우리나라 하천과 호수에서 탁수발생 현황과 대책[1)]

김범철 · 정성민[2)]
강원대학교 자연과학대학 환경과학과

우리나라 탁수문제의 발생

근래 우리나라 많은 하천과 호수에서 탁수가 가장 심각한 수질오염의 형태로 나타나고 있다. 강우가 우기에 집중되어 강우강도가 높은 우리나라의 기후조건에서는 폭우시 탁수의 발생은 자연적인 현상이었다. 과거의 탁수발생은 강우 시에만 짧게 일어나는 일시적인 현상이었고 비가 그치면 곧바로 물이 맑아지는 것이 정상이었다. 탁수는 곧바로 바다로 흘러가고 하천은 다시 원상을 회복하여, 수중 생물도 탁수의 피해로부터 쉽게 회복할 수 있었다.

그러나 1990년대 후반에 들어 탁수의 발생이 증가하여 수질오염 현상으로 대두되기 시작하였다(김범철, 1998a; 김범철, 1998b; 전만식과 김범철, 1999). 부유물질의 농도도 점차 높아지고 탁수발생기간도 길어져 탁수의 피해가 심화되기 시작한 것이다. 탁수의 장기화는 특히 댐이 많이 건설되어 있는 북한강에서 그 영향이 크게 나타났다. 탁수의 농도가 높아지고 장기화 되면서 정수장애도 일어나고 수중생물의 감소가 나타나는 등의 수중생태계 피해가 나타나고 있다. 본 논문에서는 우리나라 하천과 호수에서 탁수발생의 실태와 원인 및 대책에 관하여 논하고자 한다.

농경지역 하천의 탁수발생 실태

우리나라 농경지역의 탁수발생을 평가할 수 있는 사례로서 소양강 상류의 강원도 양구군 해안면을 들 수 있다. 이 지역은 둥근 분지의 지형을 가지고 있어 농경지의 비율이 유역면적의 50%가 넘는 농업집중 지역이며, 고랭지 채소 재배가 활발하여 탁수가 많이 발생하는 지역이다. 이 지역의 강우 시 수질변화를 보면 강우시 급격히 부유물질의 농도가 증가하는 것을 볼 수 있다(그림 1).

농경지역 하천에서 탁수가 발생하는 지역으로서는 양구군 해안면 외에 홍천군 내면 자운리, 평창군 도암면, 등을 들 수 있다. 북한강과 남한강 모두 상류지역에 탁수가 발생하는 농경지역이 위치하고 있으므로 한강 상류는 대부분 하천이 탁수의 피해를 받고 있다.

하천의 수질은 강우의 영향을 크게 받는다. 농경지역에서는 일반적으로 갈수기에는

1)Turbidity Problems in Streams and Reservoirs in Korea and Control Strategies

2)KIM, Bomchul · JUNG, Sungmin, Department of Environmental Science, Kangwon National University, 200-701, Korea, E-mail: bkim@kangwon.ac.kr

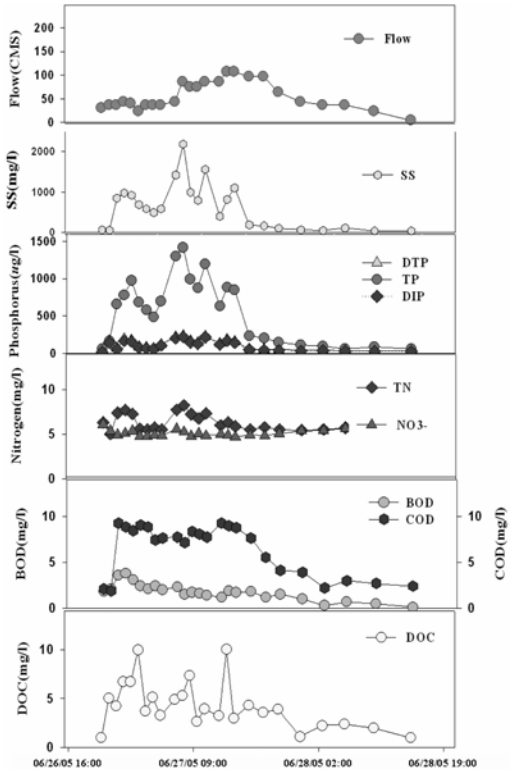

그림 1. 농경지역 하천의 강우시 수질변동 사례 (소양강 상류 자운천, 2004년 6월 26일-28일).

물이 맑고, 비가 내리면 혼탁해지는 변동을 보인다. 하수처리장 등의 점오염원이 많은 도시하천에서는 갈수기에 수질이 악화되고 비가 내리면 희석에 의해 개선되는 변동을 보이지만, 비점오염원의 비중이 큰 농경지역의 하천은 반대로 갈수기에 맑은 물이 흐르고 비가 내리면 혼탁하고 오염도가 높다.

강우 시 수질의 변동은 수질 항목에 따라서도 다른 패턴을 보인다. 강우 후 유량이 증가할 때 부유물질과 인의 농도는 수십 배의 증가를 보이지만 질소의 농도는 거의 변동이 없다. BOD도 인에 비해 증가폭이 작다. 일반적으로 입자상으로 존재하는 물질은 강우 시 침식이 증가하여 수중농도가 증가하고, 용존형으로 존재하는 물질은 강우 시 희석되어 농도가 감소하는 경향을 보인다. 인은 대부분 토양입자에 흡착되어 있어 입자의 속성을 띄고 있는 반면에 질소는 대부분 용존형 질산이온으로 존재한다(표 1).

하천수질의 대표치로는 시간평균을 사용하기도 하고 유량가중평균을 사용하기도 하는데, 바다로 곧바로 배출되는 하천에서는 일반적으로 시간평균을 적용하는 것이 적절하다. 그러나 대형댐으로 유입하는 하천에서는 댐 내에 저류되어 장시간 하류에 서서히 배출되면서 수질에 영향을 미치므로 저수량에 비례하여 영향을 평가하여야 한다. 따라서 강우 시 변동하는 하천수질에 유량을 곱하

표 1. 소양강 상류 지천인 양구군 해안면 유출수(만대천)의 강우시 유량가중 평균 농도 (EMC) (단위 mg/l)

강우사상	BOD	SS	COD	TN	NO_3^--N	NH_3-N	TP	DIP
2003.6.27~6.28	3.3	430	17.1	3.86	2.10	0.274	0.652	0.062
2003.7.8~7.10	3.4	251	8.3	3.68	2.30	0.151	0.441	0.036
2003.7.18~7.19	5.1	735	15.0	3.90	1.98	0.331	0.704	0.042
2003.7.21~7.25	6.7	1,349	18.4	3.82	1.80	0.146	1.094	0.074
2003.8.19~8.21	3.3	414	6.5	2.35	1.80	0.834	0.347	0.049
2003.8.23~8.25	2.2	294	5.5	1.72	1.06	0.110	0.647	0.086
2003.9.5	4.5	424	10.8	2.56	1.83	0.159	0.259	0.090
2003.9.12~13	2.7	660	6.4	2.07	1.67	0.048	0.458	0.058
2003.9.18~9.19	2.5	340	5.6	1.69	1.23	0.123	0.096	0.066
평균	3.7	544	10.4	2.85	1.75	0.242	0.522	0.063

여 오염배출량의 합을 구한다음 유출수량의 합으로 나누어 유량가중 평균농도를 구하여 적용하는 것이 타당하다. 유량가중 농도를 한 번의 강우사상에 대해 측정하는 경우 이를 강우사상당 평균농도(event mean concentration)이라 하며 EMC라는 약어로 부른다.

양구군 해안면의 농경지역(만대천)에서 측정된 EMC를 보면 BOD는 2-3급수의 낮은 농도를 보이지만 SS와 TP는 매우 높은 것을 볼 수 있다(엄재성 등, 2004; 김범철 등, 2007)(표 1). 부유토사가 많이 배출되는 것은 농경지 유출수의 일반적인 특성이다. 인은 농경지의 토사입자에 흡착되어 있다가 토양과 함께 유출되므로 농경지역 하천에서는 SS 농도와 인의 농도가 매우 높은 상관관계를 보인다. 즉, 혼탁한 물은 인을 많이 함유하고 있다고 추정할 수 있다.

부유물질(SS)의 농도는 20 mg/L를 초과하면 어류에 영향을 미치기 시작하며, SS 100 mg/L를 초과하면 어류 가운데 민감한 종류는 죽거나 손상을 입을 수 있다. 따라서 현재의 하천 탁수는 어류에 매우 큰 피해를 줄 수 있는 농도이다. 인은 호수의 부영양화를 일으키는 원인이 되는데 호수에서 0.03 mgP/L를 초과하면 부영양호가 된다. 해안면 유출수의 인농도는 이 임계농도의 10배를 초과하므로 호수와 하천에서 부영양화의 큰 원인이 될 수 있다.

호수의 탁수 발생 실태

하천의 탁수는 호수로 유입하여 호수를 혼탁하게 하고 하류에 방류되어 하류하천과 호수를 혼탁하게 한다. 댐이 탁수 피해에 미치는 영향은 두 가지 상반되는 효과를 가진다. 탁수가 저수지에서 저류되어 있는 동안 부유물질은 호수 내에 침강한다. 대개 2 μm 이상의 입자크기를 가진 부유물질은 호수 내에서 침강하여 제거되므로 댐하류로 방류되는 물의 탁도는 크게 저감된다. 즉, 저수지가 부유물질의 침강지의 역할을 하는 것이다.

반면에 저수지는 부정적인 영향도 가지고 있다. 비교적 청정한 지역에서는 하천의 탁수가 강우 시에만 일시적으로 발생하고 곧 맑은 물로 회복된다. 그러나 탁수가 댐에 저류되는 경우에는 장기간 서서히 방류되므로 하류에서는 탁수가 방류되는 기간이 길어지는 피해를 준다. 탁수가 수중생물에게 주는 피해는 탁수의 농도와 탁수지속 시간의 곱에 비례한다. 따라서 탁수의 농도가 감소하더라도 탁수발생시간이 길어지면 그 피해가 증가한다.

북한강에는 많은 댐이 건설되어 있기 때문에 여름에 발생한 탁수가 장기간 배출되는 탁수 장기화가 뚜렷하게 나타난다. 대개 여름에 유입된 소양호의 탁수가 배출되는 데에는 약 3개월이 걸린다. 그러나 2006년 7월에는 북한강 상류 지역에 많은 폭우가 내려 탁수가 많이 발생하여 2007년 3월까지 계속 탁수가 방류되는 장기화가 발생하였다.

2007년도 여름에는 소양강 유역에는 폭우가 적었으나 북한강의 북한유역에 큰 폭우가 내려 많은 탁수가 발생하였다. 그 영향으로 화천댐(파로호)이 탁수로 채워지고 계속 탁수가 방류되는 피해가 발생하고 있다. 이로 인하여 하류의 춘천호에서 탁수로 인한 생태계 피해가 크게 발생하였을 것으로 추정하고 있으며, 의암호는 2년 연속하여 장기간 탁수가 발생하는 피해를 겪고 있다. 이로 인하여 의암호의 생태계에는 많은 변화가 있었을 것으로 추정되고 있다.

대형댐 내에서는 탁도가 수심에 따라 크게 차이를 보인다. 일반적으로 강우시에는 하천의 수온이 낮아진다. 여름에 호수 표층의 수온이 25℃ 전후인데 비하여 강우시 하

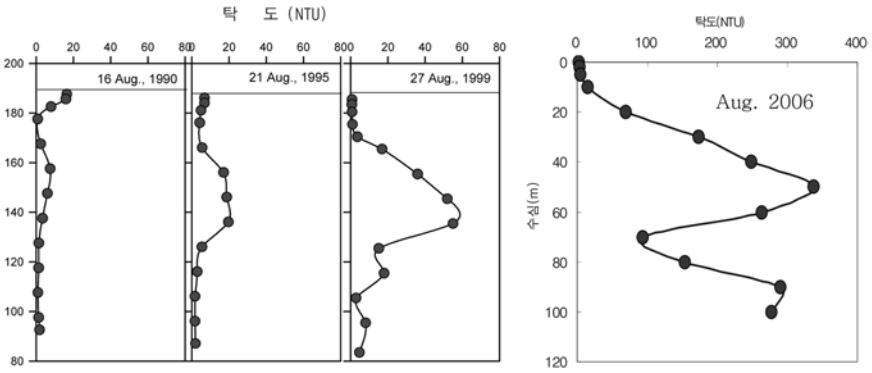

그림 2. 여름 홍수 후에 조사된 소양호 탁도 수직분포의 장기간 변동. 중층에서 높은 탁도를 보이고 있으며 1990, 1995, 1999, 2006년에 걸쳐 점차 증가 추이를 보이고 있다.

천수온은 15℃ 정도로 낮아진다. 하천수는 호수로 유입한 후 동일한 밀도를 가진 수층까지 침강한 후 수평방향으로 이동한다. 따라서 탁수는 대형댐에서 호수의 중층으로 이동하여 중층 탁수대를 형성한다(그림 2). 댐의 발전방류구의 높이가 대개 중층이므로 탁수대와 일치한다. 따라서 표층수는 맑은 물일지라도 발전을 할 때에는 중층에서 탁수가 배출된다. 방류구를 선택할 수 있는 선택취수시설은 탁수를 방류함으로써 부유물질이 침강할 수 있는 시간을 더 줄 수 있는 장점이 있으나 표층의 탁수가 모두 배출되고 나면 중층의 탁수가 표층으로 확산되어 호수의 생태계에 악영향을 미칠 수도 있다.

탁수로 인한 피해

탁수가 주는 가장 큰 피해는 수중생태계 파괴이다. 탁수는 하천의 부착조류, 저서동물, 어류 등을 저해하여 현존량과 다양성의 감소를 초래한다(Kerr, 1995). 호수에서는 수초의 사멸을 초래하여 이에 의존하는 수서곤충과 어류의 감소를 수반한다. 2006년도 탁수발생 후 의암호에서는 침수수초가 모두 죽고, 어획량이 크게 감소하는 정도로 어류가 감소하였다.

또한 소양호 방류수를 상수원으로 사용하는 춘천시에서는 정수비용의 증가와 수질악화라는 피해를 겪었다. 탁수는 수돗물의 질도 나쁘게 한다. 농경지에서 유출되는 탁수에는 퇴비에 기인하는 많은 부식질이 함유되어 있는데 이는 수돗물 소독시에 발암물질을 생성하는 원인물질이다. 따라서 탁수를 원수로 사용하면 수돗물의 발암물질 농도가 증가한다.

또한 탁수는 부영양화의 원인이 되기도 한

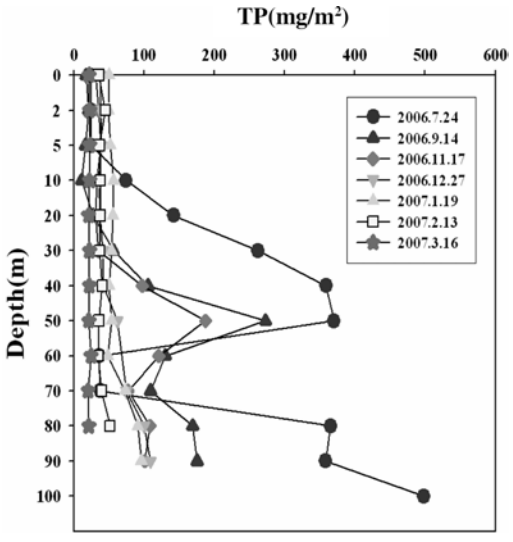

그림 3. 소양호의 표층 총인농도의 변동. 2006년 홍수 후 크게 증가하였다.

다. 호수의 인농도는 부영양화를 결정짓는 가장 중요한 요인인데 강우시 탁수와 함께 하천의 인농도가 증가하여 강우 후 호수의 중층에는 매년 총인농도가 높은 수층이 형성되고 있다(그림 3). 소양호의 예를 보면 중층에 총인농도가 높은 탁수대가 형성되어 있는데 이 물은 장기간에 걸쳐 서서히 하류로 방류되어 하류의 수도권 상수원의 부영양화에도 영향을 미치고 있다.

2006년도에는 특히 소양호에서 탁수의 장기화가 심하게 나타났다. 예년에는 가을 혼합기 이전에 중층 탁수가 모두 방류되므로 소양호의 표층에는 영향을 주지 않았다. 그러나 2006년도에는 탁수의 유입량이 많아 가을 혼합기까지 탁수가 모두 배출되지 않았고 이 층이 표층으로 확산됨으로써 표층의 인농도가 증가하였다. 소양호의 표층 인농도는 가두리 양식장 설치이전에 10 mgP/m^3 이하의 낮은 농도를 보이다가 가두리 양식장의 생산량이 컸던 1990년대에는 20 mgP/m^{3}까지 증가하였다. 가두리 양식장 이후 총인 농도는 감소하는 추이를 보였으나 2006년도 홍수발생 후 가을 혼합기에 약 50 mgP/m^{3}까지 증가하였다(그림 4). 의암호에서도 탁수발생으로 인한 인의 증가가 나타났다. 의암호의 인농도는 예년에 30 mgP/m^3 수준이

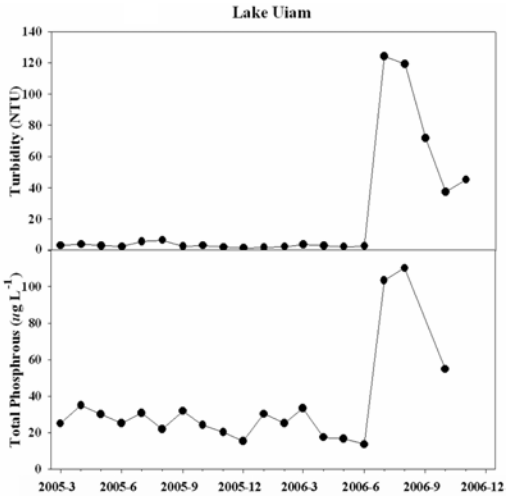

그림 5. 의암호에서 2006년 탁수 대발생 전후의 탁도와 총인농도 변동.

었으나 소양호의 탁수방류가 시작된 후 100 mgP/m^{3}까지 증가하였고 수개월간 고농도의 인이 관측되었다(그림 5).

하상에 퇴적된 토사는 하천생태계에 더욱 큰 위협이 된다. 하천에 유입된 토사는 입자에 따라 작은 것은 부유토사(suspended sediment)라 부르고 입자가 큰 것은 하상을 굴러가는 유사(bedload)라고 부른다. 입자가 큰 모래는 유속이 빠를 때는 하천 바닥을 따라 흐르고 유속이 느릴 때는 머물러 있으면서 하상에 쌓여 생태계에 큰 위협이 되고 있

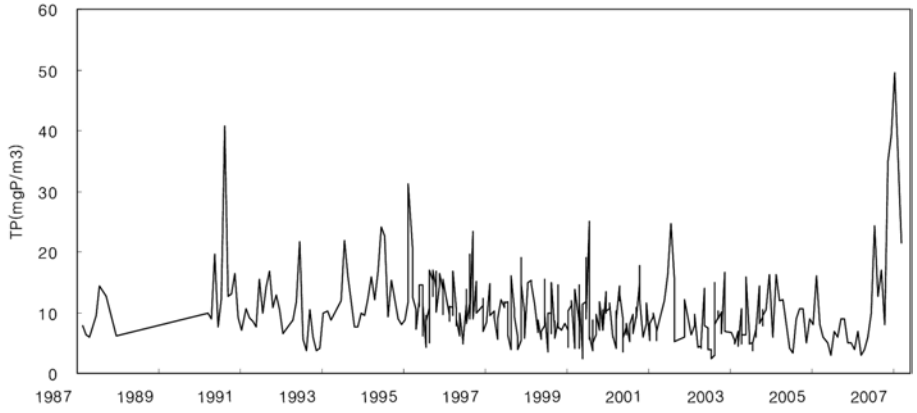

그림 4. 소양호의 표층 총인농도의 변동. 2006년 홍수 후 크게 증가하였다.

다. 하상의 자갈틈은 저서동물이 살고 어류가 산란을 하는 중요한 서식처인데 모래가 돌사이를 메워 이들 수중 동물의 서식과 번식을 방해한다. 저서동물의 감소는 이를 먹고사는 어류의 먹이를 감소시킴으로써 간접적으로 어류의 감소를 초래한다. 한강 상류의 탁수가 발생하는 많은 하천에서 토사의 퇴적으로 인한 생물상 파괴가 발생하고 있으며 다른 어느 요인보다 동물상 파괴의 가장 큰 원인으로 지목되고 있다.

탁수 발생의 원인

탁수의 발생지역은 주로 토목공사현장과 경사가 큰 농경지이다. 토목공사 기간 중에는 침식되기 쉬운 형태로 토양이 노출되어 있으며 단위면적당 토양침식량이 매우 크다. 농경지는 단위면적당 침식량은 토목공사장보다 작으나 총면적이 크기 때문에 총 침식량의 많은 비중을 차지한다. 특히 경사가 큰 농경지에서는 평지의 농경지보다 침식량이 월등히 크기 때문에 한강 상류 지역에서 탁수발생의 주요 원인으로 지목되고 있다.

한강 상류 지역에서는 가파른 고령지역에서도 경작을 하는 밭이 많이 분포한다. 북한강유역에서는 양구군 해안면, 홍천군 내면 등이 있고, 남한강에서는 평창군 도암면, 강릉시 왕산면, 등이 대표적인 지역으로서 고랭지 채소재배가 활발한 지역이다. 이들 지역은 해발 고도가 높아 여름 기온이 낮은 지역으로서 여름에 질 좋은 채소를 재배할 수 있다는 이유로 인하여 고령지를 경작하고 있으며 흔히 고랭지 채소재배로 불리고 있다.

무, 배추, 당근 등이 주로 토사를 많이 배출하는 작물인데, 고령지에서는 객토를 자주 한다는 것이 토사 유출의 큰 원인으로 지목되고 있다. 경사가 큰 밭에서는 고운 입자의 표토가 강우에 유출되기 때문에 지력이 감퇴한다. 이를 보완하기 위하여 새로운 흙을 캐내어 덮어주는 부토작업을 하는데 이를 흔히 객토라고도 부르고 있다. 객토하는 흙은 부드럽기 때문에 뿌리채소의 성장에 매우 좋은 조건을 가지는 반면에 침식에 취약하여 탁수 발생의 원인이 된다. 근래 농기계의 보급이 증가하면서 객토가 쉬워졌기 때문에 과거에 비하여 객토가 크게 증가하였으며 이는 탁수 증가 추이와 일치한다.

고랭지 채소재배지에서는 거의 매년 객토를 하기 때문에 다른 농업에 비하여 토사 유출량이 크다. 객토를 할 때에는 많은 양의 퇴비도 함께 투여하는데 강우시 퇴비의 유출은 탁수와 함께 중요한 수질악화원인이 된다. 퇴비는 주로 가축분뇨로 만들므로 많은 양의 인을 함유하고 있어 부영양화의 원인이 되며, 퇴비의 부식질 성분은 수돗물 소독시 발암물질 생성의 원인이 된다.

하상의 준설도 하천의 탁수발생과 생물상 파괴의 큰 원인이다. 일반적으로 청정지역에서의 강우시 탁수발생은 일시적인 현상으로 비가 그치고 물이 맑아지면 저서동물과 어류상이 곧 다시 회복된다. 그러나 하상을 긁어내는 수해 복구 공사, 준설 등은 탁수발생 기간을 증가시키며, 자갈 등의 서식처를 교란하며, 어류의 산란에 장애를 주어 홍수보다도 더 큰 피해를 주는 요인으로 작용한다. 탁수의 어류피해는 노출시간에 비례하여 증가하므로 탁수기간의 증가는 탁수의 농도증가와 유사한 피해를 가져온다. 하천생태학의 관점에서 본다면 홍수 후 복구작업을 하더라도 하상은 교란하지 말고 꼭 필요한 주변의 구조물만 보수하여야 한다. 즉, '하천의 자연은 홍수에 의해 자연히 만들어 지는 것'이라는 하천생태학의 원리를 지키는 것이 자연경관을 살리고 하천의 생물을 살리는 진정한 친자연형 복구인 것이다.

탁수저감 대책

우선 탁수가 생태계에 매우 큰 피해를 주는 중대한 수질오염현상이라는 인식을 가지고 대처하여야 한다. 우리나라에서는 여름에 폭우 시에 탁수가 발생하는 것이 자연현상이므로 탁수의 심각성에 대해 무감각한 경향이 있다. 그러나 근래의 탁수는 그 농도와 발생기간이 과거와는 비교할 수 없을 만큼 증가하여 하천과 호수에서 어류를 죽이고 수돗물의 질을 저하시키는 큰 피해를 주고 있다. 따라서 탁수가 한강의 주된 수질오염현상이라는 인식을 새로이 가져야 한다.

탁수피해에 대한 인식의 부족은 규제의 부재라는 결과를 가져왔다. 미국에서는 하천의 탁도 수질기준이 20-40 NTU로 규정되어 있으며 이를 초과하는 경우에는 토목공사를 허가하지 않고, 총량관리를 실시하는 등의 강력한 규제를 시행하고 있다. 이는 탁수가 주는 생태학적 피해가 그 만큼 심각하다는 것을 시사하고 있다. 우리나라도 하천의 탁도 기준을 과학적 근거를 가지고 설정하고 법적구속력을 가지도록 관리하여야 한다.

탁수의 저감을 위한 노력에 대한 인센티브로서 각 종 농업 보조금을 활용할 수 있다. 현재 친환경농업의 인증제를 통하여 농업 보조금을 지급하고 있는데 여기에는 농약과 화학비료의 사용저감만이 조건으로 규제되고 있으며, 수질오염의 원인이 되는 탁수, 인, 부식질유기물 등은 고려하지 않고 있다. 따라서 오염이 적은 진정한 친환경적 농업을 권장하기 위해서는 친환경농업의 개념을 수질오염이 적은 농업으로 전환하여야 하며, 이를 고려하여 농업보조금을 지급한다면 탁수저감을 유도하는 인센티브로서의 역할을 할 수 있을 것이다.

고령지 경작지의 하천정비에도 투자와 규제가 필요하다. 하천의 폭을 좁히는 불법경작을 막고, 수변구역을 매입하여 하폭을 넓히고 수변식생대를 복원하여야 하며, 하천에 흙을 밀어 넣는 행위는 규제하여야 한다. 그 외에 하천 내에서의 토목공사는 기간을 단축하여 수생태계에 영향을 미치는 기간을 최소화하는 제도도 필요하다. 2007년도에는 북한지역에서 많은 탁수가 발생하였다. 이를 막기 위해서는 앞으로 남북한 공동 대응 방안도 필요하다.

참고문헌

김범철a. 1998. 흙탕물도 심각한 오염원. 강원도민일보 환경이야기 1998년 2월 25일자.

김범철b. 1998. 현대농업은 공해산업. 강원도민일보 환경이야기. 1998년 7월 22일자

김범철, 정성민, 김재구, 장창원, 전만식. 2007. 소양호의 탁수발생 실태와 육수학적 영향. 한국육수학회 춘계 학술발표대회 발표논문집 p17-23.

엄재성, 김범철, 이영기, 최한규. 2004. 소양강 상류 농경지역(인북천)의 비점오염유출. 『소양호 생태계의 특성과 보전』 세계 물의 날 기념 심포지엄 논문집. p275-296. 원주지방환경청.

전만식, 김범철. 1999. 하천탁수현상의 원인과 피해. 강원대학신문. 1999년 10월 4일자.

Kerr, S.J. 1995. Silt, Turbidity and Suspended Sediments in the Aquatic Environment: An Annotated Bibliography and Literature Review. Southern Region Science and Technology Transfer Unit Technical Report TR-008: Ontario, Canada 277pp.