

실험적 생물조절 기법을 이용한 엽록소 및 남조류 제거 효과

이상재 · 이재연 · 이재훈 · 배대열 · 이의행 · 한정호 · 황순진¹ · 안광국*

(충남대학교 생명과학부, ¹건국대학교 환경과학과)

Removal Effects of Chlorophyll-*a* and Cyanobacteria Using Laboratory-scale Biomanipulation Tests. Lee, Sang-Jae, Jae-Yon Lee, Jae-Hoon Lee, Dae-Yeul Bae, Eui-Hang Lee, Jung-Ho Han, Soon-Jin Hwang¹ and Kwang-Guk An* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea; ¹Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)

This study was conducted to determine removal effect on phytoplankton (chlorophyll-*a* as whole algae) and cyanobacteria by a fish *Pseudorasbora parva* and macroinvertebrate *Palaemon paucidens* in September 2006. Three treatments with 25 (T1), 50 (T2) and 100 (T3) individuals along with control (C1, no input fish), and two treatments with 25 (T4) and 50 (T5) individuals along with control (C1) were made for fish and macroinvertebrate, respectively. The initial concentrations of chlorophyll-*a* (Chl_a) in each 10 L test tank were set up for the levels of 95~100 µg L⁻¹ and the daily values were monitored in the test tank during 7 days. In the lab tests, *P. parva* did not show Chl-*a* removal effect; the removal rate of Chl-*a* for *P. parva* was -58% in T1, -56% in T2, and 61% in T3 during the test period. In contrast, *P. paucidens* in the treatments of T4 and T5 removed the phytoplankton effectively and the removal effect were appeared to be 33% and 22%, respectively. Also, *P. paucidens* showed high feeding efficiency in the removal of cyanobacteria. The levels of cyanobacteria were greatly lowered from 6,048 to 927 cells mL⁻¹ in T4 and from 6,539 to 1,053 cells mL⁻¹ in T5, resulting in 85% and 84% in the removal effect, respectively. Our results for biomanipulation tests suggest that *P. paucidens* may be used as a potential candidate organism for algae control in spite of the preliminary results by laboratory tests.

Key words : biomanipulation, removal effect, cyanobacteria, chlorophyll-*a*, agricultural reservoir

서 론

농업용 저수지는 과거로부터 농업활동에 가장 중요한 수자원으로 이용되어 왔으나 최근에는 단위 면적당 수확량 증가를 위한 각종 합성비료 사용 증가 및 산업화로

수질이 빠르게 악화되고 있다(김 등, 1995; 윤, 1998; 이 등, 2003; 김 등, 2004; 안 등, 2007). 특히, 농업용 저수지는 이·치수 기능을 고려하여 전국 18,000여개 이상이 축조되어 농업용수의 공급을 목적으로 관리하여 왔으나 본래의 기능을 상실함을 물론 수질 악화가 심각하여 대다수의 저수지가 부영양화 단계를 보이고 있으며 상습적

* Corresponding author: Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 822-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

인 녹조 발생이 일어나는 것으로 보고되고 있다(김 등, 1995; 박 등, 2004). 이와 같은 녹조현상의 원인종의 대부분은 남조류(Cyanobacteria)로써, 주로 수체의 표면에 부유하며 scum을 형성하고, 종에 따라서는 독소(Toxin)를 보유 한다. 또한 남조류 독소는 수 생태계내의 어류를 비롯한 담수생물은 물론 사람이 이용하는 상수원수에도 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(김 등, 1995). 우리나라에서 독소를 생성하는 남조류 중 가장 널리 알려진 종은 *Microcystis aeruginosa*로서 간 독성을 보이는 Microcystin으로 널리 알려지고 있다(김 등, 1995). 하지만 국내외에서 이를 제거하려는 연구(Carmichael, 1988)가 극히 미비한 실정이다. 특히, 최근에는 농업용저수지의 인(P) 및 질소(N)의 증가로 녹조현상의 빈도 및 강도가 증가하면서 이를 효율적으로 관리하기 위한 방안 마련에 고심하고 있다(김 등, 2001; 김 등, 2004).

현재, 우리나라에서 농업용 저수지의 부영양화는 외부로부터 다량의 영양염류(질소, 인)의 유입으로 인해 식물성 플랑크톤을 포함한 미생물이 번성하고 내부생성 유기물의 양이 증가하여 수중생태계의 구조와 기능적 측면에서 물질순환의 불균형을 초래되는 현상을 가져오고 있다(신 등, 2000). 부영양화 현상을 일으키는 식물성 플랑크톤의 현존량을 알기 위한 가장 실용적인 방법은 식물의 광합성에서 가장 기본적인 역할을 하고 있는 엽록소의 값을 측정하는 것이다. 이에 따라 환경부에서는 과거 총인(TP)으로 호소의 부영양화를 판단하던것에서 벗어나 녹조 발생정도를 직접 판단할 수 있는 Chl-*a*를 호소 수질 기준에 포함 시켜 부영양화도를 판정하고, 이에 근거하여 수질개선 사업을 시행하고 있다. 최근 부영양화 저수지의 급증과 더불어 수화현상(Algal bloom)이 빈번하게 발생하게 되는데 이를 방지하기 위하여 유역으로부터의 영양물질인 인(P), 질소(N) 유입을 감소 내지는 차단 시키거나 호소 내에 누적 되어있는 영양물질의 제거 및 용출을 억제하는 등의 방법이 적용되고 있으나 내부 부하와 생물학적 구조 때문에 효과가 나타나지 않거나 기대 이하인 경우가 많은 실정이다(윤, 1998).

한편, 생물조절기법(Biomanipulation)은 수중의 먹이 연쇄를 인위적으로 조작하여 식물플랑크톤의 현존량 감소를 유도함으로써 수중 투명도 증가는 물론 영양염 농도 변화를 유도하는 기법으로서(김 등, 2001), 외국에서는 호수의 수질관리를 위해 널리 이용해왔다. 이러한 기술은 어류를 투입하여 수질회복 및 호수관리 방안으로 사용하고 있으나(Hunt *et al.*, 2005; Prokopkin *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2006), 수중 내 어류 투입은 조류와 같은 하위 그룹의 생물량을 인위적으로 감소시킴으로서,

수질 변화와 경제성을 동시에 추구하고 있다. 한편 우리나라에서는 최근 외래어종 및 외래성 갑각류 등을 도입한 결과 고유종의 소멸을 가져오고 있고, 새와 포유류 감소, 부영양화의 유도 등 생태계의 혼란은 물론 어류투입 이후 뚜렷한 효과가 나타나지 않는 것으로 보고되고 있다(DeMelo *et al.*, 1992; 안 등, 2007). 본 연구의 목적은 어류 및 수서무척추동물을 이용하여 부영양화된 농업용저수지의 수질개선을 위한 생물조절 유용생물을 개발, 적용하고 조류제어 및 남조류 제어효과를 평가하는 것이다.

재료 및 방법

1. 실험종 선정 및 대상생물 채집

본 연구에서는 국내 농업용 저수지에서 비교적 우점하며 녹조제어에 큰 효과를 가져올 것으로 예상되는 어류(Fish)와 대형무척추동물(Macroinvertebrate)을 각각 선별하였다. 선정된 후보 어류는 정제된 저수지 및 농수로에서 주로 서식하며 조류 및 부착조류 등을 섭식하는 것으로 알려진(김 등, 2002) 참붕어(*Pseudorasbora parva*)를 대상으로 하였다. 참붕어는 농업용 저수지처럼 수질이 악화된 곳에서 잘 서식할 수 있기 때문에 생물조절기법을 위한 유용후보로서 적합할 것으로 판단되었다. 또한, 대형무척추동물로는 국내 저수지에 우점하며 번식력이 좋은 줄새우(*Palaemon paucidens*)를 선정하였다. 줄새우는 수체내 조류와 같은 입자성 유기물의 제거를 통하여 수생태계의 물질순환에 중요한 역할을 하는 것으로 사료되는데 실험종으로 하게 인식되고 있다(김 등, 2004).

본 연구에서 사용된 생물 채집은 저수지에서 통발 그물 어항을 30분간 설치하여 참붕어를 채집하였으며, 족대(망목: 4×4 mm)를 이용하여 수변지역의 줄새우를 채집하였다. 또한 식물성 플랑크톤 네트(Mesh size: 20 μm)를 이용하여 자연 개체군의 식물플랑크톤을 농축하여 실험에 이용하였다.

2. 생물조절 실험디자인

생물조절 시험을 위해 본 연구에서는 6개의 실험용 수조(20×40×25 cm)에 초기 엽록소(Chl-*a*)의 농도범위가 95~100 μg L⁻¹인 고정하여 10 L씩 투여하였다. 수조는 1개의 대조군(Control), 3개의 어류 실험군(Fish treatment) 및 2개의 대형무척추동물 실험군(Macroinvertebrate treatment)으로 구별하였으며, 각각의 어류 처리군에는 참붕어 25개체(T1), 50개체(T2), 100개체(T3)를 투여하

Table 1. The experimental design of biomanipulation using fish and macroinvertebrate during 6th ~ 12th September, 2006.

Experimental condition	Biota used	Scientific name	Number of individuals	Initial concentration of Chl- <i>a</i> ($\mu\text{g L}^{-1}$)
C	No biota	—	—	98
T1	Fish	<i>Pseudorasbora parva</i>	25	97
T2	Fish	<i>Pseudorasbora parva</i>	50	96
T3	Fish	<i>Pseudorasbora parva</i>	100	97
T4	Macroinvertebrate	<i>Palaemon paucidens</i>	25	96
T5	Macroinvertebrate	<i>Palaemon paucidens</i>	50	99

였고, 무척추동물 처리군에는 줄새우를 25개체 (T4), 50개체 (T5)를 투입하여 생물 개체수 밀도 변화에 따른 조류 제거 효율을 평가하였다 (Table 1). 실험용 수조는 실험실 내에서 광조건 (Light condition)이 16 hr : 8 hr (Light : Dark)으로 유지하였고, 영양염류의 순환 및 정체에 의한 식물성플랑크톤의 침강을 막기 위해 7일의 실험기간동안 지속적으로 기포발생기를 넣어주었다.

3. 수조 내 이화학적 수질 측정

대조군과 처리군의 수조에서는 수온, 용존 산소량 (DO), 수소이온농도 (pH), 전기전도도 (Conductivity) 및 탁도 (Turbidity)를 분석하였고, 이를 위해 다항목수질 측정기 (YSI-6600 Sonde)를 이용하여 측정하였다 (오후 6시).

4. 수조 내 녹조 및 남조 제거율 측정

각 수조별 녹조 제거율 평가를 위하여 7일 동안 동일한 시각 (오후 6시)에 각 수조별로 상층, 중층, 하층을 혼합하여 비이커를 이용하여 100 mL을 채수하여 Glass Filter (Whatman GF/C)를 이용하여 여과 후 엽록소 (Chl-*a*)의 측정은 에탄올 추출법 (APHA, 1985)을 이용하여 측정하였다. 흡광광도계 (Spectrophotometer, Beckman DU 530)에 측정된 Chl-*a*의 데이터는 아래의 회귀식을 이용하여 실제 Chl-*a* 농도를 추정하였다 (OD=Optical density; V=Sample Volume).

$$\text{Chl-}a \text{ (}\mu\text{g L}^{-1}\text{)} = \frac{[13.7(\text{OD}_{649} - \text{OD}_{750}) - 5.76(\text{OD}_{649} - \text{OD}_{750})]V}{V * 10}$$

남조류의 측정은 MS-5 남조류 측정기 (MS-5, Hach company, USA)를 이용하여 각 수조별 남조류의 단위 체적당 남조류 세포수 (cells mL⁻¹)를 측정하였다. 본 실험이 시행되는 7일 동안 매일 1회 같은 시간에 측정하여 시간 (오후 6시)에 따른 남조류의 세포수변화를 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 수조별 이화학적 특성

수온은 대조군 (Control), 어류 처리군 (Fish treatment), 대형무척추동물 처리군 모두 평균 25°C 내외로 유지하였다. 용존산소 (DO)는 T3에서 단위 면적당 높은 생물량으로 인하여 평균 8.6 mg L⁻¹로 나타났으며 전체 수조의 평균 9.2 mg L⁻¹보다 낮게 나타났다. 이는 T3의 생물의 호흡으로 인한 산소 이용을 증가 때문으로 판단되었다. pH는 모든 처리군에서 시간이 경과함에 따라 점진적으로 증가하였다. 초기 평균 7.3에서 마지막날 8.2로 증가하였다. 전기전도도 (Conductivity) 역시 초기의 D1시기에 평균 210 $\mu\text{s cm}^{-1}$ 에서 D7에는 288 $\mu\text{s cm}^{-1}$ 로 약 78 $\mu\text{s cm}^{-1}$ 만큼 증가하였다. 탁도 (Turbidity)는 어류 처리군과 대형무척추동물 처리군이 확실히 대조를 이루었다. 특히 T3는 육안으로도 현격한 차이를 보일만큼 탁도가 증가하였다. 대형무척추동물 처리군은 평균 11.3 NTU 내외로 유지 되었지만 어류 처리군은 평균 15.4 NTU, 최대 28.3 NTU까지 나타나 어류 분비물 및 배설물에 의한 탁도의 증가 양상을 보였다 (Table 2).

2. 후보 생물에 의한 엽록소 (Chl-*a*) 및 남조류 (Cyanobacteria) 제거 효율분석

1) Chl-*a* 제거 효율

Chl-*a*의 제거효율은 참붕어보다 대형무척추동물에서 확연하게 높게 나타나 줄새우는 녹조제어에 큰 역할을 하는 것으로 나타났다. Fig. 1a에서 제시하는 바와 같이, 참붕어를 투입한 수조에서는 D1~D7까지 시간 경과에 따라 Chl-*a* 농도가 감소하지않고 오히려 점진적으로 증가하는 양상을 보였다. 참붕어의 처리군은 25, 50, 100개체로 각각 달리 처리 하였을 때, 실험 마지막날 최종 Chl-*a* 농도는 3개의 처리군에서 각각 153, 149, 157 $\mu\text{g L}^{-1}$

Table 2. Physical and chemical conditions during 7 days (D1 ~ D7) of biomanipulation tests.

Water temperature (°C)							
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Control	22.7	25.7	25.3	26.3	26.2	25.6	25.1
T1	22.5	25.3	24.7	25.8	25.8	25.4	25.1
T2	22.5	25.1	25.0	25.8	25.6	25.4	24.7
T3	22.6	25.7	25.0	26.3	26.0	25.9	24.8
T4	22.5	25.3	25.1	25.9	25.7	25.4	24.8
T5	22.5	25.1	24.8	25.7	25.5	25.3	24.9
Dissolve oxygen (mg L ⁻¹)							
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Control	9.20	9.17	9.44	9.43	9.51	9.66	9.69
T1	9.11	8.75	9.16	8.96	9.11	9.22	9.22
T2	9.20	8.91	9.27	9.29	9.43	9.56	9.66
T3	9.15	8.37	8.53	8.68	8.83	8.79	8.17
T4	9.19	9.2	9.36	9.43	9.61	9.66	9.65
T5	9.17	9.01	9.32	9.18	9.26	9.22	9.21
pH							
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Control	7.48	7.86	7.98	8.47	8.51	8.52	8.22
T1	7.19	7.8	7.91	8.31	8.34	8.36	8.15
T2	7.19	7.78	7.62	8.45	8.49	8.54	8.25
T3	7.18	7.79	7.95	8.45	8.5	8.82	8.34
T4	7.28	7.84	7.96	8.49	8.52	8.54	8.17
T5	7.22	7.84	7.95	8.46	8.49	8.48	8.18
Conductivity (μs cm ⁻¹)							
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Control	209	210	216	215	230	222	223
T1	209	213	221	228	232	236	248
T2	209	215	229	247	236	274	289
T3	212	229	267	331	378	226	465
T4	210	213	214	216	270	234	241
T5	209	213	222	227	238	234	261
Turbidity (NTU)							
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
Control	10.7	4.9	17.8	8.8	7.8	10.5	3.8
T1	8.7	13.4	13.2	10.2	11.8	14.3	9.4
T2	8.3	13.8	9.2	13.7	16.2	14.8	15.1
T3	8.7	17.6	24.4	23.1	24.1	25.8	28.3
T4	9.1	10.8	14	13.5	12.5	9.6	6.7
T5	7.7	10.6	13.7	14.8	12.9	12.3	9.6

로 나타나 초기의 평균 Chl-a 농도 97 μg L⁻¹보다 오히려 56, 52, 60 μg L⁻¹만큼 증가한 수치를 보여 어류에 의한 Chl-a 제거 효과는 없는 것으로 나타났다. 또한 어류의 개체수 변화에 따라 Chl-a 농도에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이전에 치리를 이용한 녹조제어의 실험 결과에 따르면, Chl-a의 감소는 관찰되지 않았으며 실험

종료 후 적출된 장에서도 어떠한 식물플랑크톤도 관찰되지 않았다(농림부, 2005).

한편 줄새우를 투입한 수조에서는 시간이 경과함에 따라 Chl-a의 농도가 점차적으로 감소하였다. 줄새우는 처리군의 밀도에 있어서 25개체 및 50개체로 서로 달리 하였을 때 실험 최종일인 D7에 Chl-a 농도는 두개의 처리군에서 각각 64, 77 μg L⁻¹로 나타나 초기의 평균 Chl-a 농도 97 μg L⁻¹보다 32, 20 μg L⁻¹ 만큼 감소한 수치를 보여 대형무척추동물에 의한 Chl-a 제거 효과가 탁월한 것으로 분석되었다. 이는 대조군에서 Chl-a의 최종 농도 149 μg L⁻¹와 비교하였을 때, 줄새우의 제거는 57% (85 μg L⁻¹) 및 47% (72 μg L⁻¹)로 높게 나타났다. 한편, 줄새우 역시 개체수 변이에 Chl-a 영향은 크지 않은 것으로 나타나 이미 두개의 처리군에서 줄새우는 1L당 3개체만 투입 되어도 조류제거에 있어서 충분한 것으로 나타났다. 즉 어류의 최종 Chl-a 제거율은 참붕어의 25, 50, 100 개체 처리군에서 각각 -58, -56, -61%로서 조류의 증가가 분명했는데 이는 참붕어의 배설물에서 생성된 인 및 질소의 성분이 조류의 성장을 촉진한 것으로 사료되었다. 한편 줄새우 처리군에서는 25개체에서 50개체로 밀도를 증가시키에 따라 D3~D6 기간에는 고밀도처리군에서 제거효율이 높은 것으로 나타났다(Fig. 1b). 특히 줄새우 처리군과 대조군의 상대적인 Chl-a 제거율이 85, 74%로 나타나 줄새우의 섭식에 의한 Chl-a 제거가 매우 효과적인 것으로 나타났다.

실험 기간동안 처리군의 생물 한 개체당 섭식한 Chl-a는 참붕어에 의한 섭식 효과는 전혀 나타나지 않았으므로 T1, T2, T3에서 각각 -2.2, -1.1, -0.6 μg L⁻¹으로 음의 값들로 나타났다. 반면 T4, T5에 각각 1.3, 0.4 μg L⁻¹로 나타났다. T5는 T4에 비해 개체수를 두배로 많이 하였으나 T5에서 한개체당 섭식한 Chl-a의 양이 더 낮게 나타났다. 이는 단위 면적당 개체의 밀도가 높아 상호간 섭식경쟁의 영향으로 T4의 수치가 더 높게 나타난 것으로 사료된다(Fig. 2a).

참붕어 처리군 T1, T2, T3에서 단위 L당, 개체의 일일 Chl-a 섭취량은 뚜렷한 경향없이 평균값이 -0.04, -0.02, -0.01 μg L⁻¹ 음의 값을 보였다. 즉 참붕어에 의한 Chl-a 섭식이 없는 것으로 나타났다. 하지만 줄새우 처리군 T4, T5의 Chl-a는 실험 초기에 많은 양의 Chl-a 섭식이 이루어 지다 점차 감소하는 경향을 보여 일일 평균 0.02, 0.01 μg L⁻¹ 만큼 섭식하는 것으로 나타났다(Fig. 2b).

2) 남조류 제거 효율

어류 및 대형무척추동물에서 남조류의 제어효과는 엽

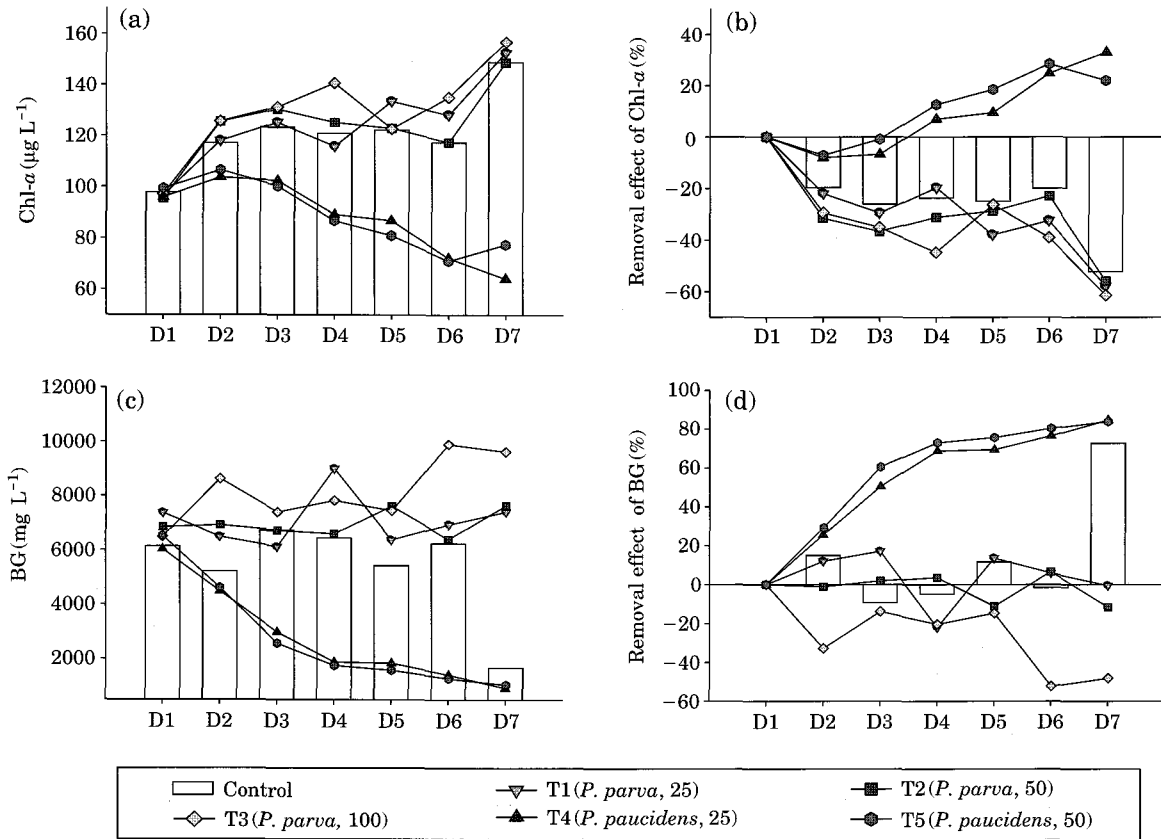


Fig. 1. The concentrations ($\mu\text{g L}^{-1}$) and removal effect (%) of Chl- α (a, b) and cyanobacteria (BG: c, d) in the control and five treatments (T1~T5) during day 1 (D1)~day 7 (D7).

록소(Chl- α)의 제거효율과 뚜렷한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 참붕어를 투여한 수조에서는 시간이 경과함에 따라 남조류의 단위면적당 세포수는 점진적으로 증가하였다. 참붕어의 남조류 제거 처리군은 개체수를 25, 50, 100으로 서로 달리 하였을 때 실험 최종일에 남조류의 단위 면적당 세포수는 T1, T2, T3에서 각각 7.4×10^3 , 7.7×10^3 , 9.6×10^3 cells mL^{-1} 로 나타나 초기의 평균 남조류의 단위면적당 세포수 6.6×10^3 cells mL^{-1} 보다 오히려 8.4×10^2 , 1.1×10^3 , 3.1×10^3 cells mL^{-1} 만큼 증가한 수치를 보여 어류에 의한 남조류 제거 효과를 관찰할 수 없었다. 또한 어류의 단위면적당 개체수가 증가함에 따라 남조류도 함께 증가하는 경향을 나타내었다. 한편, 줄새우를 투여한 수조에서는 시간이 경과함에 따라 남조류의 세포수가 점진적으로 감소하여 나타났다. 줄새우의 처리군의 개체수를 각각 25마리, 50마리로 서로 달리 하였을 때 실험 최종일 T4, T5의 남조류 단위면적당 세포수가 9.3×10^2 및 1.1×10^3 cells mL^{-1} 로 나타나 초기의 평균 남조류 단위면적당 세포수 6.6×10^3 cells mL^{-1} 보다 각각

뚜렷한 감소현상을 보여 대형무척추동물에 의한 남조류 제거 효과가 탁월하였다. 그러나, 실험 최종일에 대조군의 남조류의 집단 사멸로 인하여 대조군과 대비한 직접적 효과를 나타내지 못했다(Fig. 1c). 어류와 대형무척추동물에서 남조류 최종 제거율은 참붕어가 포함된 3개의 처리군의 개체수가 25, 50, 100개체로 증가함에 따라 -0.5, -12, -48%의 제거율을 보여 남조류가 오히려 증가함을 보였다. 한편, 줄새우의 개체수가 25마리, 50마리 증가함에 따라 85, 84%의 제거율을 보여(Fig. 1d). 줄새우에 의한 남조류 제거효율이 매우 높은 것으로 나타났다.

실험 기간동안 처리군의 생물 한 개체당 섭식한 남조류는 참붕어에 의한 섭식 효과가 전혀 나타나지 않았으므로 T1, T2, T3에서 각각 -1.6, -15.9, -31.3 cells mL^{-1} 으로 음의값들로 나타났다. 반면 T4, T5에 각각 204.8, 109.7 cells mL^{-1} 로 Chl- α 보다 더 뚜렷한 차이를 보였다, 하지만 T5는 T4에 비해 개체수를 두배로 많이 하였으나 T5에서 한개체당 섭식한 Chl- α 의 양이 더 낮게 나타났다.

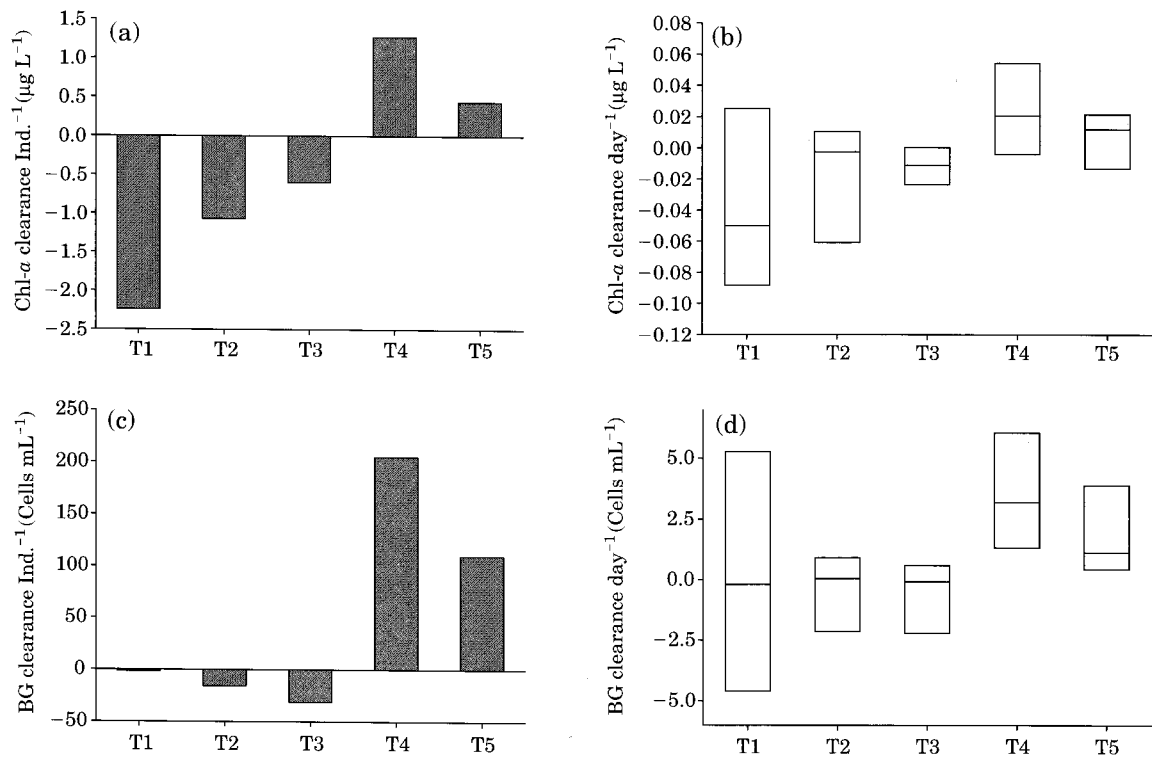


Fig. 2. The feeding volume of Chl- α (a) and cyanobacteria (c) per individual during 7 days in the five treatments (T1~T5) along with the feeding volume of Chl- α (b) and cyanobacteria (d) per day in the five treatments (T1~T5).

이 역시 단위 면적당 개체의 밀도가 높아 개체당 섭식 능력에 영향을 미쳐 T4의 수치가 더 높게 나타난 것으로 사료되었다 (Fig. 2c).

참붕어 처리군의 단위 L당, 개체의 일일 남조류 섭취량은 뚜렷한 경향 없이 평균값이 각각 -0.03, -0.26 및 -0.52 cells mL $^{-1}$ 음의 값을 보였다. 즉 참붕어에 의한 남조류 섭식효과는 거의 없는 것으로 나타났다. 하지만 줄새우 처리군의 남조류는 실험 초기에 많은 양의 남조류 섭식이 이루어지다가 점차 감소하는 경향을 보여 일일 평균 3.41, 1.83 cells mL $^{-1}$ 만큼 섭식하는 것으로 나타나 참붕어 처리군과 대조되었다 (Fig. 2d).

상기 연구를 종합해 볼 때, 어류 처리군의 조류 제어능은 이전에 다른 어종을 이용한 실험결과(안 등, 2007)와 동일하게 제어 효과가 전혀 없는 것으로 나타났다. 오히려 어류의 분뇨, 분비물에서 발생한 영양염류(질소 및 인)에 의해 식물성 플랑크톤이 급증한 것으로 사료된다. 반면, 줄새우에 의한 조류 제어 효과가 높게 나타났다. 특히 수체내 존재하는 일반 조류농도의 척도인 Chl- α 보다는 남조류의 제거 효율이 보다 탁월하게 나타났다. 또한 생물투입 초기에 다량의 조류를 섭식하다가 시간 경과함에 따라 섭식량이 점차 감소하는 것으로 나타났으며, 이

는 생물 섭식에 의한 조류의 감소 효과로 사료되었다. 그러나, 단위면적당 대상 생물의 개체수가 과다하면 오히려 생물들 간의 섭식능력에 영향을 미쳐 조류제어 효과가 낮아지는 것으로 보아 적정량의 생물이 투여해야 최대의 효과를 보일 것으로 사료되었다. 대형무척추동물 처리군의 탁도(Turbidity), 전기전도도(Conductivity)는 육안으로 관찰하여도 낮아졌음을 쉽게 알 수 있었다. 초기의 녹색빛을 띠던 물이 시간이 경과함에 따라 점진적으로 연한 갈색 빛으로 나타났으며, 수소이온농도(pH) 역시 소폭 증가하여 약 알카리성을 보였다. 본 연구에서는 실험실내에서 줄새우의 섭식에 의한 높은 조류 제거효과를 검증할 수 있었다. 다음단계의 향후 실험은 다양한 먹이원이 존재하며, 자연계의 물질순환 및 에너지 흐름에 대한 시험해 볼 수 있는 메소크즘(Mesocosm) 현장 실험을 통해 조류 제거 효과에 대한 실험이 필요할 것으로 사료되었다.

적 요

본 연구는 참붕어와 줄새우의 섭식에 의한 조류제어

효과를 평가하는 것으로 자연개체군의 조류를 채집하여 조류(Chl-*a*) 초기 농도를 95~100 mg L⁻¹로 고정하였으며, 각각의 실험용 수조에 10 L의 자연수와 대상생물을 투여하였다. 참붕어에 의한 조류제어 실험에서는 개체수 변이에 따른 섭식능력을 평가하기 위해 대조군(Control) 1개 및 처리군 3개(T1(25개체)), T2(50개체), T3(100개체))를 비교 평가하였고, 줄새우에 의한 조류제어 실험은 생물을 투여하지 않은 대조군 1개, T4(25개체) 및 T5(50개체)의 2개 처리군을 이용하였다. 본 생물조절 실험기간 동안 용존산소는 8.2~9.7 mg L⁻¹, 수소 이온농도는 7.2~8.8로 나타났다. 참붕어 처리군의 개체수 변이에 따른 T1, T2 및 T3에서 Chl-*a* 제거효과는 각각 -58, -56, -61%로 나타났으며, 남조류의 최종 제거효과는 -0.5, -12, -48%로 나타나 어류의 분뇨, 분비물에 의해 조류제어효과에 오히려 악영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편 줄새우에서 T4과 T5의 처리군에서 최종 Chl-*a* 제거효과는 각각 33, 22%로 나타났으며, 줄새우 한 개체당 엽록소 제거능은 T4 및 T5에서 각각 1.3 및 0.4 µg L⁻¹로 나타났다. 또한, 줄새우의 T4 및 T5에서 남조류 최종 제거효과는 85, 84%로 나타나 줄새우 한개체당 남조류를 평균 2.0×10² 및 1.1×10² cells mL⁻¹를 섭식하는 것으로 나타나 Chl-*a*보다 남조류 제거에 보다 더 탁월한 효과를 보였다. 본 생물조절에 의한 예비 실험 결과에 따르면, 줄새우에 의한 조류제거 효과가 탁월하여 향후 메조코즘 현장 적용에 의한 단계적 평가가 필요한 것으로 사료되었다.

사 사

본 연구는 농림부 핵심 전략 연구과제 “생물조절(먹이 연쇄)을 통한 농업용저수지 수질관리 기법개발”(306009-03-2-CG000)에 의해 수행되었음.

인 용 문 헌

김백호, 한명수, 최민규, 황수옥, 福島路生, 高村典子. 2001. 어류조작이 부영양호수의 플랑크톤군집 및 수질환경에 미치는 영향. 환경과학연구지 10: 1-7.
김범철, 김은경, 표동진, 박호동, 허우명. 1995. 국내 호수에서의

- 남조류 독소발생. 한국물환경학회지 11(3): 231-237.
김익수, 박종영. 2002. 한국의 민물고기. 교학사.
김호섭, 공동수, 황순진. 2004. 여과 섭식성 패류가 동·식물 플랑크톤군집에 미치는 영향. 육수지 37(3): 319-331.
농림부. 2005. 농업용 저수지의 녹조제어 기법개발. pp. 487-495.
박제철, 김동섭, 이승환. 2004. 금오지의 수환경 및 부영양화 평가. 한국환경과학회지 13(4): 389-401.
신재기, 조주래, 황순진, 조경제. 2000. 경안천~팔당호의 부영양화와 수질오염 특성. 육수지 33(4): 387-394.
안광국, 이상재, 이재연. 2007. 조류제거 효과에 대한 Top-down 어류조작 실험. 육수지 40(3): 431-438
윤춘경. 1998. 생물조절방법을 이용한 수심이 낮은 호소의 수질개선에 관한 고찰. 농자원개발논집 20: 81-92.
이광식, 윤경섭, 김형중, 김호일. 2003. 농업용 저수지의 부영양화와 수질관리방안. 한국환경농학회지 22(2): 166-171.
APHA. 1985. Standard methods for the examination of water and waste water. 16th ed. New York, American Public Health Association. pp. 1067-1072.
Bishop, C.T., E.F. Anet and P.R. Gorham. 1959. Isolation and identification of the fastdeath factor in *Microcystis aeruginosa* NRCL. *Can. J. Biochem. Physiol.* 37: 453-471.
Carmichael, W.W. 1988. Toxins of freshwater algae, In: Tu A. T. (ed). handbook of Natural Toxins. Marcel Dekker, New York. pp. 121-147.
DeMelo, R., R. France and D.J. McQueen. 1992. Biomani-pulation: Hit or myth?. *Limnol. Oceanogr.* 37: 192-207.
Prokopkin, I.G., V.G. Gubanov and M.I. Gladyshev. 2006. Modelling the effect of planktivorous fish removal in a reservoir on the biomass of cyanobacteria. *Ecol. Model.* 190(3-4): 419-431.
Hunt, R.J. and V.F. Matveev. 2005. The effects of nutrients and zooplankton community structure on phytoplankton growth in a subtropical Australian reservoir: An enclosure study. *Limnologia* 35(1-2): 90-101.
Zhang, Z., P. Xie, L. Hao, N. Guo, Y. Gong, X. Hu, J. Chen and G. Liang. 2006. Effects of the phytoplanktivorous silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) on plankton and the hepatotoxic microcystins in an enclosure experiment in a eutrophic lake, Lake Shichahai in Beijing. *Aquaculture* 257(1-4): 173-186.

(Manuscript received 31 December 2007,
Revision accepted 4 February 2008)