

Problems of lake water management in Korea

한국의 호수 수질관리의 문제점

Bomchul Kim

**(Professor, Department of Environmental Science,
Kangwon National University, Korea)**

김범철

(강원대학교 자연과학대학 환경과학과 교수)

한국의 호수수질관리의 문제점

김범철 · 전만식 · 김윤희
(강원대학교)

1. 서론

우리나라는 일본, 남중국, 인도, 등과 함께 summer monsoon 지역에 속하며 여름에 강우량이 많다. 특히 우리나라는 여름에 강도 높은 폭우가 많이 내려 강우량의 집중도가 매우 높고 하천의 유량이 수백 배까지 크게 변동한다. 하천수량의 극단적이 변동으로 인하여 갈수기에 수자원의 확보가 어렵기 때문에 많은 댐을 건설하지 않을 수 없다. 그 때문에 수도권의 인구밀집지역으로 흐르는 한강에는 가장 많은 댐이 건설되어 있다. 특히 북한강은 댐의 연속으로 변모하였다.

댐이 건설된 경우에는 호수의 부영양화와 조류의 일차생산이 수질을 크게 좌우하기 때문에 하천과는 다른 수질변동 기작을 가지게 된다. 즉, 하천위주의 수질관리에서 호수위주의 수질관리로 전환하여야 한다. 호수위주의 수질관리가 하천위주의 수질관리와 다른 점은 조류의 일차생산의 영향이다. 하천에서는 외부유입 BOD를 제거하는 것이 주요 수질관리의 목표이지만 호수에서는 외부기원유기물 뿐 아니라 호수내 조류의 일차생산을 증가시키는 인을 감소시키는 것이 수질관리의 주요 목표가 된다.

우리나라의 호수의 수질관리에서 어려움을 주고 있는 문제점들을 열거하자면 하수처리의 낮은 인제거율, 도시지표유출수의 미처리, 강우집중, 높은 비료 사용량, 급경사지의 비료와 토사유출, 등을 들 수 있다(표 1).

표 1. 우리나라의 호수수질관리에 어려움을 주고 있는 요인들

-
- 하수처리의 낮은 인제거율
 - 아직 처리되지 않고 있는 도시지표 유출수
 - 여름의 강우집중 현상
 - 농경지의 높은 비료 사용량
 - 높은 축산밀도
 - 급경사 농경지의 비료와 토양침식
-

2. 하수의 인제거율

2.1 인제거의 필요성

갈수기 수자원확보를 위해 댐의 건설이 필수적인데 댐은 갈수기에 정체수역을 생성하게 되고, 조류의 발생이 수반된다. 따라서 댐이 많이 건설된 우리나라에서는 호수의 부영양화 방지를 위해 인을 저감하는 것이 수질관리의 핵심적인 대책이 되어야 한다. 그 대책으로서 생활하수의 인 제거가 절실한 실정이다.

영양염류 가운데에서 호수에서 조류의 성장을 좌우하는 제한영양소는 주로 질소와 인인데, 국내의 자연수계에서는 외국과 달리 질소가 비교적 풍부하게 존재한다. 따라서 국내의 경우, 질소가 제한영양소로 작용하는 자연수계는 거의 없다. 자연수계에서 기본적으로 질소가 풍부하다는 것은, 하수처리에서 질소를 완벽하게 제거하여도 부영양화의 방지에 큰 의미가 없다. 그러므로 하수의 처리에서는 유기물제거 뿐 아니라 인의 제거에 초점을 맞추어야 한다. 그러나 국내하수처리의 현실은 인제거 보다는 질소제거에 초점을 두고 있는 실정이다.

2.2 하수처리장 방류수의 인농도 기준

현재 미국이나 일본등 세계 여러 나라와 비교할 때 우리나라의 하수처리장 방류수의 인 질소 농도기준은 매우 높으며(표 2), 앞으로 강화될 인농도 기준도 현재의 하수처리장 방류수의 인농도보다 높게 책정되어 있어 하수의 인제거율 제고를 유도할 수 없으며 그 결과 호수의 수질이 개선되지 않고 있다.

인의 기준농도가 현재 방류수의 인 농도보다 높게 책정되어 있으므로, 인의 추가 제거의 압박이 없으나, 질소농도는 일부 처리장의 방류수보다 낮게 책정되어 있어 추가설비가 필요한 실정이다. 우리나라 대부분의 대형호수에서 부영양화를 좌우하는 인자는 인농도이며 질소는 상대적으로 중요성이 작다. 우리나라에서는 질소의 자연적인 배경농도가 1mg/l 이상으로 높은 편이므로 하수처리장에서 질소를 제거한다고 해도 조류 번성을 막을 수 있는 정도까지 질소 농도를 낮출 수 없다.

호수의 조류감소를 위해서는 질소보다는 인의 제거에 노력을 집중하여야 함에도 불구하고 현재의 방류수 수질기준에 의하면 오히려 질소제거에 주력하여야 하는 실정이다. 따라서 질소의 배출기준은 더 강화하지 말고 인 배출기준만을 더 강화하는 방안을 채택하여야 한다.

표 2. 세계 각국의 하수처리 방류수 질소·인농도 기준

국가 / 지역		TN (mg/ℓ)	TP (mg/ℓ)
미국	오대호지역	3.2 - 19.3	1.0
	포토맥 강 하류	-	0.2-1.0
	플로리다	3.0	1.0
	워싱턴 D.C.	-	0.23
	Lake Tahoe	-	1.0
일본	비와호 유역(현재)	10	0.5
	비와호 유역(장래 고도처리계획)	3	0.02
	하마마쯔	5	1.0
	가스미가우라호 유역 (湖北 하수처리장)	12	0.3
	가스미가우라호 유역 (水郷 하수처리장)	5	0.4
스위스		-	1.0
스웨덴		-	1.0
호주		5-10	1.0
한국 - 일반지역		60	8
한국 - 특별대책지역		20	2

2.2 생활하수 처리공법의 문제점

댐으로 방류되는 하수에 대해서는 유기물의 제거 뿐 아니라 인의 제거가 필수적인데 하수처리 공법에 따라 인의 제거율이 크게 달라진다. 우리나라에서도 1996년 처음으로 질소와 인이 규제 대상이 되면서 신설되는 처리장의 대부분이 고도처리 방식으로 설계, 시공되고 있다.

고도처리라고 하는 것은 활성오니법 등 통상의 2차 처리에서 얻는 수질보다도, 더욱 양호한 수질을 얻는 처리를 말한다. 구체적으로는 수질환경기준 달성 등을 위해 부유물질(SS)제거, 폐쇄성 수역의 부영양화방지를 위한 질소(N)와 인(P)제거, 처리수의 재이용을 위한 색도, 취기, 미생물 제거 등이다. 우리나라의 현 실정으로는 고도처리의 대상물질 중에서도 인의 제거에 중점을 두어야만 할 것이다.

인은 휘발성 원소가 아니므로 폐수로부터 제거하기 위해서는 슬러지 형태로 제거해야만 한다. 수중의 용존인을 고형화하는 방법으로는 크게 분류하여 생물학적 방법과 물리화학적 방법이 있으며, 이중 대부분의 방법은 기술적으로 확립되어 있다.

우리나라에서는 인질소의 농도의 규제가 강화되지 않았으므로 처리비용을 절감하기 위하여 생물학적 처리에 의한 인질소 동시제거 공법을 주로 사용하고 있다. 그에 비하여 선진외국에서는 화학적처리를 병용하여 인의 제거율을 크게 높이고 있다.

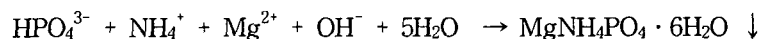
하수의 인제거 공법으로서 화학적 처리, 또는 생물화학적 병행 처리, 등이 높은 인제거율을 보이고 있다. 현재 개발된 공정들은 일반적으로 알루미늄을 첨가하여 인을 불활성화하는 방법을 포함하고 있다.

(가) 응집제 첨가 활성오니법

활성오니법의 반응 탱크에 철염이나 알루미늄염을 응집제로 첨가하면 용액중의 인산이온은 불용성 인산염으로서 응집해 침전지에서 오니와 같이 침전시켜 하수로부터 제거한다. 응집제로서는 염화제이철, 폴리염화알루미늄(PAC), 황산알루미늄 등이 일반적이다. 응집제 첨가법을 이용하면 처리수의 인농도를 0.5mg/l 이하로 안정하게 유지시킬 수 있다. 그러나 응집제에 의해 고형화된 인은 오니로부터 용출되지 않는 장점을 가지는 반면에, 응집제 첨가를 위한 새로운 시설이 필요하게 되고, 오니 발생량의 증가에 따른 오니의 처리비용 증가, 경우에 따라서 응집제(특히 알루미늄)가 질화세균의 활성에 악영향을 주게되는 경우가 있으며, 오니의 탈수성이 악화할 경우가 있는 등의 문제점이 있다.

(나) MAP법

MAP법은 폐수에 마그네슘을 첨가하여 magnesium ammonium phosphate(MAP) 침전을 생성하게 하는 방법이다. MAP법은 폐수 중에 인산이온 및 암모늄이온이 고농도로 포함되어 있는 경우에 마그네슘을 첨가하여 MAP을 생성하게 하는 것으로 인과 암모니아를 동시에 제거하는 기술이다. 그 생성반응은 다음과 같으며, 오니처리 반류수 중의 고농도 인을 제거하기 위해 개발되었다.



이 MAP 분자는 직경이 2mm정도의 입자로 되며, 비료 및 토양의 개량제로서 이용할 수 있다.

폐수중 인과 암모니아 농도가 높지 않으면 효율적인 MAP 생성이 기대하기 어려우므로 하수에 대해서 직접 사용하는 것은 거의 없다. 이 방법은 하수의 인제거방법이라기 보다는 인의 농도가 높게 농축되어 있는 폐수, 또는 고농도의 인과 암모니아 함유되어 있는 폐수의 인회수법이라고 할 수 있다. 실질적으로는 오니탈리액이나 생물학적 탈인법의 잉여오니로부터 인을 유리시킨 고농도의 인함유 상정액에 사용되는 경우가 많으며, 앞으로 이 방법의 사용은 증가할 가능성이 높다.

(다) 응집침전법

물리화학적 방법에 의한 대표적인 인 제거기술로는 응집침전이 있는데, 폐수에 칼슘이온을 첨가하여 용해성 인산이온을 hydroxyapatite($\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$)라고 불리는 인산칼슘염으로 제거하는 방법이다. 화학반응은 다음과 같다.



2.3 외국의 하수의 인제거 사례

우리나라에서는 질소제거 위주의 방류수 수질기준으로 인하여 현재 대부분의 하수처리장이 인과 질소를 동시에 제거하기 위한 방법을 계획하고 있다. 생물학적처리 공법(BNR)을 채택하고 있는데, BNR은 인의 제거 효율이 완벽하지 않아서 방류수의 인의 농도가 처리 후에도 $0.5\text{mgP}/\ell$ 이하로 내려가기가 쉽지 않은 실정이다. 일부 실험실규모의 시설에서는 더 높은 인 제거율을 보이는 예도 있으나 아직 실용화된 시설에서는 화학적 처리에 비해 인 제거율이 낮다.

보다 개선된 호수수질을 얻기 위해서는 인의 제거율이 높은 화학적 처리공법의 도입을 유도하여야 한다. 이를 위하여 우선 하수처리장 방류수의 수질기준을 개선하여 인의 기준농도를 낮추어야 하며, 현재 기획단계에 있는 고도처리의 설비를 더 낮아진 인 기준농도에 적합한 고도처리 설비로 변환하여야 한다. 현재 계획중인 생물학적 인질소 제거 공법은 차후 인 기준 농도가 강화되어 화학적 처리공법이 도입될 때에는 무의미한 시설이 되어 경비를 이중으로 투자하는 낭비가 될 것이다. 따라서 생물학적 인질소제거 공법을 도입하는 현재의 계획을 조속히 중단하고, 계획을 수정하여 차제에 고도처리 공법을 화학적 인제거 공법으로 전환할 것을 검토하여야 한다. 미국과 일본 등에서는 생물학적 처리공정에 화학적 처리공정을 병용하여 인의 제거율을 높이고 있는 사례가 많이 있다(표 3).

표 3. 외국의 화학적 인제거 처리 설비 운용 사례

<p>일본 센다이시</p>	<p>히라세천의 수질을 보전하기 위해 고도처리를 시행하고 있다. 유입하수의 연평균 총인 농도는 5.12mgP/l이며, 처리수 농도는 0.72 mgP/l이다. 처리공정 과정은 2차 처리수에 PAC를 첨가하여 응집침전과 모래여과를 병행하고 있다.</p>
<p>일본 후쿠오카 宗像市</p>	<p>쓰리천의 물을 재이용(상수원인 상류댐으로 회송)하기 위한 기본적인 목적으로 하천 유역에 있는 하수처리장에서는 고도처리를 시행하고 있다. 유입하수의 연평균 총인 농도는 6.0 mgP/l이며, 최종 침전지의 유출수 농도는 0.4 mgP/l 및 급속여과지 유출수 농도는 0.3 mgP/l이다. 고도 처리방식으로는 응집제첨가순환법과 급속모래여과를 병행하고 있다.</p>
<p>미국 Jones Island 하수처리장 (Milwaukee, Wisconsin)</p>	<p>Lake Michigan의 수질보전을 위한 목적으로 유역의 하수처리장 방류수의 월평균 총인 농도를 1 mgP/l로 규제하고 있다. 유입하수의 연평균 총인 농도는 5.0 mgP/l이며, 처리수의 월평균 농도는 0.3~0.8 mgP/l의 범위를 보이고 있다. 고도처리방식은 2차 처리수에 철염을 첨가하여 응집침전을 시행하고 있다. South Shore 하수처리장에서는 처리수의 월평균인 농도가 0.7~1.0 mgP/l의 범위로 다소 높게 나타나고 있다. 고도 처리방식은 1차 처리수에 철염을 첨가하여 응집침전을 시행하고 있다.</p>
<p>미국 Lower Potomac 하수처리장(Fairfac County, Virginia)</p>	<p>Potomac River의 수질보전을 위한 목적으로 유역의 하수처리장 방류수의 월평균 총인 농도를 0.2 mgP/l로 규제하고 있다. 유입하수의 연평균 총인 농도는 7.0 mgP/l이며, 처리수의 월평균 농도는 0.12 mgP/l이다. 고도처리방식은 2차 처리수에 염화제이철을 첨가한 응집제첨가법과 완속모래여과를 병행하고 있다.</p>
<p>미국 Upper Occoquan 하수처리장 (Virginia)</p>	<p>Occoquan 저수지의 수질보전을 위한 목적으로 유역의 하수처리장 방류수의 일주일평균 총인 농도를 0.1 mgP/l로 엄격히 규제하고 있다. 유입하수의 연평균 총인 농도는 9.0 mgP/l이며, 처리수의 중앙값 농도는 0.03 mgP/l이다. 인 제거의 효율은 높지만, 처리의 비용이 많이 소요되는 단점이 있다. 처리방법은 여러 가지 공정이 병행되고 있으며, 고도처리방식은 2차 처리수에 lime과 염화제이철을 첨가한 응집제첨가법과 완속모래여과를 병행하고 있다.</p>

2.3 일본의 고도처리

선진 외국에서는 화학적 인제거 처리가 많이 보급되어 있어 하수의 인을 제거하고 있다. 일본의 경우는 수질오염방지법에서 총질소와 총인을 규제하고 있지만, 지방자치단체에서 자기 지역의 특수성을 고려하여 오히려 훨씬 더 강화된 기준을 적용하고 있는 곳이 많으며, 특히 신설되는 시설의 기준을 강화하고 있다.

예로써 일본 시가현의 경우에는 강화된 인규제 정책을 시행하고 있다. 시가현의 중앙에 위치한 비와湖는 일본에서 가장 큰 호수로 1400만 명의 음용수 및 각종 용수로서 이용되고 있는 중요한 수자원이다. 그러나 1970년대부터 부영양화의 징후가 보임에 따라, 수질보전을 위한 일환으로 1982년 4월부터 유역의 하수처리장에서 질소 및 인 제거를 위한 고도처리를 도입하고 있다 (Hidaka, 1998).

표 4. 일본 비와호 주변에 위치한 각 하수처리장에서의 수질항목별 처리목표 및 처리실태 현황(1998년 평균) (단위 : mg/ℓ). 기준보다 낮은 농도로 인을 처리하여 방류하고 있다.

	관리목표	비와호 남중부처리장		비와호 서부처리장		비와호 동북부처리장	
		유입수	방류수	유입수	방류수	유입수	방류수
COD	10	92	5.8	86.5	6.4	71.8	5.2
TN	10	29.4	6.5	30.2	6.7	28.6	6.9
TP	0.5	3.15	0.05	3.06	0.06	2.91	0.03

비와호 주변의 하수처리장에서 처리효율을 보면 BOD는 검출한계까지 처리되고, 난분해성 유기물을 포함하는 COD도 90%정도의 제거율을 보이고 있으며, 그 외에 부유물질 및 총인은 99% 이상의 제거율을 보이고 있다. 특히 방류수의 인농도가 0.03 - 0.06 mgP/ℓ로서 우리나라의 1-2 mgP/ℓ에 비하여 매우 낮은 것을 볼 수 있다(표 4).

시가현의 현행의 고도처리만으로도 처리수는 양호한 수질을 보이고 있지만, 처리수의 수질이 아직도 COD가 남호의 호수농도보다도 2배, 총질소는 20배, 총인은 수 배정도로 높은 상태이다. 비와호의 수질과 비교하면 처리수의 농도가 높기 때문에 시가현에서는 장래 초고도처리를 계획하고 있으며, 이에 따르면 방류수의 인 농도는 0.02 mg/ℓ로서 비와호의 수질과 비슷한 농도로 처리한 후 배출할 예정이다(표 4).

2.4 호수유역의 방류수 인농도 기준 개선안

현행의 하수처리장 방류수 수질기준의 인농도가 방류수 농도보다 낮으므로, 하수처리장의 인제거율을 높이도록 유도할 수 없으며 하수처리가 호수의 부영양화예방에 기여할 수 없다. 호수의 수질을 결정짓는 요인은 인의 농도이므로 호수 유역에서는 현재의 하수처리계획을 유기물 뿐 아니라 인의 제거에도 효율을 높이는 설비를 추가하여야 한다. 또한 질소보다 인의 제거 효율증대에 더 역점을 주는 공법으로 전환하여야 한다.

질소는 호수부영양화의 제한요인이 아니므로 기준을 강화할 필요가 없으며 다만 암모니아는 동물에 독성이 있으므로 규제를 하는 것이 타당하다. 또한 질소가 부족한 경우에는 질소가스(N_2)를 고정하는 남조류가 증식하여 암모니아를 생성해내므로 질소가 호수 내에서 생성된다. 인의 농도가 높은 부영양호에서 일시적으로 무기질소가 고갈되는 사례가 있으나 이것은 일시적이며, 이들 수역에서는 대부분 영양소외에 빛투과도와 부유토사가 제한요소가 된다.

방류수의 인농도 기준은 호수유역과 호수를 거치지 않고 해양으로 유출되는 경우로 나누어 달리 설정하는 것이 좋다. 해양에서는 상대적으로 인의 부영양화 유발 효과가 작으므로 호수의 수질보전에 비중을 두어 인의 제거에 주력하여야 한다. 즉, 방류수의 수질기준을 방류수를 수용하는 수체의 생태학적 특성에 맞추어 설정하는 것이 합리적이고 경제적이다.

현재의 방류수 수질기준의 N/P 비는 하수중의 농도비와 유사하게 규정되어 있어 생물학적처리의 결과에 맞추어 배출수 농도기준을 정한 것으로 보인다. 호수의 수질을 개선하기 위하여 필요한 수준으로서 농도를 규정한 것이 아니라, 현재 적용하는 생물학적 처리공법에서 배출되는 방류수의 수질을 대상으로 적용한 것으로서, 생물학적 처리 방법을 이용 가능한 기술로서 적용한 결과로부터 근거하여 규정하였다고 볼 수 있다.

그러나 조류성장 억제라는 목표를 위해서는 생물학적 처리효율에 근거하지 말고 화학적 인 제거에 근거를 둔 기준농도를 제정하여야 한다. 질소의 규제는 더 강화하지 말고 인의 제거를 더 강화하는 방향으로 전환하여야 한다. 2003년도부터 적용 예정인 방류수 수질 기준 가운데 질소와 인은 시행하지 않는 것이 낭비를 막는 길이다. 인의 기준농도를 생물학적처리가 아닌 화학적 처리의 가용기술을 근거로 하여 강화된 인 농도기준을 제정하여야 한다.

인의 수질기준 강화에 대비하여 인과 질소를 동시에 제거하는 생물학적 처리(BNR) 공법의 설비계획을 중단하고, 인의 제거율이 높은 화학적 처리공법을 검토한 후에 장기적인 계획에 의거하여 설비투자를 하여야 중복 설비투자의 낭비를 막을 수 있을 것이다. 이 총인 기준농도와 비교하면 우리나라의 하수처리장 방류수의 인기준 농도인 $6\text{mg}/\ell$ (팔당특별대책지역에서는 $2\text{mg}/\ell$)는 일본 시가현의 초고도처리에 비해 100-300배의 높은 농도이다.

인제거율 제고를 위하여 방류수 수질기준을 개정하여 대형댐의 상류유역에서는 인의 방류수 수질기준농도를 현재의 $2\text{mg}/\ell$ 에서 $0.1\text{mg}/\ell$ 이하로 강화하여야 한다. 이 농도는 선진국의 하수처리 실태로 볼 때 큰 비용추가 없이 가능할 것으로 보인다.

3. 도시하수 월류수 처리대책

도시하수처리장이 설치되어 하수를 처리하기는 하지만 우리나라의 많은 하수차집시설은 합류식으로 만들어져 있기 때문에 강우시 유량이 증가한다. 하수처리장 용량 이상으로 유출되는 물은 처리할 수 없으므로 그대로 방류하고 있는 실정이다. 또한 분류식 하수관거에서는 우수는 오염되지 않은 물로 간주하고 처리하지 않는데, 실제로는 강우초기의 지표유출수의 오염도가 매우 높으므로 처리 후에 방류하여야 한다. 강우초기에 유속이 증가하면서 발생하는 월류수는 하상에 침적되어 있던 유기물을 재부유시키면서 유출되므로 오염도가 갈수기의 오염도보다 높아지는 first flush 현상이 발생한다.

이 때 유출되는 도시지표 유출수의 오염도는 생활하수보다 높아지기도 한다. 경안천의 한 지점에서 측정한 월류 초기의 인농도는 2 mg/l를 초과하여 생활하수와 같은 오염도를 보이고 있다(그림 1).

그러나 생물학적 하수처리장의 시설은 처리할 수 있는 유량이 한정되어 있으므로 강우시에 발생하는 하수량은 일부만 처리하고 나머지 월류수는 그대로 방류하고 있는 실정이다. 강우시 하수월류수 (combined sewer overflow, CSO)는 강우시에만 간헐적으로 대량발생하므로 기존

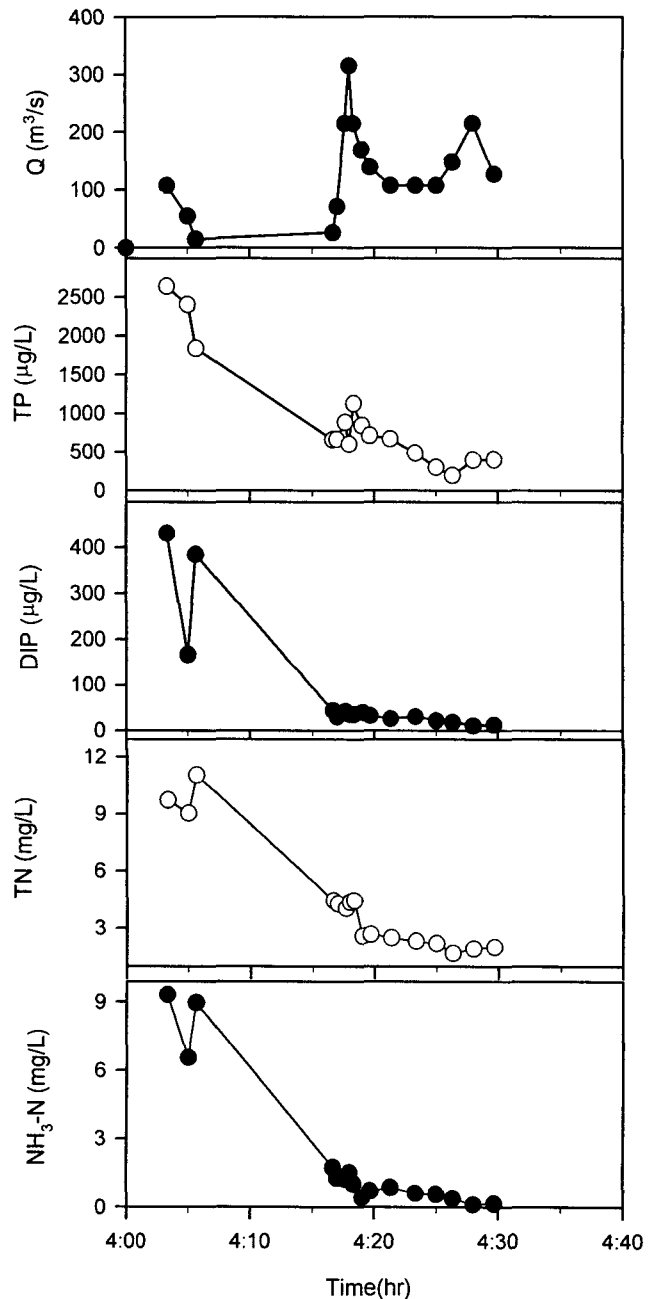


그림 1. 강우시 경안천으로 유입되는 하수관거월류수의 유량, 총인(TP), 용존무기인(DIP), 총질소(TN), 암모니아성질소(NH₃-N)의 시간별 변화(2003년 7월 22일). 월류초기에 높은 인농도를 보이고 있다

의 continuous flow 방식의 생물학적처리장치로는 처리할 수가 없다. 따라서 일시적으로 가동하고 정지할 수 있는 장치가 필요하다(Field et. al, 1993).

가장 비용이 적게 드는 방법은 기존의 하수관거를 이용하여 하수를 최대한 하수처리장으로 유입시키고 고속응집침전방법에 의해 처리하는 것이다. 화학적 응집침전처리장치는 생물학적 처리와는 달리 비강우시에는 가동하지 않고 필요시에만 가동할 수 있으며 처리시간이 짧아 적은 부지에서 많은 양의 하수를 처리할 수 있다. 또는 저류지를 만들 부지가 있는 곳에서는 강우시 하수처리용량을 초과하는 유입수를 저류하였다가 이후 생물학적, 또는 화학적 처리에 의해 처리한 후 방류하는 것이다. 하수처리장으로 초기강우를 유입시킬 수 없을 때에는 하천 현장에 원심분리식 처리장치를 설치하여 처리하는 방법을 사용하여야 한다.

4. 강우 집중에 따른 비점오염 유출

한국에서는 유량에 따른 수질의 변동 폭이 크다는 점도 수질관리에 어려움을 주고 있다(그림 2). 하천의 유속이 증가하면 입자상 물질의 이동이 증가하기 때문에 토양에 흡착되어 있던 입자상오염물이 유출되면서 농도가 증가한다. 토양에 잘 흡착하는 인이 대표적인 사례이다. 소양강의 예를 보면 강우시에 부유물질이 많이 발생하면서(그림 3)토사에 흡착된 인이 함께 유출되고 있다. 소양강의 인의 농도가 갈수기에 30 mg/m^3 인데 비하여 강우시에는 $1,000 \text{ mg/m}^3$ 에 이르기까지 크게 변동한다(그림 4).

그 결과 대형댐에서는 여름 우기가 지나면 중층에 다량의 탁수대가 형성되기도 한다. 소양호의 예를 보면 표수층에서는 강우후에도 맑은 상태를 유지하지만 중층에는 부유물질과 인의 함량이 높은 탁수대가 형성된다(그림 4). 이 탁수는 방류구를 통하여 수 개월에 걸쳐 서서히 하류로 배출되는데 이로 인하여 탁수의 장기화와 부영양화가 발생하고 있다.

한국의 강우 집중으로 인하여 비점오염 유출이 여름 폭우시에 집중되고 있으며 수량이 크기 때문에 유출수를 모아서 처리하는 외국의 방법들은 적용할 수가 없다. 소양호의 예를 보면 보면 폭우시 유입수량이 하루에 1억톤을 초과한다. 이 가운데 오염도가 높은 시간동안만 모은다고 해도 천만톤 규모의 저류지가 필요하다. 그러므로 이를 모으기는 불가능하며 처리하는 것도 불가능하다. 강우 집중도가 낮은 국가에서는 비점오염원의 유출수를 저류지를 만들거나 인공습지를 만들어 처리하고 있지만 우리 나라의 대형댐에서는 사실상 적용할 수 없는 방법이다. 따라서 비점오염 유출수를 처리하는 것보다는 발생장소에서 근원적으로 발생을 저감하는 방법을 사용하여야 한다.

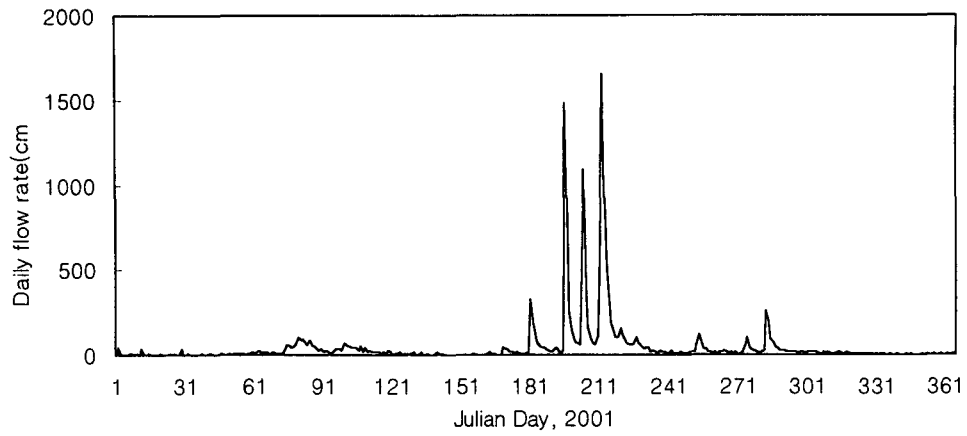


그림 2. 소양호의 일평균 유입수량의 급격한 계절변동(자료: 수자원공사)

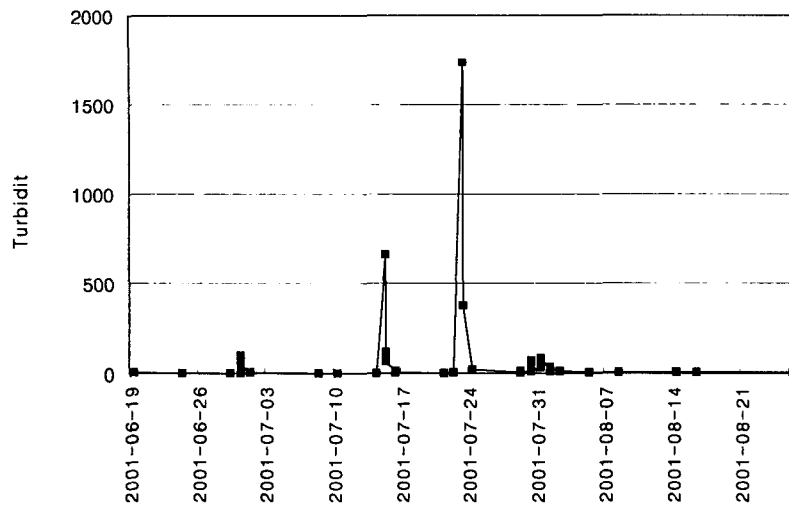


그림 3. 소양강의 탁도 변화. 강우시에 매우 심한 탁수현상을 보이고 있다(김범철 등, 2003)

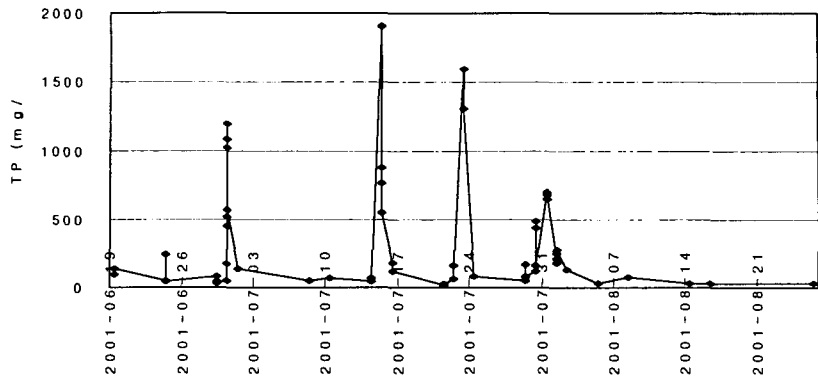


그림 4. 소양댐 유입수(소양강)의 총 인 농도의 계절변동. 강우시에 총 인의 농도가 수십 배 증가하여 생활하수에 버금하는 정도로 높아진다.

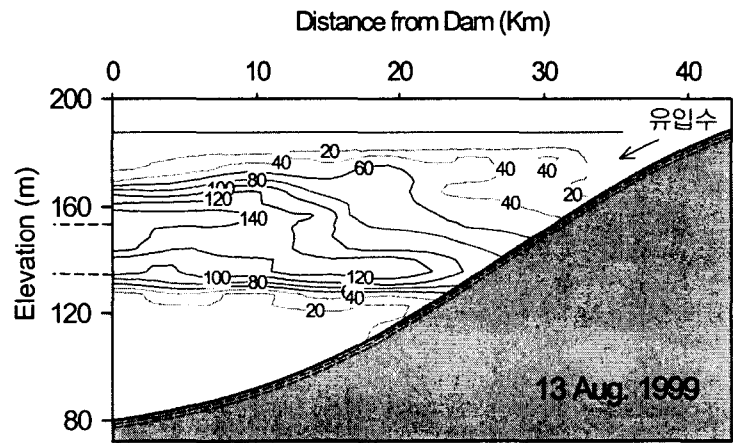


그림 5. 소양호에서 홍수 후 탁도의 수직수평 분포. 표수층을 제외하고 저수량의 대부분이 탁수임을 보여주고 있다.

5. 급경사 농경지의 비료와 토양 침식 문제

(1) 토사유출과 인의 유출

인은 일반적으로 토양입자의 표면에 잘 흡착되는 성질을 가지고 있다. 따라서 토양유출이 없으면 농경지로부터의 인의 유출은 많지 않다. 그러나 장기간 지속된 비료 투여로 인하여 농경지의 표토는 인을 많이 함유하고 있으며 토사의 유출은 이에 흡착된 인을 함께 유출하는 결과를 가져

온다. 토양표면에 흡착된 인은 수중 용존무기인과 평형을 이루게 되는데 토양중에서는 토양간극 수중의 인농도가 높으므로 토양에 흡착되지만 반대로 호수에서는 수중의 인농도가 낮으므로 토양에서 수중으로 인을 용출시킨다.

$$(\text{토양}) - (\text{흡착된 인}) \leftrightarrow (\text{토양}) + (\text{용존무기인})$$

그러므로 농경지역의 토사유출은 곧 인의 유출을 의미하여 탁수가 유출될 때는 인의 농도가 높아진다(그림 4, 6).

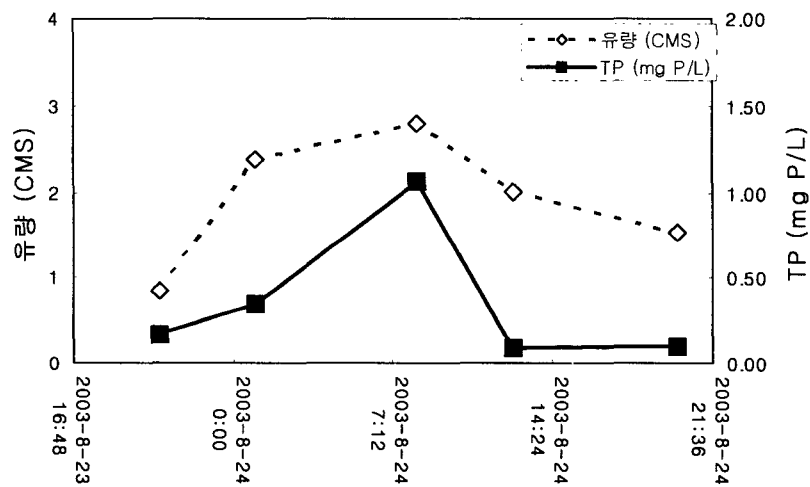


그림 6. 소양댐 유역의 농경지역(양구군 해안면) 유출 하천수의 인 농도. 강우시 인농도가 크게 증가하여 도시하수의 1/2에 달한다.

농경지역의 비점오염의 특징은 도시 생활하수보다는 오염도가 낮으나 다량이 배출된다는 점이다. 강의 하류지역에서는 강우시에 배출되어 즉시 바다로 흘러가지만 댐의 상류에서는 호수에 저류되어 부영양화를 일으킨다. 특히 북한강에는 많은 댐이 건설되어 있어 강우시 유출수가 저류되므로 비점오염유출이 한강 하류의 수질에 장시간 영향을 줄 수 있는 조건을 가지고 있다. 홍수기의 탁류가 저류되었다가 장기간 서서히 방출되므로 댐이 없는 경우에 비해 탁수가 장기화된다.

(2) 토사유출로 인한 수생태계 파괴

농경지역의 비점오염원 유출수는 인농도가 높을 뿐 아니라 암모니아와 부유토사의 농도도 높다. 하천수중의 부유토사는 수질을 악화시킬 뿐 아니라 하천생물상을 파괴하고 물고기가 없어지는 주요 원인이다. 하천 생태계의 먹이연쇄는

(부착조류, 낙엽) → (저생 동물) → (어류)

로 연결되는 구조를 가지고 있다. 그러나 부유물질은 하천에서 저생동물의 먹이가 되는 돌표면의 부착조류를 깎아내고, 유속이 느린 곳에서는 돌표면을 덮어 빛을 차단하여 광합성을 저해하여 부착조류를 죽게 하는 등, periphyton의 성장을 저해한다. 부착생물이 줄어들면 이를 먹고사는 저생동물이 줄어들게 된다.

또한 토사가 쌓여 돌틈을 메우면 돌틈에 사는 저생동물의 서식처가 사라진다. 하천의 어류는 대개 잔자갈 사이나 돌틈에 알을 낳는다. 그러나 흙탕물과 토사가 흘러들어 자갈사이를 메우면 산란장이 없어지고, 돌틈에 물이 흐르지 못하여 산소부족으로 알이 부화하지 못한다. 즉, 흙탕물이 발생하면 물고기의 산란장이 줄어들어 드는 것이다.

어류를 비롯한 수중동물 가운데에는 먹이섭취를 시각에 의존하는 동물들이 있다. 쏘가리와 같은 포식성 어류는 시각에 의존하는 것으로 보고되고 있는데 탁도의 증가는 이들 어류의 포식을 저해하여 감소하는 원인이 된다.

호수에서는 부유토사가 햇빛 투과를 차단하여 수초의 광합성을 저해하여 수초가 감소하고 대신 식물플랑크톤이 증가하는 원인이 된다. 일반적으로 빛투과량의 10% 이상 감소하면 생태계에 악영향을 미치는 것으로 평가된다. 수초대신 식물플랑크톤이 증가하는 것은 수질을 악화시키므로 바람직하지 않은 변화이다.

(3) 급경사 농경지의 삼림환원 필요

급경사 농경지에서는 비료와 토사의 유출이 평지에 비하여 매우 크다. 경사도가 10% 이면 토양유실이 10배 이상으로 증가한다(Novotny and Olem, 1994). 한강의 상류 지역은 산악지형임에도 불구하고 근래 채소재배가 크게 활성화되었다. 그 결과 경사도가 큰 밭이 많이 있으며 이로 인하여 토사 유출이 매우 심각한 상태이다. 강원도 평창군, 홍천군 내면, 양구군 해안면, 등이 특히 토사와 인의 유출이 심한 지역이다.

이러한 급경사의 밭에서는 토사와 함께 비료와 퇴비가 유출되므로 토질의 향상을 위해 매년 많은 양의 비료와 퇴비를 사용하고 있으며(그림 7) 객토에 의해 새로운 토양을 덮어 준다. 그러므로 평지의 밭에 비해 인과 부유토사의 유출이 월등히 크다.

근원적으로 호수의 수질을 보호하기 위해서는 급경사의 밭은 삼림으로 환원하는 것이 경제적이다. 급경사 밭의 매입, 휴경직불제, 급경사지에 대한 보조금 중단, 등의 경제적 인센티브와 규

제를 강구하여 급경사지의 삼림환원을 유도하여야 한다.



그림 7. 남한강 상류의 급경사 채소밭에 많은 퇴비를 시비하는 모습.

경사가 클수록 비료 유출이 많아서 더 많은 퇴비와 비료를 사용한다.

(4) 상류지천의 수변식생대 복원 필요

농경지의 하천이나 밭사이의 배수로는 토사침식이 많이 발생하고 있는 곳이다(그림 8). 많은 지역에서 농배수로의 침식이 많이 일어나 gully가 발생하고, 경작지 표면에서 유실되는 토사보다도 오히려 bank erosion에 의해 침식되는 양이 더 많다. 이를 막기 위하여 농경지의 하천이나 배수로를 침식이 적은 형태로 자연을 복원하여야 한다. 그 방안으로서 하천변의 일정구역을 경작하지 말고 침식이 적은 하상을 만들어 주고, 식생을 복원하는 것이다.

현재 수변구역은 서울 인근의 한강하류를 대상으로 적용하고 있다. 그러나 실제로 비점오염 유출이 많이 발생하는 곳은 상류의 하천변의 침식이다. 따라서 수변구역의 개념을 상류하천으로 확대하여 원천적으로 토사와 비료의 침식이 발생하는 곳에서부터 저감하는 것이 가장 효율적인 것이다. 상류 지천의 하천부지를 최대한 확보하여 통수단면을 넓히고, 양안의 일정부분을 수변구역으로 지정하여 토양침식을 억제하는 것이 토사와 인의 유출을 저감하는 절실히 필요한 대책이다.

하천의 양안을 따라 일정거리의 넓이를 가진 식생여과대를 완충지대로 사용하는 방법이 외국에서 많이 이용되는 방법이다. 완충초지(buffer strip), 인공습지와 같은 일종의 완충지대를 설치하여 지표유출수의 오염물질을 침전, 여과, 흡착하고 유입수를 일시 저지하여 지하침투를 촉진하는 기능을 갖게 하는 것이다. 선진 외국의 경우 최적관리기술(BMP)로서 완충지대 식생의 자연정화능력을 이용한 처리는 그 효과가 큰 것으로 보고되고 있다. 그러나 우리나라에서는 강우의 집중도가 너무 커서 일시에 많은 유출수가 발생하므로 식생대에 머무르는 시간이 짧고 처리효율

이 낮을 것으로 보인다. 그렇지만 식생대가 오염물을 정화하는 효과는 없을지라도 하천변의 침식은 막을 수 있으므로 우리나라에서도 적극 도입해야 할 방안이다.



그림 8. 남한강 상류의 농수로 토양침식 사례.
밭두렁이 없이 수로변에서 침식이 발생하고 있다.

하천의 식생복원에서 우선적으로 해결해야 할 문제점은 하천이 국유지임에도 불구하고 하천부지를 도로를 확장하는데 사용하거나 농지를 확장하기 위해 점유한 곳이 많다는 것이다. 하천을 점유하여 하천을 좁게 만들면 유속이 증가하고 하천변의 침식이 더욱 증가하게 된다. 그러므로 하천의 폭을 넓히고 침식되지 않는 하천을 복원하기 위해서 이들 토지에 대해 측량작업이 이루어져야 하며 불법적인 국유지하천부지 점유에 대해 강한 규제 조치를 시행하여야 한다. 최상류의 농배수로의 폭을 넓히고 하천변의 침식을 막는 것이 토사유출을 막는 데에 가장 중요한 선결과제이다.

하천의 수변식생복원에서 또 다른 하나의 문제점은 많은 상류의 지천들 가운데에는 국유지인 하천부지가 없고, 하천부지 자체가 사유지인 곳이 있다는 점이다. 특히 농경지의 구거는 사유지인 경우가 많으므로 지주가 임의로 유로를 변경하거나 하폭을 줄이는 사례가 흔히 있다. 그러므로 수변구역의 복원을 위해서는 우선 적절한 위치에 배수로를 만들고 하폭을 설정한 후 해당구역의 토지를 매입하여야 한다. 매입이 불가능한 곳에서는 직불제를 적용하여 하천을 복원할 수 있다. 이에 필요한 재원은 각 종 농업보조금을 전환하여 친환경농업 지원의 형태로 충당할 수 있으며, 또한 각 종 수질개선사업의 일환으로도 지원하여야 한다.

침사지의 문제점

침사지는 유수의 유속을 완화시켜 부유유사가 침전하도록 만드는 시설이다. 일차적인 토양유실 방지 시설과는 달리 유사배출 억제시설은 토양유실을 차단하는 시설이 아니기 때문에 토양침식 방지조치에 대한 보조조치로 사용되어야 한다.

일차적인 침식방지조치를 통해서 근원적으로 토양이 이동하지 않도록 하는 것이 침사지를 이용하여 토사를 차단하는 것보다 훨씬 경제적이고 효과적이다. 일차적인 방제조치를 소홀히 하고 침사지를 만드는 경우에는 침사지가 곧 바로 토사로 메워지기 때문에 자주 준설해야하는 문제점이 있다.

실제로 우리나라에 설치된 많은 침사지와 침사보가 단 하루의 비에도 토사로 메워지는 실정이라므로 실질적으로 토사유출 억제 효과의 효과를 가지지 못하고 있는 상태이다(그림 8). 따라서 침사지는 일차적인 토양보호 조치를 시행한 후에 설치하여야 하며, 강우 후에는 즉시 쌓인 토사를 제거하여야만 효과가 있다. 또한 침사지는 최상류의 농경지 바로 아래에 설치하여야 효과를 기대할 수 있으며 유량과 토사의 양이 많이 모이는 중하류지점에서는 곧바로 메워지기 때문에 매 강우 때마다 준설하지 않으면 아무런 효과가 없다. 일차적인 방제조치를 하더라도 토양유실이 완전히 차단되지 않는 경우에 추가적인 이차 조치로서만 고려할 대책이다.



그림 9. 준설한 후 수 일만에 모래로 채워진 침사보의 사례

6. 결론

- 1) 대형호수유역에서는 하수의 인제거가 필요하다.
- 2) 생활하수처리 방류수의 인농도 기준이 높아서 호수수질개선에 기여하지 못한다. 대형담 유역에서는 방류수의 인농도 기준을 현행 2-6 mg/l에서 0.1 mg/l로 낮추어야 한다.
- 3) 도시지표 유출수와 강우시 월류수의 오염도가 높으므로 처리가 필요하다.
- 4) 강우집중으로 인하여 댐이 많이 건설되어 있으므로 강우시 비점오염원의 유출수가 댐에 저류되어 수질에 큰 영향을 미친다. 따라서 대형담의 상류지역에서는 점오염원보다 부하량이 더 큰 비점오염원이 더 중요하다.
- 5) 농경지의 비료와 퇴비는 인과 유기물의 주요 근원이며 호수수질악화의 주원인이다.
- 6) 급경사 채소밭은 많은 토사와 비료, 퇴비를 유출시키므로 호수 혼탁화와 부영양화의 주원인이다. 근본적 해결을 위하여 삼림으로 복원하여야 한다.
- 7) 경작지의 농수로 침식이 심하므로 하천의 침식을 저감하는 하천복원이 필요하다. 국유지 하천 부지의 무단점유를 시정하여 하폭을 넓히고 식생을 복원하여야 하며, 사유지내 농수로도 침식 방지 조치가 이루어지도록 유도하여야 한다.

7. 참고문헌

- 김범철, 전만식, 최중수. (2003). 상수원 비점오염원 관리. 2003년 세계 물의 해 기념. 지속가능한 물이용을 위한 심포지엄 발표논문집. 유네스코 한국위원회 주최
- Field, R., M. O'Shea, and K. K. Chin. (1993) Integrated stormwater management. Lewis Publishers.
- Hitaka, M. (1998). 시가현의 “초고도처리”계획..하수도 협회지 35:25~30
- Novotny, V., and H. Olem. (1994) Water quality. Prevention, identification, and management of diffuse pollution. Van Nostrand Reinhold. New York.
- Ritter, W. F., and A. Shirmohammad. ed. (2001) Agricultural nonpoint source pollution. Lewis Publishers.

Problems of lake water quality management in Korea

Bomchul Kim, Mansig Jun, Yoon-Hee Kim

(Kangwon National University, Korea)

Summary

In Korea most of annual rainfall is concentrated in several episodic heavy rains during the season of summer monsoon and typhoon. Because of uneven rainfall distribution many dams have been constructed in order to secure water supply in dry seasons. The Han River system has the most dams among Korean rivers, and the river is a series of dams now.

Reservoirs need different strategy of water quality control from river water. Autochthonous organic matter and phosphorus should be the major target to be controlled in lakes. In this paper some problems are discussed that makes efforts of water quality improvement ineffective in lakes of Korea, even after the substantial investment to wastewater treatment facilities.

1) Phosphorus is the key factor controlling eutrophication of lakes and the reduction of phosphorus should be the major target of water treatment. However, water quality management strategy in Korea is still stream-oriented, and focused on BOD removal from sewage. Phosphorus removal efficiency remains as low as 10-30%, because biological treatment is adopted for both secondary treatment and advanced treatment. The standard for TP concentration of the sewage treatment plant effluent is 6 mgP/l in most of regions, and 2 mg/l in enforced region near metropolitan water intake point. TP in the effluents of sewage treatment plants are usually 1-2 mg/l, and most of plants meet the effluent regulation without a further phosphorus removal process. The generous TP standard for effluents discourages further efforts to improve phosphorus removal efficiency of sewage treatment. Considering that TP standard for the effluent is below 0.1 mg/l in some countries, it should be amended to below 0.1 mg/l in Korea, especially in the watershed of large lakes.

2) Urban runoff and combined sewer overflow are not treated, even though their total loading into lakes can be comparable to municipal sewage discharges on dry days. Chemical coagulation and rapid settling might be the solution to urban runoff in regard of intermittent operation on only rainy days.

3) Aggregated precipitation in Korea that is concentrated on several episodic heavy rains per year causes a large amount of nonpoint source pollution loading into lakes. It makes the treatment of nonpoint source discharge by methods of other countries of even rain pattern, such as retention pond or artificial wetland, impractical in Korea.

4) The application rate of fertilizers in Korea is ten times as high as the average of OECD countries. The total manure discharge from animal farming is thought to be over the capacity of soil treatment in Korea. Even though large portion of manure is composted for organic fertilizer, a lot of nutrients and organic matter emanates from organic compost. The reduction of application rate and discharge rate of phosphorus from agricultural fields should be encouraged by incentives and regulations.

5) There is a lot of vegetable fields with high slopes in the upstream region of the Han River. Soil erosion is severe due to high slopes, and fertilizer is discharged in the form of adsorbed phosphorus on clay surface. The reduction of soil erosion in the upland area should be the major preventive policy for eutrophication. Uplands of high slope must be recovered to forest, and eroded gullies should be reformed into grass-buffered natural streams which are wider and resistant to bank erosion.