

하천 생태계에서 유기탄소 기질 제거에 조류와 세균의 공생작용이 미치는 영향

공석기* · 도시유키 나카지마
충부대학교 환경공학과* · 일본 에히메대학교 생물지구과학과

Effect of Bacterial and Algal Symbiotic Reaction on the Removal of Organic Carbon in River Ecosystem

Surk Key Kong* · Nakajima Toshiuki

*Department of Environmental Engineering, Joongbu University, Korea**

Department of Biology and Earth Science, Ehime University, Japan

Abstract

It have been investigated how algal and bacterial symbiotic reaction influences on removal of organic carbon in river ecosystem. And artificial experimentation apparatus was made for algae' and bacteia' culture as lab scale. Investigating and researching minutely the change of concentration of organic carbon substrate and the change of population density of algae' and of bacteria' with this artificial experimentation apparatus, the next results could be obtained.

1. Successful decrease of DOC(dissolved organic carbon) could not be expected unless algal and bacterial biomass floc was not formed effectively and unless biosorption was not proceeded effectively in the very culture system in which artificial synthetic wastewater was supplied continuously at constant rate.

2. In conditions of culture liquid of 1335 glucose mg/L(type 1) and of 267 glucose mg/L(type 2), the algal dominant species was always *Chlorella vulgaris* in both types in which artificial synthetic wastewater were supplied continuously at constant rate and algae population density was around maximum 107 cells/mL.

3. It was around 108 ~ 107 cells/mL that the population density of heterotrophic bacterium. In culture medium systems type 1 and type 2 in which artificial wastewater were supplied continuously at constant rate, the same density appeared initially when using the population density of *Escherichia coli* w 3110 as indirect indicator. And this density decreased rapidly till the culturing date 35 days were passed away, while this density increased with gentle slope after same date and then the trend of change at type 2 was more severe than one at type 1.

4. When seeing such a change of population density of *Escherichia coli* w 3110, the growth of heterotrophic bacterium appeared as survival instinct pattern of broader requirement of nutrient at condition of low concentration of organic carbon substrate than condition of high concentration of samr substrate.

I. 서론

조류가 미생물체이지만 광합성작용을 수행하므로 식물체와 같은 기능을 나타낸다. 이들은 개체군 성장을 S자 형으로 이루고 지수 증식기에 들어섰을 때 영양물질들을 세포체내로 빠르게 흡수하는 동력학적 특성을 지닌다. 특히, 생존에 있어서 다른 미생물들과는 달리 높은 포용능력을 지니는데 개체군의 성장이 수 환경의 여러 물리, 화학적 조건 중에서 특히 수온, 광도, pH와 질소, 인 등과 같은 영양염류에 의해 높은 생물 군집의 특성을 나타낸다.

조류를 이용한 폐수처리 방법은 전통적으로 산

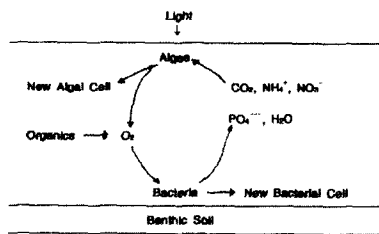


Fig. 1. Symbiotic cycle between algae and bacterium

화지 또는 재래식 안정화지 등에서 이루어져 왔다. 그리고 그 동안 전 세계 각 국에서 질소와 인을 위주로 한 영양염류 및 COD 제거를 위하여 이른바 HRP(high rate pond)라고 불리우는 소단위 처리시설로 개발하여 운전하여 온 결과 폐수의 체류 시간이 보통 7-9일에서 약 70%-100%의 NH_4^+ , NO_3^- 의 제거 효율과, 약 50% 이상의 PO_4^{3-} 제거 효율 그리고 70% 이상의 COD 제거효율 범위에서 연구가 수행¹⁻⁴⁾되어 왔다. 조류가 이와 같은 폐수 처리에 이용되는 것과 함께 현재, 전 세계 각국에서는 수생식물을 이용한 생물학적 폐수처리 연구에 심혈을 기울이고 있다. 왜냐하면 조류를 이용한 폐수처리가 환경공학의 생물학적 폐수처리 분야에서 이미 익히 그 효용성을 인정받아 왔기 때문이기도 하지만 식물 자체와 습지를 이용한 수 처리 기술은 이미 지난 1960년대에 전 세계인들에게 관심 대상이 되었었고⁵⁾ 그 동안 가끔씩 기존의 물리 화학, 미생물학적 유기물 제거의 보완, 영양물질의 고도처리, 친수효과 등의 확장에 이용되어 왔기 때문이다.⁶⁻⁸⁾

조류와 수생식물체를 이용하는 수 정화 시스템이 서로 연결되는 경우 조류 연못 시스템이 필히 선행 공정이 되어야 하고 수생식물체 연못 시스템이 후 공정이 되어 왔다. 이는 대형 수생식물체

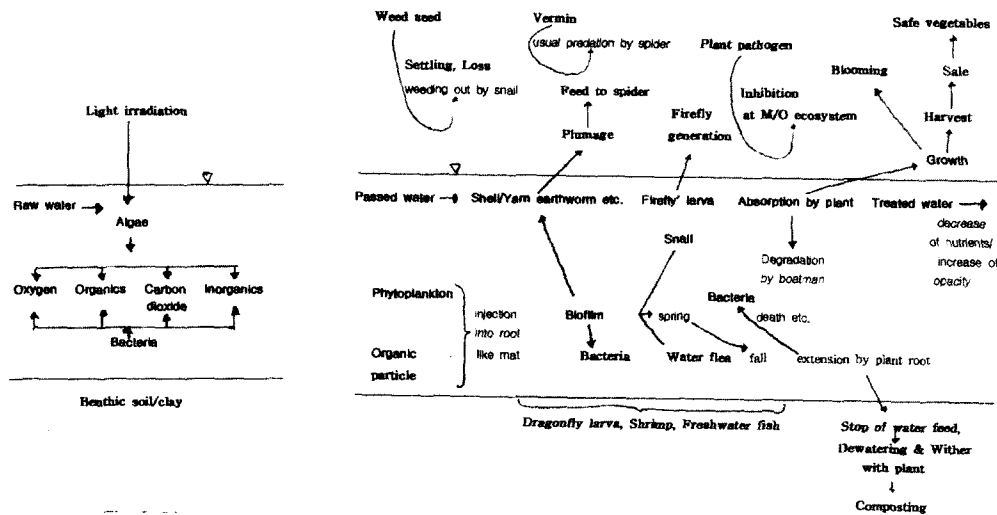


Fig. 2. Diagram of water purification concept by algae and aquatic plant in river ecosystem

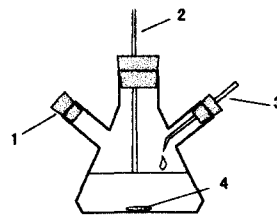
(macrophyte)들이 대사하는 생리활성물질인 gallic acid, ellagic acid, quercetin, α -asarone, 6z, 9z, 12 15z-octadecatetraenoic acid, stigmast-4-ene3, 6-dione, 4-methyl-thio-1, 2-dithiolane 등의 생물 간 화학물질(allerochemicals)이 antialgal bioactive compound로 작용할 수 있기 때문이기도 하지만⁹⁾¹⁰⁾ 조류 및 수생식물에 의한 수질정화작용은 어디까지나 수 생태계에서의 여러 생물체들의 상호간 작용에 바탕을 두는 것으로서 수 생태계에서 생물 개체군과 환경과의 상호작용이 그 상호간에 악 영향을 주어서는 안되기 때문이다. 그러므로 수 생태계에서 조류와 수생식물의 수질정화작용이 다음 그림으로 그 개념이 정립¹¹⁾되어 왔다.

위에서 살펴보았듯이 수 생태계에서 조류와 수생식물의 수질정화작용은 어디까지나 조류와 세균의 공생작용이 그 바탕을 이룬다.^{11, 12)} 그러나 물의 흐름이 상류에서 하류로 연속적으로 진행되고 물의 체류시간이 만족할 만한 정도로 7-9일이 되지 못하는 하천 개수로에서 수 생태계에서의 조류와 세균의 공생작용이 과연 얼마나 진행될 것이며 하천 수 수질정화에 미치는 영향이 무엇인지 이제까지 명확히 규명된 바가 없다.

그러므로 본 연구에서는 수 생태계에서 조류와 수생식물의 수질 정화 핵심 기작인 조류와 세균의 공생작용을 더욱 명확히 규명하고 이 조류와 세균의 공생작용 효용성이 흐름이 연속적으로 진행되는 하천 생태계에서 어느 정도 효과를 나타낼 것인가 하는 문제를 실험적으로 연구하여 보았다. 이를 위하여 제조된 인공 합성 폐수가 일정한 비율로 연속적으로 공급되는 실험실 수준의 조류와 세균의 인공 배양실험장치를 구성하고 이 인공 배양 실험장치에서의 조류와 세균 군집의 밀도변화와 유기탄소 기질 농도 변화를 실험적으로 면밀히 분석하는 것을 통하여 고, 저 농도의 유기탄소 기질 제거에 조류와 세균의 공생작용이 미치는 영향을 면밀히 조사 연구하여 보았다.

II. 재료 및 방법

먼저, 실내온도 25 °C로 유지되고 있는 그린 하우스 내에 앵글 프레이트로 제작된 직육면체 구조



1. Sampling port 2. Effluent outlet 3. Influent inlet 4. Magnetic stirrer bar

Fig. 3. Erlenmeyer flask for experiment

물을 설치하였다. 그리고 이 앵글 프레이트 구조물에 형광등을 설치하였고 다음 그림의 가지 달린 Erlenmeyer flask를 형광등 아래에 설치하였다.

그 다음에는 다음 Table 1 내용의 인공 합성 폐수를 만들었다.

다음에는 24시간 연속적으로 Erlenmeyer flask 내부 수표면 조도가 3500 LUX 되도록 형광등을 가동하고 이 flask안으로 제조된 인공합성 폐수를 투입한 다음 배양액 중의 조류와 세균의 성장 순응을 위하여 5일간 방치한 다음 배양 5일째부터 peristaltic pump를 이용하여 제조된 인공합성 폐

Table 1. Composition of synthetic wastewater used in study

Component	Concentration (mg/L)	Remarks
C ₆ H ₁₂ O ₆	1,335	Type 1 Experimentation
	267	Type 2 Experimentation
(NH ₄) ₂ CO ₃	102.9(30 mg NH ₃ -N/L)	
Na ₂ HPO ₄	41.4(9 mg 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	

Table 2. Condition of culture

Items	Operational Condition
Experimetal Micobial Communities	
- Bacterium	Seeding with Escherichia coli w3110
- Bacterium and Algae	Seeding with Escherichia coli w3110 And Chlorella vulgaris
Culture Volume	200mL
Temperature	25℃
Illumination	3500 LUX

Table 3. Condition of experimental runs

Seeding M/Os	Glucose Concentration(mg/L)	Type
Escherichia coliform W3110	1335	1
Escherichia Coliform W3110	267	2
Escherichia Coliform W3110 and Chlorella vargaris	1335	1
Escherichia Coliform W3110 and Chlorella vargaris	267	2

Table 4. Analysis method for the density of E. coli w 3110 and C. vulgaris population

M/O	Method
Escherichia coliform	Common Agar Plates
Chlorella vulgaris	Direct Counting through an Epifluorescent Microscope, with which auto luminescent cells containing chlorophyl were counted

수를 18 mL/hr의 일정한 비율로 port 3을 통하여 Erlenmeyer flask에 투입하였는데 이 port 3은 port 2를 통하여 잉여 인공합성 폐수를 또 다른 peristaltic pump로 제거하므로써 항상 200 mL의 배양액 용량을 유지하도록 조작되었다. 그리고 종속영양 세균 개체수와 변화 추이를 규명하기 위하여 배양기내의 종속 영양 세균 개체 수의 indirect indicator로서 대장균 수를 이용하기로 하고 다음과 같은 조건에서 연속적으로 수행되었다.

port 1을 통하여 시료를 매일 채취하였고 채취한 시료내의 DOC(dissolved organic carbon)변화를 파악하기 위하여 채취한 시료를 0.2 μm pore size의 여과지로 여과한 다음 TOC analyzer(Shi-

madzu TOC-5000A)로 분석하였으며 반응액 중의 세균과 조류 변화를 파악하기 위하여 다음 방법으로 밀도를 조사하였다.

III. 실험결과 및 고찰

3-1. 평판 배양에서 생 대장균 개체수 변화

E. coli w 3110을 1335 mg/L의 glucose 농도 배양액(고 농도 glucose의 도시하수 ; 이하 type 1)에서 배양하여 이 배양된 E. coli를 agar plate에서 배양하여 개체수 밀도를 측정된 결과 최초 시료 1 mL당 10⁸개 정도에서 배양 경과일 35일 까지 개체수가 급격히 감소하다가 이후에는 완만히 증가하였으며 267 mg/L glucose 농도 배양액(보통 농도 glucose의 도시하수 ; 이하 type 2)에서는 최초 시료 1 mL당 10⁷개 정도에서 배양 경과일 22일 까지 급격히 감소하다가 이후로 급격히 증감을 거듭하였다.

3-2. Type 1과 Type 2 기질 조건에서의 Chlorella vulgaris 개체수 변화

Type 1이나 Type 2에서도 조류 우점종 C. vulgaris와 종속영양 세균사이의 공생작용이 수행되는 배양기내에서 C. vulgaris 개체수의 변화가 배양 최초 일 시료 1 mL 당 약 10⁵ 개에서 배양 경과일 10일을 전후하여 약 10⁷ 개로 급격히 증가하다가 이후로는 대체로 이 숫자를 유지하면서 완만히 감소하고 있었다.

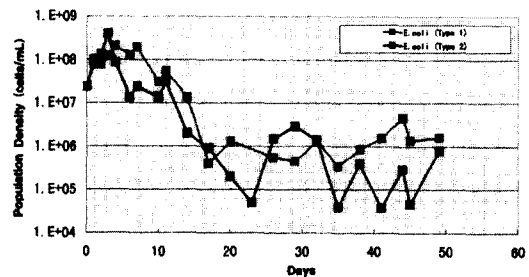


Fig. 4. Changes of the density of E. coli population on the culture using agar plate

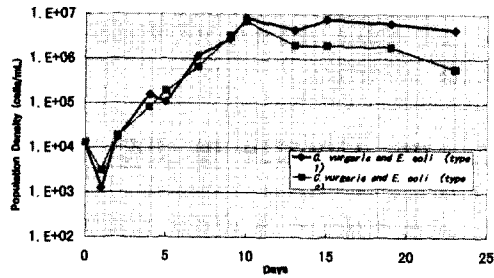


Fig. 5. Changes of the density of *C. vulgaris* population in two membered culture of *C. vulgaris* and *E. coli*

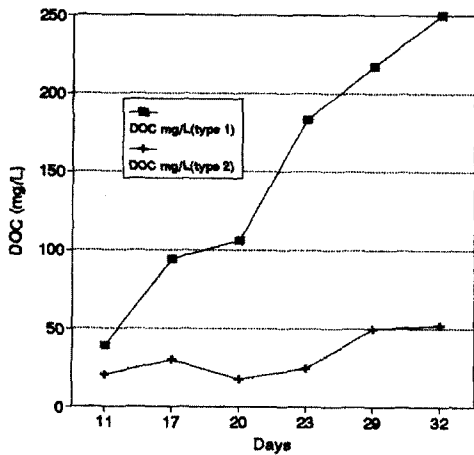


Fig. 6. Changes in concentration of the dissolved total organic carbon(mg/L), abbreviated DOC, in the culture of *C. vulgaris* and *E. coli* in synthetic waste water

3-3. DOC 변화

시료의 DOC 변화가 다음과 같이 나타났다.

Type 1 조건에서 DOC 농도가 배양 경과일 11일에 39 mg/L로 나타났고 이후 배양 32일째의 DOC 농도 250 mg/L까지 회귀분석하여 보면 기울기 10.3으로 증가하는 것으로 나타난다. Type 2 조건에서 DOC 농도가 배양 경과일 11일에 20 mg/L로 나타났고 이후 배양 경과일 20일째 되는 날에 17.6 mg/L로 감소하였다가 배양 경과일 32일

째 되는 날에 52.4 mg/L로 증가하였다. 이 결과를 회귀분석하여 보면 기울기 1.645로 증가하는 것으로 나타난다.

그동안 고율 안정화지 등의 운용을 보아 잘 알 수 있듯이 조류와 세균의 공생작용을 바탕으로 하는 여러 생물학적 기작이 수질을 양호하게 만들고 있음에도 본 실험에서는 배양일이 경과될수록 DOC는 증가하는 것으로 나타나는데 이는 이 배양 시스템이 갖고있는 인공합성 폐수의 연속 공급의 문제로부터 그 원인이 도출된다. 즉, peristaltic pump를 통하여 일정한 비율로 연속적으로 공급되는 인공합성 폐수는 조류와 세균 개체수를 현저히 증가시키고 있음에도 불구하고 배양기 내부 공간 내의 유체 흐름은 유기탄소 기질 등의 수중 오염 물질을 효과적으로 흡착하게 하는 조류와 세균의 바이오 매스 피(biomass floc)를 더 이상 양호하게 형성시키지는 못하기 때문이다.

IV. 결 론

수 생태계에서 조류와 수생식물의 수질 정화 핵심 기작인 조류와 세균의 공생작용을 더욱 명확히 규명하기 위하여 실험실 수준의 조류와 세균의 인공 배양실험장치를 구성하고 이 인공 배양실험장치에서의 조류와 세균군집의 밀도변화와 유기탄소 기질 농도 변화를 실험적으로 면밀히 조사하는 것을 통하여 고, 보통 농도의 유기탄소 기질 제거에 조류와 세균의 공생작용이 미치는 영향을 연구하여 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 인공 합성폐수를 일정한 비율로 연속적으로 공급하는 배양기 시스템에서 조류-세균 바이오매스 피가 효과적으로 형성되지 않고 생흡착이 효과적으로 진행되지 아니하는 한 DOC의 효과적인 감소는 기대할 수 없다.
2. 인공 합성폐수를 일정한 비율로 연속적으로 공급하는 배양기 시스템에서의 우점종 조류는 Type 1이나 Type 2에서 모두 *Chlorella vulgaris* 이고 조류 밀도가 세포 수로서 1 mL당 최대 약 10^7 개이다.
3. 인공 합성폐수를 일정한 비율로 연속적으로 공급하는 배양기 시스템에서의 종속영양 세균 밀

도는 대장균 집락의 밀도로 나타내어 Type 1과 Type 2가 최초로, 시료 1mL당 10^8 - 10^7 개 정도에서 배양 경과일 35일까지 집락 수가 급격히 감소하다가 이후에는 완만히 증가하는데 그 변화 추이는 Type 2가 Type 1보다 더욱 심하다.

4. 이러한 대장균 밀도 변화를 볼 때 중속영양 세균의 생장이 고농도의 유기탄소 기질 조건보다 보통 농도의 유기탄소 기질 조건에서 더욱 광범위한 영양염류 요구의 생존본능 패턴으로 나타난다.

감사의 글

2000년도 중부대학교 학술연구개발비 지원에 감사드리며 특히 본 실험을 위하여 노고를 아끼지 않은 일본 에히메 대학교 생물지구과학과의 마루야마 군과 그의 동료들에게 감사의 말을 전하고 싶습니다.

참 고 문 헌

1. Picot, B. et al : Nutrients Removal by High Rate Pond System in a Mediterranean Climate(France), Wat. Sci. Tech. 23, 1535-1541, 1991.
2. Mara, D. D. et al : The Design and Operation of Waste Stabilization Ponds in Tourist Areaa of Mediterranean Europe, Wat. Sci. Tech., 22(3/4), 73-76, 1990.
3. Shelef, G. et al : Nutrients Removal and Recovery in a Two-Stage High Rate Algal Wastewater Treatment, Wat. Sci. Tech., 14, 87-100, 1982.
4. Nie, M. et al : Techbical and Economic Analysis of Stabilization Ponds, Wat. Sci. Tech., 25(5), 55-62, 1991.
5. 정정권등 : 수생식물에 의한 수질개선기법 연구(II), 농어촌진흥공사, 3, 1998.
6. 加藤 智博 등 : 浚渫へドロトに創出した人工ヨシ濕地の水質浄化機能の評価, 用水と廢水, 41(6), 504-512, 1999.
7. Nakazato, H. : Water Purification with Crop Production by the BIOPARK Method, Water and Wastewater, 40(10), 19-25, 1998.
8. Aizaki, M. et al : Development of Constructed Wetland Using Hydroponic Biofilter Method for Purification of Hyper-Eutrophic Lake Water, J. of Japanese Water Environment Academic Society, 20(9), 622-628, 1997.
9. Aliota, G. et al : In Vitro Algal Growth Inhibition by Phytotoxins of Typha latifolia L., J. of Chem. Ecol., 16(9), 2637-2646, 1990.
10. Saito, K. et al : Inhibitory Substances from Myriophyllum brasiliense on Growth of Blue Algae, J. of Nat. Prod., 52(6), 1221-1226, 1989.
11. Nakazato, H. : Water Purification with Crop Production by the BIOPARK Method, Water and Wastewater, 40(10), 19-25, 1998.
12. Tabata, M. : Nitrogen and Phosporous Removal from River Water in Reef-Wetland Bed, J. of Japanese Water Environment Academic Society, 19(4), 331-338, 1996.
13. 栂田 聖孝 등 : 水生植物および微細藻類による水質浄化とそのバイオマス利用, 用水と廢水, 38(6), 31-36, 1996.