

부영양 저수지에서 국내 담수산 패류가 수질에 미치는 영향

황순진 · 박구성 · 백순기* · 김백호†

건국대학교 환경과학과

*동신대학교 환경공학과

Effects of Domestic Freshwater Shellfishes on the Water Quality in the Eutrophic Agricultural Reservoir

Soon-Jin Hwang · Ku-Sung Park · Soon-Ki Baik* · Baik-Ho Kim†

Department of Environmental Science, Konkuk University

*Department of Environmental Engineering, Dongshin University

(Received 10 November 2009, Revised 5 December 2009, Accepted 14 December 2009)

Abstract

Water quality and plankton community dynamics after the introduction of two domestic freshwater shellfishes (*Unio douglasiae* Griffith & Pidgeon and *Cipangoplaudina chinese malleata* Reeve), were monitored daily in enclosures, which constructed in the tidal zone of eutrophic agricultural reservoir (Shingu reservoir, Korea) for one week between July 31 and August 6, 2007. This biomanipulation study to improve the water quality of eutrophic lake, comprised eight enclosures (duplicate x four kinds), enclosure had no mussels (Control), stocked only with *U. douglasiae* at density of 60 individuals (UD), stocked only with *C. chinese malleata* at density of 60 individuals (CCM), and combined-stocked with 30 individuals of UD and 30 individuals of CCM (MIX), respectively. Our results clearly indicate that UD strongly decreased the concentration of chlorophyll-a and increased the water transparency, whereas CCM and MIX (included CCM) did increase algal density or decrease transparency, due perhaps to the disturbance of *C. chinese malleata*. Therefore, the field application of shellfish to enhance the water quality of eutrophic agricultural reservoir, should consider the grazing characteristics of biological control agents, especially active moving animals like snail.

keywords : Agricultural reservoir, *Cipangoplaudina chinensis malleata*, Eutrophic reservoir, Freshwater shellfish, *Unio douglasiae*, Water quality improvement

1. 서론

국내에 분포하는 18,000여개 크고 작은 저수지들은 대부분 수중내 유기물량이 지속적으로 증가하고 있으며, 전체의 72%는 중영양, 22%는 부영양 상태이다(농업기반공사, 2000, 2001, 2007). 호소 및 하천 등에서 서식하는 담수 패류는 강한 여과섭식능을 가지고 있어 오래 전부터 수중의 투명도 증가와 플랑크톤 감소 등과 같은 수질개선에 이용되어 왔다(McIvor, 2004; Osenberg, 1989; Soto and Mena, 1999; Weber and Lodge, 1990). 국내산 말조개(*Unio douglasiae* Griffith & Pidgeon)는 전국 대부분의 하천과 호소에 서식하며(권오길 등, 1993; 유종생, 1995), 수온, 용존 산소 및 유기물에 대한 내성이 강하고, 다른 패류에 비해 여과율이 높아 남조 *Microcystis aeruginosa*와 같은 유해조류 제어를 위한 기능생물로 이용되고 있다(박구성 등, 2008; 이연주 등, 2008). 한편, 논우렁이(*Cipangoplaudina*

chinensis malleata Reeve) 역시 대부분의 수계에 고르게 분포하는 토착종으로(권오길 등, 1993; 유종생, 1995), 비록 농약, 증급속 및 외래종 유입 등에 의해 그 개체수는 감소하였으나(박갑만 등, 1997), 높은 유기물 제어능을 가지고 있어 남조 또는 규조 제어에 이용되어 왔다(유영훈 등, 2008; 황순진 등, 2008). 두 종의 패류는 보통 같은 서식처를 공유하며 물고기의 산란처를 제공하거나 생물농약으로 이용되기 한다. 그러나 이들을 이용하여 현장 수질개선 연구를 시도한 사례는 극히 드물다. 지금까지 이들 패류에 관한 연구는 다양한 환경에서의 여과율 및 생존율 연구(김호섭 등, 2004; 박구성 등, 2008; 황순진 등, 2008)가 있으나, 서식처를 종종 공유하는 두 패류를 이용하여 수질개선에 동시에 적용한 사례는 보고된 바 없다. 따라서 본 연구는 부영양 저수지의 수질개선 가능성을 확인하고자 현장에 실험구조물을 설치하고 조류제어능이 뛰어난 말조개와 논우렁이의 단독 또는 혼합 처리한 다음 수질에 미치는 영향을 조사하였다.

† To whom correspondence should be addressed.
white-t@hanmail.net

2. 연구방법

2.1. 실험저수지 및 구조물

실험대상 저수지는 충청남도 보령시 주안면에 위치하는 신구지로서 표면적 0.0815 km², 최대수심 7.0 m, 평균수심 4 m, 저수량 3.88×10⁵ ton, 유역면적 2.55 km²의 농업 전용 저수지이다(김호섭 등, 2009). 수원은 주로 작은 마을, 농경지, 낮은 산에서 형성되며, 축산폐수와 농경지를 비롯한 낚시와 같은 레크레이션 활동으로 인하여 부영양화가 심화되었으며, 수질개선을 위한 준설 및 식물성 적용이 시도되었으나 여전히 매년 남조 대발생(cyanobacterial bloom)이 일어나고 있다(농업기반공사, 2001, 2007). 실험이 진행되었던 시기에도 남조 *Microcystis aeruginosa*가 전체 군집 생물량의 95% 이상을 차지하였다. 실험구조물은 접근이 용이한 저수지의 북서면 가장자리(수심 3 m)에 스테인레스 막대로 실험수계(2열×4행) 지지대를 만들고, 시료채취 및 보행을 위하여 부유재 위에 목재 발판을 제작하고 각 모서리를 닳으로 고정하였다. 각 실험수계는 PE Tarpaulin sheet로 바닥이 막힌 박스형(1.2×1.2×2.0 m)이며, 각 모서리는 스테인레스 봉으로 고정하고 수계 내부에 저수지 표층수를 양수기를 이용하여 1.5 m까지 채웠다. 실험수계의 설치기간은 실험 1주일 전(2007년 7월 24일)에 설치하여 실험종료 2일 후(2007년 8월 8일)에 철거하였다.

2.2. 패류채집 및 유기물량

실험에 사용된 국내산 담수 패류 말조개(*Unio douglasiae* Griffith & Pidgeon)와 논우렁이(*Cipangopauludina chinese malleata* Reeve)는 갈수기(2006년 11월 2007년 2월)시기에 금강하류(군산)에서 저인망 그물을 이용하거나 손으로 직접

채집하였다. 채집한 패류는 곧바로 실험실로 운반하여 탈염 수돗물로 2회 이상 세척한 후 자체 제작한 실험실에서 1개월 이상 순응시켰다. 순응도중 패각이 열려있거나 섭식활동이 현저히 떨어진 개체는 제거하였으며, 실험에는 건강상태가 양호한 개체만을 선별하여 사용하였으며, 실험 2일 전부터 아무런 먹이를 공급하지 않았다. 두 패류의 유기물량은 말조개(4~10 cm), 논우렁이(3~6 cm)의 각 패각길이와 중복되지 않도록 다양한 크기의 건강한 개체를 순응조에서 선별하여 패각을 제외한 나머지 부분만을 100°C에서 건조한 다음 무게를 측정하고(W1), 이를 다시 전기 가마(~1000°C, YUYU SCIENTIFIC MSG)에서 30분간 태운 다음 무게를 다시 측정하여(W2), 두 무게의 차이(W1-W2)를 패류의 유기물량으로 계산하였다. 실험에 사용된 패류의 유기물량은 실측된 패류의 패각길이와 유기물량과의 관계식을 이용하여 추정하였다(이연주 등, 2008; 황순진 등, 2008).

2.3. 실험디자인

실험은 패류를 넣지 않은 대조군(control), UD(말조개 41.2 indiv./ton), CCM(우렁이 41.2 indiv./ton), MIX(말조개 20.8 indiv./ton과 논우렁이 20.8 indiv./ton) 등 4가지로 구성하였다. 패류는 스테인레스 막대로 제작한 격자망(1 cm × 1 cm)에 각각 해당 밀도로 넣고, 실험수계 중앙부의 수심 50~60 cm 위치에 고정시켰다. 패류적용은 2007년 7월 31일~8월 6일까지 7일 동안 처리하였으며, 매일 동일한 시간(AM 11:00)에 현장 조사 및 각 실험수계 중심부에서 자체 제작한 원통형 아크릴 수직채수기(직경 × 길이, 10 cm × 100 cm)로 채수하여 실험실로 운반한 다음 수질 및 플랑

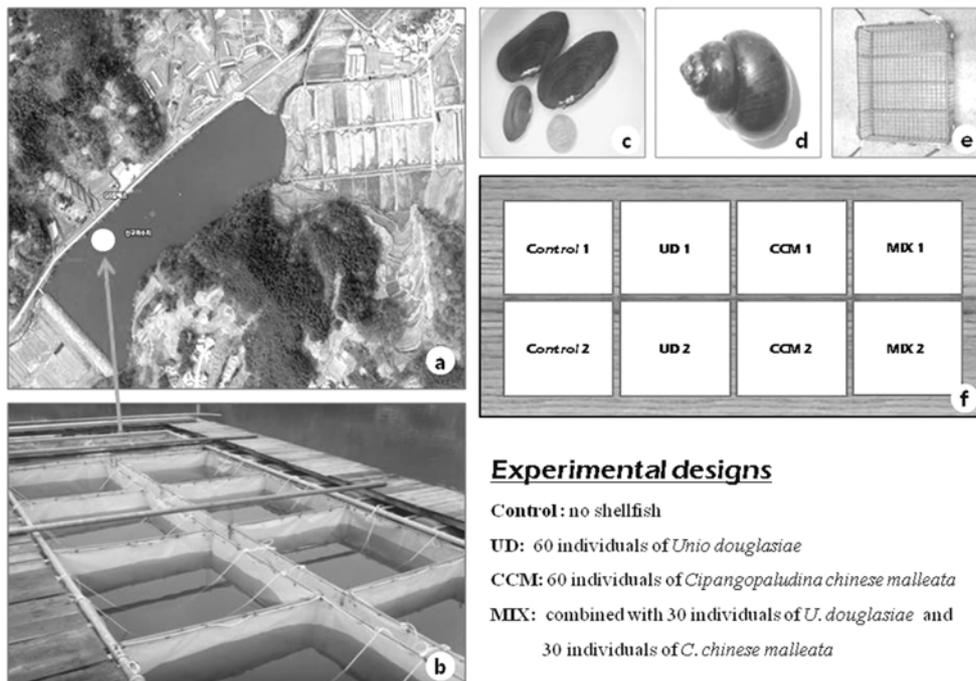


Fig. 1. Photos of the study reservoir (a) and enclosures (b). Two kinds of domestic freshwater shellfishes, *Unio douglasiae* Griffith & Pidgeon (c), *Cipangopaludina chinese malleata* Reeve (d) used in this study. A stainless steel lattice for stocking shellfish (e), and experimental designs (f).

Experimental designs

Control: no shellfish

UD: 60 individuals of *Unio douglasiae*

CCM: 60 individuals of *Cipangopaludina chinese malleata*

MIX: combined with 30 individuals of *U. douglasiae* and 30 individuals of *C. chinese malleata*

Table 1. Body length and ash-free dry-weight of the domestic freshwater shellfish used in the study

Experiments	Number of individuals	Length (mm)	AFDW (mg)	
UD	repl. 1	60	75.1±15.7	166.9±73.2
	repl. 2	60	75.6±16.0	169.6±76.8
CCM	repl. 1	60	43.4±3.5	276.9±46.2
	repl. 2	60	43.4±5.1	279.3±62.8
MIX	repl. 1	30 (UD)	75.7±17.2	171.3±83.5
		30 (CCM)	43.0±3.3	271.6±42.9
	repl. 2	30 (UD)	76.2±17.3	173.6±82.7
		30 (CCM)	43.9±3.4	283.2±45.5

AFDW: ash-free dry-weight

UD: enclosures stocked with *Unio douglasiae*CCM: enclosures stocked with *Cipangopaludina chinensis malleata*MIX: enclosures stocked with *U. douglasiae* and *C. chinensis malleata*

크톤 분석을 각각 실시하였다. 실험에 이용된 패류는 말조개의 경우, 패각길이 75~76 mm, 유기물 166~173 mg이었고, 논우렁이는 패각길이 43 mm, 유기물 271~283 mg의 범위였다(Table 1).

2.4. 생물 및 환경요인

패류의 단독 또는 혼합적용에 따른 수질 및 플랑크톤 군집의 변화를 파악하기 위하여 실험수계와 외부환경(저수지)의 수온, 전기전도도, 탁도, pH, 용존산소 등은 현장에서 다항목 수질측정기(YSI 6600 MDS, USA)로 직접 측정하였고 투명도는 Secchi disk를 이용하였다. Chl-*a*, 영양염, 동물-식물플랑크톤 등은 각 실험수계의 중심부에서 원통형 아크릴 수직채수기(10 cm × 100 cm)를 이용하여 채수한 다음 균일하게 혼합시키고 분석에 사용하였다. Chl-*a* 농도는 GF/F filter를 통하여 여과하고, 여과한 시료에 90% 아세트산을 첨가하여 냉암소에서 24시간 동안 추출한 후 흡광도를 측정하고, Lorenzen(1967)에 의하여 계산하였다. NO₂-N, NO₃-N는 각각 phenate, colorimetric 카드뮴환원법, NH₄-N는 indophenol법, 총질소는 과황산칼륨으로 분해한 후 카드뮴환원법을 이용하여 분석하였다(APHA, 1995). SRP는 ascorbic acid 법으로 발색시켜 흡광도를 측정하였고, 총인은 persulfate를 이용하여 인산염으로 산화시켜 ascorbic acid법으로 각각 측정하였다(APHA, 1995). 식물플랑크톤은 100 mL를 채취하여 Lugol 액으로 고정하고 균일하게 혼합시킨 다음 12시간 이상 정지시킨 후 Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 광학현미경(Axiostar plus, ZEISS, Germany)하에서 계수하였다. 동물플랑크톤은 최소 10 L 이상을 채수하여 동물플랑크톤 네트로(직경 64 μm) 여과하여 총 100 mL로 농축한 다음 중성 포르말린액으로 고정하였다. 고정된 시료는 그룹별로 구분하여 도립현미경(Olympus, Japan)에서 개체수를 산정하였다.

2.5. 자료분석

패류처리 이후 대조군과 처리군의 수질 및 생물요인의 차이를 비교하기 위하여 Turkey's THD test를 실시하였고,

각 요인들의 경시적 변화를 파악하기 위하여 PCA를 실시하였다. 분석은 SPSS(ver. 12.0 Korea) 소프트웨어를 이용하였고, 통계적 유의수준은 P < 0.05으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 환경요인 변동

실험기간 동안 수온은 26.4~29.3°C의 범위를 보였으며, 전체적으로 실험 3일 이후부터 점차적으로 감소하여 실험 종료일에는 실험시작일에 비해 약 2°C이상 낮았다(Fig. 2(a)). 전기전도도는 시간이 지남에 따라 지속적으로 감소하였으나 패류처리에 따라 MIX>CCM>UD 순으로 나타났다(Fig. 2(b)). 용존산소(DO)는 전기전도도와 반대 경향을 나타냈는데, MIX에서는 실험종료일에 4.1 mg/L(초기값의 약 25%)까지 감소한 반면 UD는 7.0 mg/L(초기값의 약 56%)를 유지하였다(Fig. 2(c)). 탁도는 실험초기에는 모든 실험군에서 감소하였으나 실험 4일째부터 UD에서만 뚜렷하게 감소하고 대조군을 포함한 나머지 실험군에서는 유지되거나 약간 증가하는 경향을 보였다(Fig. 2(d)). pH는 DO 패턴과 거의 유사하였는데, 모든 패류처리군에서 UD > CCM > MIX 순으로 나타났다. 흥미롭게도 MIX에서 실험 5일 이후에 외부환경보다 더 낮은 수준까지 감소하였다(Fig. 2(e)). 투명도는 전체적으로 탁도와 반대 패턴을 보였으며 실험초기에는 모든 실험군에서 증가하였다. UD에서는 패류처리 이후 급속하게 증가하여 최고치 1.0 m 투명도를 보였으며 CCM과 MIX는 실험종료일에는 대조군보다 오히려 더 감소하였고 MIX는 CCM보다 더 낮은 수준을 나타냈다(Fig. 2(f)).

일반적으로 조류제어능을 가지고 있는 기능성 생물을 현장에 직접 적용할 경우, 뚜렷한 투명도 증가, pH 및 용존산소의 감소를 유도한다(김백호 등, 2000; Fukushima et al., 2001; Kim et al., 2008). 본 연구에서 모든 패류 처리군에서 이와 동일한 현상을 보였으며 특히 말조개만 처리한 UD에서는 보다 분명하게 나타났다. 반면, 두 생물을 혼합한 말조개와 논우렁이를 혼합한 MIX의 경우 UD에 비해 심한 pH 및 용존산소 감소, 그리고 대조군보다 낮은 투명도 등 부정적인 효과를 나타냈으며, 논우렁이만 처리한 CCM은 UD와 MIX의 중정도 영향을 보였다. 이러한 결과는 실험수계에서 논우렁이가 말조개보다 운동성이 활발하여 교란인자로 작용했을 가능성을 예상할 수 있다. 황순진 등(2008)은 논우렁이의 조류 제어능은 특정 밀도 이상에서는 증가하지 않았으며, 이송희 등(2008)은 말조개와 논우렁이 혼합실험에서 말조개의 밀도가 증가할수록 높은 효과를 나타낸다고 보고하였다. 비록 선행 연구들은 모두 실내실험에서 얻은 결과이지만, 패류를 현장수에 직접 처리할 경우, 표층수의 운동, 패류의 먹이경쟁 및 운동성이 강한 논우렁이의 교란 등 부정적으로 작용했을 가능성이 예상된다. 따라서 규모가 크고 물 운동이 심한 대형 저수지를 대상으로 논우렁이의 적용은 부적절하다고 판단되며 소형 연못이나 습지 등과 같은 정수역에 적합할 것으로 판단되었다(Osenberg,

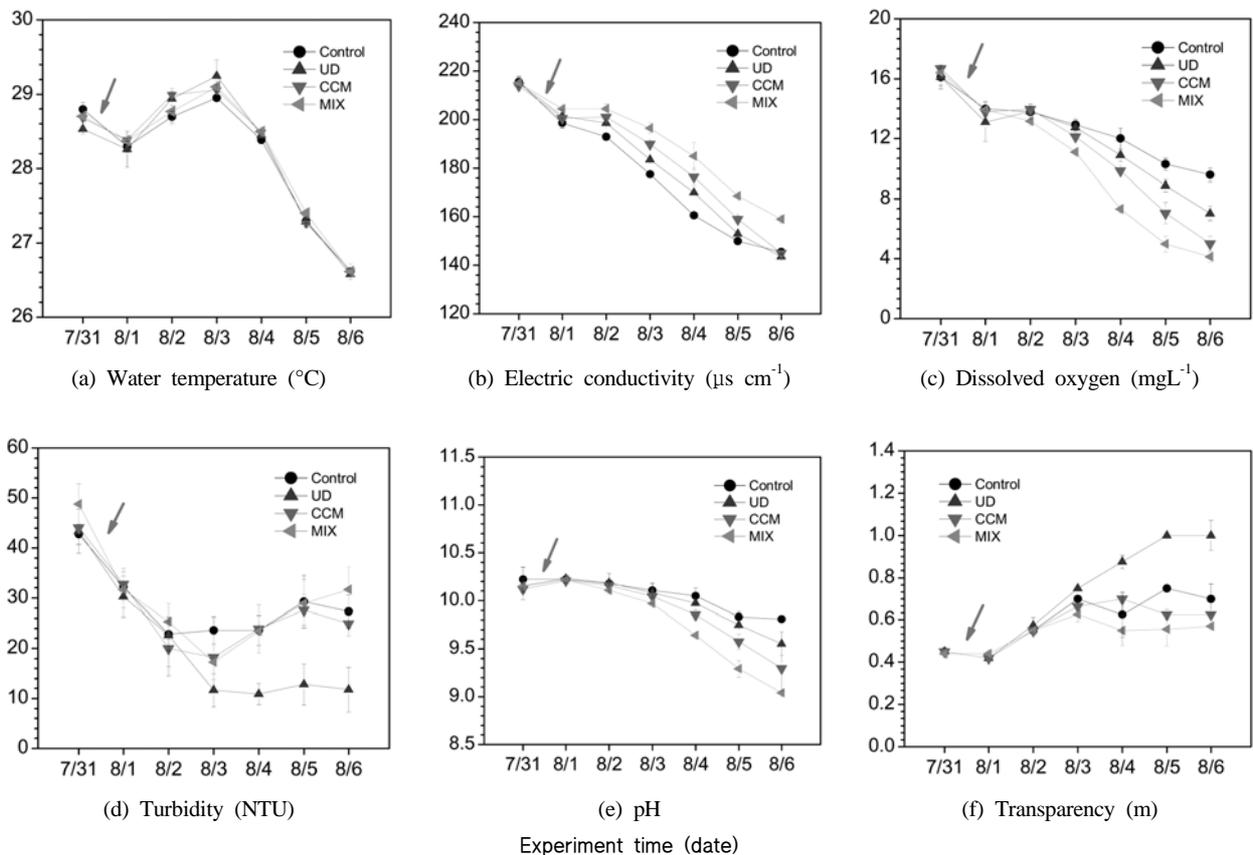


Fig. 2. Variation of physicochemical factors in the absence(Control) and presence of *Unio douglasiae* Griffith & Pidgeon(UD), *Cipangopaludina chinensis malleata* Reeve (CCM) and combined of two kinds of domestic freshwater shellfishes(MIX) for seven days. Arrow is the time of animal stocking.

1989; Weber and Lodge, 1990).

질산 및 아질산성 질소는 대조군 및 모든 패류 처리군에서 일정한 수준을 지속적으로 유지하였으나 MIX은 처리 4 일째부터 급격하게 증가하여 실험종료일에는 최고치(19.6 $\mu\text{g/L}$)를 나타냈으며, UD(2.4~3.6 $\mu\text{g/L}$)은 대조군과 비슷하거나 오히려 더 낮은 수준을 보였다(Fig. 3(a)). 암모니아성 질소는 실험기간 동안 대조군과 UD에서는 매우 낮은 농도를 보였으나 패류처리 4~5 일째부터 MIX와 CCM에서 급격하게 증가하였다. 특히 실험종료일에는 CCM은 최고치(67.8 $\mu\text{g/L}$)를 보여 논우렁이가 포함된 패류 처리군에서 높은 암모니아 배출이 일어남을 알 수 있었다(Fig. 3(b)). 총질소는 패류처리 4일째부터 MIX에서 뚜렷한 증가를 보인 반면, UD에서는 대조군과 비슷하거나 오히려 낮은 수준을 보였다(Fig. 3(c)). 인산성 인은 전체적으로 시간에 따라 모든 실험군에서 감소하는 경향을 나타냈으나 패류처리군과 대조군간의 유의한 차이는 보이지 않았다(Fig. 3(d)). 한편, 총인은 실험기간 동안 MIX에서만 패류처리 4일 이후 계속하여 다른 실험군보다 높은 수준을 보였으며, 대조군, UD, CCM 등은 뚜렷한 증감없이 비슷한 수준을 유지하였다(Fig. 3(e)).

지금까지 말조개나 논우렁이를 이용한 수질개선 실험은 주로 조류제어 - 투명도, 탁도, 염록소 등에 집중되어 왔으며, 배출되는 영양염에 대한 연구는 빈약한 편이다. 유영훈

등(2008)은 논우렁이는 여름보다 겨울철 현장수에 대하여 더 효과적이며, 이주환 등(2009)은 겨울철 현장수를 대상으로 한 CROM 연구에서 말조개 처리수내 용존유기물 농도가 시간에 따라 증가하였으나 크기가 비슷한 필조개에 비해 상대적으로 낮은 농도를 배출한다고 보고하였다. 본 연구에서 UD는 다른 CCM, MIX에 비해 상대적으로 낮은 영양염을 배출하였으며, 대조군과 비슷하거나 질소의 경우 오히려 대조군보다 더 낮은 수준을 보이기도 하였다. 특히 패류폐사와 밀접한 관련을 갖는 암모니아의 농도는 CCM, MIX보다 뚜렷하게 낮은 수준을 보여 추후 현장에 직접 적용한다면 말조개 단독처리가 적합할 것으로 판단되었다. 다만 기존의 CROM 연구에서(김백호 등, 2009; 이주환 등, 2009) 말조개 역시 높은 암모니아 배출이 일어난 것은 1차적으로 패류의 처리밀도에 의한 영향으로 판단되는 바, CROM에서 사용한 말조개 밀도는 본 연구의 20배 이상 높은 것으로서 동반되는 높은 암모니아 배출에 따른 사망률 역시 매우 높게 나타났다. 한편, CCM과 MIX에서와 같이 논우렁이가 포함된 처리군에서 높은 영양염 배출이 일어난 현상은 본 연구만으로는 정확하게 설명하기 어렵다. 다만 앞에서 기술한 바와 같이 논우렁이의 경우, 배설물 고형화(solidification)가 말조개보다 것보다 더 약해 배출된 후 곧바로 현장수에 의해 해리되거나 말조개의 호흡시 강하게

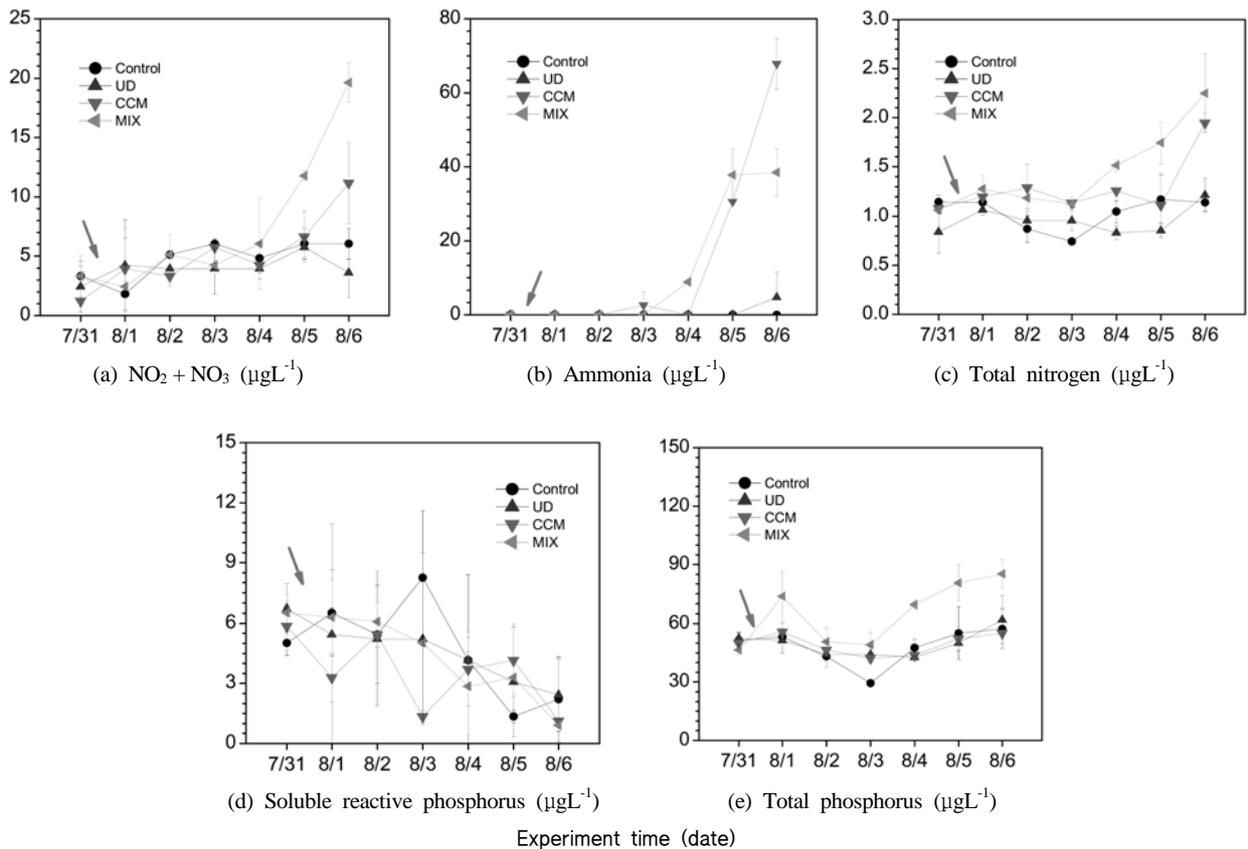


Fig. 3. Variation of nutrients (nitrogen and phosphate) in the absence (Control) and presence of *Unio douglasiae* Griffith & Pidgeon (UD), *Cipangopaludina chinensis malleata* Reeve (CCM) and combined of two kinds of domestic freshwater shellfishes (MIX) for seven days. Arrow is the time of animal stocking.

분출하는 출수에 의해 수중으로 분산되었을 가능성 등을 예상할 수 있다. 결국 서로 다른 배설물 특성이나 상호 교란이 존재하는 두 패류의 혼합적용보다 운동성이 적고 배설물의 해리가 비교적 적은 말조개의 단독처리가 수질개선에는 보다 적합할 것으로 판단되었다.

3.2. 생물요인 변동

패류처리 이후 Chl-a 농도는 UD에서만 뚜렷하게 감소하였으며, MIX에서는 오히려 증가하였으며 CCM은 대조군과 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 4(a)). 특히 UD에서는 처리 2일째부터 실험종료일까지 40 µg/L 수준에서 지속적으로 억제된 반면, 나머지 실험군들은 증가 또는 감소를 반복하는 특징을 보였다. 남조류(특히 *Microcystis aeruginosa*)가 90% 이상 우점하였던 식물플랑크톤 밀도는 Chl-a의 패턴과는 다소 차이를 보였는데 모든 패류처리군에서는 대조군보다 뚜렷하게 감소하였다(Fig. 4(b)). 특히 UD에서는 실험종료일까지 지속적으로 감소한 반면 CCM과 MIX에서는 1.8×10^5 cell/mL 이하로는 더 이상 감소하지 않았다. 한편, 동물플랑크톤은 패류처리에 대한 효과가 뚜렷하지 않았는데 MIX에서는 처리 이후 오히려 지속적으로 높은 밀도를 보이다가 실험종료일에는 다시 대조군보다 낮은 밀도를 나타냈다(Fig. 4(c)). 또한 높은 조류제어를 보였던 UD에서는 처리 4일째부터, CCM은 처리 5일째부터 각각 대조군보다

더 낮은 동물플랑크톤 밀도를 나타냈다.

전체적으로 패류처리 이후 논우렁이 단독 또는 논우렁이가 포함된 혼합적용은 Chl-a 제어에는 적절하지 않은 것으로 나타났다. 식물플랑크톤 밀도의 경우, Chl-a 변화와는 다소 차이를 보였는데 UD에서는 두 요인 모두 억제되었으나 식물플랑크톤 감소가 보다 뚜렷하였다. 다만, CCM과 MIX에서 대조군과 비슷한 조류밀도, 대조군보다 높은 Chl-a 등은 부분적이거나 패류처리 기간 동안 식물플랑크톤의 종 조성 변화 - 논우렁이 또는 논우렁이를 포함한 처리군에서 점차적인 녹조 및 규조 밀도 증가 등과 같은 종천이가 기여했을 것으로 판단된다(유영훈 등, 2008; 황순진 등, 2008). 다만 패류처리이후 수중에 증가되는 용존물질 - 암모니아, 인산, 질산(Gardner et al., 1995; Heath et al., 1995; Holland, 1993; Johengen et al., 1995; Yamamuro and Koike, 1993)이 패류중에 따라 혹은 새로운 조류성장에 어떠한 영향을 주는지 추가적인 연구가 필요하다.

3.3. 패류적용의 영향

패류처리 조건에서의 시간변화에 따른 환경인자 농도를 이용한 PCA 분석결과, 각 패류처리 조건 및 시간에 따른 변화가 뚜렷하게 나타났으며 Ordination의 두 축은 전체 분산의 81.9%의 설명력을 보였다(고유치: 5.847 for Axis 1; 고유치: 2.342 for Axis 2; Fig. 5). 실험초기인 7월 31일의

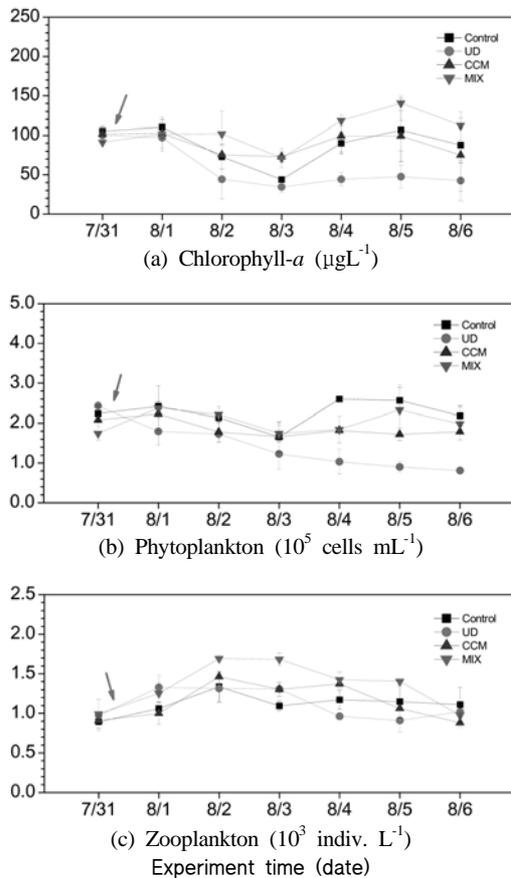


Fig. 4. Variation of chlorophyll-*a* concentration (a), and density of phytoplankton (b) and zooplankton (c) in the absence (Control) and presence of *Unio douglasiae* Griffith & Pidgeon (UD), *Cipangopaludina chinensis malleata* Reeve (CCM) and combined of two kinds of domestic freshwater shellfishes (MIX) for seven days. Arrow is the time of animal stocking.

실험군(Con_1, UD_1, CCM_1, MIX_1)은 모두 Axis 1의 왼쪽에 분포하였으나 시간이 변화함에 따라 점차 이동하여 8월 6일(Con_7, UD_7, CCM_7, MIX_7)에는 모두 오른쪽에 분포하였다. 특히 온도, pH, DO, 전도도, NTU, PO₄는 실험말기 Axis 1의 왼쪽에서 높았으며, SD, TN, TP, NO₂ + NO₃ 등은 실험말기 Axis 1의 오른쪽에서 각각 높게 나타났다. 또한 ordination 상에서 각 패류처리군 및 시간변화에 따른 차이가 뚜렷하게 나타났다. 실험말기의 UD는 주로 Axis 2의 위쪽에 위치하였으며 MIX는 Axis 2의 아래쪽에 위치하였고 대조군과 CCM은 이들의 중간에 각각 위치하였다. 특히 TN 농도는 MIX(1.5±0.2 mg/L)에서 가장 높았으며 UD에서 가장 낮았다(0.9±0.0 mg/L) (Turkey's THD test, *p* < 0.05, Table 2). TP 농도 역시 MIX에서(65.0±6.1 μg/L) 가장 높은 높았으며, 나머지 세 조건들 간에는 유의한 차이가 없었다(Turkey's THD test, *p* > 0.05, Table 2). 한편 ordination 축과 각 처리조건에서의 생물인자들의 관계는 ordination 상의 선의 길이와 방향으로 나타냈는데 UD에서는 식물플랑크톤 밀도(1.42±0.2×10⁵ cells/mL)와 Chl-*a* 농도(58.5±10.4 μg/L)가 가장 낮은 반면 MIX에서는 가장 높은 식물플랑크톤 밀도(2.0±0.1×10⁵ cells/mL)와 Chl-*a* 농도(105.3±8.2 μg/L)를 나타냈다(Turkey's THD test, *p* < 0.05, Table 2). 이러한 결과는 말조개의 단독처리가 논우렁이 또는 논우렁이를 포함한 패류처리군보다 조류 및 Chl-*a* 제어에 효과적이며, 특히 상대적으로 낮은 영양염 배출은 수질 개선(투명도 증가)보다 더 긍정적인 효과로 해석되었다.

4. 결론

부영양 저수지의 생태공학적 수질개선을 위하여 남조류가 번성하였던 2007년 7월 31일~8월 6일까지 7일 동안 국

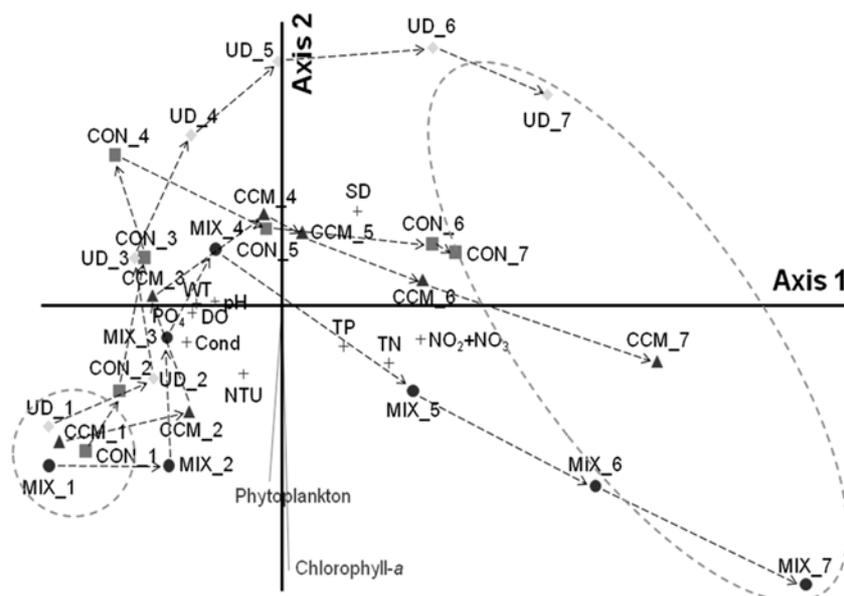


Fig. 5. PCA ordination of physicochemical parameters at each enclosure with the study time (i.e. UD_1 → UD_7) in the absence (Control) and presence of *Unio douglasiae* Griffith & Pidgeon (UD), *Cipangopaludina chinensis malleata* Reeve (CCM) and combined of two kinds of domestic freshwater shellfishes (MIX) for seven days.

Table 2. Environmental parameters at each enclosure following the introduction of two kinds of domestic freshwater shellfish for 7 days between July 31 and August 6, 2007

Parameters	Control	UD	CCM	MIX	F	P
Water temperature (°C)	28.1±0.3	28.2±0.4	28.2±0.3	28.2±0.3	0.007	0.999
pH	10.1±0.1	10.0±0.1	9.9±0.1	9.8±0.2	1.016	0.403
Dissolve oxygen (mg/L)	12.7±0.9	11.8±1.2	11.2±1.6	10.1±1.8	0.582	0.633
Conductivity (µg/L)	177.2±10.0	180.7±10.0	183.7±9.4	190.4±7.8	0.361	0.781
Turbidity (NTU)	28.8±2.7	20.5±4.7	27.4±3.3	29.6±3.7	1.273	0.306
Transparency (m)	0.6±0.0	0.7±0.1	0.6±0.0	0.5±0.0	2.013	0.139
NO ₂ +NO ₃ (µg/L)	4.8±0.6	4.0±0.4	5.2±1.2	7.5±2.3	1.261	0.310
NH ₄ (µg/L)	0.0±0.0	0.7±0.7	14.4±9.9	12.2±6.8	1.578	0.221
Total nitrogen (mg/L)	1.0±0.1 ^{a,b}	0.9±0.1 ^a	1.3±0.1 ^{a,b}	1.5±0.2 ^b	4.542	0.012
Soluble reactive phosphorus (µg/L)	4.7±0.9	4.6±0.6	3.6±0.7	4.4±0.8	0.481	0.699
Total phosphorus (µg/L)	48.2±3.6 ^a	49.5±2.5 ^a	49.3±2.0 ^a	65.0±6.1 ^b	4.280	0.015
Chlorophyll-a (µg/L)	88.1±8.9 ^{a,b}	58.5±10.4 ^a	89.4±5.3 ^{a,b}	105.3±8.2 ^b	5.378	0.006
Phytoplankton (10 ⁵ cells/mL)	2.25±0.1 ^b	1.42±0.2 ^a	1.87±0.1 ^{a,b}	2.0±0.1 ^b	6.215	0.003
Zooplankton (10 ³ indiv./L)	1.13±0.0	1.1±0.0	1.14±0.0	1.34±0.1	1.595	0.217

UD: enclosures stocked with *Unio douglasiae*

CCM: enclosures stocked with *Cipangopaludina chinensis malleata*

MIX: enclosures stocked with *U. douglasiae* and *C. chinensis malleata*

Small bold letters (a and b) indicate significant differences by analysis of Turkey's THD test ($P < 0.05$)

내산 패류(논우렁이, 말조개)를 단독 또는 혼합 적용하고 수질개선 가능성을 조사하였다. 실험은 농업용 부영양 저수지 연안에 실험수계를 설치하고 대조군, 말조개 처리군(UD), 논우렁이 처리군(CCM), 혼합처리군(MIX)로 구성하여 각각 2회씩 반복 실시하였다. 환경 및 생물요인 변화를 파악하기 위하여 현장 및 실내에서 수온, pH, 전도도, 용존 산소, 투명도, 영양염, 동물 및 식물플랑크톤 등을 각각 분석하였다. 패류처리군 중 UD에서 가장 뚜렷한 수질개선 효과(투명도 증가, 조류 및 엽록소 감소, 낮은 영양염 배출)를 보인 반면, 두 패류를 혼합한 MIX에서는 부정적인 효과(조류밀도 증가, 높은 영양염 배출)를 나타냈다. 한편 CCM에서는 두 처리군의 중간적 효과를 보였으나 높은 교란작용으로 인하여 현장 적용 가능성은 비교적 낮았다. 결국, 두 가지 이상의 기능성 생물을 동시에 이용하는 수질 개선은 오히려 단독적용보다 부정적인 효과를 야기할 수 있으므로 섭취특성이 비슷한 새로운 생물 개발 및 처리기법에 대한 추가적인 연구가 요구되었다.

사 사

본 연구는 학술진흥재단 기초연구과제(KRF-2008-313-D00587)와 농림부 핵심전략 연구과제(306009-03-2-CG000)에 의하여 수행되었으며, 현장 실험을 도와준 박명환, 김난영, 김진희, 유영훈, 이송희, 윤성애, 그리고 자료분석에 도움을 주신 권용수 님에게 감사드립니다.

참고문헌

권오길, 박갑만, 이준상(1993). *원색 한국패류도감*. 아카데미서적.

김백호, 최민규, 황수옥, 高村典子(2000). 부영양호의 enclosure 내에서 어류의 밀도조절이 수질 및 플랑크톤 군집에 미치는 영향. *한국유수학회지*, **33**, pp. 358-365.

김백호, 이주환, 김용재, 황수옥, 황순진(2009). 포천천 수질 개선을 위한 패류의 이용: 하천형 유기물제어(S-CROM) 기술의 적용. *한국하천호수학회지*, **42**, pp. 317-320.

김호섭, 공동수, 황순진(2004). 여과 섭식성 패류가 동식물 플랑크톤군집에 미치는 영향. *한국유수학회지*, **37**, pp. 319-331.

김호섭, 황순진, 공동수(2009). 얇은 부영양저수지에서의 식물 플랑크톤 성장 역학. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(5), pp. 550-555.

농업기반공사(2000). *농업용수 수질오염원 조사 종합보고서*.

농업기반공사(2001). *농업용수 수질측정망 조사보고서*.

농업기반공사(2007). *효율적인 농업용 저수지 용수확보 및 이용방안 연구*.

박갑만, 정영현, 김재진, 정평림(1997). 한국산 논우렁이와 큰논우렁이의 28S rDNA 유전자 염기서열 분석. *한국패류학회지*, **13**, pp. 91-96.

박구성, 김백호, 엄한용, 황순진(2008). 남조류 대발생 환경에서 수심과 용존산소 변화에 따른 담수산 이매패(말조개)의 생존율, 여과율 및 배설물 생산. *한국하천호수학회지*, **41**, pp. 50-60.

유영훈, 김백호, 황순진(2008). 저온기 부영양 수계의 규조 발생에 대한 한국산 논우렁이의 섭식특성. *한국하천호수학회지*, **41**, pp. 338-347.

유종생(1995). *원색 한국패류도감*. 일지사.

이송희, 황순진, 김백호(2008). 저온기 규조 발생억제를 위한 패류의 혼합적용. *한국하천호수학회지*, **41**, pp. 402-411.

이연주, 김백호, 김난영, 엄한용, 황순진(2008). 수온, 먹이농도, 패각 크기가 *Microcystis aeruginosa*에 대한 말조개의 여과율 및 배설물 생산에 미치는 영향. *한국하천호수학회지*, **41**, pp. 61-67.

이주환, 황순진, 박선구, 황수옥, 유춘만, 김백호(2009). CROM를 이용한 부영양 저수지의 유기물 제어: 이매패의 종 특이성에 대하여. *한국하천호수학회지*, **42**, pp. 350-363.

- 황순진, 전미진, 김난영, 김백호(2008). 한국산 논우렁이의 유해조류 섭식을 및 배설물 생산. *한국하천호수학회지*, **41**, pp. 77-85.
- APHA(1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th ed., APHA-AWWA-WEF, Washington D.C. USA.
- Fukushima, M., Takamura, N., Kim, B. H., Nakagawa, M., Sun, L., and Zheng, Y. (2001). The responses of an aquatic ecosystem to the manipulation of the filter-feeding silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*). *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, **27**, pp. 1-7.
- Gardner, W. S., Cavaletto, J. F., Johengen, T. H., Johnson, J. R., Heath, R. T., and Cotner, J. B. (1995). Effects of the zebra mussel, *Dreissena polymorpha*, on community nitrogen dynamics in Saginaw Bay, Lake Huron. *J. Great Lakes Res.*, **21**, pp. 529-544.
- Heath, R. T., Fahnenstiel, G. L., Gardner, W. S., Cavaletto, J. F., and Hwang, S. J. (1995). Ecosystem-level effects of zebra mussel (*Dreissena polymorpha*): An enclosure experiment in Saginaw Bay, Lake Huron. *J. Great Lakes Res.*, **21**, pp. 501-516.
- Holland, R. E. (1993). Changes in plankton diatoms and water transparency in Hatchery Bay, Bass Island area, western Lake Erie since the establishment of the zebra mussel. *J. Great Lakes Res.*, **19**, pp. 617-624.
- Johengen, T. H., Nalepa, T. F., Fahnenstiel, G. L., and Goudy, G. (1995). Nutrient changes in Saginaw Bay, Lake Huron, after the establishment of the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*). *J. Great Lakes Res.*, **21**, pp. 449-464.
- Kim, B. H., Sang, M., Hwang, S. J., and Han, M. S. (2008). *In situ* bacterial mitigation of the toxic cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*: implications for biological bloom control. *Limnol. Oceanogr. : methods*, **6**, pp. 513-522.
- Lorenzen, C. J. (1967). Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanogr.*, **12**, pp. 343-346.
- Mclvor, A. L. (2004). *Freshwater Mussels as Biofilters*. Ph.D. thesis. Pembroke college.
- Osenberg, C. W. (1989). Resource limitation, competition and the influence of life history in a freshwater snail community. *Oecologia*, **79**, pp. 512-519.
- Soto, D. and Mena, G. (1999). Filter feeding by the freshwater mussel, *Diplodon chilensis*, as a biocontrol of salmon farming eutrophication. *Aquaculture*, **171**, pp. 63-81.
- Weber, L. M. and Lodge, D. M. (1990). Periphytic food and predatory crayfish: relative roles in determining snail distribution. *Oecologia*, **82**, pp. 33-39.
- Yamamuro, M. and Koike, I. (1993). Nitrogen metabolism of the filter-feeding bivalve *Corbicula japonica* and its significance in primary production of a brackish lake in Japan. *Limnol. Oceanogr.*, **38**, pp. 997-1007.