Special Issue

01

녹조현상의 원인과 대책

김 범 철
강원대학교 환경학부 교수
bomchulkim@gmail.com

1. 녹조현상이란? 綠潮와 綠藻

녹조현상이란 식물플랑크톤이 많이 증식하여 호수의 물이 녹색으로 변하는 현상을 지칭하는 용어인데 '녹조'를 한글로만 적다 보니 용어상 혼선이 발생하는 예가 많다. '녹조현상'이란 말은 20여년 전부터 보도 매체에 등장해 확산된 용어다. 플랑크톤으로 인하여 물의 색이 변하는 현상을 영어로는 'water bloom(물꽃)'이라 하는데, 일본에서는 이를 번역하여 '미즈노하나(水の華)' 라고 부르고 우리나라 학계는 이를 번역해 '물꽃현상' 또는 '수화현상'이라 불렀다. 식물플랑크톤 가운데 남조류(시아노박테리아)에 의한 물꽃현상을 영어로는 cyanobacterial bloom이라고 부르는데 일본에서는 특별히 '아오코(靑粉)'라 부르는 용어가 따로 있다. 남조류세포가 파쇄되거나 건조되면 세포 내에 잠재해 있던 청색 색소가 나타나 푸른색을 띠기 때문에 푸른색 가루라는 의미로 만들어진 용어인데 남조류의 색상을 정확히 관찰하여 만든 용어이다.

그런데 간혹 녹조(綠潮)현상을 녹조류(綠藻類)와 혼동하여 綠藻현상이라고 잘 못 쓰는 경우가 있다. 1990년대에 호수의 부영양화가 심해지면서 녹색으로 변하는 호수가 많아지자 붉은색 플랑크톤이 증식해 바닷물이 붉게 물드는 '적조(赤潮)현상'과 대비하여 '녹조현상'이라는 용어가 어디선가 만들어져 일반에게 쉽게 이해되는 용어로 널리 호응을 받게 되었다. 녹조현상은 적조현상에 대비하여 만들어진 용어이므로 녹조현상을 한자로는 '녹조(綠潮)현상'이라고 쓰는 것이 옳다.

용어의 혼선은 녹조류(綠藻類)라는 플랑크톤과 혼동하는 데서 비롯된다. 식물플랑크톤 중에는 규조류, 녹조류, 와편모조류와 남세균 등이 흔히 출현하는 종류이다. 남세균은 과거에 남조류(藍藻類)로 불리었으며 요즘은 학술용어로서 남세균 또는 시아노박테리아로 불리우고 있다. 최근 우리나라 부영양호를 녹색으로 물들인 생물은 남세균이며 녹조류(綠藻類)가 아니기 때문에 이를 '녹조(綠藻)현상'이라 부르는 것은 잘못된 표현이다. 녹조류는 남세균보다 좀 더 짙은 녹색을 띠며 독소가 없어 크로렐라와 같이 사람이 먹기도 한다. 반면 남세균은 호수에서는 녹조류보다 연녹색을 띠다가 건조하면 청색을 띠며 수면에 떠올라 고밀도의 '스컴(scum · 떠 있는 찌꺼기)'을 형성하므로 육안으로도 구분된다. 남세균은 녹조류와는 달리 독소를 생성하기도 하고 악취를 내는 유해한 조류이므로 반드시 구분할 필요가 있다.

따라서 부영양호에서 흔히 보는 '녹조현상'을 가장 정확히 표현하자면 '남세균이 대량 증식하여 녹조(綠潮)현상이 발생했다'고 해야 한다.

간혹 하천의 부착조류 가운데 녹조류가 번성하여 하상이 녹색으로 덮이는 현상을 녹조현상이라고 부르는 경우가 있는데 부착조류 번성을 綠潮현상이라고 부르기에는 어색하다.

2. 녹조현상의 피해

호수의 녹조(綠潮)현상이 세간의 관심을 끌면서 녹조현상의 위해성을 바라보는 다른 견해들이 대두되고 있다. 녹조현상이 매우 해로운 것이라는 견해와 남조류는 원래 자연적으로 어느 곳이나 흔히 존재하는 생물이므로 함께 더불어 살아가야할 자연현상이라는 견해이다. 결론부터 말하자면 녹조현상은 생태계에 매우 해로운 것이다. 조류가 과잉 번성하는 것 자체가 수중동물에게 두루 해를 주는 현상이며 남조류는 더욱 더 동물에 위해성이 크다.

우선 조류의 번성은 호수 심층의 산소고갈을 가져온다. 조류가 호수 표수층에서 광합성을 할 때는 산소가 생성되고 표수층의 산소가 과포화되어 대기로 확산되어 나간다. 반면에 조류가 침강하여 분해될 때는 산소를 소비하여 심수층의 산소고갈이 일어난다. 우리나라 많은 저수지에서 산소고갈이 나타나고 있으며 일부 4대강보에서도 심층의 산소고갈이 발생한다. 댐에서 심층의 산소가 고갈되는 경우 심층수를 하류로 방류하면 하류의 어류폐사가 발생하기 쉽다. 댐이나 저수지의 수문이 누수가 발생하여 심층수가 방류되거나, 보에서 바닥을 통과하는 파이핑현상이 있을 때도 무산소 심층수가 방류되어 어류폐사가 발생할 수 있다. 또한 조류의 번성은 표수층에서 알칼리성의 독성을 유발한다. 호수의 pH는 이산화탄소의 농도가 좌우하는 것인데 조류가 광합성을 많이 하면 표수층의 pH가 수질기준인 8.5를 초과하여 9.5 이상에 이르는 경우가 허다하다. 어류는 pH가 8.5 이상이면 스트레스를 받고 9.5를 초과하면 민감한 어류는 급성독성을 나타내어 죽기도 한다. 따라서 부영양화로 인하여 표수층의 pH 가 알칼리성을 나타내면 민감한 어류는 서서히 도태되고 내성이 강한 어류만 살아남아 동물다양성이 크게 낮아진다. 심층 산소고갈, 표수층의 산소과포화, 표수층의 알칼리성, 등이 부영양화현상으로 인하여 보편적으로 발생하는 생태학적 위해성이다.

남조류는 동물의 간을 손상시키는 독소를 만들기 때문에 다른 조류에 비하여 더욱 위해성이 크다. 남조류는 간을 손상시키는 마이크로시스틴(microcystin)이라는 독소를 흔히 생성하여 외국에서는 가축이 대량폐사하거나 사람이 죽은 사례도 있고 간암발생이 증가하였다는 보고도 있다. 남조류에는 많은 종이 있고 같은 종이라도 환경조건에 따라 독소를 생성하기도 하고 생성하지 않기도 하므로 예측하기가 어렵다. 남조류가 번성하여 녹조현상이 발생하였다면 대략 절반의 확률을 가지고 유독성일 가능성이 있다고 보면 된다.

남조류의 독소가 사람에게도 매우 유독하지만 남조류의 독소는 주로 세포 내에 존재하며 현대의 고도정수처리 공정에서는 남조류 세포가 거의 제거되고, 마이크로시스틴이 활성탄과 염소소독 과정에 의해 거의 제거되기 때문에 다행히 수돗물을 통해 남세균의 독소를 섭취할 가능성은 거의 없다. 그동안 다른 오염물질에 비해 유독 남조류의 독소에는 지나칠 정도로 많은 관심을 갖고 적정 이상의 정밀분석을 요구하는 등 과잉대응이 나타났는데, 이는 녹조현상이 필요이상으로 이슈화됐기 때문에 나타난 부작용이라는 비판론도 제기되고 있고, 정치적으로 이용하기 위해 녹조현상의 위해성이 과장됐다는 평가가 나타나기도 한다.

많은 사람들이 수돗물의 오염을 통한 녹조현상의 위해성을 우려하는 예가 많지만 사실 이는 적절한 반응이 아니다. 한국에서는 남조류의 독소가 인간에게 위해를 줄 수 있는 경로가 수돗물이 아니라 어패류의 섭식이 오히려 더 클 수 있는데 수돗물만 걱정

하는 것은 위해성의 대상을 잘못 짚은 것이다. 수돗물의 마이크로시스틴은 고도정수처리 공정을 거치면 거의 제거돼 위해성이 작은 반면, 한국에서는 민물새우와 우렁이, 물고기 등의 어패류를 통해 독소를 섭취하는 경로가 존재한다. 물속의 남조류를 먹고 사는 수중동물의 체내에 마이크로시스틴이 축적되어 있을 수 있기 때문이다. 특히 동물의 내장에 많이 분포하므로 녹조현상이 있는 곳에서 잡은 어패류는 내장을 제거하고 먹어야 한다. 남조류 독소는 열에 안정하여 끓여도 분해되지 않는다. 그동안 수돗물의 남조류 독소 위해성이 다소 과대평가됐다고 본다면 어패류 섭취의 위해성은 과소평가됐다고 본다.

녹조현상은 사람보다는 야생동물에게 미치는 위해성이 더 크다. 사람에게는 민물새우 매운탕이 어쩌다 먹는 별식이지만 수중동물은 식물플랑크톤을 늘 먹고 살아야 하기 때문에 유독성 녹조현상이 발생하면 체내에 독소가 축적되고 간 손상으로 죽기도 한다. 수돗물이 안전하다고 해서 녹조현상의 위해성이 적다고 평가하는 것은 생태계의 건강성을 도외시하는 인간위주의 이기적 사고라고 할 수 있으며 생태계에 위해성이 크다는 점을 인식하여야 한다.

3. 녹조현상의 원인

조류성장의 제한요인

녹조현상이 발생하기 위해서는 인의 농도가 높아야 하고 체류시간이 길어야 한다는 두 가지 조건이 모두 충족되어야 한다. 남조류의 번성은 인농도가 높은 부영양호에서 나타나는 현상이며 빈영양호에서는 거의 발생하지 않으므로 녹조현상의 원인은 부영양화의 원인과 같다. 따라서 조류성장의 제한영양소가 증가하는 것이 주요 원인이라고 볼 수 있는데 우리나라 호수의 제한영양소는 모두 인이다. 세계적으로는 질소가 제한영양소가 되는 호수가 10% 정도 되는데 우리나라에서는 질소의 자연배경농도가 높기 때문에 N/P 비가 Redfield ratio 보다 높고 인이 제한영양소가 된다 (Kim et al., 2001). 질소배경농도가 높은 이유는 기반암의 조성과 관련이 있는 것으로 추정되나 명확히 밝혀지지는 않았다.

제한영양소는 부영양화의 과정에서 바뀌기도 한다. 빈영양상태일 때에는 인의 농도가 낮아서 인이 제한영양소인데 하수에는 상대적으로 인의 함량이 높기 때문에 하수의 유입이 증가하면 점차 N/P 비가 낮아지면서 일시적인 질소의 부족이 나타나기도 한다. 그러나 이때는 인과 질소의 농도가 모두 높기 때문에 대개 영양소 이외에 체류시간이나 빛이 제한요인이 된다. 부영양수역에서 녹조현상이 발생하면 질소의 고갈이 나타날 수 있는데 이를 보고 질소제거가 녹조현상의 제어를 위해 필요하다고 주장하는 사례도 있으나 질소의 결핍은 일시적인 현상이다. 질소를 제거하더라도 자연배경농도가 높기 때문에 효과가 조금 있을 뿐이며 곧 인제한으로 바뀌게 된다.

체류시간이 인농도에 뒤이어 두 번째 주요 제한요인인데 수체에 따라 중요도가 다르다. 저수지에서 조류성장에 최적인 체류시간은 약 1개월 정도로 보고 있는데 대형댐에서는 체류시간이 이보다 길기 때문에 강우에 따른 체류시간의 변동이 영향을 주지 않는다. 그러나 의암호, 팔당호, 하구호 등의 체류시간이 짧은 하천형저수지와 강의하류지역에서는 체류시간이 주요제한요인이다. 특히 한강 하류의 신곡수중보 상류 지역에서는 평소 체류시간이 짧기 때문에 플랑크톤이 번성하기 어려우나 팔당호의 방류량이 줄어들면 남조류가 번성할 수 있는 충분한 체류시간을 가지게 되고 녹조현상이 발생한다. 우리나라 주요 강의 하류에서는 하수의 영향으로 인하여 인의 농도가 과포화상태로 높기 때문에 영양소의 농도는 더 이상 조류성장의 결정인자가 아니고 체류시간이 결정인자이며, 언제든 체류시간이 증가하면 조류가 증식할 수 있는 조건을 갖추고 있다.

4대강사업으로 건설된 보에서 녹조현상이 발생하여 그 원인이 하수의 유입인지 체류시간의 증가인지에 대하여 논란이 있기도 하였는데 두 가지가 모두 녹조현상의 필요조건이다. 인의 농도가 낮은 물

은 정체하여도 녹조현상이 생기지 않으며, 체류시간이 짧으면 남조류 식물플랑크톤이 살 수 없다. 따라서 녹조현상을 줄이기 위해서는 제한요인인 인의 농도를 감소시키든가 체류시간을 줄여야 하는데, 지역에 따라서는 물의 체류시간을 줄이는 것이 어려울 수 있으며, 인의 농도를 줄이는 방향에 중점을 두어야 하는 경우도 있을 수 있다.

인의 근원 · 점오염원 vs. 비점오염원

조류성장의 제한영양소가 인이므로 인의 근원을 찾아서 줄이는 것이 궁극적인 해결책이다. 인의 근원은 크게 동물의 배설물과 비료로 나누어 볼 수 있다. 동물의 배설물은 하수와 퇴비의 형태로 배출되고 비료는 농경배수로 배출된다. 우리나라의 인수지를 계산해 보면 사람에 의한 배출량이 13%이며, 비료와 축산이 87%를 차지하는 것으로 추산된다 (Kim et al, 2001). 사람에 의한 배출은 주로 하수로 배출되며, 축산분뇨는 퇴비로 바뀌어 농경지에서 유출되므로 비료와 같은 비점오염원의 경로로 유출된다. 총량으로 보면 농업비점오염원이 더 많고 하수의 영향은 작은 것으로 볼 수 있지만, 수체에 따라 이 상대적 기여도는 전혀 달라질 수 있다.

점오염원과 비점오염원의 상대적 중요도에 대해 수질관리자들은 계산 방법에 따라 서로 다른 평가를 제시하기도 한다. 점오염원은 연중 일정하게 배출되는 반면에 비점오염원에서는 폭우 시에만 다량 유출되므로 수체의 수리적 특성에 따라 생태학적 영향도 달라진다. 대형댐에서는 유입한 물이 장시간 체류하므로 비점오염원으로부터 폭우 시에 유출된 인이 조류에 이용될 수 있는 충분한 시간을 가진다. 소양호, 대청호 등의 대형저수지에서는 홍수 후에 조류의 증식이 나타난다. 이는 우리나라 몬순기후의 영향이라고 볼 수 있는데 여름 강수량이 많지 않은 나라에서는 조류의 번성이 주로 봄철에 나타나지만 우리나라에서는 홍수 후에 나타나는 'monsoon bloom' 이 spring bloom 보다 더 크게 나타난다. 대형호수에서는 점오염원이건 비점오염원이건 간에 연간 유출량이 많은 오염원이 호수의 수질을 좌우하게 되며 당연히 비점오염원이 큰 기여도를 가진다.

반면에 체류시간이 짧은 수체에서는 강우 시에 비점오염원으로부터 유출되는 인이 충분이 조류에 이용되지 않고 바다로 배출된다. 한강의 팔당호, 의암호, 4대강보, 강의 하구호 등이 이에 해당한다. 이를 수역에서는 홍수기에 인의 농도가 높아지더라도 체류시간이 짧아서 녹조현상이 발생하지 않는다. 오히려 갈수기에 체류시간이 길어지면서 조류가 증가하는데 이 때는 비점오염원으로부터의 인 유출이 거의 없는 시기이며 대부분의 인은 하수에 기인한다. 즉, 연간 인의 총배출량은 비점오염원이 많지만 연중 기여도의 시간적 평균을 계산해 보면 점오염원이 월등히 크다. 현재 많은 강의 하류지역에서 유량의 많은 부분이 하수처리장 방류수로 이루어져 있다. 중류에 대청댐 팔당댐 등의 댐을 만들어 상수원으로 취수하기 때문에 자연수의 유하량이 많지 않고, 특히 갈수기에는 댐의 방류량이 더욱 줄어들고 회귀한 하수가 하천을 형성하기 때문에 하수의 기여도가 매우 높다.

4. 녹조현상의 저감대책

녹조현상의 필요조건이 인의 증가와 체류시간의 증가이므로 이 두 가지를 저감하는 것이 근본대책이다. 체류시간을 줄이기 위해서는 불필요한 보와 저수지를 철거하는 것이 필요하다. 우리나라의 저수지 수는 약 17,500개이며, 보의 수는 국가하천과 지방하천에서만 약 4만개가 확인되었고 소하천까지 포함하면 약 10만개로 추정된다. 필요성이 낮아진 보와 저수지들을 점차 철거하는 것이 녹조현상을 줄이면서 동시에 하천생태계의 건강성을 회복하는 방안이 될 것이다. 선진국에서는 이미 불필요한 보와 댐의 철거사업이 확대되어 가고 있으나 우리나라에서는 아직 적절한 투자가 이루어지지 않고 있어 앞으로 하천생태계 복원사업의 핵심이 되어야 할 것이다.

녹조현상을 저감하는 근원적 대책의 핵심은 인의 저감이라고 할 수 있는데 인의 저감은 얕은 하천이건 정체된 호수이건 모두 필요하다. 정체수역에서 인의 농도가 높으면 녹조현상을 일으키는 것은 잘 알려져 있는데 얕은 하천에서도 인의 농도가 높으면 부착조류의 과다증식으로 문제를 일으킨다는 사실은 흔히 간과된다. 하천의 부영양화로 인하여 발생하는 부착조류의 과잉 번성은 자갈틈을 메우고 야간에 저질의 산소를 고갈시키는 피해에 의해 하천생태계에 큰 피해를 준다. 따라서 정체수역이건 유수생태계이건 간에 인의 농도는 반드시 낮추어야 한다.

강의 하류수역에서 갈수기 녹조현상의 주원인은 하수에 기인하는 인이므로 인의 배출을 줄이는 첫째 타겟은 하수이어야 한다. 하수의 처리에는 주로 생물학적 처리법을 사용하고 있는데 미생물은 인을 자신이 필요한 만큼만 흡수하기 때문에 인의 제거율이 높지 않다. 생물학적처리만 거치는 경우 하수처리장 방류수의 인농도는 약 1 mg/L에 달하며 이는 호수 부영양화의 기준인 0.03 mg/L 의 수 십 배에 해당한다. 따라서 하수를 희석할 수 있는 자연수가 부족한 하천에서는 하수처리장 방류수가 갈수기 부영양화의 주요 원인이 된다. 그러므로 미국 일본 등 선진국에서는 화학적 인제거 공정을 추가하여 방류수의 인농도를 0.01 mg/L 수준까지 낮추어 주변자연수의 농도와 동일하게 맞추거나 오염된 하천수를 희석하여 정화하는 목표를 가지고 처리한다. 미국에서의 조사에 의하면 많은 하수처리장 방류수가 인을 0.02 mg/L 수준으로 처리하고 있으며 인제거에 따른 비용증가도 크지 않아서 감당할 수 있는 수준인 것으로 평가하였다 (U.S. EPA, 2007). 우리나라에서도 근래 하수의 인제거공정이 확산되고 있으나 아직도 기준농도가 0.2 mg/L 이상으로서 부영양화 기준을 크게 웃돌고 있어 하수처리장 방류수가 부영양화의 원인으로 남아 있다. 호수의 녹조현상저감과 하천의 부착조류 저감을 위하여 하수의 인제거강화는 최우선 대책이다 (김범철 등, 2007).

강우 시 월류하수(sewer overflow)도 중요한 하천부영양화의 원인이다. 우리나라 하수처리장의 용량이 충분치 않아서 대부분 강우 시 하수가 월류하여 하천이나 호수로 배출되고 있다. 강우 초기에는 지천으로부터 매우 오염도가 높은 물이 유출되는데 분류식하수관거가 설치된 곳일지라도 강우 시 유량증가와 오염도 증가가 흔히 나타나고 있어 월류수는 하수오염의 중요한 형태로 남아 있다. 우리나라 하수관거와 하수처리장이 연결된 인구수의 비율은 높은 편이지만 실제 배출되는 인의 제거율은 절반에 못미칠 것으로 추정된다. 이를 해결하기 위해서는 하수처리장의 용량을 더욱 확대하여 초기강우 유출수를 처리하는 시설을 갖추어야 한다. 또는 강우 시에는 생물학적 처리를 생략하고 처리시간이 짧은 화학적처리공정에 의해 최대한 많은 월류하수를 처리하는 방안도 고려하여야 한다.

한 편 대형댐 유역의 농경지에서는 퇴비의 유출이 매우 큰 비중을 차지하므로 이에 대한 대책이 필요하다. 농업분야에서 퇴비를 많이 사용하는 유기농을 친환경농업이라고 부르기 때문에 퇴비는 수질에 악영향이 없는 것으로 오해하기도 하는데 유기농이란 생산물이 농약에 오염되지 않은 청정산물이라는 뜻이지 수질오염이 없다는 뜻이 아니다. 농경지가 배출하는 수질오염 물질로는 흙탕물, 인, 부식질, 농약, 등을 들 수 있는데 유기농은 이 가운데에서 농약의 사용만 없다는 것이지, 나머지 오염물질의 배출여부와는 무관한 것인데 우리나라에서는 이를 '친환경농업'이라고 명명하여 많은 이들이 수질오염이 전혀 없는 농업으로 오해하고 있다.

유기농은 농약과 화학비료를 사용하지 않는 대신 많은 양의 퇴비를 사용하는 것을 말한다. 퇴비를 많이 사용하면 작물생산에는 긍정적인 효과를 가져 오지만 수질에는 악영향을 미칠 수 있다. 퇴비는 가축분뇨와 식물 잔재(부스러기)를 섞어서 만드는데, 분뇨에는 하천과 호수의 부영양화를 일으키는 인이 많이 함유되어 있기 때문에 부영양화의 원인이 된다. 또한 식물잔재를 구성하는 부식질은 수돗물에서 발

암물질을 생성하는 원인물질이므로 상수원 수질악화의 주요 원인이 될 수 있다.

인은 분해가 되지 않으며 기체상으로 제거되지 않고 남는 물질이기 때문에 퇴비화 과정에서 유기물이 썩고 암모니아가 공기중으로 날아 가더라도 인은 전혀 감소되지 않는다. 그 결과 퇴비에는 많은 인이 축적되어 인함량이 높아지는데, 농작물이 비료성분으로서 주로 필요로 하는 것은 질소성분이고 인은 소량만이 필요하다. 따라서 농작물에 충분한 질소를 주기 위해 퇴비를 뿌리면 퇴비에 함유된 인이 지나치게 많아 인 성분은 과잉공급되고 이것이 빗물에 씻겨 강과 호수에 흘러 들어가 부영양화를 일으킨다.

유럽처럼 농경지의 경사가 완만하고, 폭우가 내리지 않는 국가에서는 퇴비를 사용하더라도 퇴비의 유출이 우려되지 않는다. 하지만 경사진 밭이 많고 폭우가 내려 표토가 심하게 유실되는 우리나라의 자연환경에서는 지나친 퇴비사용은 폭우에 유출되어 수질을 악화시킬 수밖에 없다. 고랭지 채소재배지에서 보듯이 유기농이라도 경사가 급하고 객토를 많이 하여 토양이 연약하면 흙탕물이 발생할 수 밖에 없고, 토양의 인함량이 높으면 하천수의 인농도가 높아진다. 분뇨를 하천으로 직접 유출시키는 것보다는 분뇨를 퇴비로 만드는 것이 나은 방법이기는 하다. 그렇다 하더라도 수질오염을 낮추는 정책의 일환으로 유기농을 확대하려는 것은 적절치 않고 퇴비의 과다 사용과 유출을 억제하는 농경활동의 규제가 필요한 시점이다.

5. 호수 내 조류저감 대책

유역의 인유출을 저감하는 것이 가장 경제적이고 효과가 확실한 방법이지만 부영양화 방지를 위해서는 유역의 오염원을 관리하는 것이 가장 투자의 효율이 크고 확실한 방법이나 유역의 오염원이 관리가 불가능할 때에는 호수 내에 유입한 후 처리하는 방법을 쓰기도 한다.

호수 내 대책으로서 가장 경제성이 있고 세계적으로 널리 사용되는 방법이 화학적 응집침전에 의해 수중의 인과 부유물을 제거하는 방법이다 (Cooke et al. 1993). 황산알루미늄(alum, $Al_2(SO_4)_3$) 형태의 알루미늄염이 주로 많이 사용되며 lime (CaO, $Ca(OH)_2$), $FeCl_3$ 등도 사용된다. 알루미늄염이 물에 녹으면 $Al(OH)_3$ 침전이 만들어 지면서 수중의 부유물과 함께 침강하며 수중의 인산이온도 함께 흡착되어 침전한다. 그러나 응집침전의 효과가 오래 지속될 수 있으려면 외부로부터의 인유입이 차단되어야 하며 체류시간이 짧은 인공호에서는 외부유입수량이 많기 때문에 반복적인 투여가 필요하다.

알루미늄염에 의한 부영양화 제어는 위해성이 없고 호수 물 1톤당 약품비가 10원 정도로 저렴하기 때문에 세계 여러 나라에서 수 십 년 동안 사용된 방법이다. 우리나라에서는 알루미늄의 유해성에 대한 우려로 인하여 널리 시행되지 않고 있으나, 많은 연구 결과 호수 내 알루미늄이온이 곧 바로 침강하며 동물에 해가 없는 것으로 알려져 있다. 미국 뉴욕시의 사례를 보면 상수원 저수지에서 탁수가 발생하는 경우에 탁수가 정수장에 유입되지 않도록 저수지내에 alum을 넣어 침전시키는 방법을 사용하고 있다. 호수 내에서 부유물질을 침강시키지 않는 경우에는 정수공정에서 알루미늄응집제를 많이 사용하여야 하므로 오히려 수돗물의 알루미늄 잔류량이 더 많아지기 때문이다.

녹조현상이 심각한 경우 임시방편으로 살조제를 사용하기도 한다. 전통적으로 황산구리를 많이 사용하였으나 구리의 축적이 동물에 독성을 가질 수 있으므로 사용을 지양하고 있다. 최근에는 산화력을 가지고 있는 과탄산소다(sodium percarbonate)를 사용하는 시도도 이루어졌다. 과탄산은 구리와 달리 유해 잔유물이 없으며 적절한 농도를 사용하면 동물에 피해가 없이 조류를 죽일 수 있는 것으로 보고되고 있다.

그 외에 조류세포를 제거하거나 조류를 죽이는 방법들이 다양하게 개발되어 있으나 대부분 처리비용이 많이 들기 때문에 경제성과 효과가 확실히 인정되지 못하고 있는 것으로 보인다.

호수의 상류 유입부에 작은 전처리댐(pre-reservoir)을 건설하여 유입수를 체류시킴으로써 인의 침강을 유도하여 본 댐의 수질을 개선하는 방법도 좋은 효과를 가지는 방법이다. 유역으로부터 유입하는 표토와 결합된 입자상인, detritus, 식물플랑크톤, 등은 전처리댐에서 체류시킴으로써 일부를 제거할 수 있다. 독일의 Bahnwach 저수지에서는 전처리댐에 모인 물을 철을 이용한 응집침전법으로 처리한 후 본 댐에 넣어 줌으로써 수질을 개선하고 있다. 우리나라에서는 파로호에 두 곳의 전처리댐이 설치되어 있는데 수질개선에 효과를 나타내고 생물서식처 개선에 도움이 되는 것으로 생각된다.

참고문헌

김범철 등. 2007. 국내 호수의 제한영양소와 하수처리장 방류수 인 기준 강화의 필요성. 한국물환경학회지 23(4): 512-517

Cooke, G. D., E. B. Welch, S. A. Peterson and P. R. Newroth. 1993. Restoration and management of lakes and reservoirs. Lewis Publishers and CRC Press, Boca Raton, FL.

Kim, Bomchul, Park, J-H., Hwang G., Jun, M-S. and Choi, K., Eutrophication of reservoirs in South Korea, Limnology., 2, 223-229 (2001).

U.S. EPA 2007. Advanced Wastewater Treatment to Achieve Low Concentration of Phosphorus. EPA 910-R-07-002