

고율 조류 바이오매스 반응기에서 조사시간으로 본 *Zygnema sterile*과
Lepocinclism textra 바이오매스의 질소, 인 이온 생흡착의 비교
공석기

중부대학교 환경보건학과

Comparison of Biosorption of N, P ions by *Zygnema sterile* and
Lepocinclism textra Biomass under Irradiation Period in
High Rate Algae Biomass Reactor

Surk-Key Kong

Department of Environmental Hygiene, Joongbu University

Abstract

The recent investigation indicates that the kinetic constants for anionic ions were merely the result of ion exchange between the algae cell wall surface and the anionic ion.

In this study, *Zygnema sterile* and *Lepocinclism textra*, floating flagellate alga as the dominant algae strains, were cultivated using HRABR(High Rate Algae Biomass Reactor) and the cultivation conditions were 24 hrs. and 12 hrs. irradiation and it was studied how this algal biomass acts on the biosorption mechanism of anionic N and P.

Results are as follows :

1. Calculating the specific chl.-a growth rate using Michaelis-Menten model, the one of 24hrs. irradiation was about 55 times higher than the one of 12 hrs. irradiation
2. Calculating the specific chl.-a growth rate using Kuo model, the one of 24 hrs. irradiation was about 2.26 times higher than the one of 12 hrs. irradiation
3. Langmuir model can apply to the biosorption mechanism of anionic N and P in HRABP.
4. Regarding the chlorophyll-a concentration as unit weight of sorbent, the ion selectivity coefficients for N and P are as follows :

(NH₃-N)+(NO₃-N) in 24 hrs. irradiation ; 44.984

PO₄-P in 24 hrs. irradiation ; 24.237

(NH₃-N)+(NO₃-N) in 12 hrs. irradiation ; 1432.851

PO₄-P in 12 hrs. irradiation ; 599.076

Key words : High Rate Algae Biomass Reactor, *Zygnema sterile*, *Lepocinclism textra*, Michaelis-Menten Model, Kuo Model, Langmuir Model, Ion Selectivity Coefficients

*Corresponding author E-mail : skkong@joongbu.ac.kr

I. 서론

조류 바이오매스를 이용하는 폐수처리 (Wastewater treatment with algal biomass)¹⁾가 질소(N)나 인(P)을 제거하기 위한 고도처리로서 이미 오래 전부터 고율 조류 바이오매스 반응기(High Rate Algae Biomass Reactor 이하 HRABP) 등에서 실행²⁾되어 온 것으로 요즘은 조류 바이오매스를 과립(granule)형태로 만들어 수은, 카드뮴, 납과 같은 중금속(heavy metal)의 제거 및 회수, 금 등의 희귀금속(precious metal) 및 우라늄 같은 전략 금속(strategic metal)의 제거 및 회수에 효과적으로 이용³⁾되고 있다. 이 공법은 어디까지나 조류 바이오매스의 생 흡착 기능을 그 핵심으로 한다.

1. HRABP에서의 생흡착

HRABP에서 조류가 성장함에 조류 세포체 생명력에 의한 영양염류 이온의 수동적 흡수의 결과이다. 그리고 생 흡착은 이러한 흡수의 전 단계로 조류 세포벽 표면 위에서 생성되는 현상이다. 생 흡착이 물리적 흡착과 화학적 흡착으로 나뉘어 진행된다. 물리적 흡착은 가역적(reversible)으로 나타나는 과정인데 이 과정에서의 흡착력은 다음 과정으로서의 화학적 흡착력과 비교할 경우 매우 약하게 나타난다. 물리적 흡착은 어디까지나 정전기력에 근거하는 과정으로서 기계적 결합(binding) 현상을

뜻하지 않는다. 수온이 올라가면 물리적 흡착력은 더욱 감소⁴⁾하고 오히려 화학적 흡착이 증가한다. 이렇게 생 흡착에 영향을 미치는 수온과 같은 여러 요소들은 어디까지나 흡착제와 피 흡착질사이에서의 반응 활성화 에너지(activation energy)의 소요 정도에 바탕을 둔 것으로서 구체적인 내용이 다음 Table 1⁵⁾과 같다.

물리적 흡착 다음에 화학적 흡착이 진행된다. 즉, 조류 바이오매스 표면 위에서 이온성 흡착분자의 binding 현상이 진행된다. 피 흡착분자(sorbate molecules)의 전기음성도 차이에 따라 공유결합성이 큰 것에서 이온결합성이 큰 것에 이르도록 다양하게 중심원소로 다른 이온이나 분자가 입체적으로 결합되어 집단화한다.

2. ECP와 protomotive force

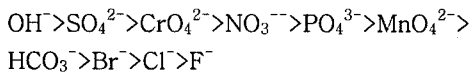
특히, 조류 바이오매스 세포 외로 분비되는 효소 촉매 ECP(extra cellular polymer)가 영양염류를 chelating함에 매우 중요한 역할을 수행한다. 이 ECP의 Carboxyl(-COOH), Sulfonate(-SO₃H), Sulfhydryl(-SH), Hydroxyl(-OH), Phosphonate[-P(O)(OH)₂], Thioether(=S), Secondary Amine(=NH), Imine(=NH) 등(S. Hunt, biopolymer)의 유기그룹이 binding material로 작용⁶⁾한다. 단백질은 일반적으로 조류 세포체 밖으로 분비하는 효소 촉매 ECP(extra cellular polymer)의 성분으로도 알려져 있는 바 이 ECP에 의하여 binding된 영양분들이 조류 세포벽을 통과하고 세포로 합성된다.

Table 1. Fundamentals of sorption methods

PARAMETERS	PHYSICAL ADSORPTION	CHEMISORPTION
Temp. Range	Lower	Higher
Heat of adsorption	Lower	Higher
Order of H	Condensation	Reaction
Rate	Fast	Non-activated
Activation Energy	Low E.	Low E.
Coverage	Multilayer possible	Monolayer
Reversibility	High	Often irreversible

음이온성 영양염류의 조류 세포벽 통과가 protomotive force⁷⁾에 의해서 수행된다. 원래 이 protomotive force는 조류세포 핵산대사의 ATP(adenosine triphosphate)와 ADP(adenosine diphosphate)의 전환 기작의 결과로 세포벽에 생성되는 힘으로서 핵산대사에서 발생한 정인산(orthophosphate)의 산화와 환원이 원형질막에 존재하는 효소 F₁F₀ATPase 등에게 일차적으로 H⁺을 세포외로 방출하게 하여 이온으로 하여금 세포막을 통과하게 하는 힘인 것이다. 그러므로 조류 세포벽 통과 바로 직전의 과정은 세포외로 방출된 H⁺과의 정전기적 결합이며 전체적으로 볼 때 음이온성 비금속이온의 제거는 주로 이러한 흡착의 결과로 볼 수 있다.

음이온성 영양염류의 흡착이 어디까지나 조류세포체의 흡수에 의한 결과이므로 이들 생흡착의 동력 상수(kinetic constant)가 Michaelis-Menten 모델식으로부터 잘 구하여 진다. 그러나 최근의 연구 결과들을 보면 음이온성 영양염류의 생흡착 또한 단순한 (+), (-)종 사이의 이온교환에 의한 결과⁸⁾임이 확인되고 있다. 폴리아민(polyamine)은 현재 폐수처리를 위한 이온교환수지 공법에 많이 사용되는 수지이기도 한데 Bolto와 Pawlowski⁹⁾는 정전기적 흡착을 그 바탕으로 하는 이온교환수지 공법에서 폴리아민 수지를 이용한 NO₃⁻, PO₄³⁻의 정전기적 흡착을 다음의 이온 선택성(ion selectivity)으로 나타내었다.



3. ECP의 폴리아민류 화합물 성질

폴리아민은 두 개 이상의 아미노기나 치환 아미노기를 가진 유기 화합물을 통틀어 이르는 것으로서 보통, 도료의 경화제(hardner)로 많이 사용되는 수지이기도 한데 북한에서는 단백질 영양제, 오미자, 계

수나무 껍질, 꿀, 알코올, 굴껍질 따위로 만든 약으로 신경 쇠약이나 빈혈을 치료하는데에 쓰이기도 한다. 폴리아민은 기능이 알려지지 않은 몇 개의 metabolite 중의 하나이며 이들은 2개 이상의 amine group을 가지고 있는 화합물을 총칭하는 것으로 어떤 특정 생물계에 편재하지 않고 식물, 동물 그리고 미생물 등 거의 모든 생명체에 mM수준의 농도로 존재하고 있다. 그러므로 조류 바이오매스에 의한 N, P와 같은 음이온성 비금속의 흡착은 어떤 조류 종이 polyamine을 많이 함유하고 있는가를 확인하는 것도 매우 중요하다.

4. 조류 바이오매스의 확보 기술

조류 바이오매스를 이용하는 폐수처리에는 무엇보다도 흡착제 조류 바이오매스를 확보하는 것이 중요하다. 그리고 그동안의 조류 바이오매스 확보가 해안가에 풍부하게 서식하고 있는 것의 채취와 조류 바이오매스를 실내에서 인공적으로 대량 배양하고 난 후 가공절차를 거쳐 확보하는 두 가지¹⁰⁾로 확인된다.

조류 바이오매스를 실내에서 인공적으로 대량 배양하는 기술은 이미 오래전부터 우리나라 및 일본 등지의 해안가에서 성행되어 왔던 해조류 김 등의 양식기술에서 그 힌트를 얻어왔던 것으로 수 생태계에서의 조류와 세균의 공생작용 원리¹¹⁾에 따른다. 이 조류와 세균의 공생작용은 하천 및 호소 생태계의 생물학적 수질자정작용에 가장 기초적인 기작인 바 그 모식도가 다음 Fig. 1과 같다. 즉, 호기성 종속영양 세균의 생존본능적 대사작용이 물속에서 CO₂, NH₄⁺+NO₃⁻, PO₄³⁻ 등의 용해도를 증가시키고 조류는 이러한 CO₂, NH₄⁺+NO₃⁻, PO₄³⁻ 등을 그들 세포체내로 섭취하여 O₂와 H₂O를 생산하는데 이 생산된 O₂는 호기성 종속영양 세균의 대사작용에 다시 이용되는 일련의 순환 과정을 이룬다.

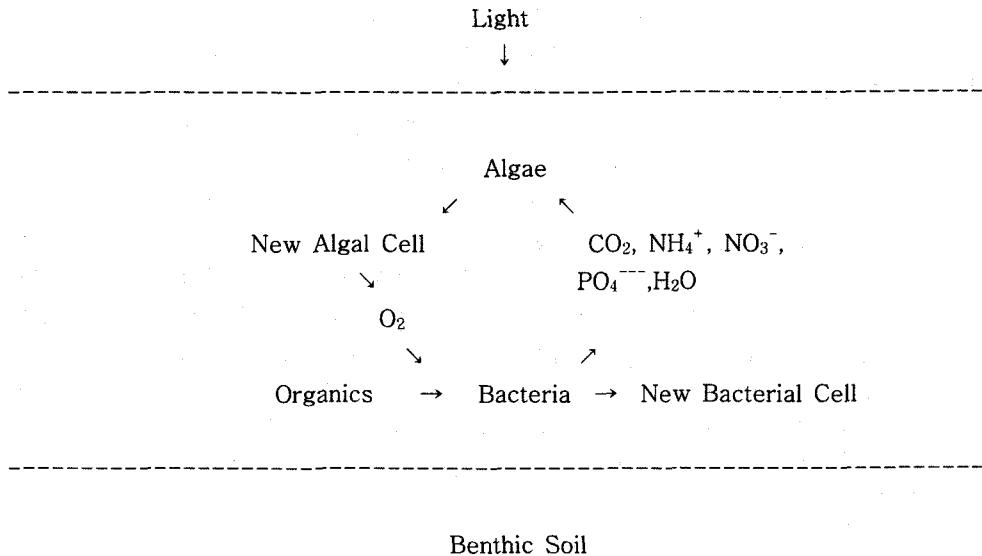


Fig. 1. Algal and bacterial symbiotic reaction.

5. 고정기술(immobilizing technology)의 개발

지난 1977년 Kierstan과 Bucke¹²⁾가 5%(W/v) sodium alginate에 0.3M로 조제된 CaCl₂를 가한 결과 직경 4mm의 비드(bead)가 생성되는 현상을 발견한 이후 Rhodophyta의 세포벽 성분 알긴산(alginate)이 효과적인 고정재료(immobilization agent)로 사용될 수 있음이 처음 제기되었다. 이후 알긴산과 관련하여 지난 1985년 Bold와 Wynne¹³⁾도 Uglrophyta의 proteinaceous cuticle도 효과적인 고정재료로 사용할 수 있음을 실험적으로 증명한 바 있고 Chevalier 등¹⁴⁾도 K-carrageenan으로 속박(entrapping)된 *Chrolorella* 종 등으로 PO₄³⁻의 흡착실험을 성공적으로 수행한 바 있다. 더 나아가 P. S. Lau 등¹⁵⁾은 *Eucheuma cottoni*로부터 추출한 K-carrageenan을 5%(w/v) 수용액 상태로 만들어 NH₄⁺-N와 PO₄³⁻-P의 제거실험을 하여 세포체 밀도 18×10⁶cells/mL의 high cell stocking 기술로 이틀만에 NH₄⁺-N를 95.2%, PO₄³⁻-P를 100% 제거하였음을 발표한 바 있듯이 N, P 등의 성공적 흡착에는 immobilizing 기술의 개발이 매우 중요하

다. 그리고 K-carrageenan, chitosan, alginate가 원래 다당류 물질로서 카르복실기(carboxyl group)를 주요 성분으로 하는 음이온성 물질이므로 대부분 (-) 전하를 띄고 있는 비금속 이온의 흡착이 불가능한 것으로 생각할 수 있으나 이러한 immobilizing 기술이 섬유성 gel 비드 내에서 조류 세포체가 잘 성장하며 N, P 등의 음이온성 영양염류도 잘 흡착 제거함을 실험적으로 확인하고 있다.

6. 연구목적

이렇게 폐수처리를 위한 조류 바이오매스 이용의 핵심 기술 이론이 학제적 범위 안에서 점차 구체화되고 있는 현실에서 본 연구는 조류 인공배양 장치를 이용한 조류 배양실험의 24시간 조사와 12시간 조사 두 경우를 놓고 질소, 인 이온 제거기작에 대한 실험적 결과를 문헌조사 결과와 함께 고찰하는 것을 통하여 조류 바이오매스의 질소, 인 이온의 생흡착 효과를 기초과학적으로 이해함에 부족함이 없도록 조류 바이오매스 생흡착의 이론적 배경을 공고히 하기 위하여 엄밀히 수행되었다.

II. 재료와 방법

1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 acryl판으로 된 저류 basin 및 반응 basin으로 구성하였으며 저류 basin은 125 L 용량으로 제작하였고 반응 basin은 64 L 용량으로 2 조 제작하였다. 반응 basin에는 온도 조절장치, 교반장치, 광 조사 장치, 수위 조절 장치를 부착하였다. 온도 조절 장치는 온수 제조기, 침지 heater 및 확인 봉상 온도계 및 thermostat를 이용 조합하였으며 교반 장치는 터빈 임펠라 및 속도 가변 모터로 구성하였고 광 조사 장치는 전원 개폐 장치, 40 W. 3 파장 형광램프 12 개 및 20 W. 램프를 반응조의 23 cm 상부 양 측면에 2 개씩 설치하였다. 또한 수위 조절 장치로는 floating valve를 사용하였다.

2. 실험방법

본 연구를 위한 실험은 사용할 조류 바이오매스 량을 확보하기 위한 preliminary 배양실험에서부터 출발하였는데 먼저, 팔당호

원수 64 L를 채수하여 반응조에 넣고 다음 Table 2 내용의 영양염류를 투입한 후 수표면 조도 3000 Lux, 수온 25 °C, 교반속도 50 rpm에서 1 개월 동안 배양하였다. 그 다음에는 main 배양실험으로 우선, 반응기 구성조건으로서 반응basin 내부 바닥에 powder로 제조된 clay를 3 cm 두께로 깔았는데 이는 clay를 고정재료(immobilization agent)로 사용하고자 함이었다. 그리고 Table 3에 종합한 인공 실험 영양염류를 제조하여 64 L씩 투입한 후 여기에 앞에서 배양된 조류 용액을 Chlorophyll-a 농도가 0.47 mg/m²되도록 희석하여 가하였다. 이 조류 혼합액을 pH 7.0, 수온 25 °C, 교반속도 15 rpm, 수표면 조도 3000 Lux의 조건에서 회분식으로 배양하였으며 배양기 A는 자동 시간 조절기를 작동하여 12 시간 간격으로 광이 조사되도록 하였고 배양기 B에는 24 시간 계속 조사하여 운전하였다. 배양액은 매일, 일정한 시간에 sampling되었으며 sampling water는 U.S. standard method의 spectrophotometric method, pH meter method와 DO meter method(Azide Modification)에 의해 Chlorophyll-a, pH, DO 항목으로 분석, 측정되었다.

Table 2. Nutrients composition added for algae cultivation

Nutrient	Chemicals	Amount(mg/L)
macro nutrient	KNO ₃	80
	K ₂ HPO ₄	11.25
	KH ₂ PO ₄	8.44
	MgSO ₄ · 7H ₂ O	250
	CaCl ₂ · 2H ₂ O	15.47
	Fe ₂ (SO ₄) ₃	4.06
	NaHCO ₃	167.97
	Na ₂ EDTA	4.88
micro nutrient	MnSO ₄ · H ₂ O	1.41
	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	0.2
	CuSO ₄ · 5H ₂ O	0.08
	H ₃ BO ₃	3.13
	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₄ · 4H ₂ O	0.13
	O	0.04
	CoCl ₂ · 6H ₂ O	

Table 3. Nutrient composition used in main experiment

Component	Concentration(mg/L)
starch	300(300mg CODcr/L)
(NH ₄) ₂ CO ₃	102.9(30mg NH ₃ -N/L)
Na ₂ HPO ₄	41.4(9mg PO ₄ -P/L)
MgSO ₄ · 7H ₂ O	250
CaCl ₂ · 2H ₂ O	15.47
Fe ₂ (SO ₄) ₃	4.06
NaHCO ₃	167.97
Na ₂ EDTA	4.88
MnSO ₄ · 5H ₂ O	1.41×10 ⁻³
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	0.2
CuSO ₄ · 5H ₂ O	0.08
H ₃ BO ₃	3.13×10 ⁻³
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₄ · 4H ₂ O	0.13
CoCl ₂ · 6H ₂ O	0.04

III. 결과 및 고찰

음의 Table 4, Table 5와 같고 이를 그래프로 나타낸 결과가 다음 Fig. 2, 3, 4, 5와 같다.

두 배양 basin에서의 조류 성장과 산소 생성, 질소와 인의 농도변화를 나타낸 결과가 다

Table 4. Changes of water quality parameters in continuous irradiance during 24 hours

Day	Effluent						
	pH	DO, mg/L	Chl.-a, µg/L	NH ₃ -N, mg/L	NO ₃ -N, mg/L	(NH ₃ -N)+(NO ₃ -N), mg/L	PO ₄ -P, mg/L
1	7.33	0.5	21.83	16.06	1.04	17.10	7.64
2	6.96	0.4	28.13	10.08	0.57	10.65	7.58
3	7.01	0.4	62.55	5.09	0.11	5.20	6.73
4	7.52	1.8	375.58	3.15	0.11	3.26	5.81
5	7.78	3.4	660.64	0.61	0.12	0.78	4.86
6	8.04	4.2	945.70	0.45	0.17	0.62	4.42
7	8.24	5.0	1370.57	0.29	0.25	0.54	4.29
8	8.43	5.8	1408.97	0	0.29	0.29	4.18

Table 5. Changes of water quality parameters in periodic irradiance during 12 hours

Day	Effluent						
	pH	DO, mg/L	Chl.-a, µg/L	NH ₃ -N, mg/L	NO ₃ -N, mg/L	(NH ₃ -N)+(NO ₃ -N), mg/L	PO ₄ -P, mg/L
1	7.38	0.9	19.22	12.66	1.06	13.12	7.92
2	7.05	0.6	22.77	11.33	0.61	11.94	7.46
3	6.97	0.6	28.09	6.25	0.16	6.41	7.08
4	7.13	0.6	31.53	5.16	0.16	5.32	6.81
5	7.28	0.6	33.20	3.78	0.15	3.93	6.61
6	7.31	0.7	34.88	3.53	0.18	3.71	6.16
7	7.42	0.8	36.56	3.00	0.18	3.18	5.92
8	7.58	1.2	41.48	1.91	0.23	2.14	7.98

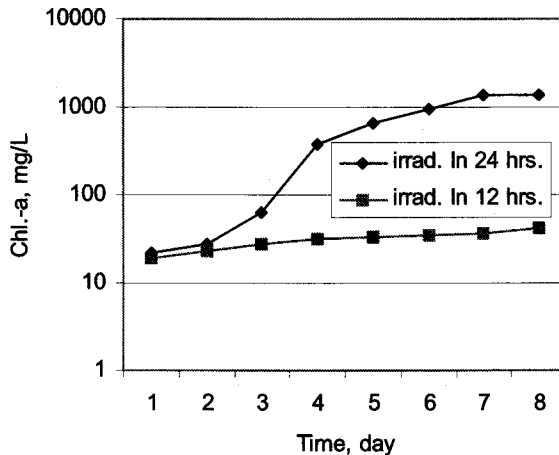


Fig. 2. Trend of algal growth in irradiation period.

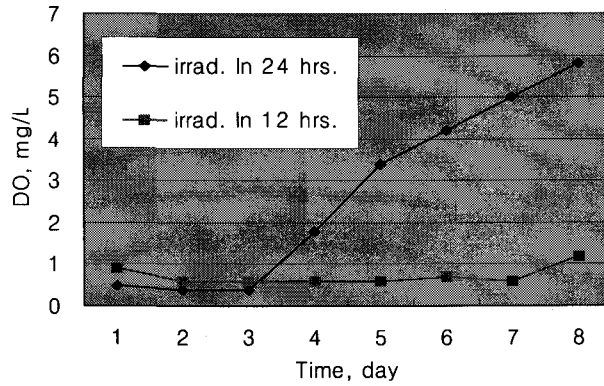


Fig. 3. Trend of O₂ generation in irradiation period.

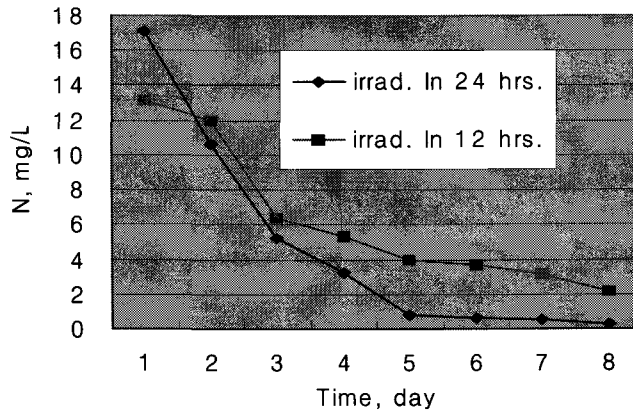


Fig. 4. Trend of N removal in irradiation period.

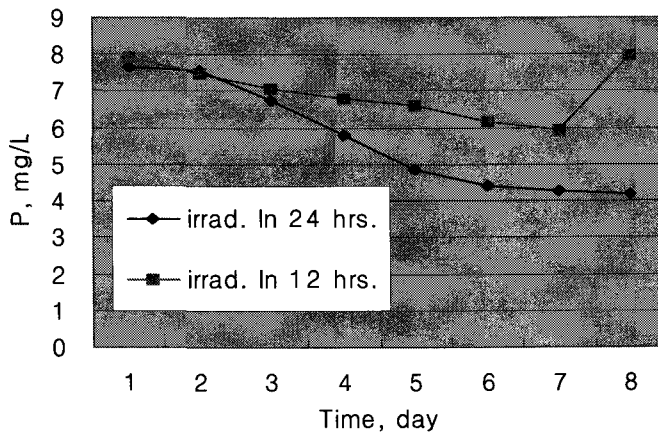


Fig. 5. Trend of P removal in irradiation period.

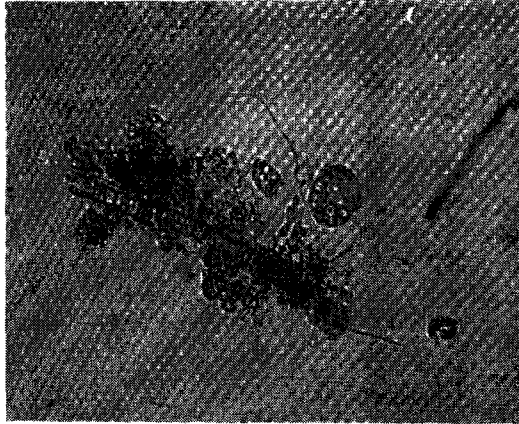


Photo 1. *Zygnema sterile* and *Lepocinclism textra*

배양 basin에서 발색현상이 강하게 나타났는바 두 배양 basin에서의 발색이 배양 3, 4일(순응기)후 부터 나타났으며 12시간 조사-배양 basin에서는 회, 검정 색 으로부터 점차 청색으로 변화하였으며 24시간 조사-배양 basin에서는 연녹색으로부터 점차 진녹색으로 변화하였다. 배양이 진행됨에 따라 조류농도가 최대를 나타냈을 때 부유성 미세 편모 조류 Chlorophyta의 *Zygnema sterile*과 *Lepocinclism textra* 가 절대 우점종으로 나타났다(Photo 1.). 두 basin 모두 pH는 배양 내내 중성을 유지하였고 24시간 조사-배양 basin에서 배양 9일째에 1403.97 Chl.-a $\mu\text{g/L}$ 을 나타내었고 12시간 조사-배양 basin에서는 41.48 Chl.-a $\mu\text{g/L}$ 을 나타내었다. 이는 24시간 조사-배양 basin의 것이 12시간 조사-배양 basin의 것보다 약 34배의 조류 바이오매스 생산력이 있음을 의미한다.

두 배양 basin의 조류 성장을 조류 세포체의 영양염류 섭취를 통한 생화학적 1차 반응으로 볼 경우, 조류 성장을 다음의 Michaelis-Menten식¹⁶⁾으로 나타낼 수 있다.

$$X_t = K \cdot S \cdot S_m \cdot t \text{ -----(1)}$$

- Xt : t일 후의 Chl.-a 농도, $\mu\text{g/L}$
- K : 비 Chl.-a 증식속도, L/mg-day
- S : 배양조로 유입되는 N 혹은 P 농도, mg/L
- Sm : 생화학 반응동안 N 혹은 P 농도, mg/L
- t : 배양시간, day

본 배양 basin에서의 N/P 물비가 16 이하로서 조류 성장이 N에 의해 지배되고 있으므로 윗 식에서의 K 값은 각각, 12시간 조사 : 8.38×10^{-5} L/mg-day와 24시간 조사 : 4.58×10^{-3} L/mg-day의 값을 나타낸다. 이는 24시간 조사의 것이 12시간 조사의 것보다 약 55배의 비 Chl.-a 증식속도를 갖고 있음을 나타낸다.

두 배양 basin에서의 조류 배양결과를 다음의 Cheng 식¹⁷⁾

$$\mu = 2(Sae - Sao) / (Sae + Sao)$$

- μ : 비 조류 성장률
 - Sae : 현재 Chl.-a 농도, $\mu\text{g/L}$
 - Sao : 24시간후의 Chl.-a 농도, $\mu\text{g/L}$
- 을 통하여 구하여진 매일의 μ 값을 다음 식,

$$k = (1/t) \cdot \mu$$

k : 평균 비 조류 성장률, day^{-1}

t : 반응일, day

에 대입하여 구하면

24 시간-조사 배양조 : 0.43 $\mu\text{g/L}\cdot\text{day}$

12 시간-조사 배양조 : 0.19 $\mu\text{g/L}\cdot\text{day}$

로 나타나는데 이는 매일의 조류 성장력을 일일 정산으로 나타낼 경우에 24 시간-조사 배양 basin의 평균 비 Chl.-a 성장속도가 12 시간-조사 배양 basin의 것보다 약 2.26배 정도됨을 의미한다.

순환기 이후 두 반응 basin에서의 DO 농도는 꾸준히 증가하고 있었다. 12시간 조사 배양basin의 경우 조류 성장이 최대 41.48 Chl.-a $\mu\text{g/L}$ 을 나타낸 상태에서 최대 1.2 mg DO/L를 나타내었으며 24시간 조사 배양 basin의 경우 최대 1408.97 Chl.-a $\mu\text{g/L}$ 을 나타낸 상태에서 최대 5.8 mg DO/L 나타내었는바 일일 평균 산소 생산율이 각각, 12시간 조사 : 0.0857142 mg DO/L·day, 24시간 조사 : 0.7714285 mg DO/L·day로 나타났다. 이는 24시간 조사의 것이 12시간 조사의 것보다 약 9배 정도 산소 생성력을 갖고 있음을 의미한다.

24시간 조사 배양 basin의 경우 폐수 체류시간 8일에서 조류 바이오매스 성장이 최대 1403.97 Chl.-a $\mu\text{g/L}$ 을 나타낸 상태에서 (NH₃-N)+(NO₃-N), PO₄-P가 각각 99.0%, 45%의 제거율을 나타낸다 12시간 조사 배양 basin의 경우 폐수 체류시간 8일에서 조류 성장이 최대 41.48 Chl.-a $\mu\text{g/L}$ 을 나타낸 상태에서 (NH₃-N)+(NO₃-N)는 폐수 체류시간 8일에서 92.9%, PO₄-P가 폐수 체류시간 7일에서 34.2%의 제거율을 나타낸다 이는 (NH₃-N)+(NO₃-N)의 경우 24시간 조사의 것이 12시간 조사의 것보다 약 1.07배 정도 높은 효율을 갖고 있으며 PO₄-P의 경우 24시간 조사의 것이 12시간 조사의 것보다 약 1.32배 정도 높은 효율을 갖고 있음을 의미한다.

HRABP의 음이온성 영양염류 생흡착 기작에 Langmuir 모델식이 성립되는 바

이 Langmuir 모델식을 갖고 다음과 같이 생흡착 모델링을 할 수 있다.

$$K = \frac{[BM]}{[B][M]} \text{ ----- } \textcircled{1}$$

여기에서, K : equilibrium constant

B : free binding sites

M : sorbate in solution

질량보전의 법칙에 의하여

$$[Bt] = [B] + [BM] \text{ ----- } \textcircled{2}$$

여기에서, Bt : total binding capacity

식이 성립하고 ①식과 ②식을 결합하여 피 흡착제 섭취량(sorbate uptake), q를 얻을 수 있다.

$$[BM] = q = \frac{[B]K[M]}{1 + K[M]} \text{ ---- } \textcircled{3}$$

조류 바이오매스에 의한 음이온성 영양염류 생흡착에 있어서 이온교환 선택성 계수(selectivity coefficient)가 다음과 같이 표시된다.

$$K_d = \frac{(\text{이온농도}/\text{흡착제 단위중량})}{\text{이온농도}/\text{용액 mL}} \text{ --- } \textcircled{4}$$

clay를 고정재료로 사용한 본 시스템에서 조류 세포체 chlorophyll-a를 흡착제 단위 중량으로 놓고 볼 경우 ④ 식으로 24 시간 조사의 조류 바이오매스 흡착제와 12 시간 조사의 조류 바이오매스 흡착제의 N, P 이온 선택성 계수를 구하면

24시간-조사 배양 basin의 (NH₃-N)+(NO₃-N) : 44.984

24시간-조사 배양 basin의 PO₄-P : 24.327

12시간-조사 배양 basin의 (NH₃-N)+(NO₃-N) : 1432.851

12시간-조사 배양 basin의 PO₄-P : 599.076
으로 나타난다. 이는 (NH₃-N)+(NO₃-N)의 경우 24시간 조사 배양 basin의 *Zygnema*

*sterile*과 *Lepocinclism textra* 바이오매스 흡착제가 12시간 조사 배양 basin의 것보다 0.0314 mL²/mg 정도 선택성이 높음을 의미하며 PO₄-P의 경우 24시간 조사 배양 basin의 *Zygnema sterile*과 *Lepocinclism textra* 바이오매스 흡착제가 12시간 조사 배양 basin의 것보다 0.0406 mL²/mg 정도 선택성이 높음을 의미한다.

IV. 결 론

본 HRABR을 갖고 *Zygnema sterile*과 *Lepocinclism textra* 바이오매스의 음이온성 N, P이온의 조사시간 별 생흡착 효과 및 기작을 살펴보기 위하여 수행한 본 실험적 연구결과를 여러 모델식에 적용하여 고찰한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. Michaelis-Menten 식을 사용하여 산출한 비 Chl.-a 증식속도에 있어서 24시간 조사의 것이 12시간 조사의 것보다 약 55배 높다.
2. Cheng 식을 사용하여 산출한 평균 비 Chl.-a 성장속도는 24시간 조사의 것이 12시간 조사의 것보다 약 2.26배 높다.
3. 산출 평균식으로 계산하면 (NH₃-N)+(NO₃-N) 제거의 경우 24시간 조사의 것이 12시간 조사의 것보다 약 1.07배 정도 높은 효율을 갖고 있고 PO₄-P 제거의 경우 24시간 조사의 것이 12시간 조사의 것보다 약 1.32배 정도 높은 효율을 갖고 있다.
4. Langmuir 모델식을 사용하여 산출한 *Zygnema sterile*과 *Lepocinclism textra* 바이오매스 흡착제의 (NH₃-N)+(NO₃-N) 이온의 선택성은 24시간 조사의 것이 12시간 조사의 것보다 0.0314 mL²/mg 정도 선택성이 높다.
5. Langmuir 모델식을 사용하여 산출한 *Zygnema sterile*과 *Lepocinclism*

textra 바이오매스 흡착제의 PO₄-P 이온의 선택성은 24시간 조사의 것이 12시간 조사의 것보다 0.0406 mL²/mg 정도 선택성이 높다.

6. 최근의 연구결과들을 보면 이온성 영양염류의 생 흡착 또한 단순한 (+), (-)종 사이의 이온교환에 의한 결과임이 확인되고 있음에 비추어 조류 바이오매스 흡착제 재료개발 또한 이온교환수지 공법에서와 같이 이온선택성 계수를 활용할 충분한 가치가 있다.

참고문헌

1. Wong, Yuk-Shan and Tam, Nora F. Y. : Wastewater Treatment with Algae, Springer-Verlag Co., New York, p. 4, 1997.
2. 공 석 기, 도시유기 나까지마, Activity of *Chlorella vulgaris* Associated by *Escherichia coli* W3110 on Removal of Total Organic Carbon in Continuous River Water Flow System, *Algae*, 2002 : 17(3) : 195-199.
3. Bohumil, Volesky and Holan, Z. R. : Biosorption of heavy metals, *Biotechnol. Prog.* 1995 : 11(3) : 235-250.
4. Bohumil Volesky : Sorption and Biosorption. BV Sorbex, Inc., Montreal, 35-39, 2004.
5. Bohumil Volesky : Sorption and Biosorption. BV Sorbex, Inc., Montreal, p. 5, 2004
6. Bailey, J. E. and Ollis, D. E. : Biochemical Engineering Fundamentals, 2nded, McGraw-Hill, New York, 58-59, 1986.
7. 김 병 흥, 미생물 생리학, 아카데미사, 서울, p. 5, 61-72, 331-332, 1993.
8. Crist, R. H. and Martin, J. R. and

- Gaptil, P. W. and Eslinger, J. M. and Crist, J. M : Interaction of Metals and Protons with Algae. 2 Ion Exchange in adsorption and metal displacement by protons, Environ. Sci. Tech., 24, 337-342, 1990.
9. Bolto, B. A. and Pawlowski L. : Wastewater Treatment by Ion-Exchange, E. & F. N. SPON, New York, p. 22, 1985.
10. 공 석 기, 보후밀 볼레스키, 캐나다 환경산업의 조류 바이오매스 이용 생흡착 기술, 한국도시환경학회지, 2005 : 5(1) : 68-79. Activities of Water Purification by Algae and Aquatic Plant in River Ecosystem, J. of KSUE., 1, 41-53, 2001.
11. Atlas, R and Bartha, R : Microbial Ecology, Benzamin and Cummings Publishing Co., London, 49-52, 1995.
12. Wong, Yuk-Shan and Tam, Nora F. Y. : Wastewater Treatment with Algae, Springer-Verlag Co., New York, p. 8, 1997.
13. Bold, H. C. 물 Wynne, M. J. : Introduction to the Algae, Prentice-Hall Co., Ottawa, 20-22, 70-75, 288-289. p. 301, 478-479, p. 516, 1985.
14. Wong, Yuk-Shan and Tam, Nora F. Y. : Wastewater Treatment with Algae, Springer-Verlag Co., New York, p. 7, 1997.
15. Wong, Yuk-Shan and Tam, Nora F. Y. : Wastewater Treatment with Algae, Springer-Verlag Co., New York, 145-161, 1997.
16. Reynolds, Tom D. : Unit Operations and Processes in Environmental Engineering : Brooks Cole Engineering Division, A Division of Wadworth Inc., New York, 273-276. 1995.
17. Cheng, Kuo Feng : Species Control of Microalgae in an Aquaculture Pond, Wat. Res., 25(1), 1431-1437, 1991.