment Federation, October 12~14, 2009, Orlando, Florida.

Yang J, M Xu, X Zhang, Q Hu, M Sommerfeld and Y Chen. 2011. Life-cycle analysis on biodiesel production from

microalgae: Water footprint and nutrients balance. Bio-resour. Technol. 102:159-165.

Received: 24 April 2013

Revised: 27 May 2013

Revision accepted: 27 May 2013