

대형 수생생물에 의한 수질개선 기법

Water Quality Improvement Techniques by aquatic macroorganisms

공동수, 양상용, 황동진, 류홍일, 류재근
(국립환경연구원)

Kong, D.S., S.Y. Yang, D.J. Hwang, H.I. Rhu, J.K. Ryu
(National Institute of Environmental Research)

ABSTRACT

Biological techniques by aquatic macroanimals to improve water quality may be classified overallly as three types. The first is to use aquatic plants for nutrient removal, the second is to use grass fish to control algae or aquatic plant, and the third is to modify trophostructure by using top-consumer to control algae(top-down effect). This paper includes a general review on above-mentioned techniques, some experimental or field-based results, and some discussion on Korean status and prospect on this part.

I. Introduction

수중 생태계에서 대형생물은 수생관속식물과 같은 생산자에서 고차 영양 단계의 어류에 이르기 까지 다양한 영양단계를 점하고 있으며, 이들은 환경 요인의 작용에 의해 생육이 조절되는 피동적 측면과 아울러 생물 자체의 반 작용에 의해 환경을 변화시키는 능동적 측면을 함께 지니고 있다. 수질환경에 대한 대형생물의 능동적 측면은 일찍부터 자연정화의 하나로서 인식되어져 왔으나 이러한 기능을 인위적으로 극대화하려는 시도는 비교적 최근에 이르러서야 구체화된 경향이 있다. 대형생물에 의한 수질변화 특히 수질개선에 대한 연구는 크게 세가지 대분야로 나뉘어 이루어지고 있다. 첫째는 수생관속식물에 의한 영양염류 관리로서, 이는 부영양화 원인물질인 질소 및 인에 대한 종래의 기계적 고도처리 시스템이 가지는 운영비 문제점을 보완키 위해 최근에 들어 재부상되고 있는 자연정화 방법의 하나이다. 둘째는 생산자인 수초 및 조류를 섭식하는 초어류를 이용한 생산자 관리로서, 부영양화에 의해 생산성이 커져 이수상의 각종장해를 일으키는 조류 및 수생식물을 초어, 백련어 등의 초식성 어류를 이용하여 직접 섭식관리하는 방법이다. 셋째는 고차 소비자인 육식어류를 이용해 영양단계의 구조를 변화시켜 조류 현존량을 감소시키는 생물조작(Biomanipulation중 top-down force에 중점)을 들 수 있다.

이상의 방법은 폐·하수 처리장 뿐만아니라 하천 및 호수 현장에서 적용될 수 있는 방법으로 국내에도 수생식물에 의한 오수처리 및 호수 현장적용, 공공수역에 대한 초어 및 백련어의 방류, 배스와 같은 고차 육식어종이나 블루우길과 같은 플랑크톤성 어종의 방류가 이루어져 왔으나 대부분 그 효율성 및 생태계적 영향에 대한 전문적인 지식과 검토 없이 이루어진 것이 대부분이다. 따라서 차후 이 분야의 국내연구에 대한 작은 시작으로 그 동안 저자들의 조사결과와 국내의 상황 및 연구결과를 종합 검토하여 정리하였다.

II. Materials and Methods

1. Nutrient removal and algae control by aquatic plant

각 대상식물에 대해 수조나 야외실험지에서 환경요인의 영향과 영양물질 흡수능을 조사하였으며, 팔당호내 각 지역을 선정하여 지주식 그물망 혹은 부상식그물망을 조성하고 '92 ~ '93년에 걸쳐 현장적용 실험을 실시하였다.

부레옥잠의 비료화는 식물체를 5cm 내외의 크기로 절단한 후 알칼리첨가제(CaO-수분 : 90%이상)를 식물 무게의 10% 정도로 첨가한 후 안정화 과정의 비료화 성분 및 증금속 성분을 조사하였다.

2. Biological control of producer by fishes or zooplankton

(1) Biological control of aquatic macrophytes by grass fish

실험지(면적 9m², 수심 1m)에 초어와 일정량의 식물을 투여한 후 잔여량을 측정하여 단일 식물종에 대한 초어의 섭식능을 조사하였다. 수초는 뿌리부분을 제거하여 투입하였으며 실험중 연속해서 신선한 수초로 대체하였다.

같은 실험지내에 수면하 20cm, 수면 상부 20cm의 격자형 그물실험조(1m¹x1m¹x0.8m⁰)를 분리 설치하여 수초를 투입한 후, 격자망 하부에서 초어가 자유로이 유평토록 하여 수초에 대한 선택적 섭식능을 조사하였다.

초어 크기별 섭식율은 실험조(9m², 수심 0.8m)를 구경 1cm 그물망을 이용, 2개 실험조로 분할한 후 초어 크기별로 투입하여 조사하였다.

(2) Biological control of algae by grass fish

야외 수생식물실험지(수면적 890m², 평균 수심 0.5~1m)에 가두리 망(면적 296m²)을 설치하고, 전장 30-36cm, 평균체중 326~370 gWW의 백련어 40미를 방양한 후 수질 및 조류 종조성의 변화를 조사하였다. 백련어의 체중변화는 Gillnet를 이용하여 2회 포획한 후 측정하였다.

(3) Biological control of algae by zooplankton

2L의 비이커를 사용하여 *Daphnia magna*를 100마리/L, 400마리/L가 되도록 이식하고 15, 20, 25℃의 조건에서 정치배양하여 수질변화를 조사하였다.

3. Control of trophic levels(Biomanipulation)

체류시간 20일의 실험지(용량 36.0m³, 수심 1.53m)에 NaNO₃로서 질산성 질소를 3.6 g/일, KH₂PO₄로서 인산염인을 0.36 g/일로 공급하면서, 금붕어를 각각 210개체/pond 및 2,100개체/pond의 밀도로 투입하고 수질 및 생물 현존량을 조사하였다. 입자성물질의 침전속도는 실린더형 침전병(높

이 25cm, 내경지름 5.2cm)으로 측정하였으며, 침전물의 분해율은 5L polycarbonate bottle로 25°C 항온에서 40일간 조사하였다.

III. Results and discussion

1. Nutrient removal and algae control by aquatic plant

국내에서는 부레옥잠이 골프장의 오수처리(광주 뉴서울컨트리 클럽), 양어장의 순환수처리(함안 틸라피아 양어장), 축산폐수처리(전남 보성군 농촌지도소), 잠사공장 폐수처리 등에 적용되어 왔으며 호소의 직접정화로는 저자 등에 의해 팔당호를 대상으로 적용된 바 있다(국립환경연구원, 1992, 1993).

(1) Application of aquatic plant in treatment plants

수처리를 위해 적용되는 식물은 미나리 등의 습생식물에서 비롯하여 정수식물의 갈대(de Jong, 1976; Wathugalea, 1987; 細見, 1988)와 부들류(Spangler, 1976), 부수식물의 부레옥잠이나 개구리밥에 이르기까지 다양한 생활형의 식물등이 이용되어 왔다. 특히 부레옥잠은 탁월한 정화능력을 가지고 있어(표 1) 국내외에서 가장 많은 연구가 진행된 종류이다.

표 1. 국내산 수생식물종의 정화능력 및 이용 효율성

	水生植物種		정수식물		부엽식물		침수식물		부표식물		
	1차 요구 항목	2차 요구 항목	달뿌리풀	줄 부들	마름	어리연꽃	가래	검정말	증개구리밥	부레옥잠	
수질정화에 적합한 수생식물	영양염을 흡수 영양염을 많이 흡수	밀생균락 형성	○	○	○	△	X	X	△	X	○
		N, P 함량 높다	△	△	△	○	○	○	○	○	○
		증식배가시간 짧다	X	X	X	X	X	X	X	○	△
재배 가능	지하경이 작다	지하경이 작다	X	X	X	△	△	△	△	○	○
		내한성이 크다	△	△	△	△	△	△	△	△	△
수집 용이	수송 용이	서식 수심 낮다	△	△	△	X	X	X	X	○	○
		수분함량 낮다	○	△	△	△	X	X	X	X	X
이용 가능	연료, 비료, 사료 등	연료, 비료, 사료 등	○	△	△	△	△	△	△	○	○

○ 양호 △ 보통 X 불량

부레옥잠은 열대 및 아열대 지역에서 번성하는 다년생 수초로 우리나라에서는 자연생육이 봄에서 가을철로 제한된다. 저자등의 연구를 포함해 많은 연구에서 부레옥잠의 생육 최적수온은 25~28°C, 최저수온은 10°C, 최저 흡수 활성수온은 15°C내외에 있다(Reddy and Sutton, 1984; 橋本, 1984; 津野, 1990; 국립환경연구원, 1991, 1992, 1993). 16°C 이상의 조건에서 부레옥잠 성장능의 온도활성계수는 1.1~1.3으로 나타나, 활성슬지나 푼기라군 및 살수여상 처리에 비해 온도 의존성이 큰 것으로 판단된다.

부레옥잠은 산성조건에 비해 알칼리 조건에서 더 큰 영향을 받는데 최적 pH는 7부근으로 pH 5~7의 조건에서는 생육에 큰 지장이 없으며(변 등, 1985; 국립환경연구원, 1992), 부레옥잠 성장에 대한 pH 임계점은 산성조건에서 4, 알칼리 조건에서 9 정도다.

부레옥잠은 중금속에 대해 어느정도의 처리효과를 가지나 Cd, Cu의 경우 25 mg/l 이상의 조건에서는 오히려 식물체의 폐사가 나타나(변 등, 1985) 산업폐수의 원수에는 전처리 후에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

부레옥잠의 성장율과 영양염류 농도는 뚜렷한 Michaelis-Menten 관계식을 따르는데, 약 20°C의 조건에서 10gDW의 체중량을 가진 부레옥잠의 최대 비증식속도는 0.351/day, 인의 반포화정수는 0.95 mg/l이었다. 인의 최대비제거속도는 2.45 mgP/gDW/day, 반포화정수는 1.05 mg/l로, 津野 등(1990)의 각각 2.1 mgP/gDW/day, 0.90 mg/l와 비슷한 수준이다.

부레옥잠의 성장은 재배조의 영양염류 조성에도 영향을 받는데 식물체의 N:P비는 재배지역의 N:P비와 동일하게 변화하는 경향을 가지며, 부레옥잠의 성장에 의한 질소 및 인의 흡수비는 3.6~5.2:1로서, 최대 생체량 증식은 N:P비가 3.6:1일 때로 나타난다(Reddy and Sutton, 1984). 현장적용 실험결과 팔당호와 같이 N:P비가 20:1을 넘는 인제한 호수에서는 질소 및 인의 흡수비가 최대값인 5.2:1 정도의 범위로 나타났다. 식물체의 질소 및 인의 함량은 부위별로 상이하여 잎부분에 비해 뿌리의 함량이 상대적으로 낮았는데, 이는 영양분의 축적이 부레옥잠의 뿌리보다는 식물체의 몸체 부분에서 일어남을 의미한다(Trivedy and Gudeker, 1987).

하수처리장 방류수에서 자란 부레옥잠의 shoot/root의 비는 1~2 정도, 도시하수에서 자란 경우에는 3~6인데, 영양염류농도가 낮은 팔당호에서 자란 경우는 0.2이하로 떨어졌다. 또한 이러한 비는 질소형태가 한가지 형태로 있는 경우보다 NH₄-N, NO₃-N이 거의 동일한 비율로 들어 있을 때 더 높게 나타나게 된다.

오수처리장에서 부레옥잠의 질소흡수는 1차 처리수(질소흡수율 1,726 kgN/ha/yr, 인흡수율 387kgP/hr/yr)에 비해 2차 처리수의(질소흡수율 1,193 kgN/ha/yr, 인흡수율 321kgP/ha/yr) 경우가 보다 낮은 것으로 나타나는데 이는 2차 처리수에는 무기질소의 농도가 낮고 1차처리수에 비해 NH₄⁺에 비해 NO₃⁻의 형태가 우세하여 그 상당부분이 탈질을 통해 손실되기 때문이다(Reddy, 1983). 질산화는 부레옥잠의 성장과정에서 발생한 산소가 뿌리에서의 호흡량 보다 과잉인 경우 뿌리에 붙어 있는 질화세균(*Nitrosomanas* sp., *Nitrobacter* sp.)의 호흡과정에 전자공여체로 공급됨으로써 왕성해진다.

식물체의 밀도조절은 영양염류 제거를 극대화하기 위해 매우 중요한 사항으로 Debusk 등(1983)에 의하면 주기적 제거를 한 실험조의 영양염류 제거율이 대조구에 비해 약 7배 높음을 보고한 바 있다. 이상과 같은 부레옥잠의 환경특성에 따라 부레옥잠의 처리 시스템에 대한 설계 및 운영인자는 아래와 같이 정리될 수 있다.

부레옥잠외에 최근에 연구된 특기할만한 식물은 미나리를 들 수 있다. 수자원공사(1993)의 조사에 의하면 미나리는 부레옥잠에 비해 약 2배의 인함량을 보인다. 본 실험에서 수조용량 180L, 체류시간 1일의 조건에서 미나리 640gFW를 연속배양한 결과 영양염류 제거효율은 T-P 31%, PO₄-P 49.3%, NO₃-N 15.8%, NH₃-N 40.4%, T-N 30.9%로 나타났다. 회분식 실험의 결과 6월의 야외 실험지 실험에서 미나리의 비증식속도는 0.038/day, Doubling Time은 18일이

있다. 미나리는 수처리 식물로서 뿐만아니라 식용식물로서의 가치도 크므로 차후 연구가치가 큰 유용식물로 평가된다.

표 2. 처리수 유형에 따른 부레옥잠 처리 시스템의 설계인자

Factors	Secondary	Advanced	Tertiary
Effluent requirements	BOD<30mg/l SS<30mg/l	BOD<10mg/l, SS<10mg/l some nitrogen removal	BOD<10mg/l, SS<10mg/l TP<5mg/l
Wastewater input	Untreated	Equivalent to primary	Secondary effluent
Organic loading (BOD/ha/day)			
Entire system	50kg	< 100kg	< 50kg
First cell	100kg	< 300kg	< 150kg
Water depth	< 1.5m	< 0.9m	< 0.9m
Maximm area, single basin	0.4ha	< 0.4ha	< 0.4ha
Total retention time	> 40days	> 6days	6 days or less, depending on depth
Aeration requirements		submerged diffused the first two cells	
Hydrauric loading (m ³ /ha/day)	< 200	< 800	< 800
Water tempt.	> 10°C	> 20°C	> 20°C
Basin shape	Rectangle L:W>3:1	Rectangle L:W>3:1	Rectangle L:W>3:1
Influent flow diffusers	Recommended	Essential	Essential
Mosquito control	Necessary	Necessary	Necessary
Harvest schedule	Sesonal or annual	> monthly	Every few weeks
Multiple cells	Essential, 2 sets of 3 basins	Essential, 2 interconnected paralled sets of 3	Essential, 2 interconnected paralled sets of 3

(2) Application of aquatic plants in natural field

자연수역에서 수생식물은 영양염류 경쟁(nutrient competition)과 피음효과(light coverage effect)를 통해 조류증식을 억제한다. 오수처리장에 대한 수생식물의 이용에 비해 자연수역에 임의의 수생식물을 재배하여 수질을 개선한 연구는 상대적으로 적은 실정이다. 또한 자연수역에서 수생식물의 수질 정화능은 계절적 요인 및 영양염류 농도에 따라 상당한 차이를 보여 뚜렷한 설계인자를 도출하기 어려운 점이 있다.

적용대상 지역은 부영양화가 진행되고 있는 수역(질소 0.2mg/l 이상, 인 0.02mg/l 이상)으로서 물의 흐름이 비교적 느리고 탁도가 높은 수역에 한해,

적당한 공지가 재배하는 장소에 근접해 있는 경우가 적합하다. 기타 유의사항으로는 실시지역이 수운이나 농수산 산업등에 지장을 주는 지가 검토되어야 하고 이 경우는 사전에 관계자와 협의가 필요하다. 국내 수계의 계절적 수온변화 및 부레옥잠의 수온특성을 비교할 때 자연수역에 재배가 가능한 시기는 4월 하순에서 11월 상순까지이다. 부레옥잠은 기온이 20°C 전후에서는 새로운 shoot를 형성하는 것이 우선이고, 25°C 이상에서는 shoot의 생육이 우선하는 경향이 있다(神陽子, 1981).

TP 0.014~0.041mg/l, TN 0.704~1.124mg/l 범위를 갖는 북한강의 현장실험 결과 부레옥잠 식물량의 doubling time은 5~7월의 기간 중 18.2 ~ 22.4 일이었음에 반해, TP 0.158~0.293mg/l, TN 2.320~2.979mg/l의 경안천 수역에서는 6.8~14.4일로 나타나 뚜렷한 현장특이성을 보였다.

표 3은 현장에서의 질소 및 인의 제거율을 나타낸 것으로 영양염류 순환율이 큰 하천, 영양염류 농도가 높은 수역, 주기적인 제거를 실시한 경우일수록 영양물질의 제거효율이 높음을 알 수 있다.

표3. 부레옥잠에 의한 질소 인의 제거 효과

	팔 당 호 92.5.4-11.30	일본의 호소 85,86년	일본의 新川		
			88년	89년	
재배면적(mxm)	805	1,800	2,100	2,100	
수질	T-N (mg/l) T-P(mg/l)	1.36- 2.42 0.026-0.125	0.4-0.8 0.005-0.11	3.7-6.6 0.28-0.67	3.6-9.5 0.22-0.68
수거회수	미 실시	주 1회	재배기간중 2회		
부레옥잠 투입량	개체수 420 2.90 kg DW	85년4,000kg 86년 230kg	1,500kg	150kg	
총수거량	19,051 gDW (374배)	85년30,700kg 86년14,300kg (62배)	122,850kg (82배)	89,100 kg (594배)	
재배시설	호소의 일부	지전체	하천의 일부(고정재배)		
질소, 인 제거율(kg/100mxm)	N 4.59 P 0.87	N 0.97 P 0.15	N 8.86 P 1.19	N 6.81 P 0.76	

(3) Reutilization of removed aquatic plants

재배된 부레옥잠의 회수는 선상에서 버킷로 회수하거나, 선박등을 이용하여 회수한다. 부레옥잠의 영양물질 함량은 건량비로 비교할 경우는 기타 사료식물에 비해 다소 높은 편이나, 약 95 %에 달하는 높은 함수율로 인해 습량기준의 가소화영양소총량(Total Digestible Nutrient, T.D.N.)은 건조료 조 사료의 40%에 비해 매우 낮은 4.7%에 불과하여 사료로서는 비효율적이었다. 생석회(CaO)를 첨가하여 안정화시킨 결과 6일 후 함수율이 8.5%로 감소하였으며 N,P,K의 함은 7.5~8.5%로 나타나 비료공정규격에 나와 있는 혼합유기질 비료기준인 7%를 넘어 비료로의 이용이 가장 적합한 것으로 판정되었다.

2. Biological control of producers by aquatic animals

(1) Removal of aquatic macrophytes by grass fish

수생 대형식물은 정화기구의 하나로서 중요한 역할을 하지만 적절한 관리 없이 과도번성할 경우 수체에 복합적인 2차적 악영향을 미친다. 이러한 악영향은 크게 직접영향과 간접영향으로 구분되는데, 직접영향으로는 생육기를 통해 흡수한 영양물질의 고사후 재배출을 들 수 있다. 수생식물의 영양물질 흡수는 비교적 장기간의 생육기를 걸쳐 일어나는 반면 영양물질의 재배출은 짧은 고사기에 일시에 일어나므로써, 이러한 생활사적 특성은 수체내 오염물질의 시기적인 집중화를 유발하여 실질적인 영향도는 더욱 크게 나타난다.

간접영향은 수생식물 고사체의 미생물적 분해과정에 수반되는 혐기화와 유해물질의 발생, 산화환원전위의 감소에 따른 퇴적물내 각종 오염물질의 용출증가 등을 들 수 있다. 이러한 영향은 수체내 물질순환 고리에 연쇄적으로 작용하여 환경조건에 따라서 직접영향보다 더욱 큰 악영향을 미치는 경우가 있으나 그 양상이 복합적이므로 정량적인 평가가 어려운 점이 있다.

기타의 악영향은 수초의 과도번성에 따른 조도(roughness)의 증가, 물의 정체, 유하토사의 보축 및 고사체에 의한 늘지화, 저수용량의 감소등 각종 수리학적 인자의 변화를 통한 영향을 들 수 있다. 그러므로 과도번성한 수생식물의 제거는 호수면 관리에서 가장 일반적으로 알려져 있는 것 중의 하나로서 제외국의 여러 호수에서 실제로 적용되어 왔다.

수생식물의 제거에는 크게 수초제거선을 이용한 물리적 제거, 제초제를 이용한 화학적 제거, 초식성 어류를 이용한 생물학적 제거가 있으며 각 방법에 따른 장단점은 표 4와 같다

표 4. 수초 제거방법에 따른 장단점

구분	이용	장점	단점
물리적 제거	수초제거선	<ul style="list-style-type: none"> ○ 인위적 관리 가능 ○ 제거물의 재이용 가능 ○ 고사체 제거 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 소요인력, 소요경비 큼 ○ 작업시 환경 교란 유 ○ 식물상 파괴 가능성 유 ○ 제거물의 처리문제 유
화학적 제거	제초제	<ul style="list-style-type: none"> ○ 효과 급속함 ○ 사용이 간단 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2차 영향 유 ○ 식물상 파괴 가능성 유 ○ 소요 비용이 큼
생물학적 제거	초어	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2차 영향 무 ○ 소요예산 적음 ○ 어류의 재이용, 자원화 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 과도투입시 생물상 파괴

수초제거선을 이용한 기계적 제거는 수생식물의 생산량이 클 경우 상당한 노력과 경비가 소요되는 단점이 있으며, 준설, 피복, 수위조절, 부영양화의 인위적 유도 및 염료(dye)주입을 통한 투명도 저하와 같은 방법은 그 과정의 환경영향이나 이수관리에 있어 비현실적인 경우가 많다.

제초제의 경우는 유해물질에 의한 2차 오염이 더 큰 문제로 대두될 가능성이 있으며, 급속한 수초사멸과 분해과정의 영양물질 재배출이 조류발생의 요인으로 작용할 수도 있다. Hestand(1978)는 제초제 사용시 모든 식물 (*Hydrilla verticillata*, *Myriophyllum spicatum*, *Chara sp*, *Vallisneria american*, *Najas quadalupensis*, *Ceratophyllum demersum*)들이 일시에 사멸

하여 수초 고사체의 분해에 따른 영양물질의 급속한 재배출에 의해 수화(algal bloom)가 유발된 반면, 초어는 조류 현존량에 영향을 주지 않으면서 서서히 수초를 소모하였음을 보고한 바 있다.

따라서 과도번성한 수생식물의 관리에는 이수목적에 따른 적용방법이 선택되어야 하는데, 그중 생물학적 관리에는 2차 오염문제의 가능성이 적고 소요 경비가 적다는 점에서 큰 장점을 지니고 있다. 그러나 잉어과의 초어는 방류량이 과도할 경우 수초대의 원천파괴 및 다른 어종의 산란장등 본래의 서식 환경을 파괴하여 생태계 전체를 변화시키므로 역시 충분한 검토가 필요하다.

표 5. 초어의 생태와 습성

분포와 형태	생태와 습성
<ul style="list-style-type: none"> ○ 분포 : 만주 흑룡강수계와 중국 본토 및 월남등 ○ 잉어보다 등지느러미의 기저가 짧고 수염이 없음 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 서식수온 : 1 ~ 35 ℃(광온성) ○ 적수온 : 20 ~ 30 ℃ ○ 식성 : 잡식성 및 초식성 ○ 산란기 : 6월 상순 ~ 7월 상순 ○ 성장 : 4 - 5년, 전장 100cm

국내의 호수 및 저수지에서 초어는 수산자원의 목적으로 오래전 부터 방류되어 왔으며 그 현황은 표 6과 같다.

표 6. 국내 호수 및 저수지의 초어 방류현황

호소명	위치	용도	수면적 ha	수심 m	주요 서식 어종	방류 년도	방류 (천미)
주 남	경남, 부산	농업	285.0	5.3	잉어, 붕어, 뱀장어, 초어	'80-	12
산 남	"	"	75.0	4.8	가물치	'88	
성 암	서산	"	143.0	5.0	초어, 백련어, 붕어, 잉어	?	?
마 룡	충남	"	16.0	3.6	초어, 백련어, 잉어, 붕어	?	?
전 대	당진	"	22.0	8.0	붕어, 잉어, 뱀장어, 초어	?	?
예 당	예산		1,088	10.0	잉어, 붕어, 피라미, 뱀장어	'91	0.3
육정호	임실	다목적댐	2651.0	64	붕어, 잉어, 피라미, 붕어, 메기, 이스라엘잉어, 초어	'79	2.0
덕동호	경주	상수도용	196.0	45.0	잉어, 붕어, 메기, 초어	'82-'83	5000

Fisher & Lyaknocich(1973)는 초어의 주요한 생육요인은 온도, 산소, 염분과 먹이상태로서 다른 생물에 비하여 어란과 치어시기에 환경의 변화에 민감하여, 수온을 예로 들 때 적온보다 2℃ 이하로 떨어지면 성장이 둔화되고 어란의 사망율이 증가함을 보고한 바 있으며, Opunszynski(1967a)는 초어의 사망 온도는 34.2~41.2℃이고 산소의 평균치사농도는 치어에서는 0.43mg/l이며, 당해년생의 초어는 0.32mg/l임을 보고한 바 있다.

Chesnokova(1971)는 초어는 농약에 매우 민감하며 소량(4 kg propamide

ha⁻¹, 1.8kg 2, 4-D ha⁻¹)에서도 20%의 치사율, 다량(7 kg ha⁻¹, 5 kg 2, 4-D ha⁻¹)에서는 70%의 치사율을 나타냈음을 보고한 바 있다.

초기의 초어 치어는 동물플랑크톤(윤충류, 갑각류)과 단세포 조류를 주로 먹으며, 길이가 3 cm 정도에 달하면 초식성이 되어 주로 침수성 식물과 부수성식물을 섭식하나 사상성 조류를 섭식하기도 한다. 초어는 소화기관이 짧아 물길이의 2~3배 정도 밖에 되지 않으며 cellulose의 소화효소가 결핍되어 있어 많은 양의 식물체를 섭식한다.

미국의 예로 1~3년만에 90 % 이상의 수초가 초어에 의해 제거되어, 수초에 의한 수질오염 및 위락저해의 문제가 해결된 바 있다(표 7).

표 7. 초어를 이용한 수초관리 사례(미국)

호소명	이식 년도	무게 (gWW)	이식수 (/ha)	제거 (%)	대상식물	제거 효과
Red Haw	'73 '74	380 380	18 9	91	<i>Potamogeton</i> <i>Najas</i> <i>Ceratophyllum</i> <i>Elodea</i>	NO ₃ -N, BOD, Turbidity 감소. Alkalinity, PO ₄ -P 증가. 조류 생산력 감소. 연안대 뉘시인기 상승.
Baldwin	'78	790	24	96	<i>Hydrilla verticillata</i>	초어 무게의 26-28%의 검정말을 1일 섭식함. 검정말 완전히 제거됨.
Bell	'74	227	50	94	<i>Hydrilla verticillata</i>	1977년에 검정말 완전제거 사초과, 수련과는 영향없음.
Clear	'74	227	50	94	<i>Hydrilla</i> , <i>Ceratophyllum</i>	1976년에 완전히 제거됨.

에너지 효율이 낮은 수초를 섭식하는 초어의 섭식능은 증량비를 기준할 때 동물성 물질을 섭식하는 기타 어종에 비해 상대적으로 높다. Cure(1970)는 수온 20-28 °C의 조건에서 초어가 어체중에 해당하는 수초를 매일 섭식함을 보고하였으며, Lukanin(1959)은 습체중 2,000g에 해당하는 초어의 1일 섭식율이 25~115%임을 보고한 바 있다. 그러나 Vergin(1963)은 초어의 수초 섭식율은 수생식물 중에 의존하고, 그 섭식율은 12~135%의 범위에 있다고 주장하였다.

표 8. 단일 식물종에 대한 초어의 1일 증량비 섭식율

개체증량 (gWW)	수온 (°C)	섭식식물	어체에 대한 식물량 증량비(%)	증량비 섭식율 (%/day)
169.0	21~23	생이가래	86.2 ~ 145.4	30.9 ~ 64.2
151.0	"	넓은잎말	16.2 ~ 165.5	17.5 ~ 66.3
262.2	"	검정말	12.2 ~ 79.9	24.3 ~ 43.7
422.6	"	툼니나자스말	149.7 ~ 320.1	25.4 ~ 35.4
151.0	"	어리연꽃	310.5 ~ 423.0	17.2 ~ 33.3
274.8	"	개구리밥	185.1 ~ 191.3	18.9 ~ 27.0
277.9	"	이식물수세미	16.4 ~ 96.6	0 ~ 10.9

국내의 식물종을 가지고 초어의 단일식물종에 대한 섭식율을 조사한 결과는 표 8과 같다. 섭식율은 잎의 비율이 높고 잎의 조직이 연한 식물일수록

높았으며, 생활형으로 볼 때는 잎이 수면에 떠 있는 부엽식물보다는 침수식물에 대한 섭식율이 높았다. 이상의 섭식특성에 따라 침수식물중 넓은잎말, 검정말, 뜰이나자스말에 대한 섭식율에 비해 잎의 비율이 작고 조직이 단단한 이삭물수세미의 섭식율은 현저히 낮게 나타났으며, 부엽식물의 어리연꽃의 섭식율은 다소 낮았다.

Verigin 등(1963)은 초어의 기호식물을 아주 잘 먹는 식물, 보통, 약간 먹는 식물의 세가지 군으로 구분한 바 있는데, 아주 잘 먹는 식물은 갈대, 솔잎가래, 붕어마름, 좁개구리밥, 자라풀류, 눈포아풀, 애기부들, 붉은토끼풀, 마디풀, 서양톱풀, 토끼풀, 양지꽃류 등이며, 보통 먹는 식물은 이삭물수세미류, 골풀, 가막사리, 겨이삭류, 좁은잎해란초, 산조풀, 개취뜨기, 구주갈퀴명쿨, 박하, 고사리, 간병꽃풀, 카밀레 등, 약간 먹는 식물은 우단석잠풀, 사초류, 명아주 등이었다.

Fowler & Robson(1978)은 초어의 먹이선택성으로 식생의 변화가 일어나 1년에 걸친 초어의 선택섭식후 기호성이 높은 녹조류의 *Chara sp.*, 수생관속식물의 *Potamogeton pectinatus*, *Potamogeton berchtoldii*, *Elodea canadensis*는 현존량이 급감하고 조금 또는 먹지않는 식물인 *Myriophyllum spicatum*, *Potamogeton natans*, *Hippuris vulgaris*, *Ranunculus trichophyllus*, *Groenlandia densa*는 오히려 현존량이 증가하였으며, Copepoda, Rotifera 등의 free-swimming 무척추동물의 개체군에는 영향이 없었음을 보고한 바 있다.

국내 침수식물중 주요 우점종 3종에 대한 혼합식물중 실험에서 초어의 선택성은 매우 현저하게 나타났으며 그 기호성은 검정말 > 새우가래 > 넓은잎말의 순이었다. 이는 단일 식물중 투여시의 초어의 섭식율이 표 9에서 처럼 넓은잎말 > 새우가래 > 검정말 순이었음을 비교할 때 단일 식물중에 대한 섭식율과 혼합 식물중의 섭식율이 다름을 알 수 있었다.

표 9. 침수식물중에 대한 초어의 선택적 섭식율 ('93.9.5. ~ '93.9.9. 실험) (어체의 개체중량 151 gWW, 10피)

종 류	경과시간 (일)	식물잔량 (gWW)	잔량비 (%)	섭식량 (gWW/일)	섭식율 (%/일)	식물량/어체중 (%)
검 정 말	0	2,000.0	100.0			
	2	171.0	8.6	914.5	60.6	71.9
	3	54.1	2.7	116.9	7.7	7.5
	4	50.0	2.5	4.1	0.3	3.4
새우가래	0	2,000.0	100.0			
	2	1,788.0	89.4	106.0	7.0	125.4
	3	1,354.0	67.7	434.0	28.7	104.0
	4	944.0	47.2	410.0	27.2	76.1
넓은잎말	0	2,000.0	100.0			
	2	1,901.0	95.1	49.5	3.3	129.2
	3	1,507.0	75.4	394.0	26.1	112.8
	4	1,007.0	50.4	500.0	33.1	83.2

어리연꽃, 마름 및 부레옥잠의 혼합실험조에서 기호성은 어리연꽃 > 마름 > 부레옥잠의 순으로 나타났다(표 10).

표 10. 부엽 및 부수식물중에 대한 초어의 선택적 섭식율 ('93.8.20. ~ '93.8.23. 실험) (어체의 개체중량 151 gWW, 10피)

종 류	경과시간 (일)	식물잔량 (gWW)	잔량비 (%)	섭식량 (gWW/일)	섭식율 (%/일)	식물량/어체중 (%)
어리연꽃	0	2,000.0	100.0			
	1	1,320.0	66.0	680.0	45.0	109.9
	3	368.5	18.4	951.5	31.5	55.9
마 름	0	2,000.0	100.0			
	1	1,845.0	92.3	155.0	10.3	127.3
	3	1,232.7	61.6	612.3	20.3	101.9
부레옥잠	0	2,000.0	100.0			
	1	1,895.0	94.8	105.0	7.0	129.0
	3	1,805.2	90.3	89.8	3.0	122.5

먹이의 절대요구량은 어류의 성장에 따라 성장 및 유지를 위해 함께 증가하지만 어체 단위중량당 상대요구량은 어류의 무게가 증가함에 따라 감소한다. 마름과 생이가래를 대상으로한 실험에서 초어의 크기가 작고, 개체수가 많은 것이 섭식율이 높았다(표 11). 또한 동일한 무게밀도에서 개체수 밀도가 클수록 섭식율이 높았는데, 무게밀도 100 g/m²에서 0.6 개체/m²의 수밀도에 대한 마름 및 생이가래의 섭식율은 최대 10.4% 및 17.1%이었으나, 1 개체/m²의 수밀도에 대한 섭식율은 27.5% 및 39.2%로 증가하였다.

이러한 결과로 초어의 방류시는 육식어종에 의한 피식 가능성이 크지 않는 조건이라면 대형종묘 보다는 소형종묘를 다량 방류하므로써 소기에 효과를 얻을 수 있고, 경제적으로도 비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

표 11. 개체크기에 따른 초어의 섭식율 ('93.9.2. ~ '93.9.18. 실험)

유 형	개체중량 (gWW)	식 물 종	섭식율 (%/일)	식물량/어체중 (%)
Large	374.7	생이가래	24.7 ~ 42.8	29.6 ~ 69.9
Small	131.8	생이가래	36.0 ~ 51.3	61.1 ~ 145.9
Large	374.7	마 름	9.7 ~ 26.2	23.2 ~ 78.6
Small	131.8	마 름	8.1 ~ 36.0	63.2 ~ 156.9

성장과정에서 초어의 소화물 및 부산화배출물은 수질을 변화시키는데 영양물질 항목에 따른 동화율의 차이로 항목에 따른 변화양상 역시 다르다. 실험지내에서 수초의 섭식율과 수질의 변화를 조사한 결과 SS, COD, 영양물질의 농도는 시간경과에 따라 증가하였으며, 특히 총암모니아성 질소의 농도가 현저한 증가를 보였는데 이는 암모니아가 초어의 질소 최종대사산물로서 상당량 배설되었음을 의미하는 것이다(표 12).

Borutskij(1955)는 초어의 질소동화율을 50 %로, Stroganove(1963)는 70%로 보고한 바 있으며, Hickling((1966)은 *Enhydris angustipetala*와 *Tapioca leaves*에 대한 질소동화율이 43~47%, 나머지는 분으로 배출되어 조류의 수화현상을 일으킨다고 한 바 있다. Panov(1969)는 방사선동위원소를 이용하여 먹이의 동화율과 전환율을 조사한 결과 초어의 치어는 동물성먹이

(*Daphnia*)의 경우 69%, 식물성먹이(*Potamogeton* sp)는 15~18%의 동화율을 보였음을 보고한 바 있다. Fisher(1972)는 초어가 식물인 *Lactuca sativa*만 섭식하는 경우는 소화된 먹이의 20%만이 동화되었으며, 이렇게 낮은 동화율은 식물체의 많은 cellulose분을 때문이라고 주장한 바 있다.

표 12. 초어에 의한 수초(검정말)섭식과 수질변화

경과시간 (days)	섭식을 (g/g.day)	Temp. (°C)	SS (mg/l)	COD (mg/l)	PO4-P (mg/l)	T-P (mg/l)	NH ₃ -N (mg/l)
1	30.6	21-23	2.0	1.1	ND	0.080	0.174
2	30.4	21-23	3.3	2.9	ND	0.090	0.206
3	27.6	21-23	3.9	3.2	ND	0.116	0.229
5	28.9	21-23	4.2	4.6	0.01	0.126	0.253
6	22.2	21-23	4.8	5.2	0.02	0.132	0.243
7	24.3	21-23	5.2	6.0	0.03	0.162	0.236

Mitchell(1984)은 뉴질랜드의 수면적 1.92 ha, 수온 9-27°C의 Parkinson lake에 초어를 방류한 결과 2년내에 수초(*Egeria densa* & *Eleocharis spicelata*)가 사라졌으며, 이러한 수초의 제거로 용존산소, 수온, 수위, Chl.a 등의 변화는 없었으나, 투명도의 다소 감소가 있었고 동물성플랑크톤의 수와 양이 증가하였음을 보고한 바 있다. 이때 동물성플랑크톤 양의 증가는 초어에 의한 수생식물 서식처의 교란으로 수초 주변에 서식하던 planktivorous 어류가 감소한데 기인했을 가능성이 있다.

Richard(1984)는 미국 Florida호수의 실험에서 초어에 의한 수초의 제거로 조류 현존량이 $165,000 \text{ cells l}^{-1}$ 에서 $789,000 \text{ cell l}^{-1}$ 로 증가하였음을 보고한 바 있으며, Lembi(1978)는 1975년에서 1976간 Indiana 주내 6개의 못(수면적 : 0.21~0.30 ha, 최대수심 : 0.7~1.2 m)에 초어(전장 190~195 mm)를 방양밀도 10.59 kg/ha, 4.75 kg/ha로 방류하고 수생관속식물인 *Potamogeton folissus*, *Potamogeton crispus*, *Myriophyllum verticillatum* 및 녹조류인 *Chara* sp.를 도입한 결과, Potassium 농도가 현저히 증가하였음을 보고하고 이는 어체로의 Potassium 전환율이 매우 낮은데 기인하는 것으로 주장한 바 있다.

이상의 결과로 볼 때 초어가 수질에 미치는 영향은 식물의 현존량이 적은 경우 미미한 것으로 판단되나 지속적인 초어의 도입은 수생식물의 영양염류 제거능 감소와 기타 어류종의 서식처 손실등 수생생태계에 영향을 줄수 있으므로, 수생식물의 원천적 제거가 목적이 아닌 경우는 적용 이전에 심도있는 평가가 선행되어야 함을 알 수 있다.

(2) Control of algae by large-head fish

조류 이상증식의 호소내적 관리방법 중 생물학적 방법으로는 Safferman(1964)의 바이러스에 의한 남조류의 제어에서 비롯하여 세균, 곰팡이에 의한 조류분해 및 원생동물과 미소동물 등 조류포식생물을 이용하는 방법 등이 국내외적으로 연구되어 왔다. 백련어(*Hypthalmichthys molitrix*)와 같이 플랑크톤식성 어류(Phytoplanktivorous fish)를 이용한 조류제거 연구는 비교적 최근에 이루어진 것으로, 현재 백련어의 이용은 수질에 악영향을 미치는 조류를 유용한 생물로 전환한다는 점에서 매우 흥미로운 것이다.

백련어의 분포 및 생태는 주 식성이 식물성플랑크톤인 점을 제외하곤 초

어(표 5)와 큰 차이가 없으며, 호수에서 조류의 조절과 어류생산을 높이기 위하여 국내는 물론 세계적으로 널리 보급되고 있는 어종이다(표 13).

표 13. 국내 호수 및 저수지의 백련어 방류현황

호소명	위치	용도	수면적 ha	수심 m	주요서식어종	방류 년도	방류 (천마)
금 계	경북, 영풍	농업	35.6	35.7	잉어, 이스라엘잉어, 백련어	'80- '88	30
묘 곡	경북, 영덕	"	63.0	17.6	잉어, 붕어, 백련어, 뱀장어	'80- '88	150
성 압	충남	"	143.0	5.0	초어, 백련어, 붕어, 잉어	?	?
마 룡	충남	"	16.0	3.6	초어, 백련어, 잉어, 붕어	?	?
삼교호		"	1,052	18	장어, 잉어, 붕어, 가물치, 피라미	'79 '80	50 200
예 당	예산		1,088	10.0	잉어, 붕어, 피라미, 뱀장어	'91	1.2
충주호	충북, 제천	다목 적	4822.0	141.0	잉어, 붕어, 메기, 백련어 백련어	'86 '87	1,000 1,000

백련어는 20 μm 보다 큰 입자를 선택적으로 섭취하여 nanoplankton은 효율적으로 섭취하지 못한다(Borutskij 1973). Gophen(1985, 1986, 1987)은 이스라엘의 Kinneret호수에서 조류 섭식어종인 *Sarotherodon galilaeus* 개체군의 증가가 *Peridinium* 현존량의 중요한 억제수단이 될 수 있음을 보고한 바 있다. 이와반면 조류 섭식어종의 역효과에 대한 기록도 있는데 Opuszynski (1978, 1980)는 백련어가 식물성플랑크톤의 활성을 자극하여 수화의 조절에 대해서 비효과적임을 주장한 바 있다.

백련어의 여과수량은 체중에 비례하여 증가하며 섭이량은 플랑크톤의 농도에 비례하지만 성장을 지배하는 또 하나의 인자는 플랑크톤의 종류이다. 동물성플랑크톤과 식물플랑크톤중에 규조류와 편모조류에 대한 백련어의 소화율은 높은 편이나, 녹조류와 남조류의 소화율은 다소 낮은 것으로 보고되고 있다. 즉 규조류의 두꺼운 규산질 각은 소화되지 않고 남아있지만 다공질 각내의 증신은 소화가 쉬운 반면, 백련어는 펙틴(남조류)이나 셀룰로오스(녹조류)등과 같은 다당류의 막물질을 분해하는 효소가 없음에 따라 이들 종류에 대한 상대적인 소화율이 낮다. 長野縣水産指導所(1971)의 보고에 의하면 신선한 *Microcystis*를 먹은 백련어의 치어는 2주후 체중이 감소되었으며, 어체의 분은 녹색을 띠고 있고 물에 현탁하여 빛을 주면 산소가 방출하여 결국 대부분의 *Microcystis*가 광합성활성을 보유한체 소화관을 통과하였음을 추론한 바 있다. 그러나 야외실험에서는 *Microcystis*의 사료가치가 낮지 않음이 보고된 경우도 있다. 일본의 取訪湖에서는 *Microcystis* 우점도가 95~99%의 조건에서 격자형 망에 백련어를 완전 무사료로 사육한 결과 4,5개월간에 어체중이 7.8배로 증가한 바 있다(長野縣水産指導所, 1971). Malyarevskaya (1973)도 *Microcystis*의 세포수 우점도가 90% 이상인 사육지에서 체중 30~40g의 백련어가 1개월후 33.6%의 체중증가를 보였으며, 이때 백련어의 소화관에는 *Microcystis*가 충만하였음을 보고한 바 있다.

전반적으로 남조류 단일종류에 대한 백련어의 섭식효과는 낮은 것으로 판단되는데, Malyarevskaya(1973)은 남조류가 분비하는 thiaminase(비타민 B1을 피리미진 부분과 티아졸부분으로 분해하는 반응의 촉매효소로서 담수어의 비장, 위, 창자, 아가미, 간, 이자등에 많음)에 의하여, 남조류를 다식한 백련어의 간장이나 장의 thiaminase의 활성이 증대하고 비타민이 파괴되어 성장이 좋지않은 원인이 된다는 가설을 제안한 바 있다.

일본 수산청 연구부 어장보호과(1985)에서는 가스미가우라호에서 사료 급이에 의한 잉어 양식의 일부를 식물플랑크톤 식성어인 틸라피아로 무급이 양식으로 전환하는 것에 의하여, 잉어 양식에 따르는 오염물질의 부하량을 삭감하고 호소내 유기물의 간접적 회수를 겸하는 자가오염방지 매뉴얼을 작성하여 보급하고 있다. *Micocystis*는 조단백질을 약 50% 함유하고 있으므로 이를 사료로 직접 이용하는 어류가 있으면 물의 정화 뿐만아니라 단백질 자원을 생산하는 이중효과를 거둘 수 있을 것이다.

본 연구에서 실험지(수면적 890m², 평균 수심 0.5-1m)에 백련어 40미(전장: 30~36cm, 평균체중: 326~370gWW)를 방양하여 실험한 결과 182일후에 약 40%의 어체증이 증가하였으나, 10월을 전후하여 수온의 저하로 백련어의 성장 및 활동성이 현저히 감소함이 관찰되었다(표 14).

표 14. 수생식물실험지내의 백련어 성장을

	최초투입일 '93. 5. 19.	1차 조사 '93. 8. 21.	2차 조사 '93. 11. 18.
경과시간 (일)	0	94	182
전장 (cm)	30~34	34~39	34~40
무게 (g)	326~370	385~495	405~548
평균무게 (g)	338.8	436.9	472.7
증가율 (gWW/day)	-	1.04	0.74
어체증증가 (%)	-	129	140

백련어 성장에 따른 수질변동은 표 15와 같이 나타났다. 전체적으로 수온이 20°C 이상으로서 백련어의 활성도가 높았던 5월에서 9월까지는 Chl.a의 농도가 약 100 mg/m³의 수준에서 조절되었던 반면, 수온이 급격히 감소하여 백련어의 활성이 저하된 10월에는 약 400 mg/m³으로 현저한 증가를 보였으며 이에 따라 pH, COD, SS, T-P, T-N이 증가한 반면 PO₄-P 및 NH₃-N의 가용성 형태의 영양물질은 감소하였다(표 15). 백련어의 활성변화와 조류 현존량의 변화는 일련의 관계를 보여주는데, 백련어의 활성에는 수온저하가 시발이 되어 조류증식에 따른 pH의 증가가 복합적으로 영향을 미쳤을 가능성이 있다.

표 15. 백련어 실험조의 월별 수질변동

Months	W. T. °C	pH	DO mg/l	COD mg/l	SS mg/l	Chl-a mg/m ³	T-P mg/l	PO ₄ -P mg/l	T-N mg/l	NH ₃ -N mg/l
May	26.4	9.3	9.2	12.9	41.0	72.4	0.117	0.010	1.910	0.080
Jun.	25.3	8.9	8.9	13.4	40.8	86.5	0.153	0.009	2.539	0.097
Jul.	27.7	8.7	7.9	16.3	27.4	135.2	0.197	0.010	2.536	0.110
Aug.	29.9	8.7	7.6	17.8	25.4	118.0	0.213	0.009	2.489	0.100
Sep.	21.8	9.3	8.6	22.1	51.7	115.9	0.256	0.016	7.803	0.104
Oct.	14.3	9.3	8.6	32.0	91.1	394.4	0.385	0.003	6.531	0.039

백련어 실험지의 조류군집은 규조류의 현저한 감소 및 녹조류의 증가로 나타났다(표 16). 일반적으로 규조류는 봄철에 우점한 후 여름철에 감소하고 가을철에 다시 우점하는 일반적 천이양상을 갖는다. 백련어 실험지에서 위 천이양상과 상반되는 결과가 나타난 것은 백련어의 선택적 소화의 가능성을 시사하며, 그의 남조류의 감소는 수온저하에 따른 자연적 천이로 판단된다.

표 16. 야외 백련어 실험지내 조류군의 세포수 구성비(%) 변화

조류군	'93.7.24	'93.11.1
녹조류	51.4	93.6
규조류	21.2	4.6
남조류	27.4	1.8

수중 및 어체 장내의 조류 세포수 상대점유율을 조사한 결과 수중 우점종인 세포길이 100 μm 이상의 *Ankistrodesmus*는 장내에서 상대점유율이 낮은 반면, 수중에서 점유율이 낮은 총길이 약 30 μm (4개의 단세포 균체로서)의 *Scenedesmus abundance*가 장내에서 우점하여 백련어의 선택적 여과섭식에 대한 가능성이 시사되었다(표 17).

표 17. 야외 실험지의 수중 및 백련어 장내 조류종의 세포수 상대점유율(%) ('93.11.1.)

조 류 종	수중	장내(gut)
<i>Ankistrodesmus spp.</i>	32.7	1.7
<i>Cosmarium spp.</i>	16.9	-
<i>Scenedesmus abundance</i>	5.6	49.9
<i>Scenedesmus quadricaudatus</i>	7.0	21.7
<i>Scenedesmus denticulatus</i>	2.3	15.0

국내 호소의 실례로 예산군 소재의 만수면적 1,088ha, 만수수심 10.0m, 총저수량 47,103천톤의 예당저수지는 생활용수 및 농업용수로 이용되는 저수지인데, 예산군은 '91~'92년 사이에 전장 10~14cm(무게: 20~30g WW)의 백련어 치어 1000피를 방류한 바 있다. 수질은 Chl.a의 농도가 4.2~19.2mg/ m^3 , 투명도가 0.3~2.5m, T-P 농도가 0.122~0.213mg/l, COD 농도가 3.0~4.6 mg/l 조건이었으며, '93년 6월 저수지의 인근 어부들에 의하여 포획된 백련어는(전장 : 50cm) 무게가 3kg WW 로 성장하여 초기 방류시에 비해 2년6개월간 약 150배 증가하였다. 증가율은 3.26 g WW/day 로 야외실험지내에서 성장한 백련어(표 14)보다 약 3배의 성장율을 보이고 있어, 백련어의 성장율이 서식처의 환경조건에 크게 영향을 받고 있음을 나타내고 있다. 백련어 방류후 예당저수지의 수질은 유기 및 영양물질의 농도가 계속 증가하는 경향을 보이고 있으나 이는 유역 오염부하량의 증가에 기인하였을 가능성이 있으며, 저수용량에 비해 백련어의 방양밀도가 낮아 그 효과를 해석하는데 무리가 있다.

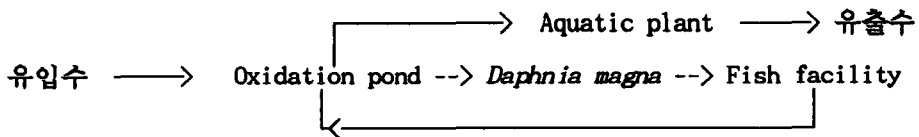
(3) Control of algae by zooplankton or protozoa

수역에서 플랑크톤성 조류는 주로 동물플랑크톤 및 원생동물에 의해 섭식된다. 따라서 조류량이 많은 수역에 동물플랑크톤의 양이 많은 것이 오래전

부터 경험적으로 알려져 왔다. 동물성플랑크톤의 섭식은 조류 현존량의 증가를 억제할 뿐만아니라 조류 군집의 크기조성 및 종구성을 변화시킨다.

소형동물은 종류에 따라 여과섭식(filter feeding) 혹은 직접포식(raptorial feeding)을 하며, 여과속도는 먹이의 밀도가 높으면 감소하고 밀도가 낮으면 최대화 된다. Braband(1983)는 사상성 남조류 *Oscillatoria agardhii*에 대해 섬모류 *Nassula ornata*가 수온 5~20℃에서 지속적인 포식을 보이며 증식을 억제함을 보고한 바 있다.

Arnold(1971)는 남조류 *Anacystis nidulans*, *Synechococcus elongata*, *S. cedrorum*, *Merismopedia sp.*, *Anabaena flosaquae*, *synechocystis sp.*, *Gloeocapsa alpicola*와 녹조류 *Ankistrodesmus falcatus*, *Chlorella vulgaris*에 대한 *Daphnia pulex*의 섭식율을 비교실험한 결과 녹조류보다 남조류에 대한 섭식율이 낮음을 보고한 바 있다. Takayuki(1987)는 일본의 Kasumigaura 호소에서 분리한 *Microcystis aeruginosa*에 대한 지각류 *Moina micrura*의 섭식율을 ¹³C로 실험결과 *Microcystis* 군체를 섭식가능한 크기로 분리하여도 섭식하지 않았으나, 분해된 *Microcystis*는 중요한 식이원이 됨을 보고하였다. Heimbuch(1978)는 산화지에서 조류를 제거하기 위하여 *Daphnia magna*를 투입한 결과 T-N, T-P와 휘발성 부유물질의 제거효과가 큼을 보고하였다. 동물성플랑크톤의 처리조는 물고기 사육시설과 연결하여 적용시킬 수 있으며 이때 물고기 대사물질은 다시 조류의 성장에 재공급할 수 있다. 그리고 *Daphnia magna* 배양조의 유출수는 수생식물조에 유입시켜 영양염류를 제거하여 최종 방류할 수도 있다. 이러한 처리시스템을 개략하면 아래와 같다.



Inamori(1990)등은 *Microcystis viridis*에 의하여 생성되는 cynoviridine의 90%를 Bio-film reactor에 접종한 *Aelosoma hemprichi*(Oligocheta)와 *Philodina erthrothalma*(Rotatoria)의 포식으로 제거하였다. Sudo 등(1989)은 이취미물질을 생성하는 사상성조류인 *Phormidium tenue* 배양조에 섬모충류 *Trithigmostom cucullulus*를 25-200 N/ml로 접종하여 암소에서 정치배양한 결과 chl- a의 제거율이 63~80%, 탁도의 제거율이 71%이었음을 보고한 바 있다. Inamori(1988)는 부영양화 호수에서 발생하는 *Microcystis wessenbergii*의 분해 역할을 하는 미소후생동물인 *Aelosoma hemprichi*(Oligocheta) MA계, *Philodina erthrothalma*(Rotatoria) MP계, *Aelosoma hemprichi*(Oligocheta)의 *Philodina erthrothalma*(Rotatoria) MAP계를 광조사계(4,000 lux)와 광차단계로 분리하여 실험한 결과 광차단계의 경우 광조사계에 비해 TOC 제거율이 높았는데, 이는 미소동물의 존재가 *M. wessenbergii*의 분해를 직접촉진하는 것외에 조체분해에 수반되는 유기물 증대로 세균류를 증식시켜, 간접적인 *M. wessenbergii*의 분해를 촉진시키는 작용을 하고 있음을 시사하였다.

Lampert(1987)는 Daphnids가 담수의 먹이연쇄에서 중앙의 위치를 점유하여 섭식대사를 통해 세균과 조류의 군집에 영향을 끼침을 보고하였다. 섭식율(feeding rate)은 먹이의 농도에 비례하며, 빛, 산소, pH 및 군집도에 따라

서 영향을 받는다. 일반적으로 최적 포식율의 온도는 약 20°C이나 오랜 기간 동안 적응된 후라면 최적온도 역시 변화한다. 본 실험에서 *Daphnia magna*의 접종량에 따른 수질 변화는 표 18과 같다.

표 18. *Daphnia magna* 접종량에 따른 정치 배양시 수질변화

기간 day	<i>Daphnia</i> Ind./l	W.T °C	pH	COD mg/l	Cond. umhos/cm	Turbid. 600nm	Chl. _a mg/m ³	PO ₄ -P mg/l	NH ₃ -N mg/l
Initial			8.8	32.2	180	58.0	600.0	ND	0.089
0		15	9.1	31.6	185	59.7	459.5	0.005	0.114
		20	7.2	24.7	205	72.6	403.7	0.010	0.500
		25	7.3	22.8	215	76.7	312.9	0.006	0.869
4th day	100	15	8.2	29.3	195	62.6	396.3	0.009	0.183
		20	7.2	19.4	210	86.1	167.9	0.148	3.137
		25	7.2	20.0	230	81.8	112.9	0.198	3.493
400		15	7.6	18.6	195	97.4	56.4	0.149	1.386
		20	7.2	11.3	218	96.7	20.6	0.509	4.534
		25	7.3	12.8	250	97.1	19.9	0.659	5.748

*Daphnia magna*의 개체수 밀도가 높을 수록 처리효율이 높았고 고밀도의 경우 온도의존성이 상대적으로 낮았으며(표 19), 처리효과는 48시간 이후 부터 현저하였다. 따라서 호수나 폐하수처리에서 조류의 제거목적으로 *Daphnia magna*를 이용할 때는 밀도가 400 마리/l 이상 되도록 유지하고, 체류시간 48 시간 이상 동안 포식작용이 가능하도록 관리하여야 된다고 사료된다.

표 19. *Daphnia magna* 접종량에 따른 처리효율의 온도효과계수(θ)

밀도 조건	COD	Turb	Chl. a
저밀도 100 Ind./l	1.15	1.18	1.09
고밀도 400 Ind./l	1.04	1.00	1.01

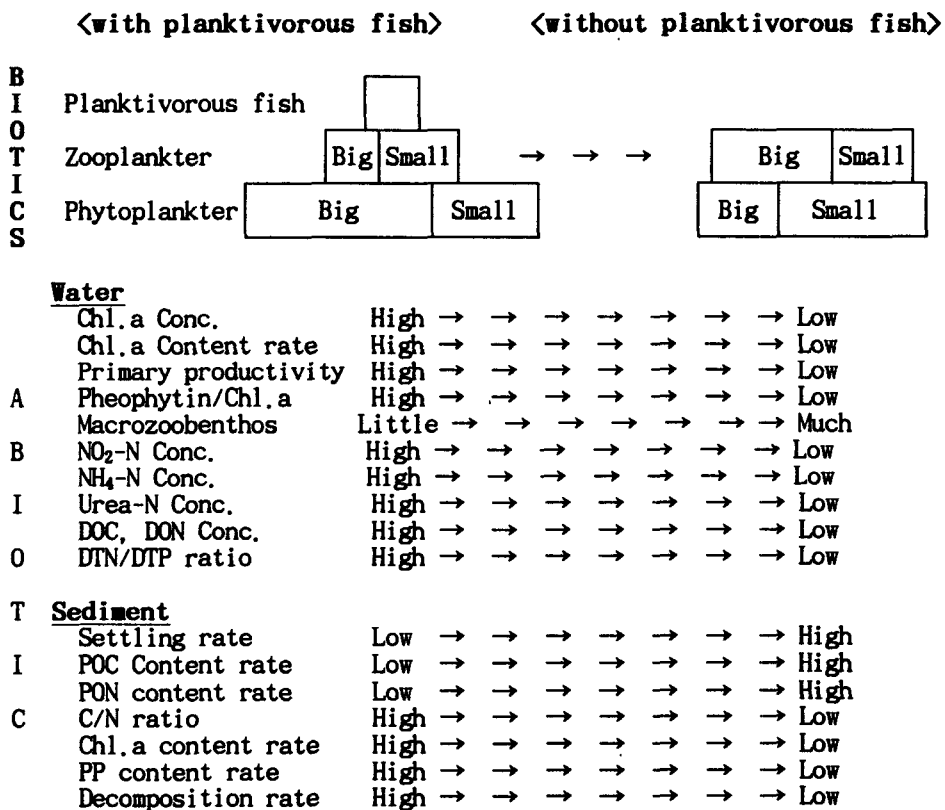
3. Control of trophic levels(Biomanipulation)

수중 생태계내 최상의 영양단계를 점하고 있는 top-consumer(대개 육식어류)의 조절은 하위 영양단계의 현존량 및 종조성을 변화시킨다. Shapiro 등(1975)에 의해 정의된 Biomanipulation의 개념은 이와 같은 top-down force에 의해 수질을 개선하는데 중점을 두었으며, 현재까지 적용된 대부분의 기법이 플랑크톤 섭식어류의 50~100%를 수체에서 제거하거나 육식어류를 이입하여 이들의 현존량을 저감시키므로써, 동물성플랑크톤의 조류에 대한 포식압(grazing pressure)을 증가시키는데 있었다. 그러나 최근에는 영양단계의 구조 뿐만아니라 먹이망(food web)내 구성자간의 영양물질 흐름등이 Biomanipulation 분야에서 함께 연구되고 있으며(Gophen, 1990), 영양물질의 관리를 통한 생물현존량의 변화를 유도하는 Bottom-up effect까지 이에 포함되어 Biomanipulation은 광의의 개념으로 확대발전 되고 있다.

(1) Top-down effect

최근 Kong 등(1994a, 1994b)의 연구결과를 인용하면 planktivorous fish의 인위적 제거 혹은 배스등의 육식어종을 도입하여 그 현존량을 저감할 경우, 생물 구성자는 물론 수질 전체의 변화가 뒤따른다. 즉 개체 크기에 따른 선택적 포식특성을 가지는 플랑크톤섭식성 어류가 감소할 경우, 동물성플랑크톤은 현존량 증가와 아울러 대형종의 구성비를 증가시키며, 그에 따라 식물성플랑크톤의 현존량 감소와 아울러 대형종의 감소가 수반된다. 플랑크톤 섭식성 어류의 감소는 식물성플랑크톤의 일차 생산력을 저감시키며 배설 특이성에 기인하여 수질항목간의 존재비를 변화 시킨다. 현탁물질의 침전속도는 일차생산력과 아울러 조류에 대한 동물의 섭식능에 좌우되므로, 플랑크톤 섭식성 어류의 감소에 따른 동물성플랑크톤 현존량의 증가는 물질의 침전속도를 증가시킨다(표 20).

표 20. 플랑크톤성 어류의 조절에 따른 수질 및 영양단계 변동



(2) Bottom-up effect

영양물질의 관리는 수중내 일차생산력의 감소를 위해 적용되어온 전통적인 것으로 이루 열거할 수 없는 기법이 적용되어 왔다. 그러나 이 방법 역시 수중 생태계에 대한 사전정보가 없는 상태에서는 내부부하로 인해 그 효과가 나타나지 않는 경우나 혹은 영양물질의 존재 구성비 등의 변화로 인해 예기치 않은 생물종의 출현으로 이어질 가능성이 내포되어 있어, lake-specific한 관리가 요한다.

IV. Conclusion

부레옥잠이나 미나리등의 수생식물을 이용한 수처리는 저비용 및 처리공정의 안전성과 같은 장점과 아울러, 유기 및 중금속 농도에 따른 적용상 제한, 처리용량에 따른 부지확보 문제, 동한기 처리식물의 유지관리, 과잉생산된 식물체의 주기적 제거, 제거물의 재이용에 대한 기술확보 등이 선결되어야 하는 제한점을 가지고 있다. 따라서 이 방법은 모든 처리시스템에 보편적으로 적용될 수 있는 방법이 아니어서 고농도 폐하수의 경우엔 유입수에 대한 전처리가 요구되며, 소규모 처리용량에 온실축조를 위한 부지확보가 가능한 곳이어야 하고, 제거물의 사료 및 퇴비화 공정을 갖춘 공장이 근접하여 수송이 가능하거나, 유기비료로 환원할 수 있는 농경지가 주변에 조성되어 재활용의 고리가 사전에 협의되어야만 한다. 이러한 시스템이 활용가능한 최적지의 하나로 최근 공공수역의 하천부지에 많이 조성되어 있는 각종 요식업소를 꼽을 수 있다. 기계적 처리시스템을 운영할 수 없는 소규모 단위 요식업소는 간단한 침전지에 이어 수생식물 온실처리조를 조성하여 오수를 처리하고, 미나리와 같은 식물은 식용으로 재이용할 수 있다.

초식성 어류에 의한 수초제거는 수초가 과잉번식하여 수질 및 위락에 뚜렷한 영향을 주어 원천적으로 수초를 제거하여야할 필요성이 있는 수역에 제한하여 적용하여야 한다. 초어의 투입으로 수생식물대가 거의 사라진 일본의 여러 저수지의 예를 볼 때도, 초어의 투입은 수생식물의 자연정화능 및 그 역기능에 대한 충분한 검토가 있을 후 실시되어야 한다. 다행히 초어의 자연번식이 불가능한 것으로 알려진 국내 수계에서는 초어를 적정규모로 방류한다면 과잉수초에 대한 지역적 관리가 가능하며 방류 초어의 타지역 유출에 의한 위험성은 크지 않을 것으로 본다.

백련어 등에 의한 조류 현존량의 직접적 관리는 먹이로서의 조류량과 섭식자로서의 백련어가 균형을 유지할 수 있는 일정 범위에서만 가능할 것으로 본다. 즉 영양염류 농도가 낮아 조류 현존량이 적은 곳에선 백련어의 성장과 섭식능이 약하고 오히려 배설을 통한 물질순환 속도의 가속화가 조류생산을 가중시킬 가능성이 있다. 따라서 조류가 고도로 이상증식된 곳에 백련어를 투입하여 백련어 현존량과 어느정도의 균형을 유지시키는 수준까지 조류 현존량을 조절하는 제한적인 범위에서 적용이 가능할 것으로 본다.

Bio-manipulation에 의한 수질개선을 위해 국외의 많은 호수에서는 최고차 영양단계의 육식어류 특히 넓은잎배스등을 도입한 경우가 많다. 기존 생태계에 대한 새로운 생물종의 인위적인 이입은 기존 생태계를 변화 시킴에 있어 상당한 부작용의 위험성을 내포하고 있는 것이므로, 이러한 기법의 적용에는 기존 생태계에 대한 구체적인 정보가 확보되어 있어야 한다. 즉 고유 생태계에 항구적으로 적용해온 기존 고유종의 먹이사슬을 교란하므로써 나타날 수 있는 예기치 못한 수질 및 생태계의 변화는 충분히 바람직하지 못한 결과를 초래할 가능성을 내포하고 있다. 현재 국내에 무작위적으로 도입된 배스나 블루우길은 기존의 수질 및 생태계에 많은 변화를 일으키고 있을 가능성이 충분히 있다. 특히 블루우길은 플랑크톤 포식어종으로서 동물성플랑크톤의 조류에 대한 포식압을 떨어뜨릴 가능성이 커 이에대한 연구가 필요한 시기에 있다고 본다.

References

- Arnold, D.E., 1971. Ingestion, assimilation, survival, and reproduction by *Daphnia pulex* feed seven species of blue greenalgae, Lim. Oceanogr., 16:906-920.
- Borutskij, E.V., 1955. Methods for study the feeding of plant-eating fish, 54-61, Moskva, Izadat, Akad, Nauk SSSR
- Cure, V., 1970. The development of grass carp in Fasinet pond. Bull. cerc. pisc., 29(4), 31-49.
- Debusk, T.A., L.D. Williams, and J.H. Ryther., 1983. Removal of nitrogen and phosphorus from wastewater in a water hyacinth-based treatment system. J. Environ. Qual., 12(2):257-262.
- Fisher, Z and V.P. Lyakovich, 1973. Biology and bionergetics of grass carp *Ctenopharyngodon idella*. Pol Arch Hydrobiol 20:521-557.
- Fowler, M.C. and T.O. Robson, 1978. The effects of the prefernces and stocking rates of grass carp (*Ctenopharyngodon idella* Vall.) on mixed plant communities, Aquatic Botany, 15:261-276.
- Gophen, M., 1987. Fisheries management, water quality and economic impact : a case study of lake Kinneret. proc. World conference on large lakes, Mackinac island, Miichigan USA. 18-21/5/1986 2:5-24.
- Gophen, M., 1990. Biomanipulation: retrospective and future development. Hydrobiologia, 200/201:1-11.
- Heimbuch, D.S., 1978. Cultured Daphnids as a biological wastewater treatment system for oxidation pond effluent clarification. PB-285-933.
- Hestand, R.S. and C. Carter, 1978. Comparative of grass carp and selected herbicides on macrophytes and phytoplankton communities, J. Aquatic plant manage., 16:43-50.
- Hickling, C.P., 1966. The feeding process in the white Amur. J. Zooll. (London), 148:408-419.
- Inamori, Y., N. Hayashi, and R. Sudoh, 1988. Experimental studies on the role of smaller animals with regard to the degradation of AOKO, Jap. J. Water Treat. Biol, 24(1).
- Inamori, Y., 1990. Water polution research and control. Kyoto, July 29 Agust 3,
- Kong, D.S., T. Fukushima, M. Aizaki, R. Hussein, 1994a. Effects of aquatic animals on settling and decomposition of particulate materials. Proc. Conf. Lim. Stu. Kas. Wat. Res. Sta., 8:39-45.
- Kong, D.S., T. Fukushima, M. Aizaki, R. Hussein, 1994b. Some effects of aquatic animals (zooplankton and small omnivorous fish) on settling and decomposition of particulate materials. Sympo. Kor. J. Limnology., 1994, 1:9-26.
- Lampert, W., W. Fleckner, H. Rai, and B.E. Taylor, 1986. Phytoplankton control by grazing zooplankton : A study on the spring clear-water phase. Limnol. Oceanogr. 31:478-490.

- Lembi, C.A. *et al*, 1978. The effects of vegetation removal by Grass carp on water chemistry and phytoplankton in Indiana Ponds. *Trans. AM. FISH.*, 107(1).
- Lukanin, A.P., 1959. Experimental on growth of white amur in Angelinsk pond, *Ryb. khoz.*, 35(6):82-83.
- Mitchell, C.P., 1984. Limnological changes in a small lake stocked with grass carp. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Reaech*, 18:103-114.
- Opunszynski, K. 1967a, Comparison of temperature and oxygen tolerance in grass carp (*Ctenopharyngodon idella* Vall.) Silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix* Val.) and mirror carp (*Cyprinus carpio* L.) *, Ekol. pol., ser. A*, 15:385-400.
- Reddy, K.R. and D.L. Sutton, 1984. Water hyacinth for water quality improvement and biomass production. *J. Environ. Qual.*, 13(1)
- Reddy, K.R., 1983. Fate of nitrogen and phosphorus in a wastewater retention reservoir containing aquatic macrophytes. *J. Environ. Qual.*, 12:137-141.
- Shapiro, J., V. Lamarra & M. Lynch, 1975. Biomanipulation: an ecosystem approach to lake restoration. In: P.L. Brezonik and J.L. Fox (eds). *Proc. Sym. Wat. Qua. Man. Bio. Con.*, Univ. Fla., Gainesville:85-69.
- Reed, S.C., 1988. *Systems for Waste Management and Treatment*, McGraw Hillbook company
- Spangler, F. *et al.*, 1976. Experimental use of emergent vegetation for the biological treatment of municipal wastewater in Wisconsin., *Biol. Cont. Wat. Poll.* (ed by J. Tourbier *et al.*). Univ. Pen. Pr., 161.
- Stroganove, N.S., 1965. Food selection in grass. Ashkhabad, 181-191 (in Russian).
- Takayuki, H. and M. Yasuno, 1987. Evaluation of *Microcystis* as food for zooplankton in a eutrophic lake. *Hydrobiologia*, 144:251-229.
- Trivedy, K. and V.R. Gudeker, 1987. Treatment of textile industry waste using water hyacinth. *Wat. Sci. Tech.* 19(10):1503-1511.
- Vergin, B.V., 1963. Materials on food preference and 24hr food intake in grass carp
- Wathugalea, A.G. *et al.*, 1987. Removal of nitrogen, phosphorus and COD from waste water using sand filtration system with *Phragmites australis*. *Wat. Res.*, 21(10):1217.
- de Jong, J., 1976. The purification of wastewater with the aid of rush or reed pond., *Biol. Cont. Wat. Poll.* (ed. J. Tourbier *et al.*). Univ. Pen. Pr., 133.
- 橋本 肇, 1984. 水生生物による汚水処理と食糧生産に関する研究. 国立公害研究所 第1回 自然浄化シンポジウム, 67-78.
- 細見正明, 1988. アシ原の自然浄化機能を活用した生活雑排水処理. 国立公害研報. No. 119.

- 長野縣水産指導所, 1971.
- 津野 洋, 宗官 功, 深尾忠司, 新村正樹, 1990. 花粉植物の水耕栽培による下水二次處理水からのリン及窒素の除去に関する研究. 下水道協會論文集, 27(316):53-60.
- 沖 陽子, 中川恭二郎, 1981. 自然水域におけるホテイアオイ個體群の生長と群落構造の解. 析文部省科研[兒島湖集水域] 研報, 115. 1981
- 변종영, 김문규, 아종식, 1985. 수생식물을 이용한 수질오염원제거에 관한 연구. 제1보. 부레옥잠의 유기물 제거효과 및 생장에 미치는 제요인, 한국잡초학회지, 5(2):143-148.
- 수자원공사, 1993. 수생식물 재배를 통한 댐저수지 유입수 수질개선 타당성 조사연구, 211 pp.
- 국립환경연구원 호소수질연구소, 1991. 호소만입부에서의 조류대량증식 제어 기술개발(I)
- 국립환경연구원 호소수질연구소, 1992. 호소만입부에서의 조류대량증식 제어 기술개발(II)
- 국립환경연구원 호소수질연구소, 1993. 호소만입부에서의 조류대량증식 제어 기술개발(III)
- 日本水産廳研究部漁場保存科, ティラピアニロチカ 自家汚染防止 マニュアル