

농업용 호소의 수질개선 및 기능향상을 위한 생태학적 이해와 다원적 접근의 필요성



황 순 진
건국대학교 환경과학과
sjhwang@konkuk.ac.kr

I. 서론

우리나라에는 북미, 유럽과는 다르게 저지대에서 북미 혹은 유럽에서와 같이 빙하의 활동에 의해 만들어진 자연호(빙적호, glacial lake)가 남아 있는 경우는 없으며, 거의 모든 호소는 문순기후 체계 하에서 여름에 물을 가두어 이를 이용하는 저수지의 형태로 발전되어 왔다. 수자원의 확보와 홍수조절을 위해 하천 혹은 하구의 대형 댐호들이 건설된 역사는 불과 50년도 되지 않는다. 그러므로 우리나라의 거의 모든 호소는 중소형의 농업용호소라 해도 과언이 아니다. 농업용 호소들의 기능은 관개용수의 공급이 주요 목표이기 때문에 일부 특별한 환경적 혹은 보전적 가치가 있는 호소들을 제외하고는 현실적으로 환경관리와 보호를 제대로 받지 못하고 있는 상태이다.

농업용호소의 절대적인 수(약 18,000여개)와 국토 전역에 걸친 넓은 분포를 감안한다면 실제로 이들이 지닌 다원적 기능과 역할은 지대하다. 그러나 오랫동안 수오

적 물관리 측면만을 강조한 나머지 농업용호소가 가지는 생태계로서의 본연의 위치와 생물서식지로서의 기능을 간과해 왔으며, 그러는 동안 수질과 생태계 서비스 기능은 크게 악화되었다. 더욱이 정책적으로 관리의 대상이 되고 있는 호소들도 수질이 악화되고 녹조현상이 빈번하게 발생하고 있는 상태이다. 농업용수 수질측정망 조사결과(농림부, 2004)에 의하면, 측정망 대상 저수지(492개소)의 16.3%가 COD 기준 농업용수 수질기준인 IV등급을 초과하였다. 이미 부영양화로 인해 수질 환경이 심각하게 악화된 저수지는 전체의 8.5%에 달하고 있으며 또한 중부영양화 상태의 저수지를 포함하면 전체의 40.4%가 부영양화단계에 접어들고 있다.

국내의 수많은 농업용호소는 자연자원과 자연경관의 중요한 일부이다. 국토의 자연환경에서 찾을 수 있는 중요한 생물다양성의 섬(Island of biological diversity)으로서 수서생물 혹은 물과 관련이 있는 생물들의 서식처, 산란보육처, 피난처를 제공한다. 농업용호소의 환경 악화는 서식생물과 친수성에 악영향을 미치게 된다. 따

라서 앞으로 농업용호소의 수질개선과 연계한 생태계 보전은 중요한 정책적 사안으로 다루어져야 한다. 말할 필요도 없이, 농업용호소의 본연의 목적인 관개수 이용도 수질의 악화에 크게 영향을 받게 되므로 농촌유역에 산재하는 농업용호소에 대한 환경적 시각과 생태적 관리가 중요하다.

II. 호소생태계의 이해

1. 호소환경의 복잡한 영향요인

가. 호소생태계의 복잡성

호소는 지형변화적으로 경관의 일부분이며 자연적, 인위적 지형변화의 결과로 만들어진 일시적인 형상으로서 물이 가두어져 있거나 고여 있는 형태로 나타난다. 호소는 육지에 의해 둘러싸인 수체(water body)를 의미하며, 수체로 부터의 유출은 수체 전체부피에 비해 상대적으로 적다.

호소는 외부로부터 유입되는 물로 채워지고 이 물은 주로 육상을 통해 유입되므로 호내의 현상을 이해하기 위해서는 인접하는 유역의 육상생태계와 인접 하천과의 수리·수문·지질·화학적 관계를 이해하는 것이 중요하다. 특히, 호소는 하천과 달리 물이 정체되어 있는 시스템이며, 형태상 수심이 존재하며 이는 호소의 동태학에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 물의 체류시간과 수심에 따른 생물·물리·화학적 특성이 호소 내 생물 및 무생물적인 요인들 그리고 이들간의 상호작용(생태학)에 중요한 영향요인이 된다.

한편 호소 내에는 다양한 생물들이 서식하며 이들의 동태학이 생물 간의 상호작용 뿐 만 아니라 외부 영양물질 또는 호소 내 다양한 물질들과의 상호작용이라는 형

태로 나타나므로, 수질과 생태계의 개선대책을 제시하기 위해서는 기후, 유역 및 호소의 형태적 이해가 필수적이다(표 1, 그림 1). 또한 호소가 가진 공간(수평 및 수직)적 이질성과 환경조건의 계절적인 변화에 대한 이해가 필요하다.

〈표 1〉 호소 내 수질 및 생물에 미치는 주요한 영향요인들과 관련 학문분야

영향 요인	요인별 주요인자	관련 학문분야
기후 요인	강수량, 증발, 일조량	수문학, 기상학
유역 요인	면적, 경사, 토질, 식생, 오염원, 체류시간	수리학, 토양학, 식물학, 환경(공)학, 화학, 농공학
호소 요인	수심, 표면적, 연안부 형태, 호내 경사, 체류시간	육수학, 생태(물)학, 환경(공)학

호소환경과 관련되는 여러 가지 인자들은 호소수질을 결정하는데 큰 역할을 할 뿐 만 아니라 호소 내에 서식하는 다양한 생물들에게도 영향을 미쳐 최종적으로 생태계의 변화를 초래한다. 그러므로 호소수질의 최종적인 평가는 수질이 생물에 영향을 미쳐서 나타나는 (또한 생물이 수질에 영향을 미치는 결과도 포함) 생태학적 현상을 통해 이루어져야 한다(예: 그림 4).

나. 강우특성과 호소수질

호소 내로 물의 일차적 유입은 강우와 관련되며, 많은 경우 하천으로부터 물이 유입된다. 특히 강우 및 하천수와 관련된 수리·수문학적 특성이 해당지역의 오염원 분포 및 배출특성과 연관되어 호소의 수질과 생물의 생산력을 결정하므로, 호소수질의 관리를 위하여 지역의 강우와 기후적 특성을 파악하는 일은 중요하다. 우리나라의 강우는 몬순기후의 영향 속에서, 계절·지역적으로 편중되어 강우기인 6~8월에 전체 수량의 약 60%가 집중되어 유역으로부터 대량의 오염물질이 유입된다. 특히 강우기에는 도시와 농촌지역 수계들 모두 점오염원의 영향보다는 비점오염원에 영향을 크게 받는다.

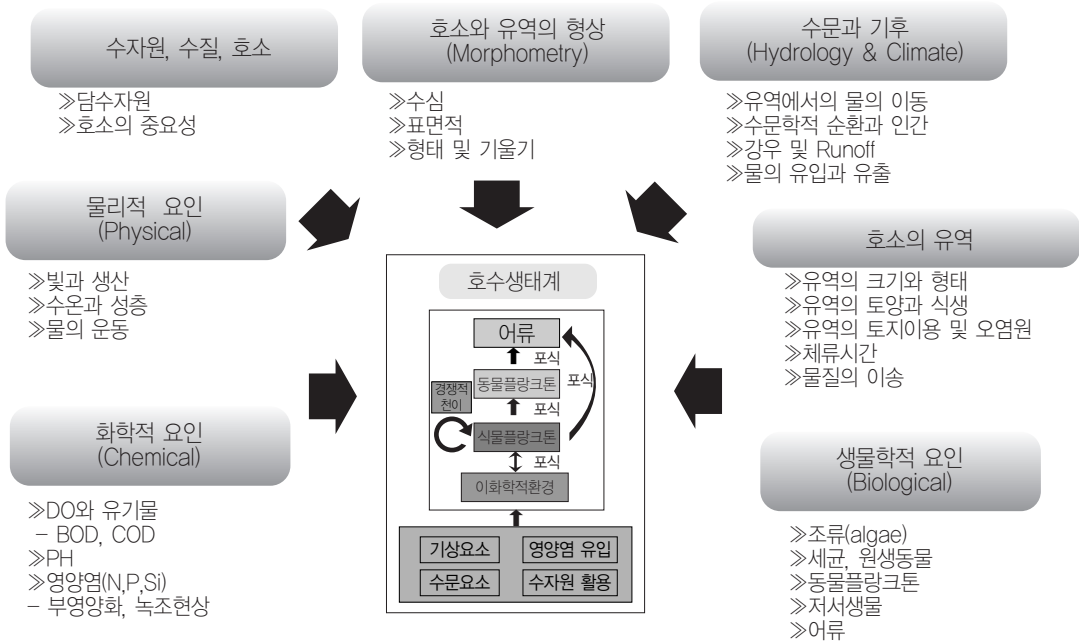


그림 1. 호소 내 수질 및 생물에 미치는 주요한 영향요인들

점오염원과 비점오염원은 강우에 따른 유출형태가 다르게 나타난다. 가정하수와 산업폐수 등의 점오염원이 우세한 지역에서는 강우에 의해 희석효과가 나타나고 오염도가 낮아지나, 비점오염원이 우세한 지역에서는 유역의 토양에 축적되어 있던 오염물이 강우의 침식에 의해 유출되므로 오염도가 증가하게 되는 특성이 있다. 비료의 주요성분 중 질소와 칼륨은 물에 잘 녹는 물질이므로 용존형태로 유출이 되는 반면에 인은 용존형으로도 유출될 뿐만 아니라 토양에 흡착되어 축적되어 있다. 비료의 침식과 더불어 입자상으로 유출되므로 강우 시 10배 이상 증가하는 경향도 나타낸다 (Kaff, 2002).

또한, 용존물질은 강우에 의해 희석되어 농도가 낮아지거나 증가가 크지 않은 특징을 보이는 반면, 입자상 물질은 유속에 비례하여 유출되므로 강우시에 유출량이 크게 증가하는 형태를 나타낸다. 특히 최근 그 심각성이

대두되고 있는 토사유출의 문제는 수질문제와 관련하여 심각한 수준이나 아직도 대책과 개선방안 등은 제대로 적용되지 못하고 있는 실정이다.

입자상으로 유출되는 인은 수중의 용존인과 평형을 이루며 용존무기인의 농도를 지속적으로 높이는 부영양화 효과를 가져오며 이것이 호수에서 조류의 왕성한 번성을 일으키는 요인이 되고 있다. 또한 우리나라 강우의 특성상 폭우 시 유량도 크게 증가하므로 총 배출량이 크게 되고, 따라서 호수에서는 홍수 후에 조류의 대번성이 나타나는 경향이 크다.

다. 유역특성 및 호소 형태

호소의 수질과 생물상의 변동은 최종적으로 호수 내 수질에 의하여 영향을 받지만, 호수 내 수질은 역으로 유역으로부터의 수리·수문 현상과 오염물질의 유입에

의존한다. 즉, 유역특성 인자들은 유역면적 크기, 경사도, 토지이용형태, 토질, 오염원분포 등을 포함하며 이들은 개별적 또는 다른 요인들과 복합적으로 작용하여 호수수질에 영향을 미치게 된다. Lee 등(2009)은 우리나라의 농업용 호소를 대상으로 유역 내 토지이용 패턴(예를 들면, 도시, 농지, 산림 등)이 인접하는 호소의 수질에 직간접적으로 영향을 미친다는 것을 보여주었으며, 이를 통해 유역 내 호수수질 관리에 대한 토지이용의 전략적 측면을 제안하였다.

유역면적이 클수록, 인구밀도가 높을수록, 경사가 급할수록, 토양 침식성이 클수록 수질에 미치는 영향이 크다. 호소표면적에 대한 유역면적의 비를 '유역비(유역면적/호소표면적)'로 표현하는데, 유역비가 클수록 영양염 등 오염물질의 부하되는 양이 증가하여 부영양화될 가능성이 커진다(Kalff, 2002).

호소의 평균수심, 저수용량, 표면적 및 호안부의 형태 등은 호소의 형태적(morphometric) 인자들로서 호소내 수질과 생물분포에 영향을 미치는 주요한 요소들이다. 우리나라 호소의 평균수심은 대부분 10m 이하로서 일단 부영양화되면 호소바닥에 쌓이는 유기물이 많아 저질층으로부터 용출되는 오염물질(특히 인)의 영향을 많이 받을 가능성이 높다. 이를 호수로부터 영양물질의 내부부하(internal loading)라고 하는데, 이 경우 부영양화의 조절을 위하여 외부유입수의 수질을 개선한다 할지라도 실제 호소내의 수질은 개선되지 못하는 경우가 발생한다(Cooke et al. 2005). 또한 호소 주변부 발달형태(shoreline development)는 생물의 서식처와 수질에 영향을 미칠 수 있다(Hwang et al. 2007).

2. 호소의 생물과 그 특성

가. 연안부의 생물

호소의 주변인 호안(littoral zone)에는 갈대, 줄, 부들 등의 추수성 식물(emergent plant), 연, 개구리밥 등의 부유성 식물(floating plant), 그리고 마름과 같은 침수성 식물(submerged plant)이 서식한다. 이러한 식물이 살고 있는 근처를 추이대(ecotone) 또는 전이지역(transitional zone)이라 부른다. 갈대가 살고 있는 수심은 0~0.2m, 줄과 작은 부들은 0.2~0.5m, 그리고 연꽃과 미름 등이 1~1.5m와 같이 연안에서 물의 깊이에 따라서 식물이 띠의 모양으로 생육하고 있다.

호소의 연안부는 육지역과 수역의 접점(land-water interface)이 되고, 환경조건도 복잡하게 변화하고 있다. 그 때문에 수생식물을 중심으로 해서 미생물에서부터 어류와 새에 이르기까지 많은 종류의 생물이 생활하고 있다. 연안부는 특히 생물의 다양성을 보전하기 위한 장소이며, 연안부의 형태(단순 혹은 복잡함)는 호소내 수질과도 영향이 있다. Hwang 등(2007)은 우리나라 농업용호소들을 대상으로 연안부 형태가 단순할수록 인접하는 호소의 수질이 악화되는 경향이 있음을 보여주었다. 우리나라의 많은 농업용호소의 연안부는 인간활동에 크게 노출되어 자연적인 복잡한 구조를 보여주지 못하고 있으며 자연이 현저하게 변형된 예가 많다. 호소 생태계를 보전하기 위해서 연안부 구조를 자연적으로 회복하고, 특히 수초대를 보전하는 중요성을 재검토해야 한다.

나. 개방수역 수체 내의 생물

아주 얇은 호소에서는 중간의 개방수역(open water, limnetic zone)까지 부엽식물과 침수식물이 살고 있는

경우가 있지만, 어느 정도 이상의 깊이가 있는 호소의 중간에서는 생활하고 있는 주된 생물은 플랑크톤(박테리아를 포함)과 어류이다. 플랑크톤은 극히 작은 생물로서 자신만으로 유영능력이 없거나, 있어도 약하고, 물의 움직임에 따라 이동한다.

식물은 광합성작용에 의해 무기물에서 유기물을 합성한다. 그러나 호소의 중간이나 수체 내에서의 식물의 대부분은 수 0.1mm에서부터 0.001mm 정도 크기의 극히 미세하다. 식물플랑크톤 중에는 남조류와 편모조류와 같이 세포내의 가스주머니(gas vacule)를 조절하고, 편모를 움직여 운동성에 의해 부유·침강할 수 있는 것도 있다. 여름철에 부영양호소의 수면을 녹색으로 변하게 하는 통상 녹조라 불려지고 있는(실제로는 남조류, blue-green algae) Microcystis는 수직이동을 하는 조류의 예이다.

동물플랑크톤을 대표로 하는 것은 물벼룩과 같은 지각류 그리고 요각류, 윤충류가 있다. 대부분 1mm 내외의 크기이지만, 플랑크톤 네트로 모아서 투명한 병에 넣으면, 육안으로도 유영하고 있는 것이 관찰된다. 윤충류는 작은 것이 많고, 미세한 식물플랑크톤과 박테리아를 먹이로 하고 있다. 이외에 호소의 생태계에서 유기물 분해와 동물플랑크톤의 먹이원으로 중요한 역할을 하고 있는 2 μ m이하의 극미세한 피코플랑크톤 (picoplankton: 세균과 광합성 초미세조류 포함)이 있다. 호소생태계 먹이사슬에서 이들의 중요성이 실제로 알려진 것은 20~30 여 년 전으로 다른 생물들에 비해 비교적 연구가 최근에 이루어졌다(예: Hwang, 1995).

호소에서는 다양한 어류들이 서식하고 있으며, 이들 중에서는 식물플랑크톤이나 식물체를 직접 먹는 초식성 어류도 있지만, 대부분은 동물플랑크톤을 먹는다. 우리나라 호소에는 어류를 먹는 어류 이른바 육식어종이 적

다. 그러나 미국으로부터 육식성 어종인 배스와 블루길 이 도입된 후 분별없이 방류되어, 소형의 어류와 치어 등에게 큰 피해를 주고 호소의 어류조성을 변화시키고 있다. 최근의 농업용호소에서 조사에 의하면(황 등, 2005), 블루길의 경우 많은 호소에서 고르게 나타나고 있지는 않으나 이들이 출현하는 지역은 상당히 높은 출현빈도를 보였으며, 또한 전반적인 출현어종이 단순화 되는 경향을 보여주었다. 우리나라 농업용호소에서 주로 출현하는 어종은 참붕어, 치리, 피라미, 버들치, 붕어, 잉어, 밀어 등으로 나타나고 있다. 또한 출현어종의 수는 저수지의 유효저수량과는 별 상관성이 없는 것으로 나타나고 있으며, 대신에 유입하천의 크기가 호소의 어류다양성과 관계가 더 큰 것으로 보고되었다.

다. 심저부의 생물

호소의 바닥은 토양 이외에 생물들의 잔재와 배설물이 섞여 있다. 수심이 깊은 호소는 여름에도 겨울의 최저수온에 가까운 차가운 물로서 빛도 거의 없다. 깊어서 생물이 적고 이른바 빈영양호의 저니 표면부근에는 용존산소가 충분하지 않으면 생활할 수 없는 각다구류 유충과 새우 등이 생활하고 있다. 이러한 생물은 저서생물(benthos)이라 부르며, 호소의 유광층에서 생산되어진 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 잔재와 배설물 등이 침강·퇴적한 유기성의 저니를 먹고서 생활한다. 호소주변의 삼림에서부터 흘러 들어온 죽은 나뭇가지와 낙엽도 중요한 먹이다.

수심 수 미터의 얇은 호수는 일반적으로 생물이 많은 부영양호로서 하계에 수온 성층이 나타날 때에는 심수층은 빈번하게 무산소가 된다. 이러한 호소의 대표적인 저서동물은 몸체가 붉은 색을 띤 각다구류 유충과 같은 실지렁이 등이다. 모두 체액 내에 혈액의 헤모글로빈과

비슷한 산소와의 결합력이 강한 색소를 포함하고 있고, 체액 중에 산소를 비축하여 어느 기간 호수의 용존산소가 적어져도 견딜 수 있다.

호수바닥에는 곤충의 유생, 지렁이류, 조개류 등의 저서동물이 살고 있는데 산소가 고갈된 부영양호의 심층에는 다양한 저서동물이 살지 못한다. 부영양화 될수록 퇴적물 내 산소부족으로 저산소에 견디지 못하는 종류는 소멸하고 산소부족에 견디는 종류만이 살아남기 때문에 다양성이 감소한다. 그러나 생물의 총량은 오히려 더 많을 수 있다. 플랑크톤이 많아 먹이가 풍부하므로 저산소에 내성이 강한 생물에게는 먹이의 경쟁자가 없는 호조조건이 되기 때문이다. 빈영양호와 부영양호의 어류군집도 차이를 보인다. 빈영양호에서는 다양한 어류가 서식하지만 부영양호에서는 소수의 어류만이 서식한다. 어류가 생존하려면 산소가 필요하며 산란하고 부화하여 번식하려면 일정 농도 이상(보통 4mg/l 이상)의 산소가 필요하다.

라. 먹이사슬 (Food chain)

호수의 주요한 식물은 규조류, 녹조류, 남조류 등의 미세한 식물플랑크톤이다. 식물플랑크톤은 지각류, 윤충류 등의 동물플랑크톤에게 먹히고, 동물플랑크톤은 작은 어류(초식성)에게, 작은 어류는 큰 어류(육식성)에게 먹힌다. 이러한 생물학적 관계는 “먹이사슬”이라고 알려져 있다. 그러나 실제로 호수 내에서 생물들 간의 먹고 먹히는 관계는 훨씬 복잡하여, 먹이망(food web)의 형태로 나타난다. 먹이사슬의 아래 단계에는 식물플랑크톤 외에 대형의 수생식물과 박테리아가 포함되어 있다. 이들은 동물플랑크톤, 저서동물과 어류의 먹이가 된다. 박테리아는 일반적으로 유기물을 무기화하는 분해자라고 생각되고 있지만, 먹이로 하는 유기물을 공급

하는 것으로서 식물(생산자)과 같은 역할을 하고 있다 (Hwang and Heath, 1997, 1999).

호수 내에서 먹이사슬은 두 가지 작용에 의해 구동된다. 즉, Bottom-up 조절과 Top-down 조절로 구분되는데, Bottom-up 조절의 기원은 영양염의 공급이며, Top-down 조절의 기원은 육식성 어류이다. 그러나 먹이사슬 내에서 각각의 조절작용은 연계되는 피식자-포식자 간에서 이루어진다. Bottom-up 조절의 대표적인 경우는 부영양화에 의한 조류의 증가를 통한 고차 영양단계로의 자원의 공급으로 이해할 수 있다. 최근 생물조절(Biomanipulation)을 이용한 녹조제어 기법들이 활용되고 있는데 이는 먹이사슬 상위단계의 생물을 조절(제거, 투입 혹은 서식처 조성)과 같은 간접적인 보조하여 녹조를 제어하는 Top-down 조절의 방법이다(황 등, 2009).

3. 농업용 호소의 부영양화

농업용호소의 부영양화는 생활하수를 포함한 점오염원과 농지 및 산림으로부터 유출되는 불특정 비점오염원의 유입에 따라 수계 내 영양염(질소, 인 등)의 농도가 높아지는 현상으로서, 이로 인해 조류의 대발생, 심층산소의 고갈, 생물다양성 감소, 먹이사슬의 단순화 등 전반적으로 호수의 수질 및 생태계 건강성의 악화를 유발한다. 이는 21세기 지구촌의 가장 큰 수환경 문제 중의 하나로 유역의 토지이용의 변화, 인구집중, 도시화 등이 주요 기원이다.

호수생태계에서 영양염부하의 증가는 조류의 번성, 투명도의 감소 및 이에 반응하는 생물학적 변화(예를 들면 부유생물, 수생식물, 어류의 종조성 및 밀도변화)를 유발하는 주된 원인이다. 부영양화된 농업용호소에서는 주로 인(phosphorus)이 조류의 성장의 제한영양염으로

작용하며(Kim et al., 2007), 이들 중 상당부분이 유역으로부터 공급되고 오랜 기간 유기물이 퇴적층에 축적된 호소에서는 퇴적층이 인 공급원으로 작용한다.

인이 조류발생의 중요한 제한요인이기는 하나 모든 호소에서 인과 조류 발생량의 관계가 직접적인 것은 아니다. 호소내 인의 함량이 질소에 비하여 현저하게 높을 경우는 조류발생을 조절하는데 질소가 더 중요할 수 있다. 체류시간이 수 년에서 수십 년에 달하는 호소는 유입된 인이 계속적으로 순환되면서 조류의 양을 유지시키나, 체류시간이 불과 수 일에 지나지 않는 호소(예: 국내의 하천형 인공담호)는 인농도와 조류양의 관계가 오히려 역상관관계를 보이는 경우도 있으며, 반면에 체류시간은 하천형 인공호에서 조류발생에 중요한 영향인자가 될 수 있다.

부영양화 원인물질인 질소와 인은 강수나 토양에서 함유량이 달라 강우강도에 따른 유출유형에 차이를 보인다. 또한 질소와 인은 생물체를 구성하는 필수적인 물질로서 생물은 성장과 번식에 필요한 일정량을 요구하게 된다(Sterner and Elser, 2002). Redfields(1958)는 조류 세포내에 포함된 원소들, 즉 탄소:질소:인의 비율이 약 106:16:1(원자량 혹은 당량비, 이를 무게비로 환산하면 41:7:1)임을 제시한바 있다. 그러므로 호소 내에서 질소와 인의 농도 비율은 조류성장의 제한요소를 평가하는 지표로 이용될 수 있다. 질소:인 비율에 의한 영양염 제한정도는 대체로 10~20에서 구분된다. 질소:인(총 원자량)의 농도비율은 대부분의 호수에서 약 20~100의 범위로 주로 인이 조류증식의 제한인자가 되고 있으나, 여름 홍수기에는 인의 유출정도가 커서 질소:인 비율이 낮아지고 조류를 섭식하는 동물플랑크톤이 감소하며 표수층의 수온이 급상승하여 성층화가 뚜렷해짐에 따라 고온에서 증식도가 높고 인에 대한 질소의 양이 상대적

으로 적어 질소고정능을 가진 남조류 (예를 들면, Anabaena)가 대발생하는 경우가 많다(김 등, 2005).

유역으로부터 공급되는 인 부하량은 강우강도와 유역내 오염원의 분포 등에 의해 결정되며, 인 공급원으로서 퇴적층은 깊은 호소에서는 수층 혼합 시기에 식물플랑크톤 성장을 유도할 수 있다. 반면에 수심이 얇은 호소에서는 수온성층이 바람이 없는 시기에 형성되기 때문에, 바람에 의한 수체의 불규칙적인 교란으로 퇴적층으로부터 인 용출은 수시로 나타날 뿐 만 아니라 교란 시 수층으로 부유된 입자가 빛 제한을 야기하여 낮은 광도에 적응력을 가진 식물플랑크톤으로의 종 변화나 생물량의 감소를 야기하게 된다(Phlips et al. 1997).

그러나 식물플랑크톤의 대량 발생으로 나타나는 부영양화의 원인이 대부분이 유역으로부터 과다한 영양염 공급으로 야기된 결과라 할지라도, 녹조현상은 식물플랑크톤 성장에 영향을 주는 여러 가지 요인이 복잡하게 연계되어 나타난 결과로 이해하여야 한다. 또한 이러한 요인들의 중요도는 호소가 가지는 유역의 지형학적, 구조적 특성 그리고 유역환경 조건이나 계절에 따라 달라질 수 있기 때문에 다양한 요인들이 언제 어떻게 작용하는지 그리고 유역으로부터 유입되는 유입수나 영양염 부하가 수생태계 내에서 어떠한 물리적, 생물학적, 화학적 변화를 야기하는지에 대한 연구는 농업용 호소의 효과적인 수질관리를 위해 극히 중요하다.

특히, 강우사상이 계절적으로 편중된 지역에서는 기후의 영향이 호소생태계의 수질변화와 생태계의 기능에 매우 중요한 영향을 미칠 수 있다. 기후와 관련된 수문학적 특성은 특히 우리나라를 포함하는 몬순기후의 영향을 받는 지역에서 우수생태계와 대형담호에서 수환경 변화에 지배적인 영향을 미치는 특징적인 현상으로 나타나고 있다(신 등, 2003). 이와 함께, 인공호에서 수문

의 조작에 따른 물의 방류도 호내의 수질변화에 상당한 영향을 미치는 인자이다(Thornton et al, 1990).

호소생태계의 부영양화 현상은 비단 우리나라의 문제가 아니라 세계적으로 수환경 문제의 대표적인 것이다. <그림 2>에서 보여주듯이 부영양화는 수질과 생물을 포함하는 생태계 전체에 영향을 미치게 되어 생태계의 가치를 저하시키게 된다. 생태학적 관점에서 본다면 부영양화는 먹이사슬의 구조를 단순화시키고 이에 따라 특성의 내성이 있는 종을 중심으로 편향되게 된다(그림 3).

III. 농업용호소의 수질개선 기술 및 적용방안

1. 호소 수질개선 기술의 종류 및 특성

지금까지 국내외 적으로 호소를 포함하는 정수역의

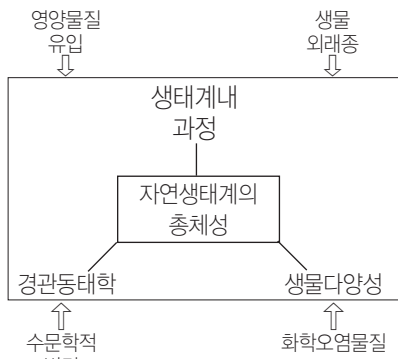


그림 2. 여러 환경적 스트레스가 호소생태계의 총체성(건강성)에 미치는 영향의 모식도

수질개선 및 녹조제어 기술로서 여러 가지 방법들이 개발, 소개되었으며(예: Cooke et al, 2007, 표 2) 또한 다양한 환경에서 적용사례들이 보고되었다.

호소생태계에서 현재까지 적용된 기술의 효과를 평가할 때, 외국에서도 단일 기술의 일시적인 적용에 의해 개선효과가 획기적으로 나타난 사례는 거의 없다. 그 이유는 호소생태계의 특성은 시공간적 변화할 뿐 만 아니라 상기한 바와 같은 여러 가지의 복합적인 영향요인들이 작용하기 때문이다. 그러므로 적용 기술 효과의 극대화는 해당 환경에 적합한 기술(들)을 상당기간 지속적으로 운영하고 그에 따라 기술의 적응적 개선이 뒤따라야 가능함을 시사하는 것이다. 특히, 다양한 생물들이 서식하는 생태계로서 호소를 이해한다면 생태계의 건강성 회복과 보전을 위한 문제의 해결은 수질을 넘어 생물까지도 고려해야 한다.

2. 농업용호소에서 수질개선 기술의 적용방향

현재 우리나라 4대강(인공댐호 포함) 및 농업용호소에서 연구 개발 및 개선을 통해 시험 혹은 현장에 적용된 기술들은 상당히 다양하다. 그러나 소수의 기술들을 제외하고 대부분은 기술개발이 실질적으로 현장적용으로 이어지지 못하고 있으며, 특히 사업화된 사례는 더욱 적다. 그 주된 이유 중의 하나는 기술개발 기간이 짧아(보통 3년) 현장실효성과 적용성에 대한 검증이 충분치

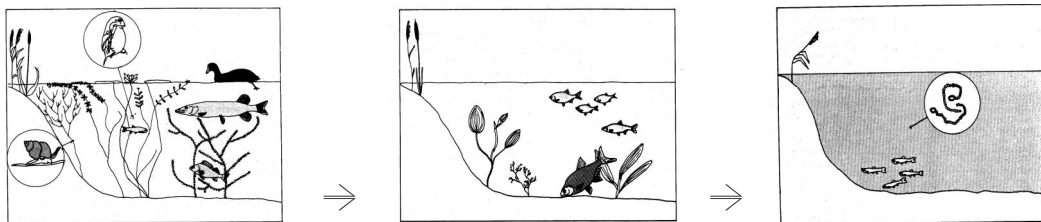


그림 3. 부영양화에 따른 호소생태계 변화의 모식도(출처: 최 등, 1995)

〈표 2〉 농업용호소 및 관련 수계의 수질개선 기술 및 특성

구분	기술종류	대상 및 특성	비고
물리적 기술	준설	퇴적질 오염, 육상 및 수중 준설. 최근 환경적 교란을 최소화 하는 흡입식 준설 개발	흡입식 준설 기법 개발. (농림부, 2005)
	조류펜스	수중의 조류 확산 저감 및 방지	대청호에서 적용사례
	차광막	수중의 조류 성장 저감 및 방지. 호소 표면의 일부지역을 가림으로써 빛 이용성 조절	일본에서 적용사례
	초음파	고주파 혹은 저주파를 이용한 조류세포 및 기낭 파괴, 조류사멸 혹은 성장 방해	국내외에서 개발. 타생물에 대한 위해성 발생 잠재
	수류발생	저수지 수체전체. 물의 혼합을 유도하여 전역에 산소공급 및 정체수역 조절	외국기술(캐나다, 일본 등), 국내에서 시험 연구 적용 사례
	수초제거선	수변부 혹은 호내의 밀집한 수초제거	미국, 유럽 등
	조류제거선	수중 조류를 대상. 물리적인 여과를 통해 조류제거	국내 수자원공사 개발(2009)
	희석	하천 혹은 주변 댐으로부터 으로부터 양질의 물을 유입하여 희석	국내 새만금에서 계획
	선택적 방류	수문조작에 의해 심층의 영양분이 많은 수층을 방류	미국 등
	유로변경	오염도가 높은 유입하천을 우회	외국에서 여러 사례
	수위감소	인위적 방류를 통해 수위를 감소, 수변지역의 식생 및 오염물질 관리	외국에서 여러사례
화학적 기술	저류지	오염물질의 함유된 유입수를 호소 유입부나 수변에 일정기간 저류하여 영양염 및 유기물 저감	국외 및 국내 적용사례(새만금 등)
	인흡착	철, 알루미늄, 칼슘 등의 인흡착 재료를 이용하여 수중의 인제거	일본 등에서 사례
	가압부상	흡착 성분 주입하여 조류 등 입자성 물질을 응집시킨 후 미세기포를 이용하여 부상분리	국내에서 개발 사례 농림부(2005) 등
	응집부상	천연물질성분을 이용하여 조류 등 입자성 물질을 응집, 부상, 제거. 자체적으로 부상하므로 공기주입 필요없음.	국내에서 개발 및 연구중
	폭기	다양한 기법을 이용하여 수중에 용존산소 공급	외국 기술, 국내 적용 및 개선 사례
	살조제	황산동을 이용하여 조류세포파괴	국내적용 사례
생물/ 생태공학적 기술	인공습지	호소 유입부 혹은 주변에 습지 설치, 유입수 내영양염, 유기물 저감	국내 다양한 적용
	수변식생대	하천 및 호소 주변에 식생대를 통해 오염물질 여과 및 개선. 조로 비점오염원 대상	국외 및 국내 시험적용 사례. 연구중
	어류	초식성 어류를 이용한 조류 섭식, 제어	중국, 미국, 유럽 등에서 사례. 국내에서도 연구(농림부, 2005, 2009)
	패류	여과섭식성 패류를 이용한 입자성 물질 저감	국외(네덜란드, 미국 등) 및
	조류(algae)	조류를 이용한 인제거	국내 사례(농림부, 2005) 국외 및 국내사례(환경부, 농림부)
	동물플랑크톤	물벼룩을 이용한 조류제어	국내 시험사례(연구중)
	미생물제제	살조미생물(세균) 혹은 유기물, 중금속 분해세균 이용	국외 적용, 국내 연구사례(과기부, 2006)
	접촉여재 생물막	접촉여재를 이용한 영양염 흡착 및 생물막 형성	국내 적용사례
	인공서식처	호내에 인공서식처 도입으로 생물다양성 증대효과	국내 적용사례 (농림부, 2009)
인공식물섬	부유식 인공식물섬 도입으로 생물서식처 및 수질개선 효과	국내 적용사례	

되지 못하는 데 있다. 이로 인해 기술개발(특히 혹은 신 기술 등)이 완료 후에도 수요자는 현장의 직접 적용에 대한 어려움을 피력하고 있다. 실제로 기술의 수요자는 개인이 아니라 정부(중앙정부 혹은 지자체)이므로 이용

자 측에서 보다 적극적으로 기술을 수용해야하며, 그 일환으로 국가 연구를 통해 개발된 기술들은 중장기적인 현장 검증 및 기술개발의 적응관리에 대한 대책이 마련 될 필요성이 크다.

최근 들어 국가적으로 호소와 하천의 환경개선 및 생태계 보전에 대한 관심과 요구가 커지고 있다. 그러나 많은 기술들이 연구 개발된 사례가 있음에도 불구하고 이들 기술의 사업화는 아직도 미흡한 실정이며 동시에 적용하는 부분도 부분적이고 시험적인 경우가 많다. 개발된 기술 중에서 효과나 경제성이 높은 기술들에 대해서는 실효성과 현장적용성 확보를 위한 고려가 필요하다고 생각된다.

농업용 호소의 수질개선 효과를 극대화하기 위해서는 유역과 호내 관리가 동시에 고려되어야 한다. 수질문제의 원천적인 해결을 위해서는 대부분의 경우 유역의 관리가 호내의 관리에 우선하는 것은 사실이지만 유역관리는 보다 긴 시간과 대규모적인 대책을 요하며 그 효과가 단기간에 나타나기 어렵다. 한편으로 사후대책인 호내의 관리는 호소생태계가 가진 복잡성으로 인해 단일 기술로 높은 효과와 지속성을 확보하기도 쉽지 않다.

따라서 농업용호소의 수질개선과 생태계 회복을 위해서는 지역적(경관적), 종합적, 다원적 측면에서 생태계를 고려한 생태공학적 토대의 정책수립과 사업시행이 필요하다. 즉, 정책의 방향을 자원의 순환을 고려한 순환형 지역생태계 문제 해결 방향으로의 전환, 농촌유역의 환경계획과 수질관리, 생태계 보전 등 국토 계획적 차원으로 전환, 기후변화 및 토지이용의 변화 등 변화하는 여건을 예측 및 적응적으로 관리하는 차원으로의 전환 등 문제의 인식과 해결의 폭을 확대하고 그 안에서 농업용호소의 수질개선과 생태계 보전의 문제를 도출하는 것이 바람직한 미래지향적 방향이라고 생각된다.

특히 앞으로의 기술개발은 다원화(예를 들면, 복수의 기술의 접목. 이때 공학적인 기술위주의 접목보다는 공학과 생태계 및 생물학적 측면의 접목)에 초점을 두는 것이 바람직하며, 유역관리와 연계된 기술(예를 들면, 수변

식생 완충대 조성 등 유역규모에서 수질 및 생태계와 연계된 구조적, 기능적 종합)의 개발도 필요하다. 또한 호소 내에서 생물다양성 확보와 관련하여 서식처의 조성, 개선 및 보존과 함께 생물상 관리와 같은 부분도 필요하다. 더욱이 기술의 개발과 연구는 다양한 분야의 전문가들의 연계를 통하여 해당 호소와 유역의 특성에 대한 충분한 이해가 선행되도록 수행되어야 하며, 이를 통해 실효성과 적용성을 극대화하도록 추진되어야 한다.

IV. 결론: 농업용호소의 생태적 기능회복과 보전을 위한 방향과 과제

호소생태계 내의 거동은 유역과 호소내부의 문제 뿐만 아니라 다양한 오염원과 호소 내 생물학적 역학적인 관계까지를 포함하는 복잡한 문제로서, 어느 한 가지의 방법으로 당면문제를 해결하기란 매우 어렵다(Cooke et al., 1993). 그러므로 농업용호소의 수질관리와 환경 보전은 생태계 관점에서 기본방향을 설정해야 한다. 즉, 수질오염을 인간에 의하여 호소가 변화된 환경에 이상적(異常的)으로 반응하는 생태계 대사(metabolism)의 문제로 해석하고 생태계라는 '체제(system)'의 관점에서 해결책을 유도하도록 해야 한다. 이를 위해서는 생태계를 이해하고 자료를 활용하는 방법과 접근법에 있어서도 보다 종합적이고 다원적 방법이 요구된다.

예를 들면, 생태계의 보전을 위한 직접적인 방법이나 기술을 적용하기 전에 해당 생태계가 가지고 있는 생태 자원의 가치, 생태계의 각 구성요소들의 기능 및 상호작용에 대한 구체적인 자료를 확보하는 것이 필요하다. 이렇게 함으로써 각 요인이 가지고 있는 중요성을 파악하고 개념적인 틀(예: 그림 4)을 설정함으로써 관리의 우선순위를 메기고 그에 따라 필요한 방법을 발굴, 적용하

수질, 생태계 등 다양한 측면에서 농업용호소와 하구담수호에 대한 체계적인 연구를 수행하여야 하고 이를 통해 향후의 물관리에 대한 중요한 자료를 확보할 필요성이 매우 크다. 지금까지의 농업용호소의 관리정책은 수질개선을 주목표로만 하였지, 수질이 호소생태계 동태학의 하나의 부분적 요소라는 측면을 제대로 인식하지 못한 것이 사실이다.

보전에 있어 모든 단계는 관리를 필요로 한다. 이는 호소생태계에 영향을 미치는 넓은 범위의 인간활동을 규제하는 행정적인 부분도 포함한다. 앞으로 농업용호소의 기능향상과 생태계 보전을 위한 예방적 측면의 규제와 연구, 그리고 사후관리적 측면의 기술개발은 다음과 같은 내용들을 보다 심도있게 고려하여야 할 것이다.

- ① 비점오염원의 조절 - 비점오염원 관리 및 생태공학 기술개발(수변완충지역 등)
- ② 토지이용의 규제 - 지하수 보전지역의 규정과 유출형태의 오염을 최소화하는 완충지역의 이용과 같은 내용을 포함
- ③ 하천 내에서 계절적으로 변화하는 요인과 습지에 필요한 물이 제공될 수 있도록 하는 물의 분배적 측면 - 하천의 환경 유지용수 공급원으로 농업용호소의 이용
- ④ 형태적인 다양성을 유지하기 위한 수로와 주변습지의 관리¹⁾

- ⑤ 낚시나 레크리에이션과 같은 인간이용의 조절
- ⑥ 특정종의 과도한 번성을 방지하는 생물조절 - 의도적 또는 사고에 의한 생물의 도입이나 외래종의 침입
- ⑦ 생태계 건강성 평가 및 회복 - 농업용호소의 건강성 평가기법의 개발, 농업용호소의 생물다양성 향상을 위한 서식처 조성 및 관리, 수변 완충지대(buffer zone)와 연계 등
- ⑧ 생태계 안정성 및 자원순환적 지역생태계 관리 - 기존의 공학적 기술보다는 자연생태계의 기능과 특성을 접목한 생태공학적 방법²⁾을 이용. 녹조의 제어 및 자원으로의 순환적 기술 개발 등

이러한 관리의 선택사항들은 자원의 개발이라는 목표를 달성하는데 초점을 둔 결정체계에서 조직화될 수 있으며, 또 한편으로는 생태계 보전이라는 측면을 제공하게 된다. 첫 단계로서 수생태계에서 수행되는 연구들을 계획하고 선택할 때 영향을 받는 수계의 자연적, 구조적 그리고 생물학적 동태학을 유지 관리할 수 있도록 하는 기본 목적을 반드시 고려하여야 한다. 또한 일차적 관리에 대한 제안의 경제적·환경적 효율성은 생물상과 인간의 이용에 대한 직접적인 조절이라는 2차적인 선택요건과 반드시 연관지어 평가되어야 한다.

1)수생태계와 육상생태계가 만나는 가장자리, 즉 경계부는 생물의 서식지나 다양성의 관점에서 매우 중요하다. 이도원(2001)은 이러한 경계부의 관리지침을 다음과 같이 제시하고 있다. ① 가장자리의 모양은 복잡한 것이 좋으나 기존의 경관과 조화를 이루도록 한다. ② 가장자리는 바깥쪽으로 확장되어 넓고 부드러운 모양으로 형성한다. ③ 수평·수직적 구조가 복합적이어야 한다. ④ 식재를 한다면 토착종을 이용한다. ⑤ 생물다양성 확보 차원에서 풀과 같은 초본의 형성이 중요하다. ⑥ 여러 가지 생태적 기능에 대하여 경사방향의 중요성을 고려한다.

2)자연생태계가 가지는 특성, 예를 들면, 복잡성, 조직성, 물질의 효율적 재순환, 유연성, 탄력성 등의 특성을 오염문제의 해결을 위해 적용하는 방법을 다루는 새로운 학문분야로서, 생태학적 이론을 기초로 공학적인 기술과 접목을 시도한다. 자연생태계와 인간생활의 조화를 목적으로 한다.

사 사

본 원고는 농림부 기획과제(농업용저수지 녹조제어 기법개발, 2005; 생물조절(먹이연쇄)을 통한 농업용 저수지 수질개선 기법개발, 2009)의 지원으로 작성되었음.

인용문헌

- 1) 농림부. 2004. 농업용수 수질측정망 자료.
- 2) Kalff, J. 2002. Rivers and their export of materials from drainage basins and the atmosphere. In: Limnology. p94-121. Prentice Hall, New Jersey.
- 3) Lee, Sang-Woo, Soon-Jin Hwang, Sae-Bom Lee, Ha-Sun Hwang, Hyun-Chan Sung. 2009. Landscape Ecological Approach to the Relationships of Land Use Patterns in Watersheds to Water Quality Characteristics. Landscape and Urban Planning 92:80-89.
- 4) Hwang, Soon-Jin, Sang-Woo Lee, Ju-Youn Son, Geun-Ae Park, Seong-Joon Kim. 2007. Moderating effects of the geometry of reservoirs on the relation between urban land use and water quality. Landscape and Urban Planning 82: 175-183.
- 5) 황순진, 김경만, 김범철, 고재만. 주기자. 2005. 농업용 저수지의 녹조제어 기법개발. 농림부
- 6) Hwang, S-J and Heath, R.T. 1999. Zooplankton bacterivory at nearshore and offshore site of Lake Erie. Journal of Plankton Research 21: 699-719.
- 7) Hwang, S-J and Heath, R.T. 1997a. Bacterial productivity and protistan bacterivory in costal and offshore communities of Lake Erie. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science 54: 788-799.
- 8) Hwang, S-J. 1995. Carbon dynamics of plankton communities in nearshore and offshore Lake Erie: Significance of the microbial loop for higher trophic levels. Ph.D. Dissertation, Kent State University, Ohio,

USA.

- 9) 황순진, 남귀숙, 박선구, 신경훈, 안광국, 박영석. 2009. 생물조절(먹이연쇄)을 통한 농업용 저수지 수질관리 기법개발. 농림부
- 10) Kim, Ho-Sub, Soon-Jin Hwang, Jae-ki Shin, Kwang-Guk An, Chun Gyeong Yoon. 2007. Effects of limiting nutrients and N:P ratios on the phytoplankton growth in a shallow hypertrophic reservoir. Hydrobiologia 581: 255-267.
- 11) Sterner, R.W. and J.J. Elser. 2002. Ecological stoichiometry. Princeton
- 12) Redfields, A.C. 1959. The biological control of chemical factors in the environment. American Scientist 46: 205-221.
- 13) 김호섭, 공동수, 황순진. 2005. 얇은 부영양 저수지의 동? 식물플랑크톤 군집변화 특성. 한국육수학회지 38(1): 18-29.
- 14) Phillips, E.J., M. Cichra, K.E. Havens, C. Hanlon, S. Badylak., B. Reuter, M. Randall, and P. Hansen. 1997. Relationships between phytoplankton dynamics and the availability of light and nutrients in a shallow subtropical lake. J. Plankton Res. 19: 319-342.
- 15) 신재기, 황순진, 강창근, 김호섭. 2003. 하천형저수지 팔당호의 육수학적 특성. 한국육수학회지 36: 242-256.
- 16) Thronton, K.W., B.L. Kimmel, and F.E. Payne. 1990. Reservoir limnology. Wiley Inter-science. New York.
- 17) 최영길, 안태영, 한명수, 곽노태(역). 1995. 담수의 부영양화. 신광문화사
- 18) Cooke, G.D., E.G. Welch, S.P. Peterson, and P.R. Newroth. 2005. Restoration and management of lakes and reservoirs (3rd ed.). 548pp. Lewis. Boca Raton.
- 19) US EPA. 2002. Biological Assessments and Criteria: Crucial components of water quality programs. EPA 822-F-02-006.

기획 : 정세용 편집부위원장(schung@chungbuk.ac.kr)