

호소의 부영양화와 대처방안

The Eutrophication of Lakes and Reservoirs and their Management Plans

이 승 현*
Lee, Seung Heon

1. 서 론

우리나라의 수계는 지형적으로 산맥에 의해 분리되어져 있어 경사가 급하며, 연평균 강수량은 1,274 mm로 세계 평균의 1.3배에 해당하는 것으로 적은 양은 아니지만 인구밀도가 높기 때문에 1인당 강수량은 3,000 m³/년으로 작아서 세계평균과 비교하면 그 양은 약 9%에 지나지 않는다. 또한 우리나라의 연간 총 강수량은 1,267억 m³으로 추정되는데 이 중에서 45%에 해당하는 570억 m³은 증발 또는 지하 침투되고, 하천 유출량은 55%에 해당하는 679억 m³이다. 그러나 강수량의 계절적 변화가 크고 강우량의 60%가 우기에 집중되어 있어 하천 유출량인 467억 m³은 일시에 바다로 유출되어 버리기 때문에 수자원으로는 거의 이용할 수 없다. 수자원으로 이용할 수 있는 평상시 하천 유출량은 대략 18%인 230억 m³에 지나지 않는다. 따라서 점증하는 용수수요에 부응한 수자원을 확보하기 위하여 하천에 대형 댐을 건설하여 많은 물을 체류시키고 있으며, 그 결과 대형 인공호수가 조성되었다. 우리나라의 수자원은 크게 하천수, 복류수,

호소수 및 지하수로 구분할 수 있으며, 그 이용 현황은 하천수 및 하천 복류수가 59%를 차지하며 호소수가 32%, 지하수 및 기타 용천수가 1.6%를 차지하고 있어 우리나라의 수자원은 대부분 지표수에 의존하고 있음을 알 수 있다.

이처럼 호소는 용수 공급 면에서 중요한 역할을 하고 있지만 이에 못지않게 무시할 수 없는 또 다른 역할을 우리 인간에게 제공해 주고 있다. 즉, 담수호는 어족의 서식지로 식량을 제공해주며, 맑은 물은 우리의 심신의 피로를 풀어주고 호소에서 수상스키, 보트놀이, 요트타기, 낚시 등 많은 레크리에이션을 즐길 수 있을 뿐 아니라 호소 주변의 아름다운 경관은 호소수와 어우러져 관광자원으로서의 역할까지 겸하고 있다. 또한 호소는 생태학적 및 학술적 가치도 갖추고 있다. 호소는 매우 복잡한 생태계로 다종다양한 생물의 보호와 함께 학술연구의 대상이 되고 있어 호소는 수량의 확보와 아울러 수질보전이 더욱 강조되고 있다.

본 고에서는 우리나라 수자원 확보에 크게 기여하고 있는 호소수에 대하여 호소의 정의와 현황을 살펴보고 호소의 부영양화에 대처하고

* 한국농촌공사 농어촌연구원 주임연구원 (shyi@ekr.or.kr)

수질을 개선하는데 이용되고 있는 기술들을 소개하고자 한다.

2. 호소의 정의, 종류, 유형

가. 호소의 정의와 종류

국내에서 법적으로 호소환경은 습지보전법(1999) 제2조에 명시된 습지의 세부분류에 속해 있다. 습지는 담수, 기수, 또는 염수가 영구적 또는 일시적으로 그 표면을 덮고 있는 지역으로 정의된다. 습지는 내륙습지와 해안습지로 구분되며, 내륙습지는 육지 또는 섬 안에 있는 湖와 沼, 하구 등의 지역을 말한다.

호소는 호수(湖)와 늪(沼)을 합쳐 만든 용어로서 일본에서는 자연호를 중심으로 정체수역을 총칭하는 용어이다. 근래 우리나라에서도 호소라는 용어의 사용이 확산되면서 호수(湖水)와 동의어이거나 유사한 용어로 사용하고 있다. 호수는 담수로 채워진 정체수역을 일컫는 말로서 자연호를 대상으로 형성된 용어이므로 자연호를 ‘-湖’라 부르고 인공호는 ‘-저수지’ 또는 ‘-댐’이라는 이름으로 구분하여 부르기도 하였으나, 일반적으로 인공저수지에 대해서도 광범위하게 ‘호수’라는 용어를 적용하고 있으며, 특히 저수지의 고유명사에는 소양호, 팔당호 등과 같이 ‘-湖’라는 어미를 붙이고 있다. 작은 규모의 호수나 저수지에 대해서는 일반적으로 ‘-池’라는 어미를 사용하고 있다. 천년의 역사를 가지는 인공저수지인 제천의 의림지는 가장 역사가 오랜 저수지이며, 이외에도 소규모 농업용저수지에 대해서는 ‘-池’라는 용어를 사용하고 있다.

늪은 수심이 얇고 수생식물로 덮인 호수를 말하는 것으로서 우리나라에서는 한자용어보다는 ‘-늪’이라는 용어를 사용하였다. 우포늪, 질남늪 등의 자연호가 하나의 예이다. 沼는 우리나라에서는 하천의 수심이 깊고 유속이 느린 곳을 말하는 용어이나, 일본에서는 이를 우리나라의 ‘늪’의 의미로 사용하고 있다. 일본에서는 따라서 호수와 늪을 합하여 호소라고 부르고 있다. 우리나라에서는 沼의 의미가 일본과 다소 다르므로 호소라는 용어보다는 호수가 더 광범위하게 정체수역을 뜻하는 용어일 것이다. 그러나 근래에 들어 우리나라에서도 호소가 일본에서와 같이 호수와 늪을 포함하는 의미로 널리 사용되고 있다.

호수를 지칭하는 영문용어에서는 자연호를 lake라 하고 인공호는 reservoir라고 구분하여 부른다. 또한 소형 자연호에 대해서는 pond라는 용어도 사용되며, 영국의 스코틀랜드에서는 자연호를 loch라고 부르기도 한다. 그러나 인공호를 보통명사로 지칭할 때는 reservoir라고 부르지만, 고유명사를 만들 때는 ‘reservoir --’라 명명하지 않고 ‘Lake Kentucky’와 같이 자연호와 동일하게 ‘Lake--’라는 이름을 붙이는 것이 상례이다.

영문용어에서 lake와 pond의 차이는 명확하지는 않으나 일반적으로 규모가 크고 수생식물이 없는 개방수면(open water)이 넓은 호수를 lake라하고, 소규모이며 수생식물이 많은 호수를 pond라고 한다. 늪을 지칭하는 영문용어로서는 swamp, marsh, bog 등이 호수내 식생에 따라 구별하여 사용된다.

인공호를 dam reservoir와 impoundment로 구분하기도 한다. Dam reservoir는 하천의

계곡을 막아서 하천의 유로 가운데에 만들어진 저수지이며 Impoundment 는 하천인근에 제방을 만들고 하천으로부터 수로를 통하여 끌어들이는 물을 저장하는 시설을 말한다.

우리나라의 수질환경보전법 제2조에는 호소를 “만수위(댐의 경우는 계획홍수위) 구역안의 물과 토지로 규정하고 댐, 보 또는 제방(사방사업법에 의한 사방시설 제외)등을 쌓아 하천, 계곡에 흐르는 물을 가두어 놓은 곳 (댐 또는 저수지), 하천에 흐르는 물이 자연적으로 가두어 진 곳, 화산활동 등으로 인하여 함몰된 지역에 물이 가두어 진 곳”을 포함하여 규정하고 있다. 그러나 보의 경우는 그 규모, 이용목적, 수명들이 명기되지 않고는 호소의 구분에 포함시키기가 모호하다.

따라서 환경부에서 발간한 “한국의 호소환경 조사기법 개발에 관한 연구” 보고서에서는 우리나라의 호소의 정의를 다음과 같이 제안하고 있다.

- 호소는 영구적 또는 일시적으로 담수 또는 기수로 채워진 정체수역을 총칭하며, 만수위(댐의 경우는 홍수위) 구역안의 물과 토지로 규정한다.

- 호소는 댐 또는 제방(사방사업법에 의한 사방시설 제외)등을 쌓아 하천, 계곡에 흐르는 물을 가두어 놓은 곳 (댐 또는 저수지), 하천에 흐르는 물이 자연적으로 가두어 진 곳, 퇴적 또는 화산활동 등 자연활동으로 인하여 함몰 또는 막혀진 지역에 물이 가두어 진 곳을 의미한다.

- 제방 높이가 15 m 이상의 경우는 대댐으로 구분하며, 대댐으로 생성된 호수는 댐호로 정의하되 높이가 5 m~15 m라도 총 저수용량이 3백만 m³이상은 댐, 길이가 2,000 m이상은 방조제 및 하구호 또한 댐호로 규정하고 그 이하 규모의

것은 저수지로 규정한다.

한편, 우리나라에서는 호수의 이름이 규모, 수심, 식생에 관계없이 그 지역의 관습, 시대적 상황, 역사적 전통에 따라 붙여졌으며, 호(湖), 포(浦), 지(池), 연(淵), 담(潭), 택(澤) 등의 꼬리말을 가진다. 지역에 따라 낙동강 서쪽에서는 지(池), 동북부지역에서는 호(湖), 남쪽에서는 포(浦)로 불리고 있다. 습지성 호수는 '벌'이라고 하는데 남한의 가장 큰 자연호수인 우포는 '소벌'의 한자식 표현이다. 우리나라의 자연호는 동해안의 석호와 낙동강 하류에 배후습지성 호수가 집중적으로 분포하였으나 상당부분이 유역 이용도 변화에 따른 퇴적물의 증가나 경지화 등으로 소택지화되거나 매립되어 왔다. 대표적인 우리나라의 자연호는 다음과 같이 분류된다.

- 호(湖)는 큰 독으로 둘러 쌓인 커다란 못을 뜻하나 옛날에는 호가 포, 만과 같이 바닷가나 물가의 땅이란 의미로 많이 사용되었으며, 송지호, 소동정호, 영랑호, 청초호, 향호, 장영호, 감호, 시중호, 매호, 풍호, 금호, 은호, 도호, 응암호, 연호, 용호, 신당호, 석곡호, 장착호, 속기호, 용두호, 순호, 남호, 동호, 용수호, 무계호 등이 있다.

- 포(浦)는 개, 포구 등을 뜻하는데 다른 한편 만처럼 육지쪽으로 쭉 들어온 곳으로 고어의 호와 같은 뜻으로 쓰이며, 천아포, 강동포, 화진포, 경포, 서번포, 동병포, 만포, 삼일포, 하포, 상포, 범포, 장련포, 신광포, 두무포, 우포, 목포, 호포, 사지포, 사물포, 당포, 범포, 상포, 몽상포, 김포, 광포 등이 있다.

- 지(池)는 수전 농업 중심에서 관개용수 확보를 위해서 제언(堤堰)에 의해 생긴 저수지 또는

표 1. 국내의 인공호수 용도별 조성현황

구 분	개 소	저 수 량 (억톤)
다 목 적 댐	9	92
생 공 용 수 댐	15	6
발 전 용 댐	10	-
농업용 저수지	18,179	25
계	18,213	123

출처:송호면외, 2004, 자연공생 호수 실험사업, 건설기술연구원

못으로 일반적으로 규모가 호보다 작으며, 천지, 정양지, 연당지, 용주지, 장승지, 울목지, 답곡지, 조지지, 가명지, 아포지, 월포지, 마을지, 신장리지, 적지, 원지 등이 있다.

- 담(潭)은 물이 깨끗하고 깊은 '소'나 '못'의 뜻으로 '지'와 그다지 구분되지 않고 혼용되고 있다. '소'는 '지'보다 규모가 더 작은 논에 물을 대어 주는 유지(溜池)를 의미하며, 백록담, 화담, 용왕담, 장담, 현담 등이 있다.

- 연(淵)은 물이 고여 있는 깊은 못을 말하며 규모가 아주 작는데 우리나라에서 용연(龍淵) 계통의 지명이 많으며, 삼지연, 용연, 사연이 이에 해당한다.

- 연(淵)은 연자(淵字)의 고어로 '늪'이라 할 수 있고 냉대 기후로 증발량이 적은 북한 지방에 편재하며, 현금연, 대연, 연덕 등이 있다.

- 택(澤)은 평지보다 약간 얇고 물이 고여 있는 소택지를 말하며, 북한의 대택지가 대표적이다.

- 늪은 수심이 얇고 수생식물로 덮인 호수를 말하며, 우포늪, 질날늪 등이 대표적이다.

나. 호수의 유형

호수의 분류방법은 일정한 기준에 의해 정해지

는 것은 아니지만, 특성 및 이용목적 등에 따라 다양하게 분류할 수 있다. 호소의 면적 및 저류용량 등에 의해서는 대형과 소형으로 분류(10km²을 기준)하고, 이용목적에 따라서는 용수용(상수용, 공업용, 수산용, 농업용)과 발전용, 위락용, 다목적 호수로 분류한다. 또한, 호소의 생성 근원에 따라서는 인공호와 자연호로 분류한다.

현재 알려져 있는 우리나라의 인공호수는 표 1와 같이 약 18,000여개이며, 저수량은 약 123억 톤인 것으로 나타나고 있다. 세부적으로 살펴보면 개소수로는 농업용저수지가 대부분을 차지하고 있지만 저수량은 다목적 댐의 저수량이 가장 많다. 그러나 표-1의 내용은 석촌호수 및 일산호수, 조정호와 같은 위락용 호수(저수지)는 물론 골프장의 연못 등이 누락된 자료로써 수많은 위락용 저수지를 합산할 경우 전체 호수 수는 더욱 증가할 것이다.

호수의 수질 및 유량관리를 목적으로 할 때는 형태적 분류방식을 채택하고 있는데, 형태에 따른 호수의 특성과 우리나라의 대표적인 호수는 다음 표 2와 같다. 수지형(樹枝形) 호수는 주로 산간지역의 하천을 댐으로 막아서 만든 것으로, 계곡에 물이 채워지기 때문에 나뭇가지 모양의 형태를 나타내는 호수이다. 하천형(河川形) 호수는 수지형 호수와 마찬가지로 하천이 댐으로 인해 형성된

표 2. 호수의 형태적 분류에 따른 환경특성

구 분	특 성	대상호수
하천형 (河川形)	1. 체류시간이 비교적 짧다. 2. 호수연안이 비교적 단순하다. 3. 호수의 수평적 농도 변화가 작다.	팔당호, 의암호, 청평호, 진양호, 춘천호
수지형 (樹枝形)	1. 체류시간이 길다. 2. 호수연안이 발달되어 만이 형성되어 있다. 3. 호수의 수평적 농도 변화가 크다.	소양호, 대청호, 충주호, 안동호
저수지형 (貯水池形)	1. 체류시간이 비교적 길다. 2. 저수용량이 작다. 3. 수심이 비교적 얇다.	대가미호, 호암호, 광주호, 장성호
하구형 (河口形)	1. 하구에 위치해 있다. 2. 호수의 수평적 농도 변화가 크다. 3. 오염부하량이 크다.	아산호, 삽교호, 영산호

출처:송호면외, 2004, 자연공생 호소 실험사업, 건설기술연구원

호수이지만 호수의 폭방향보다 길이 방향(흐름방향)이 긴 형태를 가진 호수이다. 저수지형(貯水池形) 호수는 주로 농업용으로 이용되기 때문에, 평지의 농경지 주위에 형성된 호수이다. 하구형(河口形) 호수는 해수의 역류를 방지하여 담수화하기 위한 호수로 하구에 건설된 호수이다.

한국농촌공사에서는 전국 498개소 농업용수 수질측정망 조사대상 농업용 저수지 및 하구담수호의 과거 1990년부터 2001까지 수질자료와 호의 물리적 인자를 이용하여 저수지 오염 유형 분류하는 연구를 수행한바 있는데 오염 유형분류를 위한 수질인자로는 호소 수질오염을 나타내는 가장 대표적인 화학적 산소요구량(COD, Chemical Oxygen Demand)을 지표로 하였고 물리적 인자로는 호의 유효저수량(ST, Effective Storage) 대 호의 만수면적(WS, Water surface)의 비, 즉, 유효평균수심

을 지표로 활용하여 저수지 오염유형 분류도를 작성하여 활용하고 있다. 이 방법은 간단하면서도 많은 수의 저수지와 오랜 기간의 과거의 자료를 바탕으로 한 것으로 수질인자로서 현행 호소수질환경기준 IV등급(농업용수수질기준) COD 농도 8mg/L를 기준으로 분류하였다. 물리적인자인 ST/WS비는 ST/WS비가 10m보다 큰 저수지는 호소수질기준인 COD 8mg/L를 초과하는 곳이 전혀 없었고, ST/WS비가 10~6m 사이의 저수지는 단지 5개 저수지만이 수질기준을 초과한 것으로 나타났다. ST/WS비가 6m 이하가 되면서 수질기준을 초과한 저수지가 증가되기 시작하고, 5m 이하가 되면서 수질기준을 초과하는 저수지가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 ST/WS비는 5m를 기준으로 분류하였다.

저수지오염유형분류도 작성을 위해 조사한

자료를 살펴보면 다음과 같다. 저수지 중에서 평균 COD 농도가 6mg/L 이하인 312개 저수지 중 Chl-a 농도가 25mg/m³ 이하로 수질이 양호한 저수지는 310개로서 99.4%의 높은 비율을 차지하므로 COD가 6mg/L 이하인 저수지는 부영양화가 진행되지 않은 저수지로 판단할 수 있다. 또한 평균 COD 농도가 10mg/L 이상인 40개 저수지 중 36개 저수지의 Chl-a 농도가 25mg/m³ 이상으로 90%를 차지하므로 COD가 10mg/L 이상인 저수지는 부영양화가 진행된 저수지로 판단하는 기준으로 활용할 수 있다. 평균 COD 농도가 6~10 mg/L 사이의 저수지 125개 중 Chl-a 농도가 25 mg/m³ 이상인 저수지는 59(47.2%)개, 이하인 저수지는 66(52.8%)개로 서로 비슷하므로 COD 농도가 6~10mg/L 사이의 저수지는 부영양화 진행 여부를 판단할 때 주의해야 한다.

따라서 COD가 10mg/L 이상이면 수질오염이 심화된 것으로 판단하여 시급히 수질개선대책을 마련해야 하는 저수지인 것으로 판정하여 10 mg/L 이상을 수질대책기준, 6~10mg/L는 시급하지는 않지만 수질오염이 우려되므로 우려기준, 6mg/L 이하는 아직 수질오염이 진행되지 않은 저수지로 판단하여 수질오염 안전기준으로 세분하였다.

3. 호소의 부영양화

호수나 저수지로 수중 생물의 번식에 사용되는 영양 물질들이 비정상적으로 많이 유입됨에 따라 일어나는 생태계와 수질의 변화 및 이로 인한 여러 가지 현상들을 부영양화라 한다.

부영양화는 우리나라의 크고 작은 호수에서도 심각한 문제들을 발생시키고 있다. 부영양화

(eutrophication)라는 말은 eutrophia 또는 eutrophos라는 단어로부터 파생된 것으로, 이 단어들의 의미는 영양이 충분하다는 뜻이다. 즉, 부영양화 현상이란 체류시간이 비교적 긴 호수나 저수지로, 수중 생물의 증식에 기여하는 영양 물질이 과다하게 유입됨에 따른 호수 및 저수지 내에서의 생물들의 과다 번식에 의한 생태계 및 수질변화로 정의한다.

지질학적 관점에서는 모든 호수나 저수지는 영양성분의 농도가 낮은 빈영양 상태에서 부영양 상태로 변하며 부영양 상태의 호수는 늪지로 변한다. 늪지는 습지(濕地)로 변화하고, 습지는 결국 건지(乾地)로 변화한다. 이러한 과정을 호수나 저수지의 노화과정(老化過程)이라 한다. 현재 지구상에 존재하는 모든 호수나 저수지는 이러한 노화과정 중의 한 단계에 있다고 할 수 있다. 즉 모든 호수나 저수지는 인간의 오염행위와 관계없이도 부영양화가 진행되고 있는 것이다. 그 예로 화산이나 산불 등과 같은 자연현상에 의해 발생된 재나 분진이 대기 중에 존재하다가, 호수나 저수지로 유입하여 부영양화가 발생하는 경우를 들 수 있으며, 이를 “자연적 부영양화 현상”이라 한다. 자연적 부영양화 현상은 진행속도가 매우 완만하고, 자연 현상이란 점에서 크게 우려하지 않는다. 그러나 근래 인구의 증가, 산업의 발달 및 농업의 대규모화에 따라, 부영양화의 원인물질이 되는 영양염이 호수 및 저수지로 과다하게 유입되어 부영양화의 진행 속도를 가속시키며, 이로 인한 문제가 빈번히 발생하고 있다. 이러한 부영양화는 자연적 부영양화와 구분하여 “인위적 부영양화”(cultural eutrophication)라 정의한다.

한편 녹조현상이란 식물의 성장하는데 필요한 질소와 인과 같은 영양물질이 많이 존재하는 부영양 수역에서 주로 수온이 높은 여름철에 수체가 정체되어 물 흐름이 잔잔한 상태에서, 한 종 또는 소수의 조류가 대량 증식함으로써 물의 색을 녹색으로 물들이는 현상으로 규정할 수 있다. 여기서 녹조(綠藻)란 물색을 변화시키는 원인이 되는 조류군을 의미한다(엄밀하게는 조류에 속하지 않는 생물도 포함됨). 따라서 녹조현상이란 특정한 조류의 증명을 지칭하는 것은 아니다. 수체의 수면을 녹색으로 만드는 원인 조류는 반드시 일정한 종이 아니며, 다수의 종류가 혼합하여 존재하는 경우가 많지만 대체로 크기가 작은 종들로 이루어지는 경우가 많아 육안으로 구분하기는 어렵다.

녹조현상이란 최근까지도 가장 흔하게 사용되어왔던 물꽃현상(수화, water-bloom)의 일종으로 보는 것이 타당하다. 물꽃현상은 특정수역에서 조류가 대량 증식하여 물색을 변화시키는 현상으로 대량 증식하는 조류의 종류에 따라 물색이 달라지기 때문에 녹조현상을 물꽃현상과 동일한 의미로 사용하는 것은 잘못된 것이며, 물꽃현상이라는 표현은 일반적인 조류의 증식현상을 모두 포함하는 말로 훨씬 넓은 범위의 의미를 가지고 있다.

4. 호소의 부영양화 대처방안

가. 개요

부영양화로 인해 발생하는 특징적 현상으로는 수초의 번성, 수화현상, 어획고의 감소 및 수질 저하로 인한 수자원의 이용도 감소 등이다. 이러한 부영양화 현상을 억제하기 위해서는 다음과

같은 두 가지의 기본 개념이 있으며 일시적 대책으로 추가될 수 있으며 제도적 정책적 대책과 교육 및 계몽 대책을 추가할 수 있다.

첫째, 유역대책으로 호수나 저수지로 유입되는 영양염의 양을 조정하는 방법과 둘째로 호내 대책으로 바다로 영양염이 축적되는 것을 방지하고 수체내의 수질관리를 도모하는 방법이다. 호수의 영양염 농도를 조절하기 위해서는 점오염원 및 비점오염원으로부터 영양염이 유입되는 것을 근본적으로 차단하는 방법을 강구해야 한다. 그러나 비점원으로부터 영양염의 유입을 완전히 차단할 수는 없다. 따라서 호수 내에 유입된 영양염을 제거해야 하는데, 이에 대한 방안으로는 호수나 저수지의 바닥 부분에 침적되어 있는 퇴적물을 준설하여 영양염을 제거하거나, 영양염이 수중으로 용출되지 않도록 호수나 저수지의 바닥을 진흙이나 그 밖의 물질로 도포하는 방법이 있다. 영양염이 수중에 부유하고 있는 상태라면 화학제를 사용하여 침강시키거나 제거한다.

두 번째의 개념은 부영양화 방지의 근본적인 대책이라 할 수는 없으나, 이 방법을 사용함으로써 부영양화의 진행속도를 늦추며, 부영양화 현상을 단기간 동안 억제할 수 있다. 이에 사용되는 방법들 중 가장 보편적인 것으로는 수초의 성장이나 조류의 번식을 억제하는 화학약품의 투여, 수초의 제거, 기계적인 혼합에 의한 성층현상의 방지 및 심층수의 폭기, 특정한 어족의 선택적 제거 등이 있다.

나. 유역 대책

1) 하·폐수로 부터 질소와 인의 제거

인을 제거하는 편이 질소를 제거하는 것보다

표 3. 호소 부영양화 방지 대책

유역 대책	점오 염원	생활배수	공공(하수 및 분뇨포함)	고도하수처리장치 : 영양염류제거 공정
			개인(하수 및 분뇨포함)	정화조설치, 토양트렌치이용, 인함량이 적은 세제 사용, 가정용 침전조 설치
		산업배수	배수의 고도처리 시설(생활배수 처리 시설과 거의 동일함) 광산수 및 비산되는 부유방지막설치	
		축산배수	공동처리장 및 개인방지 시설 설치(분뇨의 적정처리 및 농지 환원)	
		수산배수	적정사료 사용, 배수의 적정관리	
		하천정비	하천준설, 식재, 완충녹지 조성, 우회 하천로 조성	
		관광객	오염방지 의식 계몽, 분뇨의 적정처리 시설 설치	
내부 대책	비점오 염원	강우시 유입수 (임야, 농경지 등)	유입 우회로 건설 및 유입로 변경 적절한 시비관리 및 토양관리 유입지천에 체류지 건설 초생대, 녹색지대 조성 농경지 물 재이용 유역의 침식방지막 설치 폐기물 적정관리	
			퇴적물의 준설	
			영양염 불활성화	
			희석 및 세정	
			조류의 회수 처리 및 수초제거법	
			폭기 및 성층파괴	
			선택적 방류	
			바닥 차폐에 의한 영양물질의 불활성화	
			생물량 제거	
			생물학적 제어	
기타	교육, 홍보 강화			
대책	관련 법규 정비			

출처: <http://www.aak.or.kr/technote/read.cgi?> 자료 재편집

비교적 비용이 적게 들며 그 공정도 용이한 것으로 알려져 있다. 우리나라에서도 부영양화의 발생을 억제하기 위해 질소 및 인의 방류를 규제하고 있으나, 현존하는 대부분의 하수처리장이 부유물질과 BOD의 제거만을 위한 시설만을 갖추고 있으므로, 인이나 질소의 처리를

위하여서는 별도의 시설이 추가되어야 한다. 따라서 이러한 시설을 설치하려면 별도의 비용이 필요하며 이 시설의 운영 및 유지비용을 고려한다면 경제적인 방법이라 할 수 없어, 하·폐수처리 과정에서 인을 제거하기보다는 배출원에서 인을 배출되지 않도록 조정하는 것이

바람직하다. 즉, 합성세제에 포함되어 있는 인의 함량을 줄인다든지, 합성세제를 적정량만을 사용하여 인의 부하량을 줄이는 방법을 고려해야 할 것이다.

2) 농지 살포 및 토양 트렌치법 이용

이 방법은 영양염이 호수로 유입되는 것을 차단시키는 것이다. 예를 들어 폐수처리장에서 처리된 방류수를 호수로 유입되기 전에 토양에 살포하여, 영양염을 여과시킨 후 호수로 유입시키면, 상당량의 영양염이 토양에 의해 걸러져 결과적으로 호수로 유입되는 영양염의 양을 감소시킬 수 있다. 아울러, 토양에 흡착된 영양염은 농작물의 성장에 필요한 영양원으로 작용할 수 있으므로 일거양득의 효과를 기대할 수 있다. 그러나 이 방법을 농경지에 적용하려면 폐수에 독성물질이 존재하지 않아야 한다. 이 방법은 도시지역에서는 적용할 만한 부지면적이 부족하고 기후에 의해서도 영향을 받으므로 적용 가능한 범위는 매우 제한적이다.

3) 유입수 돌리기

점오염원으로부터 영양염을 함유한 방류수가 유입되는 경우 수로를 변경하여 방류수를 호수의 하류부로 직접 흐르게 하여 호수로 영양염이 유입되는 것을 방지하는 방법으로 효과적인 방법이다. 그러나 수로를 변경하기 위한 대규모 공사과 송수관의 설치가 선행되어야 하므로, 막대한 비용이 요구된다는 단점이 있다. 이 방법은 호수로 유입되는 물을 덜 중요하고 덜 심각한 가까운 주변 호수나 바다로 수로를 바꿀 수 있는 곳에서만 가능하므로 널리 이용되지는 못한다.

4) 유입부 침강지 설치

호수의 유입 수로에 물의 흐름을 늦출 저수지가 있거나 만들 수 있다면 인을 호수 유입 전에 침전시킬 수도 있다. 이러한 것은 강줄기에 저수지가 연결되어 있을 때 가능하다.

다. 호내 대책

앞에서 열거한 방법들은 부영양화를 유발시키는 영양염이 유입되는 것을 근본적으로 차단시키는 개념으로, 효과를 보기 위해서는 장기간을 요하며 막대한 시설 투자비용이 요구된다. 또한, 이 방법들은 이미 부영양화가 진행되고 있는 호수나 저수지에 적용하기에는 부적합하다. 따라서 본 절에서는 호수나 저수지 내에 존재하고 있는 영양염의 제거 방법과 부영양화 현상을 단기간 내에 일시적으로 감소시킬 수 있는 방법에 대해 설명한다.

1) 퇴적물의 준설

수질 개선을 위해서는 수중에 존재하는 영양염 뿐만 아니라 호수나 저수지의 바닥 부분에 존재하는 영양염도 제거해야 한다. 이는 바닥에 가라앉아 있는 퇴적물에 상당한 양의 영양염이 함유되어 있기 때문이다. 따라서 퇴적물을 준설하는 방법도 효과적이다. 그러나 준설하는 과정에서 퇴적물 중에 함유되어 있던 영양염들이 수중으로 재유입되어, 수중의 영양염의 농도를 증가시킬 수도 있어 오히려 역효과를 가져올 수 있다. 또한 준설작업으로 인하여 평형상태를 이루고 있던 수중생태계의 균형이 깨져, 침적토가 가지고 있던 영양염의 농도를 조절하는 완충작용을 상실하게 할 수도 있다.

퇴적물은 영양염들이 저장되는 장소이므로 퇴적물의 준설로 인해 영양염들이 저장되는 부분이 없어져 결과적으로 수중의 영양염 농도가 증가될 수도 있으므로, 이 방법을 시행하기 전 면밀한 검토가 필요하다. 퇴적물의 제거는 준설하는 설비도 비용이 많이 들지만 슬러지(sludge)를 운반하고 버리는데도 많은 비용이 필요하다. 이 방법은 얇은 호수로 공공의 가치가 아주 크며 퇴적물로부터 인의 용출이 심하여 다른 영양물질의 제거 방법들이 실패되었을 때 마지막으로 쓰는 방법이다.

2) 영양염의 불활성화

조류는 주로 용해 상태의 영양염을 증식에 이용한다. 따라서 용해된 상태의 영양염을 조류가 번식에 이용하지 못하도록 화학약품을 투여하여 영양염을 불활성화시키거나, 응집제와 반응시켜 영양염을 침전물로 형성시켜 제거하는 방법을 사용하기도 한다.

특히 황산알루미늄(유산반토, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$)과 같은 응집제는 인의 제거뿐만 아니라, 탁도 및 색도를 제거하는 효과도 있어 영양염을 제거시키는 데 효과적인 화학제로 알려져 있다.

3) 희석 및 세정

화학제의 사용이 불가능하다면 다른 지역으로부터 지하수나 기타 관개수를 대량 투입시켜 영양염의 농도를 희석시키는 방법을 고려해 볼 수 있다. 지하수와 희석시킨 호수 물은 관개수로 사용할 수 있을 뿐만 아니라, 지하수층에 재 주입시켜 해수가 대수층으로 유입되는 것을 방지할 수도 있으며, 영양염의 농도가 낮은 호수에 주입

하여 영양의 균형을 맞출 수도 있으므로 좋은 결과를 기대할 수 있으나 희석수가 다량 필요하다는 문제가 존재한다.

4) 조류의 회수 처리 및 수초제거법

수초나 조류를 제거하는 방안은 근본적인 치유책이라 할 수는 없으나, 부분적으로 부영양화 현상이 일어나고 있는 곳에 이 방법을 적용하여 일시적으로 부영양화 현상을 억제시킬 수 있다. 그러나 이 방법은 규모가 작은 호수에서는 효과적일 수 있지만, 규모가 큰 호수에서는 일시적인 치유방법에 지나지 않는다.

5) 폭기 및 성층파괴

수심이 깊은 호소에서 발생하는 성층현상은 심수층의 산소의 고갈로 지층에서의 영양염 용출, 저생생물의 폐사 등을 유발하므로 이를 방지하기 위해 인위적인 폭기기술이 제안되고 있다. 폭기에는 전층폭기와 심수층만을 폭기해 수온약층을 파괴하지 않는 2가지의 방법이 있다. 심수층을 폭기하는 원리는 낮은 온도로 유지되어 혐기성화되는 것을 방지하고(수처리에 유리하고 찬물고기를 유지시킨다) 또한 자연적으로 일어나는 영양물질의 축적도 막는데 있다(영양물질이 조류성장에 이용되지 못하도록 한다). 이 방법은 여름철에 일상적이고 안정된 성층화 현상이 일어나는 부영양화 호수와 저수지에 가장 적합하다.

전층폭기도 당초에는 저층수의 산소 요구가 목적이었다. 식물 플랑크톤의 증식이 억제되는 경우가 있는 것, 억제되지 않아도 물의 이용에 대해서 장애를 일으키는 것이 많은 남조류가

감소하고 녹조류로 교체되는 것 등을 알게 되어 고품질내물질 생산 남조류의 증식 억제를 목적으로 사용되게 되었던 것은 비교적 최근이다.

6) 선택적 방류

심수층이나 변수층에서는 호수 바닥에 있는 침적물로부터 유출된 영양염이 유입되므로 영양염의 농도가 높다. 이러한 경우 펌프를 이용하거나 저수지인 경우 수문을 열어 중간부분이나 바닥부분의 물을 방출시키면, 영양염의 농도를 낮출 수 있다. 그러나 이 방법은 심수층의 온도를 상승시켜 심수층에 존재하고 있는 미생물의 활동을 활발하게 하여 용존산소 농도를 감소시킬 수 있다. 또한 높은 농도의 영양염을 함유한 물이 방출되는 호수의 하류 지역에서는 수초가 과다번식하거나, 용존산소 농도가 낮아져서 물고기가 몰사하는 현상 등이 나타날 수 있다.

이 밖에 호수물을 전부 빼내어 호수의 바닥과 대기를 접촉시켜 퇴적물의 산소 요구량을 감소시키거나, 플라스틱 또는 응집제 등으로 도포하는 방법이 있지만 이 방법들은 막대한 비용이 요구되므로 실제적으로 적용하기에는 무리가 있다.

7) 바닥 차폐에 의한 영양물질의 불활성화

플라스틱(plastic) 필름이나 토양으로 호수 바닥을 덮어서 저질토로부터 영양물질의 공급을 막는 방법도 실험적으로 시도되었으나 비용이 너무 많이 들며 저질토에서 발생하는 가스를 처리하여야 하는 등의 기술적 어려움이 있다.

8) 생물량 제거(Biomass harvesting)

체내에 축적된 인과 함께 생물체를 제거하는

방법은 우선 매력적인 방법으로 보이나 실제로는 그 적용은 수생 식물이나 극히 드문 경우에 어류를 제거하는 방안으로 국한되어 있다. 이 방법으로 제거된 인의 비율은 식물이 많이 자라는 얕은 호수가의 면적 비율에 따라 달라지겠지만 아주 좋은 곳은 전체 호수 인량의 60%에 달하기도 한다. 호수 식물의 인은 퇴적층의 불활성화 물질로 불활성화되어 제거되기도 한다. 식물 제거는 미국에서 널리 실용화되어 있으나 영양물질의 감소 목적보다는 여가선용 호수에서 낚시나 보트타기 등에 장애가 되고 또는 식물이 분해되어 산소를 고갈시켜 물고기를 죽게 하기 때문에 제거하는 것이다. 부레옥잠(water hyacinth)등이 매우 과밀하게 자라는 곳에서는 영양물질의 제거 효과가 있다. 어류나 조류를 제거하는 것도 역시 생각될 수 있으나 매우 부영양화된 열대 지역 호수에서조차도 그에 따른 영양물질의 제거 효과는 너무 적어 실용가치가 없다.

9) 생물학적 제어

생물학적 제어(biomanipulation)은 부영양화의 증상(주로 높은 조류 농도와 낮은 투명도)을 감소시키기 위하여 수계의 먹이 그물 중의 한 구성 성분을 다른 것으로 변화시키는 아주 신중한 조작으로 정의될 수 있다. 여기에는 육식 어류나 플랑크톤을 먹는 어류를 가두거나 제거하여 그 수를 변화시키는 것이 일반적이거나 수계를 혼합시켜 동물 플랑크톤에 직접적인 변화를 주는 방법도 포함된다. 부영양화 효과를 줄이려는 생물 군집 처리의 원리는 동물 플랑크톤에 대한 물고기의 포식 효과를 관찰한 결과로 개발되었다.

라. 일시대응

1) 살초제 처리

살초제는 예전부터 수도용 저수지에서 사용되어 온 방법이다. 통상 조류에 잘 듣기 때문에 황산동이 사용된다. 과망간산칼륨의 주입은 그 살초력을 이용함과 동시에 남조류에 필요한 철을 산화하고 남조류에 이용되지 않는 형태로 저질에 침전시키는 것에 의해 장애를 일으키는 남조류의 증식을 억제한다고 하는 보고도 있다.

2) 황토 살포

호소내에서의 응집침전방법의 일환으로 무독성이고 국내에서 구하기 쉬운 황토를 조류가 대량 발생된 지역에 살포함으로써 차광(遮光)에 의한 조류의 발생 억제와 발생된 조류를 응집·침전시켜 제거하는 방법이 시도되고 있다. 외국에서는 조류가 대량 발생하는 경우 단기적으로 황산동 및 황산반토를 사용하여 살조 또는 응집·침전시키는 방법을 많이 사용하고 있으나, 이는 궁극적으로 물속의 황산이온의 증가와 구리이온을 함유하고 있는 침전물에 의한 2차 오염을 가져올 수 있는데 반해, 황토의 살포는 이와 같은 2차 오염 가능성이 없고 또한 국내 어디에서나 구할 수가 있기 때문에 비용면에서도 매우 저렴한 방법이며, 해양의 적조발생시에도 이미 황토를 살포하여 큰 효과를 얻은 바 있어 앞으로 단기대책으로 기대해 볼 만하다.

3) 미생물의 이용

박테리아, 바이러스 등 미생물제제의 이용은 꽤 오래전부터 시도되었다. Selvey 등은 실제 저수지의 곰팡내 물질을 *Bacillus cereus*로 분해

하는 실험을 실시하여 박테리아 밀도가 1.0×10^6 이 되어, 4~5일 만에 분해했다고 보고 하였다. 또한 정수장의 전처리로서 원생동물과 미소동물의 포식력을 이용한 생물막접촉산화조 등이 시도되고 있다.

5. 결 론

이제까지 명확한 구분 없이 사용되고 있었던 호소와 관련된 여러 정의와 유사 개념의 정의 등을 살펴보고 우리나라 호소의 특징과 부영양화의 원인을 정리하고 이제까지 개발되어 알려진 호소의 부영양화 대처방안 등을 정리하여 제시하였다.

우리나라의 호소는 수자원의 효율적 이용을 위하여 하천이나 지천을 막아 조성한 댐, 저수지 및 하구를 막아 조성된 하구 담수호까지 그 용도와 물리적 재원 등이 다양하다. 뿐만 아니라 우리나라의 호소는 대부분 치수와 이수에 목적을 두고 있지만, 오염 및 훼손이 환경과 생태계에 미치는 영향에 대해서는 그동안 배려가 부족하였다. 하지만 최근에는 저수지 수변개발에 있어 생태공학적인 개념이 도입된 수변환경 조성과 아울러 수질개선 기법에 있어서도 친환경적인 개념이 도입된 기법들이 활발히 도입되고 있다.

호수 및 저수지의 수질 개선이라는 목표를 가지고 본 고에 소개된 개별 수질개선 기법들의 활용을 생각해 본다면 여러 기술들의 조합화가 필연적이다. 따라서 앞으로 조사와 연구는 개별기술들의 사례조사를 통한 효과분석 및 조합된 기술들의 종합효과와 경제성 분석 등에 초점이 맞추어져야 할 것이다. 또한 행정적으로도 유역과 호소의 관리 주체들간의 긴밀한 유대가 필요하다.

참고문헌

1. 최영길외 3인 공역, 1995, 담수의 부영양화, 신광문화사.
2. 대한환경공학회, 1999, 호수의 수질관리, 도서출판 풍남.
3. 조순행, 2001, 물환경개론, 동화기술.
4. 송호면, 2004, 자연공생 호소실험사업, 건설기술연구원.
5. 홍성기의 4인, 2004, 생태복원공학, 라이프사이언스.
6. 류재근외 9인 공역, 2002, 호소공학, 동화기술.
7. 송미영, 황순진, 박찬혁, 2001, 녹조제어 사례에 기초한 녹조방지사업의 적용 방안, 경기개발연구원.
8. 농림부, 농업기반공사, 2002, 저수지와 담수호의 수질개선 방안 연구보고서.
9. 유엔환경계획 한국위원회, 2003, 호소와 저수지, (주)주손미디어.
10. 한국육수학회, 2001, 한국의 호소환경 조사기법 개발에 관한 연구 보고서, 환경부.
11. <http://www.kncold.or.kr/kor/damsitu/dam/waterdam4-2.htm>.
12. http://www.aak.or.kr/technote/read.cgi?board=report&y__number=23#top.