

규산질다공체와 미생물응집제의 녹조제어 효과

박명환 · 이석준¹ · 윤병대 · 오희목*

한국생명공학연구원 환경생물소재연구실, ¹(주)바이오알앤즈

Effects of CellCaSi and Biofloculant on the Control of Algal Bloom

Myung-Hwan Park, Seog June Lee¹, Byung-Dae Yoon and Hee-Mock Oh*

Environmental Bioresources Laboratory and ¹Bio R & Ds, Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology, Yusong, Taejeon 305-333, Korea

Abstract - The effects of CellCaSi and biofloculant on the control of algal bloom were investigated in enclosures in a small eutrophic pond. The biofloculant produced by a bacterial strain S-2 was finally selected to remove *Microcystis aeruginosa* which was a dominant species of algal bloom in the pond. Enclosure experiment showed that phosphorus concentration decreased dramatically from 131 $\mu\text{g l}^{-1}$ (Control) to 1~14 $\mu\text{g l}^{-1}$ in three CellCaSi-enriched enclosures. Chlorophyll-*a* concentration also decreased from 215 $\mu\text{g l}^{-1}$ (Control) to 59 $\mu\text{g l}^{-1}$ by the addition of CellCaSi (1 g l^{-1}), biofloculant (2 ml l^{-1}), calcium chloride (1 g l^{-1}) and ferric chloride (2 mg Fe l^{-1}) in Enclosure 4. From the results of the mouse acute toxicity test of the S-2 biofloculant and the goldfish survival test in enclosures, it seems that both the S-2 biofloculant and the CellCaSi do not show any severe toxicity in water system. Consequently, it was concluded that the biofloculant and the CellCaSi could be used to control algal bloom in eutrophic waters by removing phosphorus and chlorophyll-*a*.

Key words : algal flocculation, biofloculant, CellCaSi, phosphorus removal

서 론

호소의 부영양화 현상인 녹조는 생활하수, 오·폐수 등에 의한 영양염류의 과다한 유입으로 수계에 존재하는 식물플랑크톤이 대량 증식하여 발생하는데, 이 중에서 남조류는 종종 독소 생산, 이취미 발생 등의 문제점을 일으키고 있다(오 등 1999; Oh *et al.* 2000). 녹조를 제어하는 방법은 1차적으로 수중 영양염류의 농도를 낮추어 조류의 성장을 억제하는 사전처리방법과 녹조발생 후에 이를 제거하는 사후처리방법을 고려할 수 있는데,

장기적 측면에서 영양염류의 농도를 낮추는 사전처리방법이 바람직하다. 녹조를 사전처리하기 위해서는 호소 내에서 조류성장의 제한 영양염류를 찾아내는 것이 무엇보다 중요하다. 제한 영양염류는 지역적, 계절적으로 변할 수 있지만, 대부분의 담수호에서는 인이 조류성장의 제한요인으로 알려져 있다(Schindler *et al.* 1971; 조와 신 1996; 오 등 1998). 따라서, 부영양화된 호소에서 수중 인의 농도 감소는 식물플랑크톤의 대량 증식을 억제하는 중요한 수단으로 고려되고 있다.

수중의 인은 Al, Ca, Fe, Mg 등의 화합물을 이용하여 침전 제거될 수 있다. Al^{3+} 이온은 수산화 이온(OH^-)과 인산염 이온(PO_4^{3-})에 대한 친밀도가 높으므로 이들과 반응하여 수산화인산알루미늄($\text{Al}_6(\text{OH})_{12}(\text{H}_2\text{PO}_4)_6$)을 형

* Corresponding author: Hee-Mock Oh, Tel. 042-860-4321, Fax. 042-860-4598, E-mail. heemock@mail.kribb.re.kr

성하여 인을 제거하는 효과가 크지만 (Hsu 1968), pH 6 이하에서 다량 존재하는 $Al(OH)_3$ 나 Al^{3+} 는 수중 생물에 독성이 있을 수 있다 (Cooke *et al.* 1993). Fe는 인산염에 대한 친화력이 Al보다 크므로 인의 침전제거에 효과적이고 (Hsu 1975, 1976), 연못에 석고나 소석회를 첨가하여 인 농도 감소와 조류 발생을 억제한다는 보고도 있다 (Murphy *et al.* 1990; Wu and Boyd 1990). 최근에 Al, Ca, Fe, Mg 화합물을 주요 성분으로 하는 규산질다공체 (CellCaSi)는 인 제거에 효과가 있음이 보고되었다 (오 등 2000).

녹조를 제거하기 위하여 황산동, alum, 석회, 과망간산칼륨, 염소화합물 등이 주로 사용되고 있지만, 황산동은 어류에 미치는 독성이 문제시되고 (Karan *et al.* 1998), 과망간산칼륨과 염소화합물은 주요 녹조발생 조류인 *Microcystis aeruginosa*의 독소인 microcystin을 수계로 방출하는 가능성이 제기되었다 (Lam *et al.* 1995). 이외에도 사용된 화학물질의 제거를 위해 산화제나 활성탄소와 같은 물질을 부가적으로 첨가하기 때문에 고비용의 문제와 번거로움이 발생한다 (Chow *et al.* 1998). 따라서, 이와 같은 문제점을 보완하기 위하여 환경친화적인 조류응집 대체물질로서 무독성이며, 생분해성의 미생물응집제를 고려할 수 있다.

본 연구는 하절기에 녹조발생이 빈번한 연못을 대상으로 enclosure 실험을 수행하여 CellCaSi와 미생물응집제의 녹조제어 효과를 조사하였다. 즉, 인의 침전제거에 관계되는 CellCaSi와 조류응집에 관여하는 미생물응집제의 첨가에 의한 이화학적 수질, 엽록소-*a* 농도 등의 변화를 조사하였다. 아울러 사용된 CellCaSi와 미생물응집제의 독성을 조사하였다.

재료 및 방법

1. CellCaSi의 조성 및 입자크기

CellCaSi는 석고, 생석회, 제철슬래그 등의 원료를 합성하여 제조된 다공성 규산칼슘계 화합물로, 주요 화학 성분은 SiO_2 와 CaO 로서 각기 45~55%, 25~35%를 점유하고 있으며, 이밖에 Al, Fe, Mg 그리고 K의 산화물이 일부 포함되어 있다 (Table 1). CellCaSi의 물리적 특성으로서 pH는 8~9, 비중은 0.35~0.45이며, 비표면적은 $50\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$ 이고, 흡수력은 자중의 1.5배로서 다공성의 구조를 갖고 있다. 본 연구에서는 오 등 (2000)에 의해 엽록소-*a* 농도 저감효과가 우수한 것으로 조사된 입자크기 1 mm 이하의 CellCaSi를 사용하였다.

Table 1. Chemical composition and physical characteristics of a porous silicate material, CellCaSi

Parameters	Characteristics
Chemical composition (%)	
SiO_2	45~55
CaO	25~35
Al_2O_3	3~4
Fe_2O_3	1~2
MgO	1~2
K_2O	0.5~1.0
Physical characteristics	
pH	8~9
Specific gravity	0.35~0.45
Specific surface area	$50\text{ m}^2\text{ g}^{-1}$
Water absorption	1.5 times of self-weight

Table 2. Composition of each enclosure

Enclosure no.	Composition
1	Control
2	CellCaSi + $FeCl_3 \cdot 6H_2O$
3	CellCaSi + $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ + biofloculant
4	CellCaSi + $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ + biofloculant + $CaCl_2 \cdot 2H_2O$

CellCaSi (1 g l^{-1}); $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ($2\text{ mg Fe}^{3+}\text{ l}^{-1}$); biofloculant (2 ml l^{-1}); $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ (1 g l^{-1})

2. 미생물응집제 생산균주의 배양

미생물응집제 생산균주는 Toeda and Kurane (1991)이 사용한 배지를 일부 변형하여 배양하였다. 미생물응집제는 250-ml 삼각플라스크에 응집제 생산균주인 S-2 균주와 배양용 배지를 첨가하여 진탕배양기에서 30°C , 120 rpm의 조건으로 6일간 배양하여 생산된 배양원액을 사용하였다.

3. Enclosure설치 및 시료채취

충남 천안시에 위치한 골프장내 부영양화 연못을 선정하여 플라스틱으로 제작된 체적 200 l의 원통형 Enclosure (깊이: 1.0 m, 상부직경: 0.55 m, 하부직경: 0.5 m)를 4개 설치하였다. 각 enclosure는 160 l의 연못물을 포함하며, 첨가된 성분은 Table 2와 같다. Enclosure 1은 첨가된 성분이 없는 대조구이고, Enclosure 2는 CellCaSi (1 g l^{-1})와 $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (2 mg Fe l^{-1})를 포함하고, Enclosure 3은 Enclosure 2에 미생물응집제 (2 ml l^{-1})를 추가하였고, Enclosure 4는 Enclosure 3에 보조응집제인 $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ (1 g l^{-1})를 추가로 처리하였다.

현장실험은 녹조발생이 심하게 관찰된 시기인 2000년 8월 23일부터 9월 26일까지 수행하였다. 시료는 5~10

일 간격으로 총 6회에 걸쳐 채취하였으며, 4개의 enclosure에서 각각 1l씩 채취하여 실험실로 운반한 후 분석에 사용하였다.

4. 수질분석

수온, pH 및 전기전도도는 전기전도도측정기 (YSI 63)를 사용하여 현장에서 직접 측정하였다. 용존산소는 용존산소측정기 (YSI 95)로 현장에서 측정하였다.

엽록소-a 농도는 채수한 시료를 냉암소에 보관하여 실험실로 운반한 후, Whatman GF/C로 여과한 시료를 chloroform-methanol (2:1, v/v)로 추출한 후 형광측정기 (Turner 450)로 측정하였다 (Wood 1985).

총질소는 second-derivative method에 의해 측정하였고 (Crumpton *et al.* 1992), 질산염은 Szechrome NB시약으로 발색하여 측정하였다 (Wynne and Rhee 1986). 총인은 persulfate법에 의해 인산염으로 산화시킨 후 (Menzel and Corwin 1965), 인산염과 마찬가지로 phosphomolybdate법으로 측정하였다 (Murphy and Riley 1962).

5. CellCaSi와 무기이온의 영향

CellCaSi와 몇몇 무기이온 중에서 인 및 녹조제거에 효과적인 성분을 조사하기 위하여 골프장의 연못에서 물 시료를 채취하였다. 8개의 시료수 150 ml에 CellCaSi와 무기이온을 각기 다른 조성으로 첨가한 후 11일간 배양하여 전기전도도, 엽록소-a 농도, 인 농도 등의 수질 변화를 조사하였다.

6. 응집실험

미생물응집제의 응집실험은 대상 연못의 녹조발생 남조류인 *Microcystis aeruginosa*를 대상으로 하였다. 진탕 배양기에서 6일 동안 배양된 배양원액을 10배로 희석하여 조류의 응집실험에 사용하였다.

응집실험은 *M. aeruginosa* 배양액 50 ml를 포함한 100-ml 비이커에 미생물응집제 배양액을 각각 희석하여 그 중 1ml를 첨가하였고, 상온에서 1분간 교반한 후 10분간 정치시켜 응집물질을 침전시켰다. 비이커의 바닥으로부터 2/3지점에서 시료를 채취하여 660 nm에서 흡광도를 측정하였다. 조류의 응집능 (flocculating capacity)은 다음과 같은 식에 의하여 계산되는 제거효율 (removal efficiency, %)로 표시하였다 (Kurane and Matsuyama 1994).

제거효율 = $\{(B - A)/B\} \times 100$, (A: 시료구의 흡광도, B: 대조구의 흡광도)

상기의 응집실험과 같은 방법으로 *M. aeruginosa* 배양액에 CellCaSi (1 g l^{-1}), 미생물응집제 (2 ml l^{-1}), 보조응집제 (1 g l^{-1})를 각각 6가지의 조건별 (① 미생물응집제, ② 보조응집제, ③ CellCaSi, ④ 미생물응집제+보조응집제, ⑤ CellCaSi+미생물응집제, ⑥ CellCaSi+미생물응집제+보조응집제)로 나누어 첨가한 후, 조류의 응집능을 조사하였다. 미생물응집제는 배지내 인 농도 92 mg l^{-1} 에서 배양한 S-2 배양액을 10배 희석하여 사용하였다.

7. 독성시험

조류의 응집에 사용되는 S-2 미생물응집제의 급성경구독성 정도를 파악하기 위하여 특정병원성부재 (Specific Pathogens Free) ICR 실험용 쥐를 사용하였다. 체중 25~30 g의 수컷 10마리에 시료원액을 실험용 쥐 20g 당 0.2 ml씩 단 1회 경구 투여하였고, 용매 대조군으로는 0.85% saline을 사용하였다. 투여 당일에는 투여 후 1, 4, 8, 12시간 뒤에, 투여 익일부터 10일째까지는 매일 오전, 오후 1회 이상씩 일반증상의 변화 및 사망동물의 유무를 관찰하였으며, 투여 당일부터 격일로 체중의 변화를 측정하였다. 투여 10일째에는 실험동물을 치사시켜 해부한 후 육안으로 내부 장기를 검사하였다.

또한, 현장에서 녹조제거에 이용하고자 첨가되는 성분들에 대한 독성시험을 수행하기 위하여 2000년 9월 18일부터 26일까지 8일 동안 4개의 enclosure 각각에 체장 7 cm 가량의 금붕어를 3마리씩 넣어 생존여부를 확인하였다.

결과 및 고찰

1. CellCaSi와 무기이온이 수질에 미치는 영향

무기이온 중에서 Fe 처리구의 인 제거효율은 58%로서 가장 효과적인 것으로 조사되었으며, Al 처리구의 엽록소-a 제거효율은 36%로 가장 높았다 (Table 3). 제강슬래그의 경우 25~40%의 Fe 산화물을 함유하고 있는데 (현 등 1997), Fe가 다량 함유된 제강슬래그를 해수에 살포하였을 때 인산염과 질산염이 평균 30% 이상 제거된 연구결과로부터 (이 등 1999), Fe는 수중 인 농도의 감소를 위하여 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

한편, 전기전도도는 CellCaSi 및 무기이온의 첨가에 따라 증가하는 경향을 보였다 (Table 3). 전기전도도가 높은 경우는 원수 및 음용수 상한값인 $500 \mu\text{S cm}^{-1}$ (De Zuane 1996)의 절반정도인 232~275 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 정도를 나

Table 3. Change of water quality by the addition of CellCaSi and inorganic compounds

Date	CellCaSi and inorganic compounds	Conductivity		Chlorophyll- <i>a</i>		PO ₄ ³⁻ -P	
		μs cm ⁻¹	% of Control	μg l ⁻¹	% of Control	μg l ⁻¹	% of Control
June 13		199		212		19	
June 26	Control	156	100	59	100	12	100
	CellCaSi	232	149	143	242	12	100
	Al ₂ (SO ₄) ₃ · 14~18H ₂ O	157	101	38	64	10	83
	CellCaSi+Al ₂ (SO ₄) ₃ · 14~18H ₂ O	253	162	135	229	14	117
	FeCl ₃ · 6H ₂ O	166	106	88	149	5	42
	CellCaSi+FeCl ₃ · 6H ₂ O	262	168	56	95	12	100
	CuSO ₄	171	110	52	88	8	67
	CellCaSi+CuSO ₄	275	176	56	95	11	92

CellCaSi (1 g l⁻¹); Al₂(SO₄)₃ · 14~18H₂O (50 μg Al l⁻¹); FeCl₃ · 6H₂O (2 mg Fe³⁺ l⁻¹); CuSO₄ (0.1 mg l⁻¹)

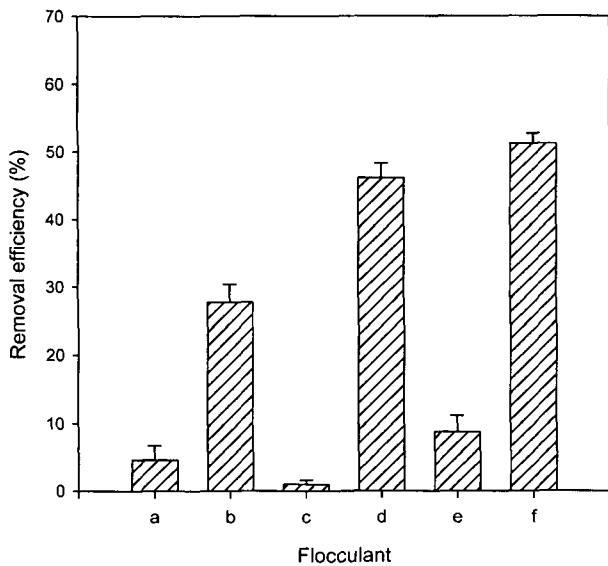


Fig. 1. Effects of CellCaSi and biofloculant on the flocculation of *Microcystis aeruginosa*. Flocculation activity was expressed as removal efficiency (%). The final concentrations of CellCaSi, biofloculant and CaCl₂ · 2H₂O were 1 g l⁻¹, 2 ml l⁻¹ and 1 g l⁻¹, respectively. Symbols are: a, biofloculant; b, CaCl₂ · 2H₂O; c, CellCaSi; d, biofloculant + CaCl₂ · 2H₂O; e, CellCaSi + biofloculant; f, CellCaSi + biofloculant + CaCl₂ · 2H₂O.

타내어 수질에 별다른 악영향은 없는 것으로 판단되었다.

2. CellCaSi와 미생물응집제의 조류제거 효과

현장의 enclosure 실험을 수행하기에 앞서 실험실 조건에서 CellCaSi와 미생물응집제의 조류제거 효과를 조사하였다. CellCaSi, 미생물응집제 (S-2) 그리고 보조응집제의 단독 또는 복합처리에 의한 *M. aeruginosa*의 제거

효율을 조사하였다 (Fig. 1). *M. aeruginosa*에 대한 응집능은 미생물응집제 또는 보조응집제의 단독 처리구보다는 이들을 함께 처리한 경우 (처리구 d)에 46%로 높았다. CellCaSi와 미생물응집제를 함께 처리한 경우 (처리구 e)의 응집능은 9%로서 보조응집제의 비첨가에 따라 그 효과는 작았지만 CellCaSi와 미생물응집제 각각의 단독 처리구보다는 좀 더 효과가 있었다. CellCaSi, 미생물응집제 그리고 보조응집제를 모두 처리한 경우 (처리구 f)의 응집능은 51%로 조사되었다. 즉, CellCaSi와 미생물응집제는 함께 사용되었을 때 상승작용에 의해 조류제거의 효과가 증가하며, 응집능은 보조응집제의 첨가에 의해서 더욱 증가하는 것으로 판단되었다.

3. Enclosure의 수질변화

현장에 설치한 enclosure의 pH, 전기전도도, 인 농도, 엽록소-*a* 농도 등의 수질변화를 조사하였다 (Fig. 2). 보조응집제가 첨가된 Enclosure 4의 pH는 초기에 7.6으로 낮아졌으나, 시간의 경과에 따라 다른 처리구, 대조구와 거의 비슷한 수준으로 회복되었다. Ca과 인의 침전반응은 보통 pH 8.0 이상의 조건에서 빠르게 일어나 침전반응이 발생한 2시간 후 pH 8은 pH 7.5 정도로 감소한다는 보고 (Moutin *et al.* 1992)를 고려할 때, 초기의 pH 감소는 보조응집제로 첨가된 Ca 성분에서 기인하는 것으로 사료되었다.

Enclosure 4를 제외한 처리구와 대조구의 전기전도도는 초기에 약 86~136 μs cm⁻¹로 큰 변화가 없었으나, Enclosure 4의 전기전도도는 초기에 약 1,600 μs cm⁻¹ 이상의 급격한 증가를 나타내었다 (Fig. 2). 이와 같이 높은 전기전도도는 보조응집제의 첨가에 따른 것으로서, 원수 및 음용수의 전기전도도 상한값으로 간주되고 있는 500 μs cm⁻¹ 이하로 감소시키기 위해서는 보조응집제의 첨가량을 크게 줄여야 할 것으로 판단되었다.

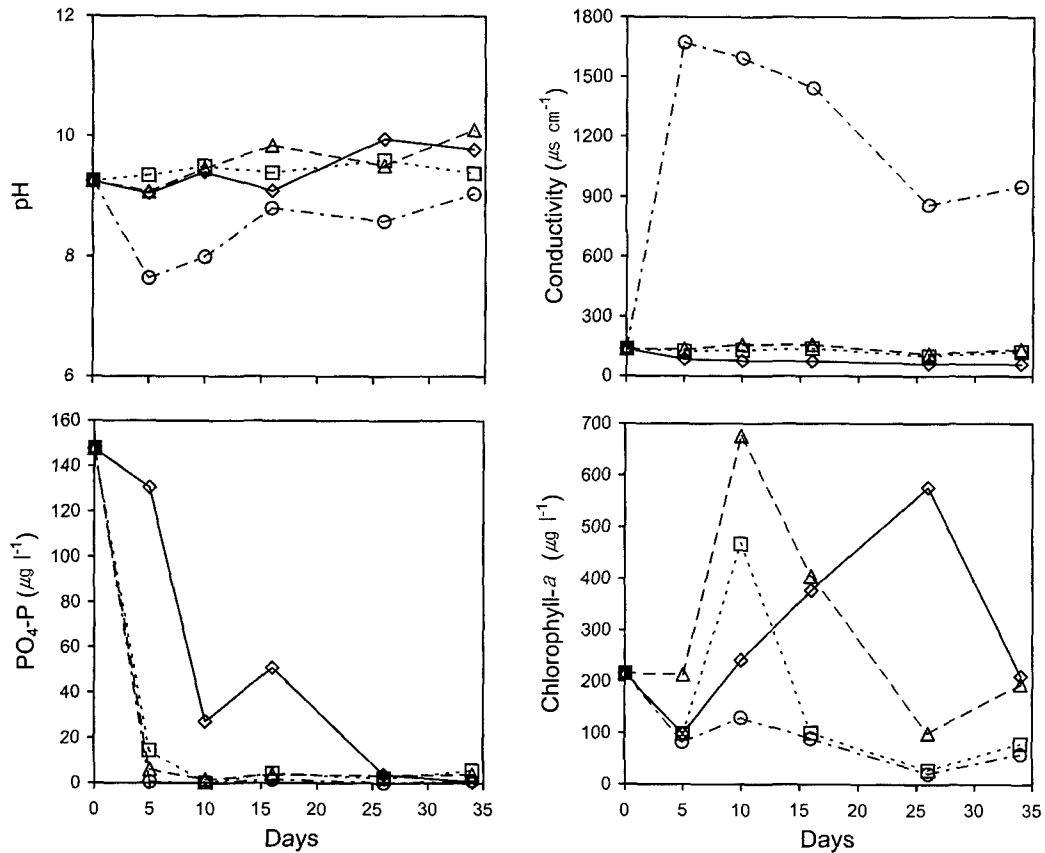


Fig. 2. Changes of pH, conductivity, phosphorus and chlorophyll-*a* concentration in 4 enclosures during the experimental period. The final concentrations of CellCaSi, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, biofloculant and $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ were 1 g l^{-1} , 2 mg Fe l^{-1} , 2 ml l^{-1} and 1 g l^{-1} , respectively. Symbols are: Enclosure 1 (\diamond), Control; Enclosure 2 (\square), CellCaSi + $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; Enclosure 3 (\triangle), CellCaSi + $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + biofloculant; Enclosure 4 (\circ), CellCaSi + $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + biofloculant + $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

인 농도는 처리 후 5일째 첫 측정시 대조구에서 $131 \mu\text{g l}^{-1}$ 를 기록하였음에 비해서 Enclosure 2, 3, 4에서는 각각 14, 6, $1 \mu\text{g l}^{-1}$ 를 기록하여 CellCaSi 처리구에서 수중 인 제거효과가 초기에 크게 나타났다(Fig. 2). NaCl과 석회석(CaCO_3)을 반응시켜 소다회를 생산하는 과정에서 발생하는 부산석회는 칼슘 화합물(약 70%)과 마그네슘 화합물(약 10%)이 대부분인 무기성 슬러지이며, 제강슬러지와 부산석회를 이용하여 흡착평형을 통해 용액중의 인 제거를 실험할 때, 흡착평형 도달시간은 제강슬러지의 경우 60시간이고 부산석회는 72시간이라고 하였다(현과 정 1997). 따라서, 본 연구에서 사용된 CellCaSi의 인 제거효과는 초기에 집중되는 것으로 볼 수 있다. 특히, 다른 처리구보다 Enclosure 4는 CellCaSi에 철과 칼슘 성분을 보강해 줌으로서 실제 현장에서 이를 응용하여, 녹조제어에 더욱 효과적으로 사용될 수 있음을 시사한다.

한편, 철 산화물과 석고의 혼합물을 이용하여 인을 제

거함에 있어서 pH 4~8의 낮은 pH에서는 인의 제거량이 거의 비슷하지만, pH 9~10에서는 pH 증가와 함께 인의 제거가 증가된다고 하였다(Bastin *et al.* 1999). 즉, pH 증가와 인산칼슘의 침전량은 비례하는 것으로 판단된다. 본 실험에서 enclosure 설치 첫째 날의 pH는 9.3으로서 Ca 성분과 인산염의 침전반응에 적절한 높은 pH를 유지하였다. 이에 따라서 Enclosure 4에서는 처리 후에 초기의 인 농도가 $1 \mu\text{g l}^{-1}$ 로 급격히 감소하였고, 약간의 pH 감소가 수반되었다.

조류 생물량의 지표로 이용되는 엽록소-*a* 농도는 실험 시작시에 $215 \mu\text{g l}^{-1}$ 로 높았으나, Enclosure 2, 4에서 본 실험의 종료일에 각각 $80 \mu\text{g l}^{-1}$, $59 \mu\text{g l}^{-1}$ 로 조사되었으며, 보조응집제와 염화제이철의 처리로 인한 인 농도 감소와 녹조제거가 뚜렷하였다(Fig. 2). CellCaSi에 의한 엽록소-*a* 농도 감소는 처리 초기에 효과가 크게 나타나며(오 등 2000), 본 enclosure 실험에서도 CellCaSi의 처리로 인한 엽록소-*a* 농도의 감소는 초기에 그 효과가

크게 나타났다.

4. 독성시험

미생물응집제(S-2)의 실험용 쥐 급성경구독성 정도를 조사한 결과 시료투여 후 10일간 치사동물은 없었으며, 모든 동물들의 정상적인 체중의 증가가 관찰되었다(Fig. 3). 또한 시료투여 10일째에 치사시킨 후 부검시에도 특별한 병변 육안 소견이 없었으므로 미생물응집제 S-2는 독성이 없는 것으로 판단되었다.

현장에서 8일간 실시한 생물 독성시험에서 4개의 enclosures 각각에 넣은 금붕어가 100% 생존함에 따라, 현 상태에서는 녹조제어용 첨가물은 독성이 없는 것으로 판단된다. 한편, 첨가된 물질에 의한 남조류 독성의 증가를 생각해 볼 수 있는데, Chow *et al.* (1998)은 첨가된 염화제이철이 남조류의 성장을 일부 자극하지만, 그에 따른 microcystin의 증가는 없다고 보고하였다. 또한, alum과 석회를 사용했을 때 *M. aeruginosa*에서 microcystin과 같은 독소의 방출 가능성은 없거나 극히 미미한 것으로 보고된 바 있다(Lam *et al.* 1995). 이상과 같은 결과를 고려할 때 본 실험에서 사용한 CellCaSi, 미생물응집제, 무기이온 등에 의한 수계의 독성증가는 없을 것으로 판단되었다.

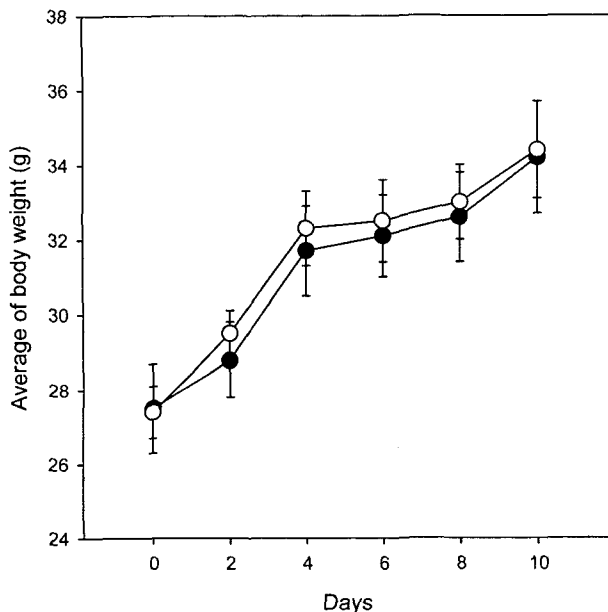


Fig. 3. Change of body weight of the mouse during the period of toxicity test. The error bars indicate SD ($n = 10$). Symbols are: ●, Control; ○, S-2 biofloculant.

적 요

부영양화된 연못에서 규산질다공체 (CellCaSi)와 미생물응집제를 이용한 녹조제어의 효과를 조사하였다. 녹조 발생 남조류인 *Microcystis aeruginosa*에 대한 응집능이 우수한 S-2 균주가 생산한 미생물응집제를 선정하여 현장의 조류응집에 적용하였다. 초기의 인산염농도는 대조구에서 $131 \mu\text{g l}^{-1}$ 를 기록하였음에 비해서, CellCaSi가 첨가된 3개의 처리구에서는 $1 \sim 14 \mu\text{g l}^{-1}$ 를 기록하며 크게 감소하였다. 엽록소-a 농도는 현장에 설치한 enclosure에서 초기에 $215 \mu\text{g l}^{-1}$ 이었으나 CellCaSi (1g l^{-1}), 미생물응집제 (2ml l^{-1}), 보조응집제 (1g l^{-1}), 염화제이철 (2mg Fe l^{-1})을 함께 처리한 처리구에서 $59 \mu\text{g l}^{-1}$ 로 가장 많이 감소하였다. 실험용 쥐 및 금붕어를 이용한 독성시험에서 녹조제거에 이용되는 성분들과 미생물응집제에 대한 독성은 없는 것으로 조사되었다. 따라서, CellCaSi와 미생물응집제는 인 제거 및 엽록소-a 농도 감소에 의한 녹조제거에 효과적인 것으로 판단되었다.

인 용 문 헌

- 오희목, 반응호, 박대균, 이진환, 맹주선. 1999. 대청호내 cyanobacteria에 의한 취기물질생산. 한국육수학회지. 32:181-188.
- 오희목, 이석준, 김성빈, 박미경, 윤병대, 김도한. 1998. Algal bioassay에 의한 조류생장제한영양염류 결정. 한국육수학회지. 31:150-157.
- 오희목, 이석준, 윤병대, 이옥재, 이승규, 최 룡. 2000. 규산질 다공체 (CellCaSi)에 의한 미세조류 제어. 한국육수학회지. 33:145-151.
- 이충일, 광영세, 김대윤. 1999. 해수의 무기영양염 농도와 제강슬래그가 와편모조류 휴면포자 발아에 미치는 영향. RIST연구논문. 13:539-542.
- 조경재, 신재기. 1996. 낙동강 담수조류 N, P 요구도 분석을 위한 bioassay. 한국육수학회지. 29:263-273.
- 현재혁, 정현영. 1997. 제강 슬러지와 부산석회를 이용한 용액중의 인 제거. 한국폐기물학회지. 14:313-319.
- 현재혁, 정현영, 김민길. 1997. 용액중의 인산염 제거를 위한 제철 폐기물의 역할. 한국폐기물학회지. 14:640-645.
- Bastin O, F Janssens, J Dufey and A Peeters. 1999. Phosphorus removal by a synthetic iron oxide-gypsum compound. Ecol. Eng. 12:339-351.
- Chow CWK, J House, RMA Velzeboer, M Drikas, MD Burch and DA Steffensen. 1998. The effect of ferric chloride flocculation on cyanobacterial cells. Water Res. 32:808-814.

- Cooke GD, EB Welch, SA Peterson and PR Newroth. 1993. Restoration and Management of Lakes and Reservoirs, 2nd ed. Lewis Pub., Boca Raton.
- Crompton WG, TM Isenhardt and PD Mitchell. 1992. Nitrate and organic N analyses with second-derivative spectroscopy. *Limnol. Oceanogr.* 37:907-913.
- De Zuane J. 1996. Handbook of Drinking Water Quality, 2nd ed. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Hsu PH. 1968. Interaction between aluminum and phosphate in aqueous solution. *Adv. Chem. Ser.* 73:115-127.
- Hsu PH. 1975. Precipitation of phosphate from solution using aluminum salt. *Water Res.* 9:1155-1161.
- Hsu PH. 1976. Comparison of iron (III) and aluminum in precipitation of phosphate from solution. *Water Res.* 10:903-907.
- Karan V, S Vitorović, V Tutundžić and V Poleksić. 1998. Functional enzymes activity and gill histology of carp after copper sulfate exposure and recovery. *Ecotox. Environ. Safe.* 40:49-55.
- Kurane R and H Matsuyama. 1994. Production of a bioflocculant by mixed culture. *Biosci. Biotech. Biochem.* 58:1589-1594.
- Lam AKY, EE Prepas, D Spink and SE Hrudey. 1995. Chemical control of hepatotoxic phytoplankton blooms: Implications for human health. *Water Res.* 29:1845-1854.
- Menzel DW and N Corwin. 1965. The measurement of total phosphorus in seawater based on the liberation of organically bound fraction of persulfate oxidation. *Limnol. Oceanogr.* 10:280-282.
- Moutin T, JY Gal, HE Halouani, B Picot and J Bontous. 1992. Decrease of phosphate concentration in a high rate pond by precipitation of calcium phosphate: theoretical and experimental results. *Water Res.* 11:1445-1450.
- Murphy J and JP Riley. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analyt. Chim. Acta* 27:31-36.
- Murphy TP, EE Prepas, JT Lim, JM Crosby and DT Walty. 1990. Evaluation of calcium carbonate and calcium hydroxide treatments of prairie water dugouts. *Lake Reserv. Manage.* 6:101-108.
- Oh HM, SJ Lee, MH Jang and BD Yoon. 2000. Microcystin production by *Microcystis aeruginosa* in a phosphorus-limited chemostat. *Appl. Environ. Microbiol.* 66:176-179.
- Schindler DW, FAJ Armstrong, SK Holmgren and GJ Brunskill. 1971. Eutrophication of Lake 227, experimental lake area, Northwestern Ontario, by addition of phosphate and nitrate. *J. Fish. Res. Bd. Canada* 28:1763-1782.
- Toeda K and R Kurane. 1991. Microbial flocculant from *Alcaligenes cupidus* KT201. *Agric. Biol. Chem.* 55:2793-2799.
- Wood LW. 1985. Chloroform-methanol extraction of chlorophyll-*a*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 42:38-43.
- Wu R and CE Boyd. 1990. Evaluation of calcium sulfate for use in aquaculture ponds. *Prog. Fish-Cult.* 52:26-31.
- Wynne D and GY Rhee. 1986. Effects of light intensity and quality on the relative N and P requirement (the optimum N:P ratio) of marine planktonic algae. *J. Plankton Res.* 8:91-103.

(Received 9 February 2001, accepted 25 May 2001)