

부영양화의 진행과 그 대책

곽노태 · 안태영*

단국대학교 미생물학과, 서울대학교 분자미생물학연구소

부영양화(eutrophication)는 무기 영양염류의 증가로 인하여 조류 등의 식물성플랑크톤이 급증하며 이에 따라 수중 생태계 환경이 변화되는 현상을 말하며 호수와 같이 정체된 수계에서 두드러진다(18). 호수는 유역으로부터 영양물질이 유입되어 호수 내의 영양물질의 농도는 점차 증가하게 되며, 조류와 같은 독립영양생물과 이어서 상위 영양단계 생물이 증식하는 결과를 가져온다. 부영양화로 증가된 생물 개체수로 다른 종과의 자원 경쟁이 심화되어 보다 효율적이고 경쟁적인 군집으로 변화되어 가며 이러한 생물 군집의 변화와 증식으로 수계의 물리·화학 환경(용존산소와 유기물 농도, 광 투과량 등)의 변화가 일어나며 이는 다시 생물 군집의 변화에 영향을 주게 된다. 이러한 부영양화는 영양염류가 결핍되어 있는 빈영양호에서 전체 생물량이 증가하는 긍정적인 효과도 있으나 부영양이나 중영양 상태에 있는 곳에서는 바람직하지 못한 방향으로 그 효과가 나타나고 있으며 인위적인 개발로 인하여 더욱 가속되고 있다. 자연계에서 제한 요소로 작용해 오던 인과 질소 등의 영양염류가 급증됨으로써 호수에서 조류가 폭발적으로 증식하는 조류 대발생(algal bloom) 현상이 자주 발생하며 이에 따라 많은 문제가 초래된다. 증가된 유기물이 분해되어 용존산소가 고갈되거나 또는 부영양화로 급증한 남조류의 독소로 인하여 어패류가 폐사하는 것도 그 한 예이다. 또한 수자원의 질적 저하를 초래하여 식수원은 물론 공업, 농업 용수원으로도 부적합하게 되어 상수나 용수처리에 많은 비용을 발생시킨다.

본 고에서는 작은 저수지인 천호지를 대상으로 부영양화의 진행과 원인 그리고 이에 따른 미생물생태학적인 변화를 살펴보았으며 끝으로 호수를 회복시키는 부영양화의 대책에 대하여 간단히 기술하였다. 천호지는 충청남도 천안시 단국대학교 천안 캠퍼스 앞에 위치한 0.31 km²의 작은 관개용 저수지로 1995년 평균 엽록소 a의 농도가 75 µg/l에 달하는 등 부영양화 현상이 매우 심하게 나타나고 있다(1). 최대 수심은 7.8 m, 평균 수심은 3 m 정도로 얕아 성층현상은 나타나지 않으며 평균 체류시간은 3-4개월이나 집수역에서 저수지까지의 유달 시간이 짧아 집수역에서의 실 체류시간은 1주일 미만일 것으로 추정된다.

천호지의 부영양화 진행

부영양화의 가장 큰 척도는 일반적으로 엽록소 a(chlorophyll-a)로 표현되는 조류량이다. 천호지의 년평균 엽

록소 a 농도는 1989년 52 µg L⁻¹에서 7년 후인 1995년에는 75 µg L⁻¹로 크게 증가되어(Table 1) 년평균 엽록소 a 농도의 증가 속도는 약 4 µg L⁻¹ 정도로 매우 큰 값을 기록하고 있다. 특히 1992-1993년에는 그 값이 크게 증가되었으며 무기인산염 농도의 급격한 증가와 일치하였다. 최대 엽록소 a 농도도 점차 증가하는 양상을 나타내어 1989년 101 µg L⁻¹에서 1994년, 1995년에는 같이 195 µg L⁻¹로 기록되었다(Fig. 1). 1992-1993년도에는 1992년 2, 3, 4월과 1993년 8, 9월의 5회의 측정 기록밖에 없으며 그 해의 최대 엽록소 a 농도는 더 클 것으로 생각된다.

광합성에 의한 1차 생산은 일조량과 온도의 영향이 가장 크므로 계절적인 엽록소 a의 변화는 겨울철에는 낮아졌다가 봄철 초기에 증가되어 늦은 봄과 여름철에 걸쳐 최대치를 이루는 기본 양상을 보이는데 겨울철에는 20-30 µg L⁻¹의 값이 거의 일정하나 봄이나 늦여름 또는 가을의 최대값은 증가하는 경향을 보이고 있다. 수온이 급상승하는 4월에 'Peak'를 보이며 5월에는 급격히 낮아진다(Fig. 1). 7월에 2차 'Peak'를 나타내며 서서히 엽록소 a의 농도가 줄어드는 경우도 있으며 연도에 따라서는 9월 또는 10월에 연중 최대값을 나타내기도 하였다. 1989년과 1990년에는 년 2회의 엽록소 a의 'peak'를 보였으나 1991년에는 년 3회의 엽록소 a 'peak'가 나타났으며 1994년과 1995년에는 다시 년 2회의 'peak'가 나타났다(Fig. 1). 이는 인 농도 증가에 따라 엽록소 a 값의 최대값은 증가하며 조류대발생의 년 발생 회수는 초기에는 뚜렷하지 않다가 년 1-2회로 뚜렷이 나타나며 다음에는 년 3회 발생되지만 계속되는 인 농도 증가에 따라 그 최대값은 물론 더 증가하지만 발생 회수는 2회로 줄어드는 보고(18, 28)와 유사하게 나타났다. 점점별 엽록소 a의 변화는 하천 유입 수역인 정점 1에서는 엽록소 a의 농도가 급증하였다가 빠르게 감소하며 변동폭도 매우 크게 나타났으며, 호수의 물 흐름에 따라 정점 2, 3으로 갈수록 변동폭이 크지 않으며 특히 방류 지점인 정점 4에서는 정점 1에서 뚜렷이 구분되는 'peak'들이 평탄한 고원 형태로 이어져 나타났다(자료 미 제시). 이러한 점점별 차이도 위에서 언급한 부영양화에 따른 조류량 변화 양상과 유사하여 유입 정점에서 유출 정점으로 갈수록 무기인산염과 총인 농도는 감소하며 외부 하천에 의한 영향이 줄어들고 있었다.

부영양화의 원인은 식물 영양염류의 증가이며 무기질소와 인이 가장 중요함이 밝혀졌다. 일반적으로 지리적, 지질학적으로 인 농도가 높아 질소 제한적인 소수의 호수를 제외한

대부분의 담수호에서는 인이 조류 증식에 제한 영양염인 것으로 나타났다. 천호지의 용해성 무기인산염(DIP) 농도도 엽록소 a 농도와 비슷한 증가 양상을 나타내었다(Table 1, Fig. 1). 1992-1993년은 정확한 조사가 이루어지지 않았지만 여러 신설공사와 주거 인구의 급증으로 인의 유입이 크게 증가되었을 것으로 생각된다. 질소원(NH₄, NO₂, NO₃) 그리고 다른 인자는 확실한 증가 추세를 보여주고 있지는 않으며 엽록소 a와 무기인산염 또는 MBOD-P(BOD 변법으로 인의 이용 가능한 정도를 측정) 농도와의 상관관계가 높게 나타나 천호지의 부영양화는 주로 인의 증가에 기인하는 양상으로 나타났다. Nakamoto(20)에 의하여 보고된 BOD 변법(MBOD)에 의한 호수의 결핍 형태 분류에서도 천호지는 높은 MBODP로 인 결핍형이 확인되고 있다(5).

천호지의 인산염 농도 증가와 인부하

주별, 월별 관측에서는 식물플랑크톤 양과 무기인산염 농도가 반비례하는 현상이 일반적이거나, 연평균 값의 변화 추이를 파악하는 연도별 관측에서는 그렇지 않다. 천호지는 Table 1에서와 같이 조류의 제한 영양염인 무기인산염 증가되어 엽록소 a 농도가 증가한 것으로 보여진다. 식물플랑크톤의 최대 농도를 예측하는데 많이 이용되는 총인 농도(16)는 1994, 1995년에만 측정하였다. 그러나 장기적인 총인의 변화는 무기인산염 농도 변화와 일치하며 천호지에서는 월별 변화도 거의 같게 측정되어(Fig. 2) 장기적인 무기인산염 농도의 증가 추이는 식물플랑크톤의 증가 추이를 평가하는 요인으로 사용될 수 있는 것으로 생각되며 1989-1993년에는

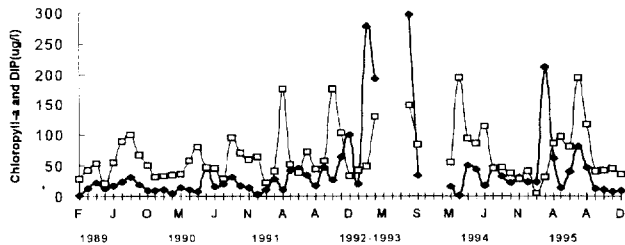


Fig. 1. Variation of chlorophyll-a and dissolved inorganic phosphate concentration from 1989 to 1995 in Cheonho reservoir.

측정하지 않았지만 저수지의 총인 농도도 증가하는 무기인산염 농도로 보아 같이 증가하였을 것이다. 약 20년간 측정된 북부 이탈리아 호수의 자료에서도 이 둘의 변화는 거의 일치하는 것으로 나타났다(14).

체류시간이 짧고 작은 호수에서는 외부에서 유입되는 인이 효과적으로 이용되지 못하고 배출되므로 인 결핍 현상이 큰 호수에 비하여 덜 나타나며(19) 따라서 인부하와 무기인산염 농도의 증가에 따라 조류량으로 평가되는 부영양화의 진행이 느린 것으로 알려졌다(16). 그러나 천호지에서는 높은 유기인 분해효소농도로(23) 보아 유입된 인이 식물플랑크톤에 빠르게 이용되어 짧은 체류시간에도 유입된 인이 대부분 유출되지 않고 효율적으로 이용되는 것으로 보여진다. 따라서 짧은 체류시간을 지닌 작은 천호지에서 유입된 인이 유출되기 전에 빠르게 이용함으로 식물플랑크톤이 계속 증가될 수 있는 것으로 보여진다.

유입수를 통한 인의 유입량은 호수의 부영양화의 정도를 결정하는 중요한 인자가 되며 호수의 수질 개선을 위한 통제 목표가 된다. 하천의 유량과 총인 농도에서 산출된 1994년 총인 부하는 4.2 t-P y⁻¹로, 호수 면적당 인부하는 13.1 g-P m⁻² y⁻¹로 예상된다(Table 2). 물론 큰 호수와 체류시간이 짧고 작은 호수는 다르게 비교되어야 하나 그럼에도 불구하고 OECD가 정한 허용 인부하량이 0.4 g-P m⁻² y⁻¹ (29)의 33배로 이렇게 높은 인부하는 매우 위험한 수준으로 볼 수 밖에 없다. 따라서 높은 인부하로 년 평균 무기인산염

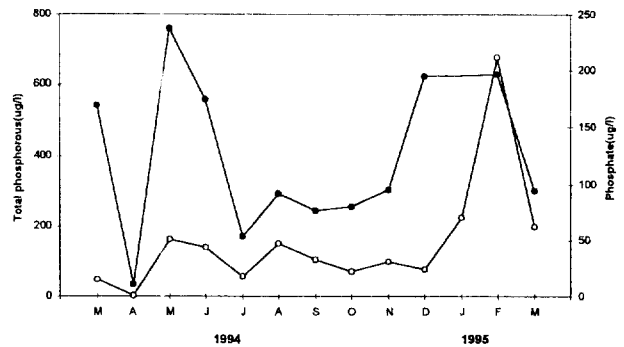


Fig. 2. Seasonal variation of dissolved inorganic phosphate and total phosphorus concentration in 1994.

Table 1. Annual average variations of important abiotic and biotic parameters in Cheonho reservoir from 1989 to 1995

Parameters	1989	1990	1991	1992-93	1994	1995
Temp.(°C)	16.1	16.4	18.7	15.3	19.1	14.2
pH	7.9	7.9	8.5	8.5	8.4	8.5
DO(mg L ⁻¹)	10.5	10.6	10.6	7.4	8.8	10.9
BOD(mg L ⁻¹)	5.0	5.0	5.0	5.0	7.7	9.4
MBOD-P(mg L ⁻¹)	28	32	82	112	ND	ND
PO ₄ -P(µg L ⁻¹)	15.2	17.5	36.7	164.4	28.4	70.5
NH ₄ -N+NO ₂ -N(µg L ⁻¹)	130	72	86	324	195	354
NO ₃ -N(µg L ⁻¹)	886	408	322	459	492	659
Chl-a(µg L ⁻¹)	52	56	67	266	75	88
HB(CFU mL ⁻¹)	8.5 × 10 ³	4.8 × 10 ⁴	2.9 × 10 ⁴	3.4 × 10 ⁴	1.6 × 10 ⁴	1.8 × 10 ⁴
TC(MPN 100 mL ⁻¹)	2.1 × 10 ²	6.0 × 10 ²	4.8 × 10 ²	8.2 × 10 ²	1.2 × 10 ³	8.0 × 10 ³

Table 2. Hydrological characteristics and phosphorus loading of Cheonho reservoir in 1994

Items	Units	Values	Remarks
Drainage area	km ²	7.7	Farm 0.9 Forest 6.8
Average surface area	m ²	0.32 × 10 ⁶	
Annual inflow(1994)	m ³ y ⁻¹	3.1 × 10 ⁶	
Average water volume	m ³	0.96 × 10 ⁶	
Hydraulic residence time	year	0.31	
Permissible P loading	g-P m ⁻² y ⁻¹	0.4	
Annual P loading	t-P y ⁻¹	4.2	
P loading per lake area	g-P m ⁻² y ⁻¹	13.1	
Populations in watershed	Ca	2,700	Resident 1,500 Nonresident 1,200
Domestic animals	Ca	414	Cow 81, Hog 120 Others 213

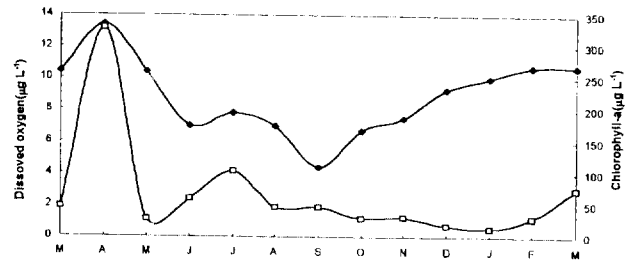
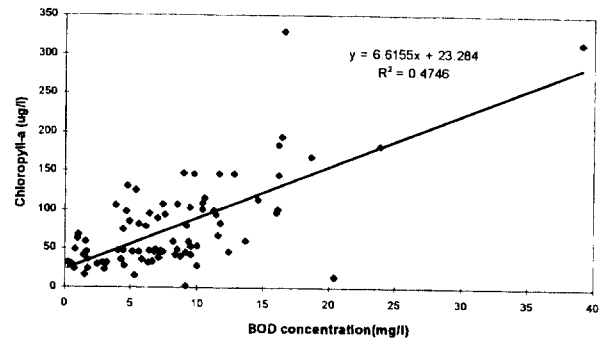
농도는 빠르게 증가하였으며 천호지의 부영양화는 앞으로도 계속 진행될 것으로 보여진다. 이러한 높은 인부하는 대부분 농가 사육 가축에 의한 것으로 여겨지는데 1993년 한국수자원공사의 인부하 원단위(9)를 사용하여 추정된 가축에 의한 인부하는 전체의 79%에 달하고 있었다. 이는 좁은 유역에서 소와 돼지, 닭 이외에도 많은 사슴과 오리를 사육하기 때문으로 여겨진다.

조류 증가에 따른 천호지 생태계의 변화

용존산소(DO) 농도의 변화

호수 표층의 용존산소 농도는 부영양화에 따라 조류량이 증가하면 조류의 광합성 작용으로 증가된다. 부영양화가 진행될수록 호수의 용존산소 농도의 변화는 강이나 민영양호에서 나타나는 수온에 따른 변화 양상이 사라지며 조류의 1차 생산량에 큰 영향을 받는다. 천호지는 부영양화가 매우 심한 저수지로 1차 생산량이 낮은 겨울철을 제외한 전 계절에서 엽록소 a 값과 용존산소 농도는 서로 일치하는 양상을 나타낸다(Fig. 3). 반면 부영양화도가 낮은 팔당호는 여름에 낮고 겨울에 높은 전형적인 물목거울 형태를 나타낸다(2). 이는 겨울에는 수온이 낮아져서 산소 포화도가 늘어나며 유기물 분해도도 낮으며 수온이 높을 경우는 반대 현상이 일어난다는 결과이다.

한편 성층현상이 나타나는 호수의 심층수에서는 미생물의 유기물 분해 작용이 활발하여 용존산소가 빠르게 소모되며 표층에서의 산소 공급은 차단되어 혐기성 상태가 나타난다. 성층현상이 나타나지 않는 얇은 호수에서도 조류 대발생으로 수중 유기물 농도가 매우 높은 시기의 바람이 없는 밤에는 조류의 광합성이 중단되고 호흡 작용이 활발하여 산소 결핍 현상이 나타나며 많은 물고기가 일시에 죽는 경우가 있다. 천호지에서는 4월 조류 대발생 시기 아침에 호숫가에 죽어 있는 물고기 떼를 자주 볼 수 있었다. 오염이 심한 하천에서는 무더운 여름밤에 이러한 현상이 나타난다. 영양상태가 낮은 소양호의 댐 앞 수역은 수심이 80-100 m되며 5월에서 10월 사이에 성층현상이 나타나는데 심층수에서 2 mg

**Fig. 3.** Seasonal variation of DO and chlorophyll-a concentration at station 1 of Cheonho reservoir from March 1994 to March 1995. -●- DO, -□- Chl-a.**Fig. 4.** Correlation between chlorophyll-a and BOD concentration in Cheonho reservoir from 1989 to 1995.

L¹ 이하의 저산소 상태(8)나 무산소 상태(22)가 나타나 부영양화 문제가 나타남을 알 수 있다. 천호지는 낮에 측정된 기록에 의하면 수심이 8 m로 깊은 곳의 상, 하층의 차이는 약 1-2 mg L⁻¹로 큰 차이가 없으며 성층현상이 없는 것을 알 수 있다.

유기물량의 증가

호수의 부영양화에 따라 외부에서 유입되는 유기물량보다도 식물플랑크톤에 의한 호수 내생적(autochthonous)인 유기물의 양이 크게 증가하게 된다. 1989-1995년간 전 정점의 엽록소 a와 생물학적 산소요구량(BOD)과의 상관관계가 높게 나타나서(r=0.449, Fig. 4) 식물플랑크톤 증가에 따라 세균이 이용 가능한 유기물 농도가 증가됨을 보여주고 있다. 특히 1995년에는 두 변수간의 상관관계가 더 높아졌으며 β-glucosidase 활성도와 종속영양 세균 수와의 관계도 밀접하여 식물플랑크톤의 1차 생산물이 빠르게 분해되어 이용되는 양상을 나타내었다(1). 부영양화에 따라 내생 유기물이 외부 유입 유기물 양을 초과하며(30) 조류량과 BOD 또는 유기물 양과의 관계가 밀접해진다는 보고는 많이 발표되었다(2, 8, 21). 정점 1과 정점 2의 BOD 변화는 유입 하천의 BOD 변화와 일치하지 않고 같은 정점의 엽록소 a 농도 변화와 일치하여 역시 외부 유입 유기물보다는 내부 생성 유기물 생성량이 더 많음을 간접적으로 보여주는 현상으로 생각된다(Fig. 5). 유입 인의 증가에 따라 식물플랑크톤이 급증하는 부영양화 현상으로 인한 조류와 유기물이 증가하여 나타나는 수질 악화 현상은 대부분의 취수원이 인공 저수지인 우리나라에서는 심각한 경제적 손실과 사회적 문제를 일으

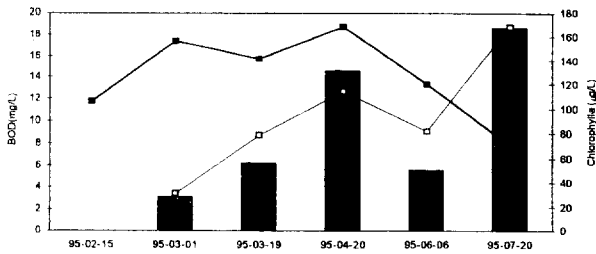


Fig. 5. Seasonal variation of BOD at influent streams and BOD and chlorophyll-a concentration at influent stations in Cheonho reservoir in 1995. ▨ BOD(S2), -■- BOD(S2-1), -□- Chl-a(S2).

키고 있다(2).

세균분포

중속영양 세균수의 경우는 1-2년의 월별 관측에서는 조류와 미생물 수의 관계가 밀접한 것으로 나타나나(1) 장기적인 관측에서는 그렇게 나타나지 않았다(Table 1). 년 평균 중속영양 세균 수는 엽록소 a의 연평균 값의 증가에 따르지 못한 것으로 보인다. 이는 부영양화 진행에 따라 전통적인 동물플랑크톤에 의한 식물플랑크톤의 포식에 의한 물질과 에너지 흐름이 미생물 순환고리(microbial loop)를 통한 과정보다 중요시된다는 보고와 일치되는 양상으로 해석되어질 수 있다(8). 부영양화에 따라 변화된 환경에 적응하는 소수의 우점종이 급증하여 전체 생물량은 증가될지라도 종의 다양성은 줄어든다는 것이 일반적인 견해이다. 스코틀랜드 호수에서 호수의 영양 상태 증가에 따라 조류, 대형식물(macrophyte)과 무척추 동물의 종의 다양성이 부영양화로 종의 다양성이 감소되었다(10, 18). 1998년 소양호의 정점별, 계절별 미생물 종의 다양성 측정에서 위와 같은 경향성이 나타났다(6). 특히 조류가 증가한 6월에는 4개 정점 중 3개 정점에서 미생물 분포는 크게 증가되어 나타났으나 다양성 지수가 낮게 나타났다. 총대장균의 수는 무기인산염과 엽록소 a의 농도에 맞춰 크게 증가되었으며 이는 유역 하천의 오염이 같이 심화되었음을 나타낸다.

미생물 활성

포도당 최대 흡수속도는 부영양화 정도에 따라 증가된다(17, 27). 이는 증가된 1차 생산량에 따라 이용 가능한 유기물과 미생물이 증가되어 나타나는 현상으로 1994년과 1995년에 측정된 천호지의 포도당 최대 흡수 속도는 0.1-8.0 mg-C L⁻¹ h⁻¹로 매우 높으며 따라서 부영양화 정도가 매우 심각함을 알 수 있다. 소양호와 비교하면 소양호에서 조류 이상증식이 나타나는 상갈리 수역이 0.01-0.3 mg-C L⁻¹ h⁻¹이며(3) 빈영양 수역인 댐 앞이 0.001-0.25 mg-C L⁻¹ h⁻¹로 부영양화 정도에 따른 미생물 활성의 차이를 보여준다. 포도당 농도 증가에 따른 포도당 최대 흡수 속도의 증가는 실험실과 실제의 수계 자료에서 확인되고 있다(25). 낮은 농도로 존재하는 이용 가능한 유기물을 효율적으로 흡수하여 이용하기 위하여, 흡수(uptake, incorporation) 시스템은 낮은 Kt값, 즉 높은 기질 친화도를 가지며 빠르게 변화되는 기질 농도에 효율적으로 적응되어 있다. 포도당 농도가 증가되면

그 흡수 속도도 증가되며 자연계의 포도당 농도는 조절되게 된다.

고분자 유기물을 이용하기 위한 세포의 효소의 활성도를 살펴보면 1차 조류 번성시기인 3월(정점 3, 3하, 4, 4하)과 4월(정점 1, 2) 그리고 2차 조류 번성시기인 6월(정점 3, 3하, 4, 4하)과 7월(정점 1, 2)에는 β-glucosidase 활성도 큰 정점일수록 중속영양 세균수가 높게 나타나는 경향성(r=7.04, p<0.01)이 뚜렷하였다(Fig. 4). 한편 조류 번성기 후의 4월과 5월 그리고 7월과 8월에는 둘의 관계는 뚜렷하지 않았다(r=5.04, p>0.05)(Fig. 4). 이는 부영양화가 될수록 증가된 조류의 1차 생산으로 autochthonous한 유기물 공급이 커지며 또한 저분자 유기물의 분비량이 상대적으로 감소되어(13, 15, 24) β-glucosidase 효소의 역할이 증대되기 때문인 것으로 사료된다. 매우 부영양화된 호수에서 식물플랑크톤이 분비하는 저분자 유기물에 대한 세균의 의존도는 크게 낮아진다는 연구 결과(13)가 이를 뒷받침한다.

회복과 방지 대책

부영양화의 회복 및 방지 대책은 크게 호수로 유입되는 영양염류(주로 인) 부하를 줄이어서 호수의 영양염류 농도를 낮추는 방법과 호수 관리를 통하여 부영양화의 해로운 결과를 완화시키는 방법이 있다.

(1) 영양염류 부하를 줄이는 방안은 가장 효율적으로 밝혀져 현재 대부분의 호수 관리는 이를 바탕으로 하고 있다. 여기에는 비점오염원을 줄이기 위한 유역 토지 관리와 점오염원을 감소시키는 하수, 폐수의 질소, 인 처리 방법이 중요하며 그 외에 무인 세계 사용, 유입 하천을 부영양화가 덜한 주변 호수나 바다로 수로를 변경하여 배출하는 방법, 작은 저수지를 유입 수로에 설치하여 인을 사전에 침전시키는 방법 등이 사용되었다. 수계로 유입되는 높은 농도의 영양염류는 대부분이 농경지에서 유래된다. 과량의 비료를 사용하며 토지 관리 부실로 강우에 의한 영양염류 유실량이 산림이나 초지에 비해 매우 크기 때문이다. 따라서 농작물 생산성에 환경 회복 비용을 감안한 새로운 경농 방법과 토지 이용 방안이 연구, 개발되고 있으나 이의 실천에는 정책적인 결정, 사회적 공감, 의식 수준 향상이 더욱 중요한 사항이라 할 수 있다. 이에 경작지 경사를 줄이며 시비 양과 기간을 조절하는 것에서 용해 속도가 느린 비료와 토양 질소를 효율적으로 이용하는 신제품 개발도 있다. 최근에는 유전공학을 이용하여 농작물에 질소고정 유전자를 삽입하는 방법도 등장하고 있다. 경제 성장과 더불어 축산물의 수요가 증가하여 사육 가축 수가 증가하며 축산 폐수와 폐기물에 의한 인부하에 큰 비율을 차지하게 된다. 축산 농가의 영세성과 높은 처리 비용으로 축산 폐기물은 퇴비화하는 것이 최상의 방법으로 알려졌다. 천호지의 경우는 사육 가축에 의한 인 부하가 전체의 약 79%를 차지하는 것으로 추정되어 이의 관리가 부영양화 방지에 가장 시급한 것으로 생각된다.

주요 점오염원은 생활하수와 공장 폐수이며 여기서는 유기물을 제거하는 과정이 대부분이다. 그러나 부영양화는 외부 유입 유기물보다도 내부에서 부영양화에 따라 증가되는

조류에 의한 자체 생성 유기물이 대부분을 차지하므로 부영양화를 방지하기 위해서는 질소와 인을 제거하는 3차 처리 또는 고도처리 과정을 추가하는 것이 필요하다. 경제적이고 효율적인 생물학적 질소, 인 제거 방식은 많이 연구, 개발되어 사용 중에 있다. 혐기성 상태에서 인을 과잉 섭취 (phosphorus luxury uptake)하고 탈질화 작용을 하는 세균을 이용하는 방법이 대부분이며 소규모 처리에서는 금속염을 첨가하여 인산염을 침전시키는 방식도 사용한다(7, 11).

(2) 호소 관리 방안에는 호수 내에서 재순환되는 영양염류를 줄이는 방안이 다른 방안에 비해 효과적이나 비용과 기술상 문제로 널리 보편화되지 못하고 있지 않다. 부레옥잠과 같은 표영 식물을 길러 수거함으로써 식물체내에 축적된 인을 제거하는 방법은 현재 국내에서도 많이 연구되고 있으나 미 우주항공연구소에서는 이미 1970년경에 연구한 바 있다. 표영 식물이 자랄 수 있는 얇은 수역(littoral)의 비율이 큰 곳에서 유리하나 수거 방법과 수거 후 처리방법이 난점으로 남아 있다. 얇은 호수는 저질토에서 인이 재순환되는 것을 방지하기 위해 저질토를 준설, 제거하는 방법도 인과 조류량 감소에 효과적인 경우도 있으나 준설 비용과 제거된 저질토 폐기 문제는 이 방법의 사용을 어렵게 한다. 이 밖에도 다량의 물을 유입하여 호수의 인 농도를 낮추며 체류시간도 감소시키는 방법과 호수에 금속염을 첨가하여 인을 침전시키는 방법, 호수 바닥을 플라스틱 필름으로 덮는 방법 등이 사용되었으나 기술, 비용, 효과 면에서 많은 문제점이 나타난 것으로 보고되었다. 부영양화의 증상을 완화시키는 방안으로는 호수에 공기를 주입하거나(인공 폭기) 펌프를 이용하여 호수 물을 혼합하여 성층화 현상을 방지하여 용존산소 농도를 증가시키는 방법이 있다(안산 신도시의 호수와 잠실의 석촌 호수에서 적용). 조류량을 감소시키는 생물학적 제어 방법도 연구되었다. 수중 먹이 사슬을 이용하는 방법으로 원리는 동물플랑크톤을 증가시키어 식물플랑크톤 양을 줄이는데 있다. 일반적인 방법은 동물플랑크톤을 포식하는 어류를 감소시키는 것이다. 이러한 방법은 영양염류에 의한 조류의 상향 조절(bottom-up control) 개념에 대응하여 하향 조절(top-down control) 개념으로 발전하였다. 어종을 선별적으로 제거하고 키움으로서 큰 동물플랑크톤을 유지시키는 것이 기술이며, 결과적으로 조류량을 낮추어 보다 맑고 깨끗한 호수를 유지하게 될 것이다. 그러나 호수 상태, 조류와 동물플랑크톤, 물고기의 종류와 행동양식 등은 그 결과를 예측할 수 없으므로 정확한 판단을 위해서는 장기적이고 세밀한 연구가 필수적이며, 일률적으로 적용하기보다는 중간중간 그 결과를 평가하여 적용 방식을 수정해 간다면 생물 제어방법의 성공률이 높아질 것이다.

참고문헌

1. **곽노태**. 1996. 천호지의 종속영양 및 세포의 효소의 활성. 이학박사학위 논문. 단국대학교.
2. **김법철, 허우명, 황길순**. 1993. 호수의 일차생산과 인순환 - 담수생태계의 보존대책-. 한국생태학회·한국유수학회 공동심포지움 1993.
3. **김상중, 안태석, 안태영, 조기성, 곽노태, 이동훈, 박호완**. 1994. 소양호 지류에서 식물플랑크톤변화에 따른 미생물 활성도의 일변화. 미생물학회지 **32**, 580-585.
4. **김상진**. 1993. 팔당호 수질의 미생물학 및 화학적 분석. 미생물학회지 **31**, 85-92.
5. **손재학**. 1990. 천호지의 세균분포에 미치는 환경요인에 관하여. 이학석사학위 논문. 단국대학교.
6. **이동훈, 안태석, 조규승**. 1990. 소양호에서의 종속영양세균의 종구성 및 Alkaline phosphatase 분비 세균에 관한 연구. 미생물학회지 **28**, 204-219.
7. **이상은**. 1995. 오·폐수의 질소·인 고도처리기술. 첨단 환경기술 1995년 1월호, p. 10-25. 환경관리연구소.
8. **조영근, 이동훈, 김상중**. 1995. 식물플랑크톤 생장이 소양호 수층의 유기물 분포에 미치는 영향. 한국유수학회지 **28**, 137-150.
9. **한국수자원공사**. 1992. 다목적댐 수질예측에 따른 오염저감 적정화 방안에 관한 연구(2차).
10. **小川 吉夫**. 1995. 호소의 부영양화 조류종의 변천. 첨단 환경기술 1995년 1월호, p. 34-41. 환경관리연구소.
11. **栗林 宗人**. 1990. 下水實務講座 7(高度處理と再利用). 栗林宗人 編. 山海堂.
12. **Franson, M.A.H.** 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th ed. APHA. Washington, D.C.
13. **Bains, S.B. and M.L. Pace**. 1991. The production of dissolved organic matter by phytoplankton and its importance to bacteria, Patterns across marine and freshwater systems. *Limnol. Oceanogr.* **36**, 1078-1090.
14. **Bernardi R., G. Giussani, M. Manca, and D. Ruggiu**. 1990. Trophic status and the pelagic system in Lago Maggiore. *Hydrobiologia* **191**, 1-9.
15. **Berman, T.** 1976. Release of dissolved organic matter by photosynthesizing algae in Lake Kinneret, Israel. *Freshwater Biol.* **48**, 1221-1230.
16. **Dillon, P.H. and F.H. Rigler**. 1974. The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes. *Limnol. Oceanogr.* **19**, 767-773.
17. **Gocke, K.** 1977. Heterotrophic activity. p. 198-222. In G. Rheinheimer (ed.), *Microbial Ecology of a Brackish Water Environment* Springer-Verlag, N.Y.
18. **Harper, D.** 1992. Eutrophication of Freshwaters, In Prediction and modeling on source and effect of eutrophication. Chapman & Hall, N.Y.
19. **Heacky, R.E., P. Cambell, and L.L. Hendzel**. 1993. The stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in particulate matter of lakes and oceans. *Limnol. Oceanogr.* **38**, 709-724.
20. **Hecky, R.E. and P. Kilham**. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments, review of recent evidence on the effect of enrichment. *Limnol. Oceanogr.* **33**, 796-822.
21. **Jin, X., H. Liu, Q. Tu, Z. Zhang, and X. Zhu**. 1990. Lake eutrofication assessment methods and results in China. p. 130-141. In X. Jin, H. Liu, Q. Tu, Z. Zhang, and X. Zhu (ed.), *Eutrofication of Lakes in China*.
22. **Kim, B.C. and K.S. Cho**. 1989. The hypolimnetic anoxic zone and the metalimnetic oxygen minimum layer in a deep reservoir, Lake soyang. *Kor. J. Microbiol.* **22**, 59-166.
23. **Kwag, N.T, J.H. Son, J.S. Lee, and T.Y. Ahn**. 1995. Phosphatase activities in Cheonho reservoir. *Kor. J. Microbiol.* **33**, 267-272.

24. **Mague, T.H., E. Fiberg, D.J. Hughes, and I. Morris.** 1980. Extracellular release of carbon by marine phytoplankton, a physical approach. *Limnol. Oceanogr.* **25**, 262-279.
25. **Münster, U.** 1991. Extracellular enzyme activity in eutrophic and polyhumic lakes, p. 113-115. In R.I. Chróst (ed.), *Microbial enzymes in aquatic environment*. Springer-Verlag, N.Y.
26. **Nakamoto, N.** 1982. Evaluation of available nutrients in eutrophic lake. Japan-Brazil symposium on Science and Technology, p. 575-280.
27. **Rheinheimer, G.** 1985. *Aquatic microbiology*. John Wiley, NY.
28. **Trifonova, I.S.** 1988. Oligotrophic-eutrophic succession of lake phytoplankton, p. 107-124. In Round, F.E. (ed.), *Algae and the aquatic environment*.
29. **Vollenweider, R.A. and OECD.** 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Hydrobiol.* **33**, 53-83.
30. **Wetzel, R.G.** 1983, *Limnology*, 2nd ed. Sanders College Publishers, N.Y.

(Received March 15, 1997)