

1. 서 론

수자원은 이제 중요한 자연자원으로 간주되고 있다. 자원고갈의 원인은 석탄이나 석유와 같이 사용하여서 없어지는 경우, 압축게스가 사용시 대기와 희석되어 재사용할 수 없는 경우, 그리고 오염에 의하여 사용할 수 없는 경우 등으로 크게 구분할 수 있다. 지구상에 존재하는 수자원은 거대한 수문순환의 일부로 사용에 의하여 그 절대량이 줄어들지는 않는다. 그러나 절대량은 줄지 않아도 오염에 의하여 사용할 수 있는 양이 줄어들기 때문에 오염방지를 위한 적극적인 연구와 합리적인 조치가 취해지지 않는다면 가까운 장래에 심각한 수자원의 부족사태를 초래할 수 있다. 앞으로 10년후인 2006년의 우리나라 용수의 수요와 공급계획상에는 공급이 355억톤, 수요가 349억톤으로 이수안전도는 약 1.7% 정도이나 적절한 이수안전도가 7~10%인 점을 감안하면 국지적으로 심각한 용수공급 부족사태가 나타날 수 있음을 예측하고 있다 (윤서성, 1995). 이상의 용수공급은 水量으로 계산된 공급물량이고 水質을 고려한다면 용수공급은 더욱 어려울 것이다. 따라서 수자원의 효율적인 이용과 보전을 위해서는 현재까지의 수량관리 중심에서 수질관리가 함께 병행되는 수자원 정책이 개발되고 수행되어야 한다.

수량과 수질의 효율적인 관리를 위해서는 점오염원의 규제와 비점오염원의 효율적인 관리가 필요하다. 점오염원은 법적인 규제에 비교적 용이하게 규제할 수 있어 환경선진국에서는 이미 성공적으로 규제가 이루어지고 있어 점오염원에 의한 수자원의 오염은 감소되고 있다. 반면에 비점오염원이 수자원오염에 기여하는 비율은 상대적으로 높아져 현재는 미국의 하천과 호수의 최대 오염물질 공급원으로 자리를 잡았다 (Griffin Jr., 1991). 비점오염원의 효율적인 관리를 위해서는 토지이용에 따른 유출 및 오염배출특성을 기술할 수 있어야 한다.

우리나라의 하천에는 댐이나 보 등이 건설되어 유로가 차단되고 많은 인공호수가 생겼다. 양적인 면에서 호수의 생성은 수자원의 공급에 지대한 공헌을 하여 경제적이고 효율적으로 물부족 문제를 해결할 수 있다. 그러나 유역에서 발생하는 오염물질이 유수와 함께 하류로 배출되지 못하고 호수에 정체하게 되어 수질이 악화되는 결과를 초래한다. 양적인 이용면에만 치우쳐 온 수자원 정책으로 수질을 관리하기 위한 유역의 관리와 오염배출규제는 거의 이루어지지 않았다. 따라서 우리나라의 거의 모든 인공호수는 빠른 속도로 오염정도가 심화되고 있다. 댐의 건설로 내륙에 형성된 호수나 방조제의 건설로 해안가에 형성된 호수 모두가 심각한 부영양화 등의 수질 악화가 이루어져 악화된 수질을 회복시키기 위한 연구가 우리나라에서도 수행되었다. 연구의 결과는 하나같이 호수자체의 처리로는 수질을 회복할 수 없고 유역의 관리가 함께 수행되어 오염물질의 유입을 효율적으로 차단하여야 호수의 수질을 개선하려는 소기의 목적을 달성할 수 있다고 결론짓고 있다 (배정옥 등, 1994; Cooke and Kennedy, 1981; 김상종 등, 1994, 권순국 등, 1987, 1989). 반면에 유역의 관리와 수질에 관한 연구는 우리나라에서 찾아보기 힘들다.

우리나라 최대의 인공호수인 소양호는 1974년 담수를 시작한 이래 유역으로 부터 지속적인 영양물질의 유입 등으로 인하여 부영양화가 진행되어 수질은 이미 2급수로 전락하였다 (허인량 등, 1993). 부영양화가 진행되면서 발생하는 수종의 남조류들은 인체에 치명적인 아나톡신이나 마이크로시스틴과 같은 독성물질은 생산하는 것으로 입증되어 (Ryuichi et al., 1995) 부영양

1. 강원대학교 농공학과 교수
2. 강원대학교 환경학과 교수

화에 대한 시민의 우려는 점증되고 있다. 유역에서 유입되는 여러가지 유기물과 무기염류 중에 총질소(TN) 및 총인(TP)의 농도가 조류의 번식에 가장 관련이 높다. 총질소와 총인의 중요성 때문에 정부에서도 이들을 호소수의 수질환경기준에 추가하였다. 상수원수 1급수를 유지하기 위하여는 TP와 TN 농도가 각각 0.01 mg/l와 0.2 mg/l 보다 작아야 된다고 환경정책기본법 시행령 제2조에 규정하고 있으며 대도시 광역상수원으로 사용되는 팔당호와 대청호의 경우는 호소수질 특별대책 지역으로 지정되어 1996년까지 호수의 총질소와 총인의 농도를 0.3 mg/l와 0.02 mg/l 이하로 유지하는 계획을 설정하고 있다 (이상은, 1995). 따라서 유역으로부터 유입되는 질소와 인의 유입특성을 분석하는 연구는 효율적인 유역관리를 위한 가장 기본이 되는 자료이며 환경부에서 추진하는 BOD 위주의 수질관리 정책에서 인과 질소의 감축을 위주로 하는 수질정책으로 전환(선우영준, 1995)하는데 가장 필수적인 자료이다. 본 연구의 목적은 소양호의 유역특성과 유입수의 총인과 총질소의 월별 유입특성을 분석하는데 있다. 본 연구결과는 소양호 및 우리나라 인공호수 유역의 효율적인 관리를 위하여 이용될 수 있다.

2. 연구방법

소양호 유역의 인구, 산업 및 토지이용 조사는 한국수자원공사 소양강댐 관리사무소에서 발행하는 소양강다목적댐 관리연보와 해당지역의 군 통계연보를 이용하여 1990년부터 1993년까지 4년 동안 변동상황을 조사하였다. 소양호 상류유역으로부터의 유입량은 소양강댐 관리사무소에서 작성된 일간 유량자료를 이용하였다. 소양호 유역의 유출특성은 인북천 수계의 원통수위표지점과 내린천 수계의 고사리수위표지점에서 측정되었다. 소양호 상류 인제읍 부근의 소양강 수질자료는 기존에 발표된 자료를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 유역의 특성

소양호의 유역면적은 2,703 km²로서 한강 유역면적의 10.3%에 해당하며 강원도의 5개 시군에 걸쳐있다. 유역의 강수량은 2,018 mm에서 775 mm까지 변화가 크며 연평균 강수량은 1,151 mm이다. 소양호는 만수면적 약 70 km², 계획홍수위 198 m, 총저수용량 29억톤 그리고 홍수조절용량 5억톤에 달하는 우리나라 최대의 인공호수이다. 소양호 유역은 소양호안에 인접한 직할유역과 소양강을 통해 유입하는 간접유역으로 구분할 수 있다. 직할유역의 면적은 506.6 km²이며 간접유역은 2,196.4 km²로 다시 인북천 (597.4 km²), 북천(358.1 km²), 내린천(1,081.7 km²) 및 인제읍 유역(159.2 km²)으로 구분하였다.

소양호 유역의 인구는 1990년도에 50,427명에서 1993년도에는 44,936명으로 매년 감소하고 있다. 반면에 거의 전지역이 소양호 상류유역인 인제군을 찾은 관광객은 해마다 증가하여 1994년에는 설악산국립공원 내설악 지역의 37만명을 비롯하여 70만명을 넘고 있다. 유역의 토지이용은 과거 4년 동안 변화가 거의 없었으며 1993년도 기준으로 밭 4.1%, 논 1.1%, 임야 88.9%, 목장 0.1%, 대지 0.2% 그리고 기타 5.6%였다. 임야가 유역의 대부분을 차지하는 산악지대이며 목장을 포함하는 경작지가 5.3%에 불과한 반면 도로 및 군사시설 등을 포함하는 기타 토지이용이 5.6%로 임야 다음의 넓은 면적을 점유하고 있어 오염물의 배출에 중요한 역할을 하는 것으로 생각된다. 소양호 유역의 폐수배출업소는 거의 중소규모의 운수, 세차, 식품 및 관공업 등으로 1993년도의 고용인원은 300명이 채안되며 폐수배출량은 137 m³/day였다. 소양호의 가두리 양식장을 제외한 소양호 유역에서 가장 큰 오염부하량은 축산업에서 발생하고 있다. 소양호 유역의 1993년도 가축사육현황은 Table 1에 나타냈다. 1990년과 1993년의 통계치를 보면 소는 8,719 마리에서 8,167 마리로 그리고 돼지는 4,451 마리에서 2,885 마리로 각각 6.3%와 35.2%가 감소하였다. 반면 가금류는 98,210 마리(1990년)에서 122,803 마리(1993년)로 약간의 증가현상을 보였으며 사슴, 염소,

3-2. 총인과 총질소의 유입특성

Table 2는 소양호 상류로 유입하는 총인과 총질소의 농도 및 연간부하량을 보여주고 있다. 총질소의 농도는 1.218~4.138 mg/l의 범위를 보여주고 있다. 총질소의 호소수질 1급수 수질기준이 0.2 mg/l이므로 최소 6배에서 20배까지 높다. 총인의 농도는 0.020~0.193 mg/l 범위로 호소수 1급수 수질기준인 0.01 mg/l 보다 최소 2배에서 19배 까지 높다. 소양호로 유입되는 총질소의 월부하량은 88.9~846.2 ton/mon이며 총인의 월부하량은 1.0~31.2 ton/mon으로 변화가 심하다. 소양호 상류유역은 공업화가 전혀 되어있지 않고 1993년 기준 인구밀도는 16.6명/km²으로 우리나라에서 가장 낮기 때문에 소양호로 유입되는 오염물질은 비점오염원으로 부터 주로 발생하고 있다. 비점오염물질은 강우와 토지이용과 가장 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 소양호로 유입되

Table 2. Monthly inflow, TP and TN concentrations and loadings to the Lake Soyang from the upper watershed at the Sagumi bridge

Month	Year	Flow rate (m ³ /sec)	TP (mg/l)	TN (mg/l)	TP loading (ton/mon)	TN loading (ton/mon)
1	1993	56.9	0.023	1.606	3.5	244.8
2	1993	75.3	0.038	1.724	6.9	314.1
3	1992	59.7	0.193	1.472	30.9	235.4
	1993	66.1	0.033	1.865	5.8	330.2
	Average	62.9			18.4	282.8
4	1992	80.7	0.078	1.406	16.3	294.1
	1993	68.0	0.034	1.218	6.0	214.7
	Average	74.4			11.2	254.4
5	1992	76.5	0.036	1.248	7.4	255.7
	1993	60.3	0.031	2.120	5.0	342.4
	Average	68.4			6.2	299.1
6	1992	82.1	0.029	1.393	6.2	296.4
	1993	160.9	0.039	2.029	16.3	846.2
	1994	20.0	0.020	1.714	1.0	88.9
	Average	87.7			7.8	410.5
7	1992	72.3	0.046	1.103	8.9	213.6
	1993	82.2	0.043	1.390	9.5	306.0
	1994	113.0	0.054	2.088	16.3	632.0
	Average	89.2			11.6	383.9
8	1992	23.7	0.024	1.460	1.5	92.7
	1993	86.8	0.067	1.930	15.6	448.7
	1994	61.0	0.123	2.299	20.1	375.6
	Average	57.2			12.4	305.7
9	1992	25.5	0.062	4.138	4.1	273.5
	1993	68.3	0.176	1.680	31.2	297.4
	Average	46.9			17.6	285.5
10	1992	46.2	0.030	1.809	3.7	223.8
	1993	60.3	0.031	1.745	5.0	281.8
	Average	53.3			4.4	252.8
11	1992	62.3	0.026	2.004	4.2	323.6
12	1992	97.0	0.016	2.010	4.2	522.2
Annual load (ton/year)					108.4	3,879.4

Table 1. Farm animal statistics in the Lake Soyang watershed

Watershed	Total	Animal (numbers)			
		Cow	Swine	Poultry	Others
Inbukchon	3,795	964	363	949	1,519
Bukcheon	11,593	1,072	694	7,651	2,176
Naerincheon	82,629	3,422	1,035	72,269	5,903
Inje-eub	6,271	373	285	5,209	404
Jikhal	44,085	2,336	508	36,725	4,516
Neighbor	148,373	8,167	2,885	122,803	14,518

멧돼지 등의 기타 동물의 사육은 9,779 마리(1991년)에서 14,518 마리(1993년)로 급속히 증가하고 있다. 소양호의 직할유역은 소양호 담수이래 도로망이 정비되지 않고 산이 험하여 내륙의 고도로 불리며 개발이 지연되어 왔다. 1990년 오지개발법이 발효되면서 도로망이 확충되고 축산업을 장려하여 가축과 야생동물의 사육이 급속히 증가하고 있다. 직할유역에서 발생하는 오염은 최소한의 자연적 자정작용을 받고 소양호로 유입된다. 또한 관광객이 급속도로 증가하고 오염물의 배출도 비례하여 증가하므로 직할유역은 호수의 수질보호 차원에서 특별한 관리가 필요하다.

소양호 상류지역에는 인제읍을 비롯하여 원통, 신남, 현리 등의 소규모 도시들이 분포하고 있으나 소도시 하수처리장은 인제군 서화면 서화리와 북면 용대리에 각각 1개소(150 m³/day 용량)가 있고 인제읍에는 4,000 m³/day 용량의 소도시 하수처리장이 96년까지 건설되도록 예정되어 있다. 분뇨처리시설은 인제군 남면 남전2리에 1곳(30 m³/day 용량)이 있다. 소규모 오수정화시설 16곳(1993년, 약 1,751 m³/day 용량)이 있으나 이중 1,350 m³/day는 고성군 간성읍 대명알프스 리조트에서 설치한 시설이다. 또한 2001년에 완료되는 환경부의 수계별, 하천별 중장기 환경기초시설 계획(환경처, 1992)에 의하면 위에서 언급한 시설을 제외하고 소양호 유역에는 새로운 오폐수정화시설의 건설계획이 없다.

소양호의 유입량은 최대 11,994.8 m³/sec 부터 1,607 m³/sec까지 강우조건에 따라 심한 기복을 보이며 홍수지속시간이 비교적 짧다(한국수자원공사, 1993). 이는 유역면적에 비하여 표토층이 얇은 산악지대가 많으며 유역의 하상경사가 급하기 때문에 강우가 지표층에 장기간 저류되지 못하고 비교적 빨리 배수되기 때문이다. Fig. 1은 1994년 4월 21일부터 9월 30일 사이의 인제군 북면 원통리에서 측정된 인북천과 인제군 인제읍 원대리에서 측정된 내린천의 수문곡선이다. 홍수량 측정지점의 유역면적이 1,039 km²인 내린천의 경우 평시에는 일정한 유출량을 보이다 집중호우시 2-3일 정도의 홍수를 보인 후 다시 평시의 유출로 돌아가고 유역면적이 528 km²인 인북천의 경우는 홍수피크는 작지만 일반적인 수문곡선을 보여주고 있다.

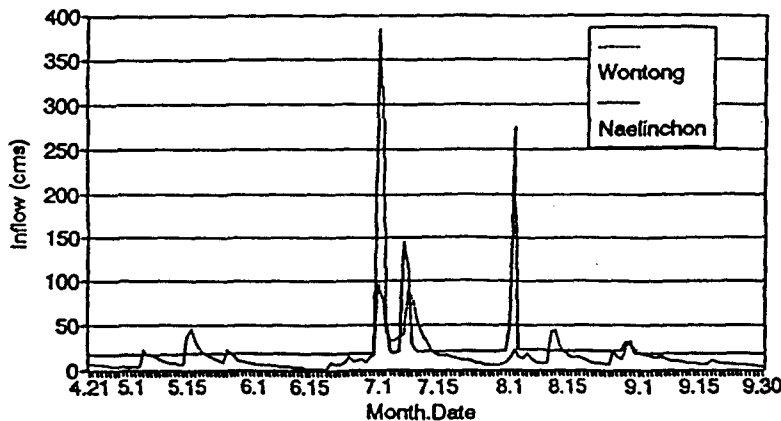


Figure 1. Runoff characteristics from the two major subwatersheds of the Lake Soyang

는 총인과 총질소의 농도와 월부하량에서 많은 변화를 보여주고 있다. Table 2의 강우가 많았던 1993년과 강우가 작았던 1994년 6월의 총인과 총질소의 월부하량은 극적인 대조를 보여주고 있다. 총인의 경우 6월중 유입량이 94년에는 1 ton/mon인데 비하여 93년에는 16.3 ton/mon으로 16 배 이상의 차이를 보였다. 총질소의 경우 94년에는 88.9 ton/mon인데 비하여 93년에는 846.2 ton/mon으로 약 10배 정도의 차이를 보이고 있다. 유입수의 총인 농도는 0.020~0.039 mg/l 그리고 총질소 농도는 1.714~2.029 mg/l로 큰 차이가 없으나 유입량에서 많은 차이가 나므로 부하량에서는 차이가 매우 심하다.

Figure 2는 소양호 상류 인제에서 총질소의 월별유입농도의 변화를 보여주고 있다. 총인의 농도는 늦겨부터 봄에 가장 낮았다가 서서히 증가하여 늦가을과 초겨울에 가장 높아지는 경향을 보이고 있다. Figure 3은 총질소 농도와 유입량과의 관계를 보여주고 있다. 유입량이 작을 때 높은 농도를 보이다 유입량이 어느정도까지 증가하면서 농도는 점차 감소하는 추세를 보였다. 장마나 태풍으로 인해 홍수가 발생하여 유출이 많으면 총질소 농도는 다시 증가하였다. 이는 총인의 배출은 거의 일정하기 때문에 작은 비로 약간의 유출이 증가하면 증가된 유량 때문에 희석이 되어 농도가 작아지나 홍수가 발생하고 유역으로 부터 많은 부유물질이 유입이 되면 다시 총질소 농도는 높아지기 때문이다. Figure 4는 유입량과 총인농도와의 관계를 보여준다. 총인농도는 총질소의 농도와는 달리 계절에 따른 변화량은 없다. 그러나 유입량과는 상당한 상관관계를 보이고 있다. 즉 소양호 유역에서 배출되는 총인은 주로 폭우에 의한 홍수시 발생하고 있음을 나타내고 있다.

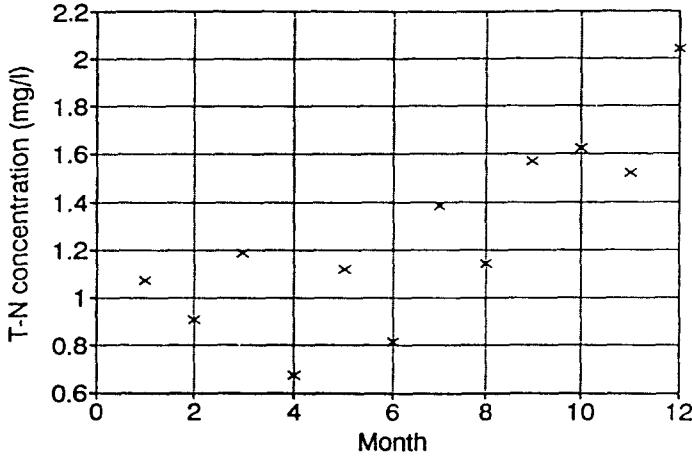


Figure 2. Seasonal trend of TP concentration

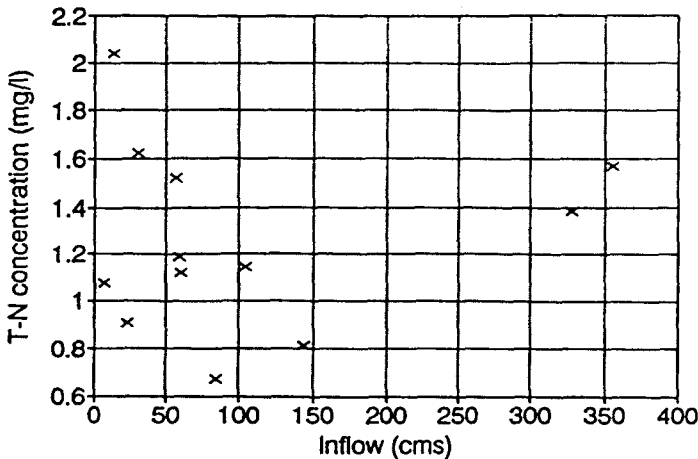


Figure 3. Relationship between TN concentration and average monthly inflow

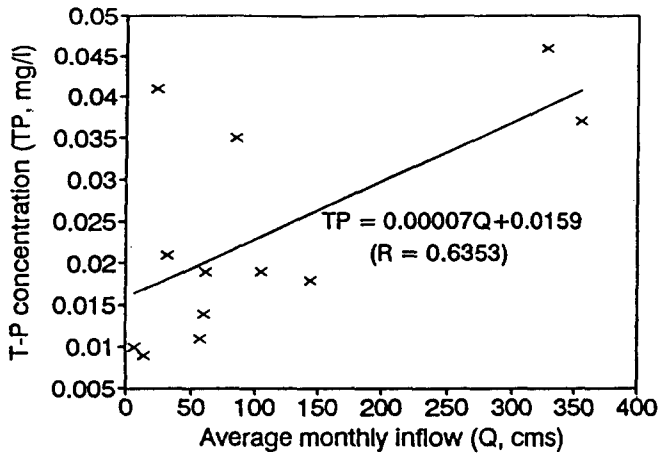


Figure 4. Relationship between TP concentration and average monthly inflow

소양호 유역에서 발생하는 총인과 총질소의 배출특성을 서로 상당히 상이하다. 총인은 홍수시의 농도가 높아 홍수기와 갈수기의 배출량 차이가 심하고 주로 홍수기에 다량 유입된다. 반면에 총질소의 농도는 유량보다는 계절적인 영향을 받는 경향이 있어 장마기에도 많이 유입되지만 평시에도 많이 유입되고 있음을 알 수 있다. 특히 늦가을 이후의 갈수기에 고농도의 총질소가 유입되고 있는 이유는 영농기와 관광철에 발생한 유기비료와 쓰레기들이 부패되고 얕은지하수로 침투하여 서서히 하천으로 배출되고 있기 때문이다. 지하수 배출이 끝나는 봄에는 다소 총질소의 농도가 감소되다 영농과 관광철이 되면 다시 총질소의 농도가 증가되는 것으로 사료된다. 그러나 이와같은 가설을 통계적으로 입증하기 위해서는 과학적이고 장기적인 유역의 수량-수질 관측이 필요하다.

4. 결 론

소양호의 유역특성과 유출수의 오염배출 특성을 분석하기 위한 연구에서 다음의 결론을 얻었다.

1. 소양호 유역의 인구는 매년 감소하는 추세로 1993년 현재의 인구는 44,936명 정도이다.
2. 소양호 유역에는 약 20여개의 소규모 산업 및 관광업체가 있으며 총고용인원은 300인 이하로 산업화가 전혀되지 않은 지역이다. 반면에 설악산 국립공원과 비지정 관광지가 많아 관광객을 대상으로 하는 음식점과 민박 등이 발달하고 있다.
3. 유역의 소와 돼지의 사육은 감소하는 추세이고 가금류와 기타 동물의 사육은 증가하고 있다.
4. 소양호 유역의 토지이용은 임야 88.9%, 농경지 5.3%, 대지 0.2%, 그리고 도로와 군시설 등을 포함하는 기타 토지이용이 5.6%이다.
5. 유출수의 총인 농도는 유출량이 많을수록 높았으며 총인부하량의 상당부분이 홍수기에 유입되었다. 총인의 월부하량은 강우량의 다소에 따라 심한 변화를 보이고 있다.
6. 유출수의 총질소 농도는 유입수량과의 관계보다는 계절적인 영향이 많은 경향을 보였다. 총질소의 농도는 이른 봄에 가장 낮았으며 서서히 증가하여 늦가을과 초겨울에 가장 높게되었다.
7. 소양호 유역으로부터 총인과 총질소의 유입을 통제하기 위하여는 유역의 과학적인 관리, 주민의 교육, 오염배출시설의 현대화, 환경친화적인 유역개발 등이 이루어져야 한다. 이와같은 사업은 유역의 토지이용과 수질과의 관계, 지표수 및 지하수의 생성과 이동 경로, 유역의 토질과 오염물질의 이동특성 등 유역을 관리하기 위한 기초연구가 선행되어야 효율적이고 성공적으로 수행될 수 있다.

5. 참고문헌

1. 권순국, 유명진. 1987. 담수호의 환경오염 및 부영양화 방지대책 수립 (I). 농림수산부, 농업진흥공사. p.387.
2. 권순국, 유명진. 1989. 담수호의 환경오염 및 부영양화 방지대책 수립 (I). 농림수산부, 농업진흥공사. p.459.
4. 김상중, 최종기, 안태영, 유근배, 이종호. 1994. 댐저수지 수질회복 기술개발에 관한 연구(3차) 보고서. 한국수자원공사, p.343.
5. 배정옥, 김도한, 김홍경. 1994. 대청댐 저수지 수질개선을 위한 인 불활성화에 관한 연구. 한국수자원공사 수자원기술성과 발표문집, pp:417-426.
6. 선우영준. 1995. 상수원수 수질현황과 전망. '94-'95 가뭄 심포지엄, 전망과 대책. 한국건설기술연구원, 한국수문학회.
7. 윤서성. 1995. 우리나라의 수자원 관리정책. 세계 물의 날 기념 수자원의 효율적인 활용을 위한 정책토론회 논문집. 삼성지구환경연구소.
8. 이상은. 1995. 오·폐수의 질소·인 고도처리 기술. 첨단환경기술 3(1):10-25.
9. 조규승, 김범철, 안태석. 1990. 소양호 수중생태계의 인순환에 관한 연구. 한국학술진흥재단.
10. 최예환, 최종대, 유능환. 1994. 인공호수에서의 부영양화 방지대책 연구. 국제수문개발계획 (IHP) 연구보고서. 건설부.
11. 한국수자원공사. 1993. 소양강다목적댐 관리연보. p:401.
12. 허인량, 이해금, 최규열, 박성빈. 1993. 소양호 COD의 연중, 계절적 변화 및 지역적 분포. 한국수질보전학회지, 9(2):93-97.
13. 환경처. 1992. 수질보전 장기종합계획수립 종합보고서. p:611.
14. Cooke, G. D. and R. H. Kennedy. 1981. Precipitation and Inactivation of Phosphorus as a Lake Restoration Technique. EPA-600/3-81-012.
15. Griffin Jr., R. 1991. The Problem, Introducing NPS Water Pollution. EPA Journal, November/December 1991, pp:6-9.
16. Ryuichi, Sudo et al. 1995. 水界생태계 보전의 질소 인 동시제거 필요성. 첨단환경기술, 3(1):26-33.