

기획주제 / 농업용수 수질 개선 현황 및 대책

저수지 · 담수호의 친환경적 수질개선 방안

권순국*

1. 머리말

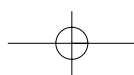
2003년 현재 우리나라의 연간 총 물 사용량은 337억 m³이며 이중 다목적댐, 식수 전용댐, 농업용 댐(저수지), 하구담수호 등 저수지·담수호에 의한 물 공급량은 약 177억 m³으로서 우리나라 연간 물 사용량의 약 52.5%를 차지하고 있다. 그러나 저수지·담수호는 우리나라 수자원 공급에서 가장 중요한 위치를 차지하는 수원이긴 하지만, 하천과 견주어 볼 때 정체수역이라는 환경적인 특성 때문에, 우리나라 모든 수계에 걸쳐서 거의 예외 없이 부영양화 되어 수질오염이 심각한 것으로 알려져 있으므로 이의 획기적인 개선이 요청되고 있다.

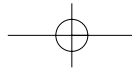
저수지·담수호의 수질개선 방안은 다음의 두 가지 범주로 크게 나눌 수 있다. 즉, (1) 스트레스가 되는 부하를 저수지·담수호 밖에서 먼저 제거하기 위한 유역 내 활동, (2) 수생생태계 자체를 복원 또는 개선하기

위한 호소 내 활동이다. 전자는 수질개선 프로그램의 장기적인 성공을 위하여 반드시 필요하지만(예를 들어 저수지·담수호의 수위 조절과 같이 스트레스의 발생원이 저수지·담수호 자체에 있는 경우는 제외하고), 그것 자체가 직접적인 수질개선 조치는 아닐뿐더러 실제로 시행하기에는 아주 어렵고(불특정다수와 관련되어 있거나, 국민의 생업과 직결되어 있으므로), 또한 불충분한 경우가 많다. 후자는 이전의(보다 자연적인) 상태로 재빨리 회복할 수 있도록, 수명이 긴 오염물질이나 외래종을 제거하거나, 또는 스트레스의 영향에 의하여 없어졌던 생태계 구성요소를 다시 도입하기 위해서 실시하는 것으로 직접적인 수질개선 조치이다.

최근 수 십년 사이에 저수지·담수호를 위한 수많은 수질개선 기술이 개발되었다. 이 글에서는 특히 방지대책별로 묶어 다루던, 이전의 글 쓰는 방식을 지양하고, 부영양화, 유사퇴적, 유해오염물질 등 문제 범주에

* 서울대학교 농업생명과학대학 교수(skkwun@snu.ac.kr)





따른 저수지·담수호의 수질개선 방안을 모두 조금씩 소개하고자 한다.

과거 30년간 가장 주목을 받아왔던 수질 문제는 과잉의 영양염 때문에 발생하는 부영양화 현상이며, 이것을 처리하기 위해서 개발된 기술이 다른 모든 종류의 수질문제를 해결하기 위해 개발된 기술보다 더 많은 것으로 알려져 있다. 과잉의 영양염 축적에 의한 수질장애증상은 여러 가지 독특한 사회적 문제로 나타나는데, 그 중에서도 가장 중요한 것은, 조류(藻類)의 이상 증식, 대형 식물의 번성, 용존산소의 감소, 레크리에이션 가치의 상실, 경관의 악화 등 여러 가지가 있다.

2. 부영양화 제어방법

가. 조류 이상증식의 억제

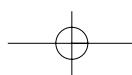
1) 영양염 발생원의 삭감

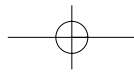
저수지·담수호로 유입되는 과잉의 영양염의 부하와 함께 산소 소비를 요구하는 유기물, 유사 또는 유해물질이 유입되어 조류 이상증식 및 기타 여러 가지 문제를 일으키고 있다. 특히, 영양염 부하(및 그것과 함께 유입되는 여러 물질)의 삭감은 다음과 같은 방법에 의하여 달성할 수 있다. 즉, ① 영양염의 점원(예를 들면 도시하수의 처리수)의 방류지점 또는 영양염이 많이 함유된 하천

의 유로를 저수지·담수호 유역 밖으로 변경하는 것, ② 세제 제품을 개량하여 영양염(주로 인)의 함유량이 최소화 되도록 하는 것, ③ 공학기술로서 실현가능한 배수처리 시스템에 의하여 배수의 영양염을 제거하는 것, ④ 저수지·담수호의 유입 이전에 저수기능(빗물의 침전 및 침투지, 자연 또는 인공의 습지 등)을 갖게 하여 영양염의 유입을 차단하는 것, ⑤ 최적관리기법(best management practice)에 의하여 농지로부터의 영양염 유출을 삭감하는 것, ⑥ 토지 이용 및 관리의 규제를 도입하는 것 등이 있다.

가) 방류지점의 변경 : 하수처리수의 방류지점을 저수지·담수호 유역 밖으로 변경하는 것은 대체 방류장소를 발견하기가 쉽지 않으므로 아무 곳에서도 널리 실시할 수 있는 방법은 아니다. 그러나 우리나라에서도 몇몇 성공적인 사례가 발견되기도 한다. 이 방법은 저수지·담수호의 부영양화 방지 대책으로서 효과가 빠르고, 좋은 결과를 가져 오기는 하나, 실제로는 하류 하천유역으로 오염물질을 떠넘기게 되므로 이곳이 역시 문제가 되는 단점을 가진다.

나) 제품의 개량 : 영양염 삭감에 대한 가장 중요한 실례는 세제로부터 인산염을 삭감 또는 제거하고, 인산염과 같은 기능을 가진 다른 물질, 예컨대, 탄산염, 규산염, 유기화합물 등의 물질로 대체하는 것이다. 앞으로, 우리나라에서도 인산염의 사용을 금지





기획주제 / 농업용수 수질 개선 현황 및 대책

하거나 또는 사용량 삭감을 규정한 법률이 공포, 실시되어야 할 것이지만 이해 당사자들의 대립(경제성 있는 대체품의 생산이 현재 가능치 않은 것으로 알려져 있음)으로 아직까지 현실화 되고 있지는 않다.

과거 미국의 예를 참고로 한다면 세계 중의 인산염을 규제하는 법률이 없는 지역에서는 세계 인산염이 도시하수 중 인산염의 약 2/3을 차지하지만 규제 법률이 존재하는 지역의 인산염 농도는 그렇지 않는 지역에 비하여 약 50% 이하로 낮아졌다고 한다. 비록 이렇게 한다하여도 비료 등의 다른 인산염 공급원 때문에 저수지·담수호의 부영양화를 곧바로 해결할 수는 없지만, 인산염의 주요 공급처인 도시하수로부터 인산염을 제거하는 비용은 저감시킬 수 있다고 알려져 있다.

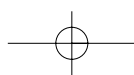
다) 하수로부터 인 제거 : 도시하수로부터 인 제거 기술은 약 30년 전만 하더라도 생소한 것이었으나, 이제는 상당한 기술발전을 이루었고, 선진외국에서는 널리 이용되고 있다. 예를 들면 우리나라에서도 몇몇 대도시의 하수처리장에서는 이미 설치되어 있으며 조만간 방류량 일정규모 이상의 모든 하수처리장에 인 제거가 의무화 될 가능성이 높다. 대부분의 하수처리장은 재래형의 2차(생물학적)처리 설비 후에 도입된 3차 처리 시설인데, 주로 화학적 방법에 의하여 인을 제거한다.

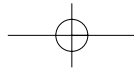
여기서, 알룸(alum)이나 칼슘(calcium) 혹은 (사용 실례는 적지만) 철염(iron salts)을 하수에 첨가하여 인을 제거하는 것이다. 금속 이온은 함수침전물을 형성하고 인산염은 공침 및 함수침전물 표면에 흡착됨으로써 제거된다. 90%를 훨씬 넘는 제거효율도 그리 어렵지는 않다. 하수 처리수 중의 인 표준농도는 보통 1mg/L(재래기술의 제거효율을 90% 및 일반적인 미처리하수 중의 인 농도를 10 mg/L로 계산)이지만 3차처리시설을 적절하게 잘 운영한다면 이를 0.1 mg/L 또는 그 이하로 할 수 있다.

하수로부터 80 내지 90%의 인을 제거할 수 있는 생물학적 기술도 개발되어 있다. 재래의 생물하수처리시설은 일반적으로 인 제거효율이 20~30%로서 아주 낮다. 그러나 폭기 시간, 미생물 체류시간 및 유기물 부하율과 같은 운전 변수를 적절하게 조정하고, 동시에 슬러지가 혐기성으로 되는 것을 방지한다면 효율적인 생물학적 제거는 충분히 잘 달성할 수 있다.

생물학적 기술은 화학물질의 투여나 설비 시설의 추가 설치가 필요치 않고, 특히 화학적 방법보다 비용이 싸다는 이점이 있다. 그렇지만, 화학적 방법이 제어가 더 간단하고 높은 제거효율로 운전이 용이한 장점을 가지므로 상호 비교하여 주어진 여건에 알맞도록 하는 것이 중요하다.

라) 비점원 유래의 영양염의 차단: 일반적





인 경우, 영양염의 점원 억제 또는 제거만으로는 부영양화 문제를 해결하기에 불충분한 경우가 많으며, 따라서 비점원도 반드시 관리되어야 한다. 비점원을 처리함에 있어서 공학적 시스템에 의한 처리는 비용이 너무나 높으며, 또한 하수의 방류지점을 다른 생태계로 전환하는 것도 정치적, 사회적 비용이 높을 뿐 아니라 생태적으로, 수문학적으로 나쁜 영향을 주어 바람직스럽지 않다.

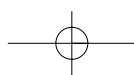
이러한 점을 고려하여, 저수지·담수호 앞 차단시스템으로서 비점원 유래 영양염 부하의 삭감을 위한 시설로서 앞에서 소개한 하수고도처리법이 도입되거나, 저수준 기술(low technology)인 농업최적관리기법(BMP)이 보완적 수단으로서 개발, 사용하게 되었다. 대부분의 차단시스템은 영양염 뿐만 아니라 기타 오염물질(실트, 입자형 유기물, 유해금속 등)도 함께 제거하는 기능이 있다. 현재까지 많이 사용된 차단 시스템은 빗물 침전지/침투지, 인공 또는 자연 습지, 유입하천 내의 인 침강 등 3종류가 있다.

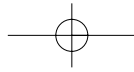
침전지는 유출된 빗물(도시 또는 농지에서)속에 있는 입자형 물질이 침강하는데 충분한 시간만큼 체류시키는 역할을 한다. 침투지는 일정한 양의 유출 빗물(예를 들면, 최초 10mm의 양)을 받아들여 그것이 토양에 침투할 때까지 체류시키는 것을 목적으로 한다. 유출수에 포함된 인(및 그 외 오염물질)의 대부분은 부유 미립자와 결합된 상

태로 존재하고 있기 때문에, 침전지 또는 침투지는 유지관리가 거의 필요 없는, 낮은 비용의 처리 시스템으로서 도시 비점원 오염 차단에 많이 이용되고 있다. 우리나라에서도 새로운 도시개발이 광범위하게 이루어지고 있는 여건 상 주목받는 처리방법이기도 하다. 그러나 이와 관련된 설계 및 성능 기준이 전무한 현실이므로 하루 빨리 기준 설정에 서둘러야 할 것이다. 침전지는 최종적으로는 유사 및 유기물이 가득 차서 매몰되므로 준설하거나 새로운 침전지를 마련해야 하는 번거로움이 있다.

저수지·담수호 입구 앞 침전지는 앞서 소개한 침전지의 변종으로서 저수지·담수호의 유입구 바로 상류에 설치한다. 저수지·담수호 입구 앞 침전지는 저수지·담수호를 유사, 인 및 박테리아 부하로부터 보호하는 역할을 하며, 내부부하를 방지할 수 있도록 호기성 상태를 유지하기만 한다면, 그 효과가 아주 크다.

부하모델을 이용한 연구결과에 의하면 체류시간 2일, 침전지는 약 35%의 인을 제거하며, 체류시간 5일간의 침전지는 약 40%의 인을 제거, 체류시간 15일간의 침전지는 약 50 내지 60%의 인 제거를 각각 달성한 것으로 추정할 수 있다. 유럽의 어떤 저수지 유역으로부터 구한 실제의 데이터는 이것보다 더욱 높은 효율을 나타냈는데, 체류시간 5일의 입구 앞 침전지가 그것에 유입하는 전





기획주제 / 농업용수 수질 개선 현황 및 대책

체인이 60 내지 70%를 제거한 것이 확인되었다.

인공습지 및 공학적으로 정비된 자연습지는 흐르는 물속의 부유물질 제거에 효과를 발휘한 경우가 몇몇 있다. 습지는 충분한 체류시간을 주기만 한다면 부유물질 제거에 유효하며, 동시에 인 제거의 대부분도 이와 같은 부유물질 제거 프로세스와 함께 이루어진다. 습지는 또한 흐르는 물속의 납이나 아연 등 금속류 부하를 저감하는데도 아주 유효하다. 이와 같은 목적을 위해 온대습지 시스템은 일반적으로 부들(cattails) 등의 추수식물(抽水植物)이 중요시 되는데 대하여 아열대 및 열대 습지에서는 부레옥잠(water hyacinth)과 같은 부유수생식물을 더 많이 이용한다.

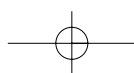
이와는 대조적으로 유출수의 흐름을 관리하지 않거나 하천수를 그대로 자연습지에 넣어 영양염을 제거하려는 시도는 장기적 관점에서 볼 때는 제한된 효과 밖에 얻을 수 없다. 이와 같은 습지는 매년 생육기간 중 유입 영양염을 흡수, 제거하는 것은 분명하지만, 다음해 봄 사멸된 식물에서 많은 영양염이 유출되어 나오기 때문에, 그 이전 해 생육기간 중에 이루어진 영양염 축적과 상쇄될 것이다. 더욱이, 고수위 또는 집중호우의 기간 중 또는 수로화 현상 때문에 발생하는 대량의 영양염 유출 현상은 상당히 긴 저수위 또는 중수위 기간 중에 이루어진 영양염의

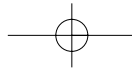
순 저장을 상쇄하는 경향이 있음에 유의해야 한다.

저수지·담수호로 유입되는 하천이 인 응집제(철, 알루미늄)의 첨가에 의해서 처리된 경우도 몇몇 있으나, 처리하는데 필요한 물의 양이 일반적으로 많기(도시하수의 경우와 비교하여) 때문에 보통 비용 효과적인 접근법은 아니다. 유수처리를 위한 응집제로서는 철이 알루미늄 보다 독성문제가 적어 더 좋지만, 인을 철에 결합시킴에 있어서 호기성 상태를 지속할 필요가 있는 단점이 있다. 비교적 적은 유량을 처리하는 경우에는 인 농도 저감의 성공률이 높은 것으로 알려져 있다.

라) 최적관리기법(BMP) : 농지 및 도시지역으로부터 표토, 영양염 및 기타 오염물질의 유출을 삭감하기 위한 최적관리기법이 수없이 많이 개발되어 있다(앞에서 설명한 차단이라는 방법도 본질적으로는 BMP의 일종이다). 영양염의 유출방지 효과, 기술적 실행가능성, 사회적 수용성 및 비용은 채택되는 기법에 따라서 아주 달라지므로 BMP는 정형화하기가 어렵고, 아직까지 연구개발 단계에 머물러 있는 형편이다.

예를 들면, 어떤 종류의 기법(예를 들면, 제한적 용도지정 조례)은 이미 개발된 곳보다 오히려 신규개발지에 더 적합하다. 비록 BMP가 수질이 악화된 저수지·담수호의 복원에 대한 완전한 해결책은 아니라 하더





라도, 저수지·담수호가 그 유역과 한 몸으로 취급되어 효과적으로 대책을 수립할 수 있다는 인식에 입각한 전략을 개발하는데 있어서는 이러한 BMP는 수질대책상의 중요한 구성요소의 하나가 될 수 있다.

2) 희석

희석은 인 농도가 낮은 물을 첨가하여 저수지·담수호 중의 인 농도를 저감하는 방법이다. 기본적으로, 저수지·담수호에 희석수를 첨가한다면 저수지·담수호의 총인 부하는 오히려 증가하지만, 유입수 중 평균 인 농도는 감소되므로, 전체적으로는 수질이 개선되는 것이다. 또한, 저수지·담수호의 수세율(水洗率, flushing rate)도 증가시키기 때문에 자연적으로 저수지 밑바닥에 쌓인 인 퇴적 양도 줄어든다.

비록 희석수량을 늘린다 하여도 저수지·담수호 물속의 인 농도는 그것에 비례하여 감소하지는 않지만, 이렇게 호저 바닥의 인 퇴적물이 줄어드는 결과로 인하여 저수지·담수호 물속의 인 농도는 감소된다는 것이다. 이 방법의 적용대상으로서 가장 알맞은 저수지·담수호는 수세율이 큰 곳으로서 인 농도가 낮은 유입수를 충분히 확보 가능한 곳이다.

희석은 저수지·담수호에 대하여 유입량의 증가에 당연히 따르는 나쁜 영향 이외의 영향은 없을 것으로 생각된다. 그렇지만, 저

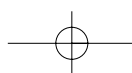
수지·담수호에 대한 유입수로서 영양염 농도가 낮은 물을 충분히 공급할 수 있는 수원을 일반적으로 구하기 어렵고, 이러한 이유 때문에 희석의 실례는 별로 많지 않다.

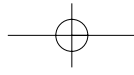
3) 인 농도 및 인 순환을 감소시키기 위한 저수지·담수호 내의 조치

가) 인의 불활성화: 부영양화에 대해서는 유입 영양염 부하를 대폭 삭감하는 것이 무엇보다도 필수불가결 하지만, 삭감을 위한 여러 조치가 조류의 현존량 삭감을 가능케 할 만큼 저수지·담수호 중의 인 농도를 저하시키는데 불충분한 경우가 많다. pH가 높은 경우 또는 심층수의 용존산소량(DO)이 적거나 0인 경우, 저질의 인이 용출되어 저수지·담수호 물속의 인의 중요한 공급원이 된다.

일정 조건하에서, 저수지·담수호 저질로부터 용출된 인이 상부 층으로 이동하여 조류 이상증식을 촉진한다. 외부부하 및 저수지·담수호 내부 생산에 의하여 공급된 유기물 및 무기물이 풍부한 저질이 용존산소 소비와 인의 용출을 발생시키는 과정을 내부부하라고 한다. 내부부하는 유로변경 또는 차단에 의한 저수지·담수호 부영양 상태 개선을 지연 또는 저지하는데 큰 영향을 끼친다.

알루미늄 염(sodium aluminate, aluminum sulfate)의 첨가에 의한 인 불활성화





기획주제 / 농업용수 수질 개선 현황 및 대책

역시 저질로부터 인의 용출량을 감소시킨다. 첨가된 알루미늄 염으로부터 플록(floc) 모양의 수산화알루미늄이 형성되고 이들이 저질까지 침강하여 인산이온과 결합함으로써 고형물을 형성한다. 이 고형물은 용존산소량이 낮거나 0인 조건하에서는 용해되지 않는다. 저질로부터 확산된 인산이온은 플록에 의하여 포착된다. 이 과정은 상당히 효과가 있으면서, 그 효과도 장기적임이 증명되어 있다. 혼합이 활발한 비교적 얇은 담수호의 처리에 효과가 있으나, 반면에 온도가 서로 다른 성층구조를 이루고 있는 깊은 저수지의 경우에는, 이와 같은 효과의 지속성은 잘 나타나지 않는다고 한다.

알루미늄은 잠재적으로 유해한 금속이다. pH 6~8의 보통 조건의 자연계에서 흔히 볼 수 있는 탄산염 알칼리성 수역에서는 거의 대부분 알루미늄은 무해한 수산화알루미늄의 형태로 발견된다. 하지만 pH가 6.0 이하로 내려가면, 가용성 상태에서 독성을 지니는 알루미늄이 증가하기 시작한다.

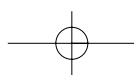
보통, 정상상태의 pH에서 처리된 저수지·담수호의 몇몇 관찰 실례에 의하면, 처리된 저질 가운데 살고 있는 어류 또는 무척추동물이 아주 장기간(年)에 걸쳐서 이러한 상태에 노출되었다 하더라도 나쁜 영향을 받은 흔적을 볼 수 없었다고 한다. 인 불활성화를 살조(殺藻) 처리의 한 종류로 오해하는 사람도 있으나, 이 인 불활성화는 황산알루

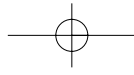
미늄의 첨가량을 낮은 pH 상태를 유지하는 양 이하로 처리만 한다면 안전하고 또한 비용 효과적인 방법이라고 생각된다. 단, 인 불활성화 이후에 나타나는 저수지·담수호의 높은 투명도는 주로 얇은 곳이 문제가 되겠지만, 고착성 대형식물의 침입 또는 확산을 조장할 수는 있다. 알루미늄 염 대신에 수산화알루미늄(석회)을 인 불활성화 목적으로 사용할 수도 있다.

나) 저질표층의 제거 : 저수지·담수호의 저질로부터 인 용출은 저질 가운데서도 가장 인이 풍부한 최근에 형성된 표층의 것이 가장 크다. 저질표층의 제거는 이 층을 수중 준설장비를 사용하여 제거하는 것이다. 이 조치는 아주 효과적이지만, 인 불활성화 보다는 비용이 더 많이 드는 단점이 있다.

그러나 이 조치는 특히 영양염 유입이 삭감 또는 제거되는 상황 하에서는 잠재적 유해물질의 투입 없이, 수질을 회복시키는 효과를 얻을 수 있다. 일단 저질 표층제거를 위한 준설 설비가 설치된 후라면, 한꺼번에 전면적인 저질 제거를 실시하여, 저수지·담수호의 수심도 깊게 하고, 내부부하도 방지하는 이중의 목적을 달성할 수 있다(준설된 저질과 물의 혼합액에 대한 충분한 수용 장소가 있는 것을 전제로 하여).

다) 저질의 산화처리 : 저질에 포함되어 있는 유기물의 산화를 촉진시킴으로서, 저수지·담수호의 저질로부터 용출된 인이 저





질 최상부 5~10 cm의 표층에 존재하는 철과 결합하는데 알맞은 화학적 환경을 조성해 줌으로서 결과적으로 물속의 인 용출을 억제할 수 있다. 이 처리방법은 아직 개발단계에 있지만 알루미늄과 같은 잠재적으로 유해한 물질의 첨가는 필요하지 않고, 질산칼슘 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 를 저질에 주입하기만 하면 된다. 이 질산염은 무산소 상태에서는 전자수용체로서 작용하며, 탈질(질산염이 유리질소 N_2 로 환원되어 가스가 발생하는)에 의하여 유기물의 분해가 진행되는 것이다.

이것과 동시에 황화철 FeS 가 산화되어 그 결과 생기는 수산화 제2철에 의하여 인이온이 포착된다. 탈질에 알맞은 pH로 만들기 위해서는 수산화칼슘을 첨가하기도 하고, 철이 부족한 곳에서는 염화 제2철을 첨가해야만 하는 저수지·담수호도 경우에 따라서 존재할 것이다.

라) 침층수의 방류 : 인의 용출에 대한 영향을 줄이기 위해서 저수지·담수호의 영양염이 풍부한 침층수를 사이폰 배수하는 경우도 생각할 수 있다. 댐 호의 경우는 댐의 깊은 위치에 설치된 수문으로부터 침층수를 방류함으로써 달성할 수 있다. 그러나 어떤 경우, 이러한 인의 방출량이 만약 새로운 외부 부하량 보다 더 크다면, 이 조치로 인하여 인 퇴적량을 서서히 감소시켜, 그 결과 매년 여름철 침층수로부터 표층수로 움직이는 인의 양을 감소시킬 수 있을 것이며, 여름 및

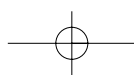
초가을의 조류 이상증식은 거의 사라질 것이다. 그러나 만약 대량의 영양염 부하가 외부에서 계속 유입된다면, 이러한 조치는 별 효과가 없을 것이다.

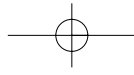
4) 증상의 처리

조류의 이상증식의 억제를 위한 위에서 소개한 여러 가지 기술이나 조치는, 영양염 농도의 지속적인 감소를 가져오게 한다는 점에서 수질 개선에 도움이 되는 본격적인 기술과 조치이다. 그러나 수질 저하를 방지할 기하는데 충분할 만큼 영양염의 외부부하 또는 내부부하를 억제하는 것은 기술적으로 가능하지도 않고, 더구나 경제적으로 실현성이 없는 경우도 많다.

이와 같은 경우에 영양염 과잉의 증상을 완화하고, 저수지·담수호 이용자를 위한 수질 개선을 하기 위해서 사용할 수 있는 저수지·담수호 내의 처리기법은 별로 많지는 않다. 이러한 처리기법 중에는 계속적으로 또는 반복적으로 사용해야만 하는 효과 지속시간이 짧은 것(예를 들면, 인위적 호수순환, 살조제의 사용 등)도 있지만, 바이오 조작과 같이 잠재적으로 장기적인 효과가 있는 것도 있어 선택에 주의를 요한다.

가) 바이오 조작 : 바이오 조작은 수질 문제 해결을 위한 여러 가지 생물제어를 이용하는 방법으로 정의되므로, 종래에 사용하였던 화학적 방법이나 공학적 방법과는 확





기획주제 / 농업용수 수질 개선 현황 및 대책

실한 구분이 된다. 바이오 조작은 영양염 부하삭감에 대한 대응으로는 보이지 않지만, 바이오 조작은 ① 부하를 제어할 수 없는 경우에도 조류의 현존량을 감소시키는 능력, 및 ② 부하의 삭감효과를 늘리거나 가속시키는 능력의 여부가 중요한 과제로 남아있다.

바이오 조작의 효과에 대해서는 아직도 오랜 기간의 연구와 많은 실증실험이 필요할 것이지만 그러나 다음과 같은 일반적인 양상은 이미 잘 밝혀져 있다. 즉, 어류를 제거하면, 우선 대형 광식성(廣食性)의 조식성(藻食性) 동물 프랑크톤의 개체수가 증가 때문에, 이들 조식성 프랑크톤이 일반적으로 조류 현존량 및 생산량을 10분의 1이하로 줄인다.

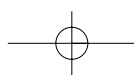
그러나 어류 제거가 실제적으로 가능하지 않거나 바람직스럽지도 않은 저수지·담수호도 많다. 여기서 어류 제거의 대체 안으로 취할 수 있는 것은 어류 군집의 구조를 대형 어식성(魚食性) 어류가 지배하는 구조로 개선하는 방법이 있다. 이와 같은 어식성 어류는 포식에 의하여 프랑크톤을 먹이로 하는 소형 어류의 현존량을 감소시키기 때문에, 조식성 동물 프랑크톤의 현존량이 증가하고, 이러한 결과로 조류의 현존량이 줄어든다. 저수지·담수호 전체에 걸친 여러 실험에서 어식성 어류 증식의 조장이 수질을 개선하는 것으로 확인된바 있다.

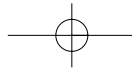
나) 인위적 호수순환: 인위적 호수순환은

방치한다면 여름철 기간 중 성층구조를 나타내는 저수지·담수호를 전체적으로 균일한 온도 및 화학적 상태로 만들어, 유지할 목적으로 하는 관리기술이다. 이러한 상태는 심저대의 호저에 연결되어 있는 파이프라인을 통하여 압축공기를 보냄으로서 달성된다. 파이프의 선단으로부터 수 m 부분은 구멍이 뚫어져 있기 때문에 이곳에서 물이 급속하게 교란하는데 충분한 에너지를 가진 강력한 거품 막이 전달되어 나온다.

적절한 규모의 시스템이라면, 여름철 가장 더운 날에도 호수의 수직적 온도차를 30C 이하로 억제할 수 있다(보통의 성층구조를 가진 저수지·담수호의 경우 수직적 온도차는 200C). 펌프와 회전우근(回轉羽根, whirling blades)에 의해서도 같은 목적을 달성할 수 있다. 이러한 기술은 최근 크게 발달하여 상업적인 호수순환 장치가 다수 개발되어 시판되고 있는데 그 중에서도 태양광 동력에 의한 부유식 순환장치는 매우 적은 동력으로 호수 하층부의 물을 상부로 부드럽게, 연속적으로 순환시킴으로서 물속의 용존산소를 증가시키고 호기성 박테리아의 활동 영역을 크게 넓혀서 호수 수질개선을 꾀한다.

이와 같은 방법에 의하여 달성이 기대되는 개선에는 ① 서식지(habitat)의 확장, ② 용해성 철, 망간, 암모늄, 황화수소 및 무산소수 때문에 생기는 기타 환원화합물의 농





도저하, ③ 조류 현존량의 감소(생기는 경우와 생기지 않는 경우가 있음) 및 ④ 남조류의 스컴 형성의 촉진 요인인 표층수의 미소한 온도 성층의 제거 등이 있다.

현재까지의 실례로 보아서, 인위적 호수 순환은, 철, 망간, 및 황화수소를 제거하고 독성을 가진 남조류를 삭감함으로써 음용수 원 개선에 큰 효과를 발휘하고 있지만, 최근에 새로이 개발된 호수 순환 장치로 인하여 일반적인 저수지·담수호까지 그 적용대상 영역이 더욱 넓어졌다.

다) 살조제 : 살조제는 독성성분의 작용에 의하여 유해한 조류를 억제하는 약품이다. 가장 일반적으로 사용되는 살조제는 특히 남조류에 예민하게 반응하는 황산동이다. 이것은 순수한 대응적 처리이기 때문에, 지속적 효과는 거의 없을 뿐 아니라, 구리 잔류물이 저수지·담수호의 바닥에 남는 폐해가 뒤따른다. 황산동 처리는 물속의 2가 구리(Cu²⁺)이온이 충분히 높은 농도로 유지되어야만 효과를 발휘하지만, 농도는 처리 후 급속도로(수 시간 또는 수일 이내로) 낮아지는 것이 일반적이다.

이것은 구리가 현탁 입자에 흡착되어 유기 복합체와 불용해성의 침전물이 되어 저질 위에 퇴적되기 때문이다. 호수로부터 구리 손실의 속도는 알칼리성 호수에서 특히 빠르며, 조류 이상증식의 문제가 있는 저수지·담수호의 대부분은 이 범주에 속한다.

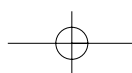
황산동 처리의 결과로서, 중대한 나쁜 영향이 생길 가능성이 있다. 즉, 사멸된 세포의 부패에 의한 용존산소 삭감, 저질 오염, 표적 외의 중(어류 및 조식성 동물 프랑크톤도 포함)에 대한 독성작용 등이 있다.

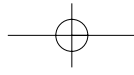
나. 저산소상태

1) 심층수 폭기

심층수 폭기의 목적은 저수지·담수호의 깊은 부분에 정체된 저온층(즉, 심층수)의 용존산소 함유량을 성층구조는 깨트리지 않고 증가시키는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 액체산소를 직접 주입하는 법 등, 여러 방법이 있으나 가장 중요한 방법은 폭기 장치라 하는 공기 양수시스템을 이용하는 방법이다.

폭기 장치는 부피가 큰 2중 시린다로 되어 있는데, 아래 쪽 끝은 열려있고, 위 쪽 끝은 닫혀져 있으나 이곳에서 파이프에 의하여 대기와 통한다. 이 관을 심층수에 삽입하고, 압축공기를 내관의 아래 끝 쪽으로 불어넣으면, 물은 이 힘으로 관 속을 상승하여, 그러한 과정을 통하여 폭기 되면서 산소로 가득 찬다. 이산화탄소나 메탄 등의 기체가 파이프를 통하여 대기 중에 배출되는 한편, 폭기 된 물은 바깥 관을 통하여 심층수로 되돌아간다. 1개의 저수지·담수호의 처리에 이러한 장치가 얼마나 필요한지는 심층수의





기획주제 / 농업용수 수질 개선 현황 및 대책

체적과 그의 산소요구량에 의하여 결정되어야 할 것이다.

폭기 장치는 그의 크기 및 설치장소가 적절한 경우에만 효과가 있다. 폭기 장치가 성층기를 통하여 계속적으로 운전된다면, 저온층의 어장을 복원하고, 동시에 음용수 또는 심층수의 방출수 수질을 개선할 수 있을 것이다. 심층수의 폭기 처리가 조류(藻類)의 방제에 유효하다고 하는 것은 아직 증명되어 있지 않으나, 폭기 과정에 제2철 이온을 첨가함으로써, 저수지·담수호 상부 층에서의 인의 내부부하를 줄일 수 있다는 보고는 있다.

심층수의 폭기처리가 모든 온도 성층구조를 가진 저수지·담수호에 적절한 것은 아니다. 수심이 상대적으로 얇은 담수호에서는 변수층 내의 온도경사가 크지 않기 때문에, 폭기 장치가 서서히 저수지·담수호의 성층구조를 해소시켜, 저산소이면서 영양염이 풍부한 물을 표면으로 이동시킴으로서 그 결과 오히려 조류의 이상증식이 발생될 가능성이 높아진다.

심층수의 폭기 처리는 관리를 위한 조치이지 어디까지나 복원을 위한 조치가 아니다. 따라서 폭기 장치의 운전이 정지된다면, 심층수 및 저질 중의 함유된 용존산소가 소비된 후, 이 서식지는 다시 무산소상태가 되어버릴 것이다.

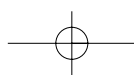
2) 인위적인 저수지·담수호 물 순환

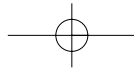
앞에서 설명한 인위적 호수순환이라고 하는 관리기술은 저수지·담수호 바닥에 삽입된 구멍 뚫린 파이프로부터 상승하는 기포막에 의하여 주어지는 교란 에너지에 의하여 호수 전체를 폭기 하거나, 부유식 호수순환장치에 의해서 하부층 물속의 용존산소 농도를 높인다. 순환장치가 등온을 유지하는데 충분한 용량을 가지고 있다면, 저산소 상태 및 그것에 따르는 여러 가지 문제를 해소할 수 있으므로 유해한 남조류도 방제할 수 있다.

3) 겨울철 폭기

북부지역의 수심이 얇고 생산력이 풍부한 저수지·담수호는 겨울철 수면 결빙기간 중에 산소가 고갈되는 것을 많이 경험하게 되는데, 이것은 강설이 아주 많은 겨울의 경우에는 더욱 현저하다. 강설에 의하여 햇빛이 수면의 얼음을 투과하는 것을 방해하여, 광합성이 계속될 수 없기 때문이다.

그 결과 일반적으로 어류의 대량 폐사가 생긴다. 이러한 경우에는 겨울철 어류 폐사를 회피 또는 저감할 목적으로 폭기가 실시되기도 한다. 다시 말하자면, 겨울철 폭기는 관리 기술이지, 근본 원인—즉, 산소요구량이 큰 유기성 저질—을 해소하기 위한 것은 아니다. 겨울철 폭기는 대부분의 경우에 효과가 있는 것으로 인정되나, 그 중에는 효과





가 불충분하거나 실패로 판정된 것도 있다. 실패의 원인은 폭기 장치의 운전이 부적절하였던 것과 저수지·담수호의 규모에 비하여 폭기 장치의 능력이 불충분한 경우였다.

3. 과잉의 퇴적물

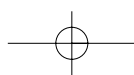
유역 또는 연안의 표토유실과 그 결과 생기는 퇴적량의 증가에 의한 저수지·담수호 용적의 손실은 일반적으로 야기되는 문제이다. 무기성 퇴적물의 증대는 또한 저수지·담수호의 투명도를 감소시키고, 그 결과로서 일차생산을 저해한다. 표토 유실을 억제하기 위한 BMP 및 토지이용규제는 이러한 문제 해결의 장기적인 해결책이지만, 만약 용적의 손실이 중대하고 시급히 해결되어야 하는 경우에는 퇴적물의 제거가 본래의 용적을 회복하기 위한 유일하고도 실제적 방법이다.

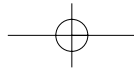
대형 식물의 번무에 의한 유기성 퇴적물의 퇴적도 또한 많은 얕은 저수지·담수호에 있어서 용적손실을 일으킬 수 있다. 저수지·담수호로부터 과잉의 퇴적물을 제거하기 위한 통상의 수단은 수중준설장비이다. 이 기계는 진흙과 물의 혼합액(슬러지)을 수면에 떠있는 흡입관으로 제거하고, 이것을 수용장소로 이송한다. 수용 장소는 보통 육상에 있다. 회수된 저수지·담수호 퇴적물이 농지의 우수한 토양개량재로서 사용되는

경우도 있다. 규모가 큰 저수지·담수호의 경우에는 준설된 슬러리는 호소의 지정된 구획에 모아 두기도 한다. 축적된 슬러리의 탈수는 호안(湖岸)의 수용 장소에서 실시하고, 씻어서 깨끗하게 된 물은 (때로는 처리를 거쳐서) 호소로 되돌린다. 고형물은 적절하게 설계된 수용 장소에 남겨둔다.

준설 프로젝트에 있어서도 여러 가지 중대한 문제가 생긴다. 그 중 하나는 수용장소의 설계가 부적절한 결과로 인하여, 혼탁하고 영양염이 풍부한 물이 넘쳐서 저수지·담수호로 되돌아가는 경우이다. 보통, 준설에 의하여 탁도가 상승하거나 영양염의 용출이 되는 호소 내의 문제는 별 큰 문제가 되지 않는다. 오히려, 더욱 더 일반적인 문제는 표토 유출 및 저수지·담수호의 용적손실 재발을 방지하기 위한 토지 관리 및 수변선 보호의 조치에 있다.

또 다른 가능한 문제의 하나는 퇴적물 중에 유해물질이 존재하는 경우이다. 이 경우는 비용이 추가되는 특별한 퇴적물 처리 과정이 필요하다. 적절하며, 비용이 들지 않고, 또한 환경적 불안을 야기치 않는 처분장소를 발견하는 것은 퇴적물의 오염이 없다 하더라도 아주 어려운 문제이다. 준설은 하천이나 항만에 있어서 수로의 복원 또는 유지를 위해 널리 이용되고 있는 방법이기 때문에 비교적 풍부한 문헌이 있고 이를 참고로 할 수 있다.





기획주제 / 농업용수 수질 개선 현황 및 대책

4. 유해 오염물질

오염에 의해 야기된 나쁜 상태를 시정하기 위해서는 오염물질(유기합성화합물 및 중금속)의 유입을 배제하거나 삭감할 필요가 있다. 기술적인 관점에서 본다면, 점원이 주된 오염원인 경우, 유입의 삭감은 비교적 간단하다. 그러나 비점원의 비중이 클 경우에는 유입 삭감은 이것보다도 더 어렵고 비용도 더 많이 든다.

저수지·담수호 생태계의 오염 방지책으로서 오염물질이 일정 범위의 저질에 집중되어 있는 곳을 준설에 의하여 제거하는 경우가 가장 간단하다. 또 다른 경우는, 오염된 저질의 표면을 피복하여 호수로 오염물질이 용출되지 않도록 하는 것이다. 또한 대형 수생식물이 금속오염물질을 고농도로 축적하고 있는 경우에는 식물자체를 예취하는 것이 생태계의 생물적 탈 오염 수단으로서 아주 유효하다.

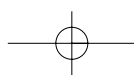
그러나, 많은 경우, 오염물질이 넓게 저수지·담수호의 전체에 분산되어 있기 때문에 저질이나 대형식물의 제거만으로는 효과가 적다. 이 때문에 요즘 분산된 유기오염물질의 생물적 처리기술 개발에 큰 관심을 보이고 있다. 생물적 처리를 위해서는 대사에 의하여 유기오염물질을 무독 또는 독성이 낮은 화합물로 변화시키는 자연미생물 또는 돌연변이체 미생물을 개발할 필요가 있다.

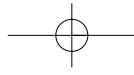
개발에 성공하려면 이러한 미생물을 오염된 호수에 이식하여 특정한 오염물질을 분해할 수 있어야 할 것이다. 현재, 변이체 미생물의 생태계에 사용은 기술개발이 완료되어 상용화된 것도 있으나, 아직까지도 계속 연구 중에 있다고 한다.

저수지·담수호의 화학적 오염물질의 처리는 어류 및 야생생물의 관리와 직접적으로 관련성이 있다. 할로겐화 탄화수소(halogenated hydrocarbons)나 메틸수은(methylmercury) 등의 특정한 오염물질은 생물 농축되기 때문에 먹이사슬의 상위 생물에서 고농도로 그 체내조직에 축적된다. 따라서 어식성의 어류, 새, 및 포유동물은 물속의 농도보다 몇 차수 높은 농도의 오염물질이 체내조직 중에 축적할 가능성이 있다.

어류가 오염물질을 생물 농축하는 정도는 종에 따라 다르다. 이것은 먹이 및 성장률이 종에 따라서 다르기 때문이다. 이 때문에 우선적으로 이용되는 어종과 그러하지 않은 어종의 구성이 오염도에 따라서 달라진다는 것이다. 어장 관리상의 여러 가지 결정이 어종구성의 조장을 통하여 먹이사슬의 꼭대기에 있는 물고기의 체내 오염물질의 양에 영향을 끼칠 가능성이 있다. 일부 생태계이긴 하지만, 어식성 조류(鳥類) 및 포유동물의 번식이 DDT에 의하여 아주 나쁜 영향을 받은 사례가 종종 보고 되어 있다.

또한 유기 염소계 오염물도 물새를 포식





하는 맹금류, 민크, 물개 등에 큰 위협이 된다. 이렇게 된다면, 야생생물의 개체수 유지는 오염물질 처리 정도 여하에 달려있게 될 것이다.

5. 맺음말

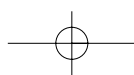
저수지·담수호의 수질개선은 항상 유역과 관련하여 생각해야 한다. 부영양화, 실트 퇴적, 유해 오염물질 문제의 제어는, 유역으로부터 유입을 방지하거나 또한 삭감이 가능하다면, 이것이 불가능한 경우보다 더욱 간단할 뿐 아니라 일반적으로 더 효과적이다. 이 글에서는 부영양화의 증상을 개선할 수 있는 저수지·담수호내의 기술에 대하여 여러 가지를 소개하였지만, 유입의 삭감이야말로 이러한 저수지·담수호 내 기술의 장기적인 효과를 더욱 더 크게 할 수 있는 최선의 방법이다.

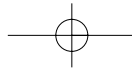
저수지·담수호의 수질개선은 유역의 기타 구성부분 개선 및 복원과 사이에 강한 상호작용이 있다. 유입하천의 복원은 저수지·담수호로 들어오는 퇴적물, 용질(溶質)(영양염, 유해오염물질을 포함), 및 물의 유입에 영향을 준다. 호소 주위의 습지는 물 및 용질의 유동 및 물고기의 산란 장소에 영향을 준다. 거꾸로, 저수지·담수호의 수질개선은 대형식물의 분포, 수위, 연안대에 대한 파도나 얼음의 영향 등을 변화시킴으로

서 습지에 영향을 미친다. 또한 저수지·담수호와 하천의 수질개선은 회귀성 어류의 생활 주기를 통하여 상호작용을 하는 등을 말한다.

기술적인 관점에서는 유역이야말로 수질개선 대상으로서 가장 논리적인 규모이다. 그러나 조직 기구적 제약이나 복잡성은 저수지·담수호의 수질개선을 유역 차원에서 할 경우, 대부분 각급 행정기관, 수산관련 기관, 수질개선관련 기관, 시민환경단체 그리고 심지어는 국제기관 까지 관련되면서, 각 기관 마다 최종적으로 추구하는 목표가 서로 달라서 생기는 난맥상을 말하며, 선진 외국에서는 이미 이에 대한 많은 경험을 가지고 있으므로 이러한 경험을 도입할 필요가 있다.

요컨대, 저수지·담수호의 수질개선은 수변선을 넘어서서 유역경계 내로 범위를 확대해야 한다. 유역이야말로 많은 수질개선 사례로부터 보건데, 가장 논리에 걸맞은 규모의 대상이다. 이러한 규모의 수질개선은 단편적인 수질개선 경우 보다 더욱 지속적인 가능성이 높다. 유역규모의 수질개선에 대한 가장 큰 난관은 조직 기구적 및 교육적 장애이다. 행정상의 경계가 유역의 경계와 일치하는 경우는 대부분 드물며, 하나의 유역 내에 존재하는 여러 가지 기관이 서로 다른 생태적 구성성분을 책임지고 있는 것은 아주 일반적으로 볼 수 있는 현상이다.





기획주제 / 농업용수 수질 개선 현황 및 대책

특히 유역의 최말단에 위치하는 하구담수호의 수질 개선에 난관이 많은 것은 이러한 이유 때문이다. 그 뿐만 아니라, 효과적인 수질개선을 위해서는 이와 같은 다양한 과학

자, 경제전문가, 관리자 및 정책결정자 사이의 협력도 필요한데, 이와 같은 다학제적 협력은 우리나라에서 상당히 어려운 과제로 남아 있다.

참고 문헌

건교부, 2006, 수자원장기종합계획(2006~2020).

小林康彦, 1989, 일본의 호수수질보전을 위한 특별대책, 하천 및 호수수질의 최적화관리방안, 세계환경의 날 기념학술세미나, 국립환경연구원, 한국환경과학연구협의회.

김범철, 1996, 우리나라 호소수질환경의 개선방향, 특집: 우리나라 담수호의 수질환경과 문제점, 한국수자원학회지 제29권 제5호: 57~61

정태학, 1989, 부영양화 방지를 위한 인 제거 기술, 하천 및 호수수질의 최적화관리방안, 세계환경의 날 기념학술세미나, 국립환경연구원, 한국환경과학연구협의회.

환경부, 2004, 환경백서.

황순진, 이상훈, 윤선주, 1998, 경기도 인공호수의 수질개선과 효과적인 관리방안 -평택호를 중심으로-, 경기개발연구원 연구보고서 pp.98-12, 경기개발연구원.

National Research Council (U.S.) 1992, Retoration of aquatic ecosystems: science, technology, and public policy, National Academy of Sciences. Washington D. C. USA.

日本建設省, 1989, 湖沼の綜合的水管理技術の開発, 建設省綜合技術開發プロジェクト, 建設省.

リバ-フロント研究所, 1994, 水質淨化對策に關する資料, リバ-フロント整備センター.

