

우리나라 인공호의 부영양화 평가 및 예측에 관한 연구

김 재 윤
한국수자원공사
(1998년 2월 12일 접수)

A Study on the Evaluation and Prediction of the Eutrophication for the Lakes in Korea

Jae-Yun Kim
Korea Water Resources Corporation
(Manuscript received 12 February 1998)

The purpose of this study is to evaluate and to predict of eutrophication in lakes by using Vollenweider-OECD model and total phosphorus concentration and inflow rate which were measured in 1993-1996. The results of study was as follows.

The annual total phosphorus loading from the watershed was calculated to be 181~195tP/yr at lake Soyang, 591~680tP/yr at lake Chungju, 420~466tP/yr at lake Taechong, 229~278tP/yr at lake Andong, 103~106tP/yr at lake Hapchon, 57~59tP/yr at lake Imha, 194~244tP/yr at lake Namgang, 83~86tP/yr at lake Chuam, 99~109tP/yr at lake Somjin. These are discharged, for the most parts, from population and fishfarm facility.

TP loading on the surface area at lake Soyang was 3.01gP/m²/yr, 2.82gP/m²/yr, 2.84gP/m²/yr, 3.03gP/m²/yr, at lake Chungju 7.91gP/m²/yr, 6.87gP/m²/yr, 7.38gP/m²/yr, 7.18gP/m²/yr, at lake Taechong 6.71gP/m²/yr, 7.25gP/m²/yr, 7.24gP/m²/yr, 6.53gP/m²/yr and TP loading on the surface area of Nakdong river basin, that is, lake Andong, Imha, Hapchon and Namgang were 5.39gP/m²/yr, 4.47gP/m²/yr, 4.56gP/m²/yr, 4.45gP/m²/yr and 2.20gP/m²/yr, 2.23gP/m²/yr, 2.24gP/m²/yr, 2.17gP/m²/yr and 4.50gP/m²/yr, 4.50gP/m²/yr, 4.54gP/m²/yr, 4.43gP/m²/yr and 8.25gP/m²/yr, 8.48gP/m²/yr, 8.48gP/m²/yr, 10.39gP/m²/yr respectively. Also those of lake Chuam was 2.51gP/m²/yr, 2.61gP/m²/yr, 2.52gP/m²/yr, 2.54gP/m²/yr and TP loading on the surface area at lake Somjin was analysed 4.09gP/m²/yr, 4.10gP/m²/yr, 3.98gP/m²/yr, 3.73gP/m²/yr.

The tropic states of nine lakes can be assessed as eutrophy because phosphorus loading exceeds the critical phosphorus loading by Vollenweider-OECD model.

Key words : eutrophication, Vollenweider-OECD model, total phosphorus loading, TP loading on the surface area, critical phosphorus loading

1. 서 론

산업의 고도화 및 인구의 증가에 따라 용수수요가 급격히 증가하고 있으나 우리나라는 강수량의 ⅓가 6~9월에 집중되고 있으며, 또한 연간 총강수량 1,267억 m³ 중 평균 이용량은 301억 m³으로 총강수량의 24%만을 이용(수자원장기종합계획, 건설교통부, 1996)하고 있는 실정으로 용수의 이용을 높이기 위해 댐이나 하구언을 건설하여 정체된 수계인 인공호를 조성하고 있다.

우리나라 호소는 거의 모두가 70년대에 축조된 인공 댐이 대부분이다. 이러한 인공호는 자연호와는 형성 과정이 근본적으로 다른 인위적인 과정을 거쳐 형성되었다. 따라서 천연적 호수와는 생태적 특성이 현저히 다른

저수지로서의 특성을 지니고 있다(Thornton, 1990; Wetzel, 1990).

그런데 이제까지는 호소의 조성에 있어서 주로 양적인 면에 치중하여 수질의 관리면에서는 구체적인 목표와 시행계획이 없었던 관계로 수자원의 질적인 저하가 심화되고 있고 대부분의 수자원은 이미 심한 오염정도를 나타내고 있다(한국과학기술원, 수계 수자원 오염관리에 관한 연구 2차, 1981).

이와 같은 현상은 도시하수 및 공장폐수, 임야 및 농경지, 축산지역에서 배출되는 각종 영양물질 등이 다목적용으로 건설된 인공호에 유입됨으로써 부영양화 현상을 발생시키고 있다.

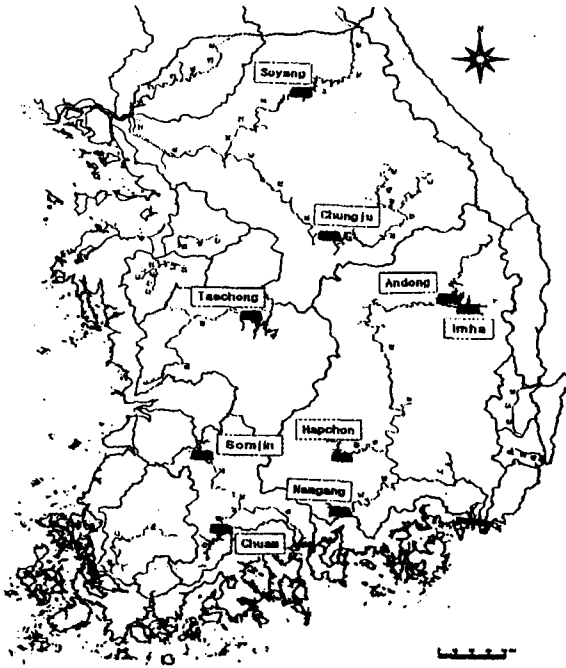


Fig. 1. Map of study lakes.

호소의 부영양화란 수계, 특히 정체된 수계(호소, 댐, 저수지)의 영양수준이 높게 되고 질소(nitrogen), 인(phosphorus) 등과 같은 조류번식 양분농도가 높아져서 조류(식물성 플랑크톤)가 대량으로 증식되어 생태계의 생산과 소비사이의 균형이 파괴되고 이와 같이 생산된 수생식물이 유기오염물질로 작용하여 수계의 수질이 악화되는 현상으로 호소 수질저하의 가장 일반적인 형태로서 호소내 일차 생산 증가에 의해 호소의 유기물 함량을 증가시키고, 수중 산소고갈과 그에 따른 생태계 파괴 및 악취발생, 염소 소독시 염소화합물의 독성 증가, 남조류 발생에 의한 수돗물의 냄새 발생 등의 피해를 유발한다.

호소생태계에서 조류는 매우 중요한 기초생산자로서 호소의 생산력에 큰 영향을 미친다. 이러한 조류의 생산력은 조체의 주요성분인 탄소(carbon), 질소(nitrogen), 인(phosphorus)에 의해 크게 영향을 받는다. 이 중 탄소의 경우는 대기와 수중에 충분히 존재하기 때문에 생산력을 조절하는 경우는 극히 드물다. 따라서 질소와 인의 동태가 호소에 있어서 생산력을 조절하는 중요한 요인으로 작용한다. 호소의 생산력은 대부분 인(phosphorus)에 의하여 조절되는 것이 일반적이다(Schindler, 1977). 이와 같이 호소에 유입되는 인의 양은 호소의 부영양화 정도를 결정하는 일차적인 요소가 된다. 그러므로 인부하량으로부터 호소수질을 예측하는 모델이 많이 연구되어 왔는데 이들 중 가장 널리 이용되는 것이 호소가 부영양화가 되는 임계점을 뜻하는 임계부하량 모델(critical loading model)로 각 호소의 체류시간, 평균수심 등의 수리특성에 따른 인의 침전율을 고려한 모델이다(Vollenweider-CECD, 1976).

현재 우리나라 대부분의 호소에서 부영양화 현상이 나타나고 있어 시급히 해결해야 할 문제이다. 호소의 수질관리에 있어서 선행되어야 할 사항은 댐유역의 오염물질 발생량과 댐으로의 유입량을 파악해야 한다. 유역 오염원으로는 점오염원(point source)과 비점오염원(non-point source)으로 구별할 수 있는데, 전자는 생활하수, 산업폐수, 축산폐수 등에 의한 오염을 말하며, 후자는 대기, 강우, 산림, 임야, 시가지 등으로부터의 부하를 의미하며, 지형, 지질, 식생 등 분산된 지역에서 고르게 발생된다.

따라서 본 연구에서는 국내 수자원으로서 중요한 위치를 차지하는 대표적인 다목적댐의 인공호를 대상으로 인부하량과 flushing rate를 이용하여 정상상태(steady state)의 총인(total phosphorus)의 농도를 예측하고, 호소로 유입되는 연간 인부하량과 호소의 평균수심의 관계로부터 호소의 영양상태를 규명한 인부하량 모델인 Vollenweider-OECD 모델을 이용하여 유역으로부터의 총인부하량에 따른 부영양화도를 판정하고 장래 호소의 영양상태 수준을 예측하여 댐저수지의 효과적인 수질관리와 수질예측 및 부영양화 방지대책 수립의 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

본 연구는 우리나라의 대표적인 다목적댐 저수지인 한강수계의 소양강댐과 충주댐, 낙동강수계의 안동댐, 임하댐, 합천댐 및 남강댐, 금강수계의 대청댐 그리고 섬진강수계의 섬진강댐과 주암댐을 대상으로 하였으며 대상지점의 현황도는 <그림 1>과 같다.

본 연구에 사용된 자료는 한국수자원공사에서 관리하고 있는 9개의 다목적댐 저수지에 대한 1993년부터 1996년까지 4년간의 수질 및 유량자료를 이용하였다.

대상 인공호의 총인(Total Phosphorus) 농도는 월 1회 측정된 자료이며 유입 유량은 호소로 유입하는 월 평균 유량을 사용하였다. 또한 각 댐호로 유입되는 총인부하량(Total Phosphorus Loading)은 인구, 가축, 산업, 가두리양식장 및 토지별 오염부하량을 오염부하량 원단위(수질보전장기종합계획, 1992, 환경처)를 이용하여 산정하였다.

인의 부영양화 임계부하량은 다음의 Vollenweider-OECD(1976)의 critical loading(Lc) model을 사용하여 분석하였다.

$$L_c = C \cdot Q_s \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{Z}{Q_s}}\right)$$

여기서, L_c 는 임계인부하량(critical phosphorus loading), Q_s 는 수리적 표면 부하량(hydraulic surface loading), Z 는 평균수심이다. 그리고 상수 C 가 10일 때가 허용임계부하량(permissible critical loading), 상수 C 가 20일 때가 위험임계부하량(dangerous critical loading)으로 허용임계부하량 이하일 때를 빈영양호, 위험임계부하량 이상일 때를 부영양호로 판정할 수 있다.

3. 분석결과 및 고찰

3.1 총인농도 변화 및 총인부하량 산정

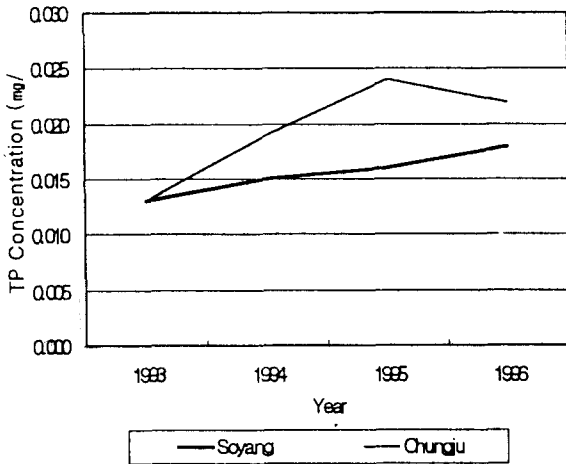


Fig. 2. Annual variation TP concentration at Soyang and Chungju lakes.

1993년부터 1996년까지 4년간 호소별 총인농도의 변화를 살펴보면, 소양호, 대청호, 안동호는 인농도가 각각 0.013~0.018mg/l, 0.021~0.029mg/l, 0.016~0.022mg/l의 범위로 계속 증가하는 추세를 보이고 있고, 주암호의 경우는 0.022~0.024mg/l의 범위로 년간 고른 분포를 나타내고 있다. 그 외 임하댐, 남강댐 및 섬진강댐 저수지의 인농도는 95년도에 각각 0.042mg/l, 0.036mg/l, 0.037mg/l로 가장 높게 나타나 감소하는 경향을 보였다.

각 댐호로 유입되는 총인부하량은 수질보전장기종합계획(1992, 환경처) 보고서의 오염부하량 원단위를 채용하여 인구, 가축, 토지, 산업, 가두리양식장으로 나누어 산정하였다. 인구에 의한 인부하량은 시가지 및 비시가지로 구분하였고, 가축에 의한 인부하량은 한우, 젖소, 돼지, 가금류 등으로, 토지는 논, 밭, 대지, 임야 등으로 구분하여 계산하였다. 그리고 산업폐수 및 가두리양식장에서 배출되는 인부하량을 각각 고려하여 저수지로 유입되는 총인부하량을 산정하였다.

각 호소별, 오염원별로 발생하는 총인부하량을 분석한 결과를 살펴보면, 소양호는 연도별로 각각 193tP/yr, 181tP/yr, 183tP/yr, 195tP/yr로 인부하량이 증가하는 추세를 보였으며, 충주호는 680tP/yr, 591tP/yr, 635tP/yr, 618tP/yr로 대상 호소 중 가장 높은 수치를 나타내었다. 대청호는 431tP/yr, 466tP/yr, 465tP/yr, 420tP/yr로 충주호 다음으로 높은 인부하량을 보였지만 최근에는 다소 감소하는 추세에 있으며, 낙동강수계의 안동호는 278tP/yr, 230tP/yr, 235tP/yr, 229tP/yr로 연도별로 큰 차이는 보이지 않았고 합천호의 경우 105tP/yr, 105tP/yr, 106tP/yr, 103tP/yr로 안동호와 마찬가지로 연도별로 큰 차이를 보이지 않았다. 임하호는 58tP/yr, 59tP/yr, 59tP/yr, 57tP/yr로 인부하량이 가장 낮았으며, 남강호의 인부하량은 각각 194tP/yr, 199tP/yr, 199tP/yr, 244tP/yr로 분석되어 낙동강수계의 안동호, 합천호, 임하호 및 남강호는 연도별로 큰 변화는 없는 것으로 분석되었다. 그리고 섬진강수계

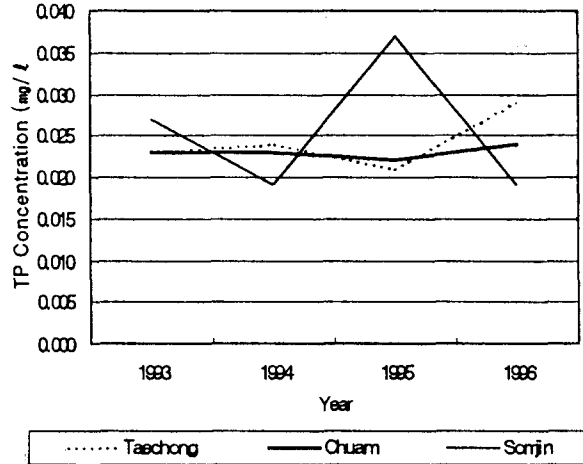


Fig. 3. Annual variation TP concentration at Taechong, Chuam and Somjin lakes.

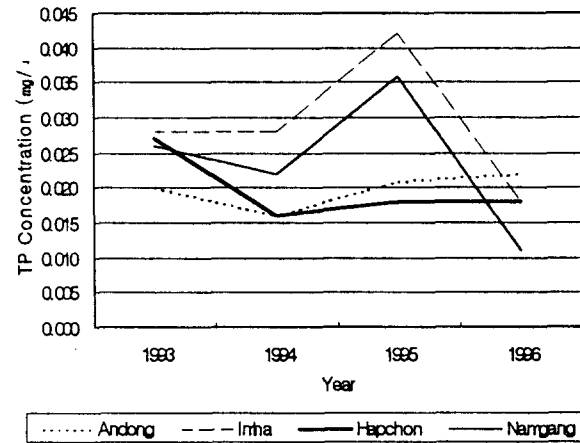


Fig. 4. Annual variation TP concentration at Andong, Imha, Hapchon and Namgang lakes.

의 주암호는 83tP/yr, 86tP/yr, 83tP/yr, 84tP/yr로 나타났으며, 섬진강댐호는 108tP/yr, 109tP/yr, 106tP/yr, 99tP/yr로 분석되었다.

총인부하량을 분석한 결과 한강수계의 인공호인 소양호와 충주호의 경우는 인부하량이 증가하고 있으며 그 밖의 수계내 인공호는 연도별로 인부하량의 변화가 크게 나타나고 있지는 않았다.

또한 각 호소별로 오염원별 인부하 기여율을 분석한 결과, 소양호는 연도별로 발생하는 오염원별 인부하량의 비율은 비슷한 경향을 보이고 있으며, 인오염부하 기여율은 가두리양식장에서 발생하는 인부하량이 총인부하량의 68.5%로 가장 높게 나타났으며, 인구 14%, 축산계 4.7%, 토지 11.6%로 나타났으며 산업에 의한 인부하율은 1.2%로 가장 낮게 분석되었다.

충주호의 경우, 인구에 의한 인부하율이 30.9%로 가장 높고 양식장 22.1%, 산업계 14.5%, 토지이용에 따른 인부하율은 13.5%, 축산계가 10.8%로 가장 낮았다. 대청호는 인구에 의한 인부하율이 47.2%, 가축 24.8%, 토지 13.5%, 양식 10.9%, 산업이 3.4%로 낮은 부하율

Table 1. Pollutant sources and annual total phosphorus loading at each lake (unit : kg/day)

lake	year	population	livestock	land	industry	fishfarm
Soyang	1993	76	24	59	1	370
	1994	73	24	60	3	336
	1995	73	25	60	7	336
	1996	66	24	60	14	370
Chungju	1993	837	227	210	201	389
	1994	684	157	205	184	389
	1995	679	175	204	296	385
	1996	628	190	197	315	362
Taechong	1993	585	239	159	12	187
	1994	570	326	168	61	153
	1995	580	333	168	61	134
	1996	571	318	165	35	62
Andong	1993	224	56	46	137	298
	1994	178	50	45	59	298
	1995	158	83	45	59	298
	1996	152	80	44	54	298
Imha	1993	103	16	39	1	-
	1994	99	18	43	1	-
	1995	101	79	46	36	-
	1996	94	20	42	1	-
Hapchon	1993	137	99	37	2	12
	1994	135	110	36	6	-
	1995	130	121	36	3	-
	1996	124	122	34	3	-
Namgang	1993	263	178	87	3	-
	1994	261	195	86	4	-
	1995	261	195	86	4	-
	1996	249	331	84	5	-
Chuam	1993	122	64	41	-	-
	1994	110	78	47	1	-
	1995	103	78	47	1	-
	1996	102	82	45	1	-
Somjin	1993	78	41	30	10	138
	1994	80	50	29	10	129
	1995	76	53	30	10	120
	1996	73	60	29	16	93

을 보였다. 또한 안동호는 양식장 45.1%, 인구 26.6%, 산업 11.3%, 가축 10.3%, 토지 6.8%이며, 임하호는 인구 55.9%, 토지 23.9%, 가축 16.3%, 산업 3.9%이며 양식장의 인부하율에 대한 기여율을 거의 나타나지 않은 것으로 분석되었다. 합천호의 경우에는 인구에 의한 인부하율의 기여율이 45.8%로 가장 높게 나타났으며 그 다음으로 가축 39.4%, 토지 12.4%, 산업 11.4%, 양식장 1.1% 순이며, 남강호는 인구 45.7%, 가축 38.6%, 토지 15.1%, 산업 0.7%이며, 주암호의 경우 인구, 가축, 토지, 산업계에 의한 인부하 기여율은 각각 47.4%, 32.7%, 19.7%, 0.2%이다. 그리고 섬진강댐 저수지로 유입되는 인부하량의 비율은 양식장에 의한 인부하율이 41.5%로 가장 높게 나타났으며 인구 26%, 가축 17.8%, 토지 10.3%, 산업계에 의한 인부하율이 4.0%로 가장 낮은 것으로 분석되었다.

오염원별 인부하량을 분석해 보면, 소양호, 안동호에서의 인부하량 중 양식장에 의한 인부하율이 가장 높게 나타났다. 양식장에서 사용하는 사료량은 소양호에서 연평균 4,015(톤/년), 안동호는 9,617.8(톤/년)으로 나타나 사료 및 고기의 배설물에 의한 오염부하량이 많은 것으로 판단된다. 그 외의 호소에서는 인구에 의한 인부

하율이 높게 나타나 생활하수에 의한 오염부하량이 과다하게 유입됨을 알 수 있다. 또한 합천호에서의 양식장에 의한 인부하율이 낮게 나타난 것은 가두리양식장이 시범적으로 운영되고 있어 직접적인 오염부하량은 미소한 것으로 사료된다.

이상의 결과를 종합해 보면, 다목적댐 저수지 유역에서 댐호로 유입되는 인부하량은 점오염원이 크게 기여하는 것으로 나타나 하수, 축산 및 산업폐수처리시설 등을 통한 점오염원에 대한 관리가 필요한 것으로 판단된다.

3.2 Vollenweider-OECD 모형에 의한 부영양화 평가 및 예측

대상 호소의 수리수문학적 특성 및 Vollenweider-OECD 모형에 의한 임계인부하량을 산정한 결과는 다음의 표와 같다.

1993년부터 1996년까지 4년간 9개의 다목적댐 저수지를 대상으로 Vollenweider-OECD 모형을 이용하여 각 호소별로 임계인부하량을 분석한 결과는 다음과 같다.

소양호는 수리적 표면 부하량(Qs)이 연도별로 각각

Table 2. Hydrological characteristics and critical phosphorus loading according to Vollenweider-OECD model of lakes in 1993

	SY	CJ	TC	AD	HC	IH	NG	CA	SJ
Water capacity(10 ⁶ m ³)	2,900	2,750	1,490	1,248	790	595	136	457	466
Surface area(km ²)	64.3	86.0	64.3	51.5	23.3	26.4	23.5	33.0	26.5
Annual inflow rate(10 ⁶ m ³ /yr)	2,211	5,928	3,607	1,382	732	1,146	1,924	672	678
Mean depth(m)	45.1	32.0	23.2	24.2	33.9	22.5	5.8	13.8	17.6
Flushing rate(1/yr)	0.76	2.16	2.42	1.11	0.93	1.93	14.15	1.47	1.46
Hydraulic resident time(yr)	1.31	0.46	0.41	0.90	1.08	0.52	0.07	0.68	0.69
Hydraulic surface loading, Qs(m ³ /yr)	34.38	68.93	56.09	26.83	31.43	43.41	81.89	20.35	25.60
Annual TP loading(tP/yr)	193.45	680.36	431.43	277.77	104.76	58.04	193.82	82.86	108.41
Qs · [1 + (Z/Qs) ^{0.5}]	73.76	115.90	92.16	52.31	64.07	74.66	103.68	37.11	46.83
Permissible TP loading(gP/m ² /yr)	0.74	1.16	0.92	0.52	0.64	0.75	1.04	0.37	0.47
Dangerous TP loading(gP/m ² /yr)	1.48	2.32	1.84	1.05	1.28	1.46	2.07	0.74	0.94
P loading, Lp(gP/m ² /yr)	3.01	7.91	6.71	5.39	4.50	2.20	8.25	2.51	4.09

Remarks) SY : Soyang lake, CJ : Chungju lake, TC : Taechong lake, AD : Andong lake, HC : Hapchon lake, IH : Imha lake, NG : Namgang lake, CA : Chuam lake, SJ : Somjin lake

Table 3. Hydrological characteristics and critical phosphorus loading according to Vollenweider-OECD model of lakes in 1994

	SY	CJ	TC	AD	HC	IH	NG	CA	SJ
Water capacity(10 ⁶ m ³)	2,900	2,750	1,490	1,248	790	595	136	457	466
Surface area(km ²)	64.3	86.0	64.3	51.5	23.3	26.4	23.5	33.0	26.5
Annual inflow rate(10 ⁶ m ³ /yr)	1,117	3,071	827	536	216	224	823	277	157
Mean depth(m)	45.1	32.0	23.2	24.2	33.9	22.5	5.8	13.8	17.6
Flushing rate(1/yr)	0.39	1.12	0.55	0.43	0.27	0.38	6.05	0.61	0.34
Hydraulic resident time(yr)	2.60	0.90	1.80	2.33	3.66	2.65	0.17	1.65	2.96
Hydraulic surface loading, Qs(m ³ /yr)	17.36	35.71	12.86	10.40	9.26	8.50	35.03	8.40	5.94
Annual TP loading(tP/yr)	181.04	590.94	466.11	229.95	104.76	58.77	199.29	86.14	108.77
Qs · [1 + (Z/Qs) ^{0.5}]	17.36	69.51	30.13	26.26	26.98	22.33	49.28	19.17	4.1
Permissible TP loading(gP/m ² /yr)	0.45	0.69	0.30	0.26	0.27	0.22	0.49	0.19	0.16
Dangerous TP loading(gP/m ² /yr)	0.91	1.39	0.60	0.53	0.54	0.45	0.99	0.38	0.32
P loading, Lp(gP/m ² /yr)	2.82	6.87	7.25	4.47	4.50	2.23	8.48	2.61	4.10

Table 4. Hydrological characteristics and critical phosphorus loading according to Vollenweider-OECD model of lakes in 1995

	SY	CJ	TC	AD	HC	IH	NG	CA	SJ
Water capacity(10 ⁶ m ³)	2,900	2,750	1,490	1,248	790	595	136	457	466
Surface area(km ²)	64.3	86.0	64.3	51.5	23.3	26.4	23.5	33.0	26.5
Annual inflow rate(10 ⁶ m ³ /yr)	3,022	6,097	1,629	577	292	254	1,127	341	310
Mean depth(m)	45.1	32.0	23.2	24.2	33.9	22.5	5.8	13.8	17.6
Flushing rate(1/yr)	1.04	2.22	1.09	0.46	0.37	0.43	8.28	0.75	0.66
Hydraulic resident time(yr)	0.96	0.45	0.91	2.16	2.70	2.34	0.12	1.34	1.50
Hydraulic surface loading, Qs(m ³ /yr)	47.00	70.90	25.34	11.20	12.54	9.62	47.94	10.33	11.69
Annual TP loading(tP/yr)	182.87	634.74	465.38	234.70	105.85	59.13	199.29	83.22	105.49
Qs · [1 + (Z/Qs) ^{0.5}]	47.00	118.53	49.59	27.66	4.54	24.33	8.48	22.27	26.03
Permissible TP loading(gP/m ² /yr)	0.93	1.19	0.50	0.28	0.33	0.24	0.65	0.22	0.26
Dangerous TP loading(gP/m ² /yr)	1.86	2.37	0.99	0.55	0.66	0.49	1.29	0.45	0.52
P loading, Lp(gP/m ² /yr)	2.84	7.38	7.24	4.56	4.45	2.24	8.48	2.52	3.98

34.38m³/yr, 17.36m³/yr, 47.00m³/yr, 22.56m³/yr로 계산되었고, 허용인하량은 0.74gP/m²/yr, 0.45gP/m²/yr, 0.93gP/m²/yr, 0.54gP/m²/yr, 위험인부하량은 각각 1.48gP/m²/yr, 0.91gP/m²/yr, 1.86gP/m²/yr, 1.09gP/m²/yr로 산정되었다. 그리고 수표면인부하량(Lp)은 3.01gP/m²/yr, 2.82gP/m²/yr, 2.84gP/m²/yr, 3.03gP/m²/yr로 분석되어 부영양상태에 있는 것으로 분석되었다. 충주호는 수리적 표면 부하량(Qs)이 68.93m³/yr, 35.71m³/yr, 70.90m³/yr, 31.85m³/yr로 계산되었고, 허용인하량은 1.16gP/m²/yr, 0.69gP/m²/yr, 1.19gP/m²/yr, 0.64gP/m²/yr, 위험인부하량은 1.48gP/m²/yr, 0.91gP/m²/yr, 1.86gP/m²/yr, 1.

Table 5. Hydrological characteristics and critical phosphorus loading according to Vollenweider-OECD model of lakes in 1996

	SY	CJ	TC	AD	HC	IH	NG	CA	SJ
Water capacity(10 ⁶ m ³)	2,900	2,750	1,490	1,248	790	595	136	457	466
Surface area(km ²)	64.3	86.0	64.3	51.5	23.3	26.4	23.5	33.0	26.5
Annual inflow rate(10 ⁶ m ³ /yr)	1,451	2,739	2,247	571	339	369	1,331	292	428
Mean depth(m)	45.1	32.0	23.2	24.2	33.9	22.5	5.8	13.8	17.6
Flushing rate(1/yr)	0.50	1.00	1.51	0.46	0.43	0.62	9.79	0.64	0.92
Hydraulic resident time(yr)	2.00	1.00	0.66	2.19	2.33	1.61	0.10	1.57	1.09
Hydraulic surface loading, Qs(m ³ /yr)	22.56	31.85	34.94	11.09	14.56	13.96	56.63	8.85	16.15
Annual TP loading(tP/yr)	194.91	617.58	420.12	229.22	103.30	57.31	244.19	83.95	98.92
Qs · [1+(Z/Qs) ^{0.5}]	22.56	63.77	63.41	27.47	36.78	31.68	74.75	19.90	33.01
Permissible TP loading(gP/m ² /yr)	0.54	0.64	0.63	0.27	0.37	0.32	0.75	0.20	0.33
Dangerous TP loading(gP/m ² /yr)	1.09	1.28	1.27	0.55	0.74	0.63	1.49	0.40	0.66
P loading, Lp(gP/m ² /yr)	3.03	7.18	6.53	4.45	4.43	2.17	10.39	2.54	3.73

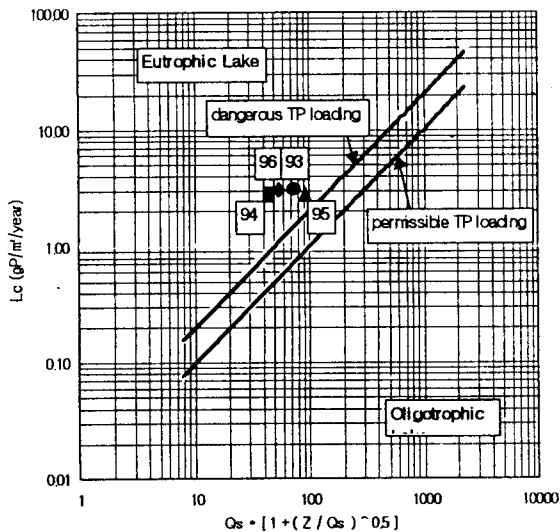


Fig. 5. Polt of Annual Total Phosphorus Loading into Lake Soyang and Critical Loading of Vollenweider-OECD Model.

09gP/m²/yr, 수표면인부하량(Lp)은 7.91gP/m²/yr, 6.87gP/m²/yr, 7.38gP/m²/yr, 7.18gP/m²/yr로 분석되었으며, 대청호는 수리적 표면 부하량(Qs)이 56.09m³/yr, 12.86m³/yr, 25.34m³/yr, 34.94m³/yr, 허용인하량은 0.92gP/m²/yr, 0.30gP/m²/yr, 0.50gP/m²/yr, 0.63gP/m²/yr, 위험인부하량은 1.48gP/m²/yr, 0.91gP/m²/yr, 1.86gP/m²/yr, 1.09gP/m²/yr로 산정되었고 수표면인부하량(Lp)은 6.71gP/m²/yr, 7.25gP/m²/yr, 7.24gP/m²/yr, 6.53gP/m²/yr로 분석되어 부영양호로 나타났다.

낙동강수계의 안동호는 수리적 표면 부하량(Qs)이 26.83m³/yr, 10.40m³/yr, 11.20m³/yr, 11.09m³/yr로 계산되었고, 허용인하량은 0.52gP/m²/yr, 0.26gP/m²/yr, 0.28gP/m²/yr, 0.27gP/m²/yr, 위험인부하량은 1.48gP/m²/yr, 0.91gP/m²/yr, 1.86gP/m²/yr, 1.09gP/m²/yr로 산정되었다. 그리고 수표면인부하량(Lp)은 5.39gP/m²/yr, 4.47gP/m²/yr, 4.56gP/m²/yr, 4.

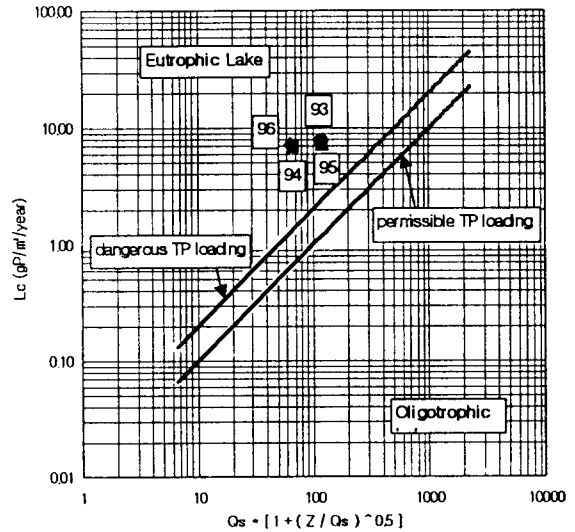


Fig. 6. Polt of Annual Total Phosphorus Loading into Lake Chungju and Critical Loading of Vollenweider-OECD Model.

45gP/m²/yr, 합천호는 수리적 표면 부하량(Qs)이 31.43m³/yr, 9.26m³/yr, 12.54m³/yr, 14.56m³/yr로 계산되었고, 허용인하량은 0.64gP/m²/yr, 0.27gP/m²/yr, 0.33gP/m²/yr, 0.37gP/m²/yr, 위험인부하량은 1.48gP/m²/yr, 0.91gP/m²/yr, 1.86gP/m²/yr, 1.09gP/m²/yr로 산정되었고 수표면인부하량(Lp)은 4.50gP/m²/yr, 4.50gP/m²/yr, 4.54gP/m²/yr, 4.43gP/m²/yr로 분석되어 부영양상태에 있는 것으로 분석되었다. 그리고 임하호는 수리적 표면 부하량(Qs)이 43.41m³/yr, 8.50m³/yr, 9.62m³/yr, 13.96m³/yr로 계산되었고, 허용인하량은 0.75gP/m²/yr, 0.22gP/m²/yr, 0.24gP/m²/yr, 0.32gP/m²/yr, 위험인부하량은 1.48gP/m²/yr, 0.91gP/m²/yr, 1.86gP/m²/yr, 1.09gP/m²/yr로 산정되었으며 수표면인부하량(Lp)은 2.20gP/m²/yr, 2.23gP/m²/yr, 2.24gP/m²/yr, 2.17gP/m²/yr로 분석되어 부영양호인 상태이다. 남강호는 수리적 표면 부하량(Qs)이 81.89m³/yr, 35.03m³/yr,

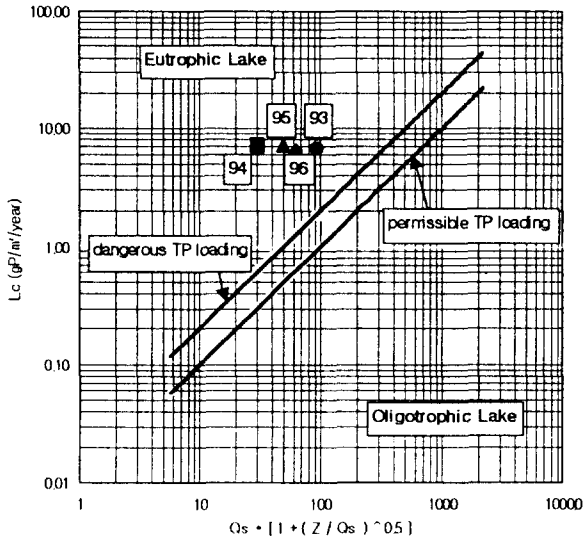


Fig. 7. Polt of Annual Total Phosphorus Loading into Lake Taechong and Critical Loading of Vollenweider-OECD Model.

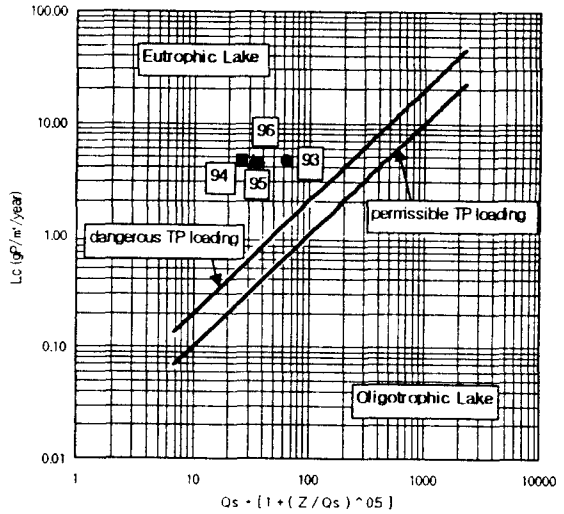


Fig. 9. Polt of Annual Total Phosphorus Loading into Lake Hapchon and Critical Loading of Vollenweider-OECD Model.

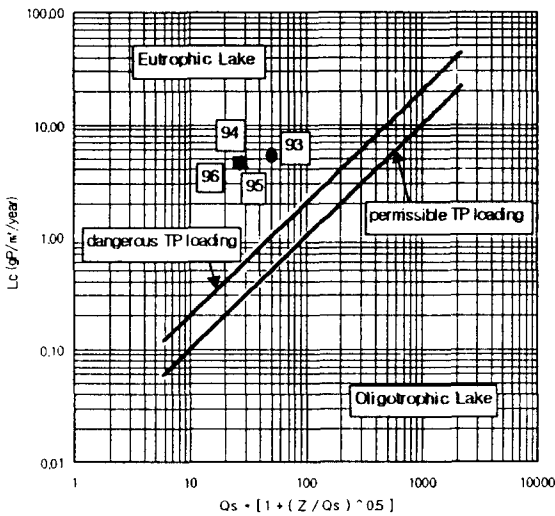


Fig. 8. Polt of Annual Total Phosphorus Loading into Lake Andong and Critical Loading of Vollenweider-OECD Model.

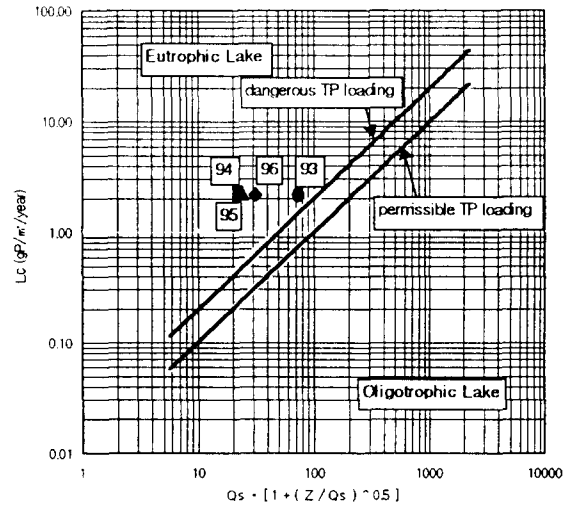


Fig. 10. Polt of Annual Total Phosphorus Loading into Lake Imha and Critical Loading of Vollenweider-OECD Model.

47.94m/yr, 56.63m/yr로 계산되었고, 허용인하량은 1.04gP/m²/yr, 0.49gP/m²/yr, 0.65gP/m²/yr, 0.75gP/m²/yr, 위험인하량은 1.48gP/m²/yr, 0.91gP/m²/yr, 1.86gP/m²/yr, 1.09gP/m²/yr로 산정되었고 수표면인하량(Lp)은 8.25gP/m²/yr, 8.48gP/m²/yr, 8.48gP/m²/yr, 10.39gP/m²/yr로 분석되어 부영양상태에 있는 것으로 분석되었다.

또한 섬진강수계의 주암호는 수리적 표면 부하량(Qs)이 20.35m/yr, 8.40m/yr, 10.33m/yr, 8.85m/yr로 계산되었고, 허용인하량은 0.37gP/m²/yr, 0.16gP/m²/yr, 0.26gP/m²/yr, 0.33gP/m²/yr, 위험인하량은 1.

48gP/m²/yr, 0.91gP/m²/yr, 1.86gP/m²/yr, 1.09gP/m²/yr로 산정되었으며 수표면인하량(Lp)은 2.51gP/m²/yr, 2.61gP/m²/yr, 2.52gP/m²/yr, 2.54gP/m²/yr, 섬진강댐호는 수리적 표면 부하량(Qs)이 25.60m/yr, 5.94m/yr, 11.69m/yr, 16.15m/yr로, 허용인하량은 0.47gP/m²/yr, 0.16gP/m²/yr, 0.26gP/m²/yr, 0.33gP/m²/yr, 위험인하량은 1.48gP/m²/yr, 0.91gP/m²/yr, 1.86gP/m²/yr, 1.09gP/m²/yr, 수표면인하량(Lp)은 4.09gP/m²/yr, 4.10gP/m²/yr, 3.98gP/m²/yr, 3.73gP/m²/yr로 분석되어 부영양상태에 있는 것으로 분석되었다.

이상의 결과를 종합해 보면, 본 연구의 대상지점인 인

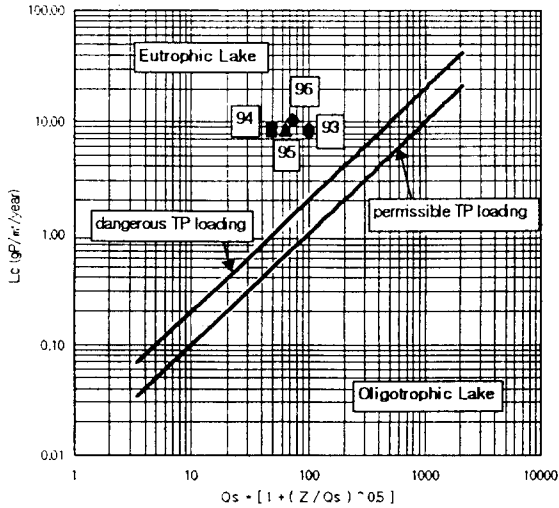


Fig. 11. Polt of Annual Total Phosphorus Loading into Lake Namgang and Critical Loading of Vollenweider-OECD Model.

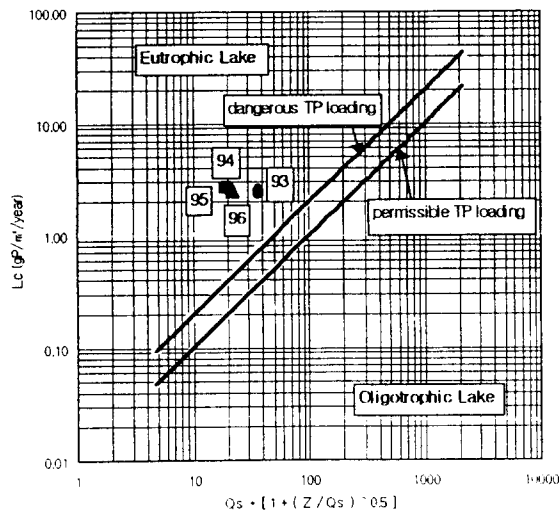


Fig. 12. Polt of Annual Total Phosphorus Loading into Lake Chuam and Critical Loading of Vollenweider-OECD Model.

공호 모두는 호소의 환경용량이라 할 수 있는 위험임계 부하량을 초과하고 있는 것으로 분석되어 이미 부영양화 단계를 초과하고 있으며, 이러한 원인은 각 호소 유역으로부터의 인과다 유입에 의한 것으로 생각된다. 특히 호소내 가두리양식장에 의한 인유입은 대상호소 전체에서 높은 기여도를 보이고 있어 양어장의 배설물 유입 차단이나 사료량의 적정관리 및 폐쇄된 가두리양식장 하부 퇴적물의 제거가 요구된다. 또한 하수, 축산 및 산업폐수처리시설의 설치에 의한 생활하수, 축산 및 산업폐수처리 등의 점오염원 관리와 비점오염원 관리를 통하여 유역으로부터의 인유입에 대한 통제가 효과적으로 이루어져야만 호소의 수질개선이 실효성을 거둘 수 있으리나 사료된다.

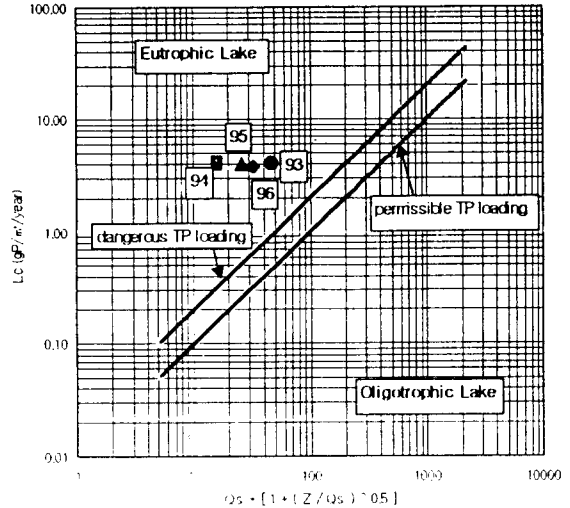


Fig. 13. Polt of Annual Total Phosphorus Loading into Lake Somjin and Critical Loading of Vollenweider-OECD Model.

4. 결 론

우리나라 9개 다목적댐 저수지를 대상으로 1993년부터 1996년까지 4년간의 수질 및 유량자료를 이용하여 인농도 변화, 총인부하량 산정 및 Vollenweider-OECD 모델을 통한 부영양화도를 판정하고 장래 호소의 영양상태 수준을 예측한 결과는 다음과 같다.

- 1) 호소별 인농도의 변화는 소양호, 대청호, 안동호는 인농도가 각각 0.013~0.018mg/l, 0.021~0.029mg/l, 0.016~0.022mg/l로 계속 증가하는 추세를 보이고 있고, 주암호의 경우는 0.022~0.024mg/l의 범위로 연간 고른 분포를 나타내고 있다. 그 외 임하댐, 남강댐 및 섬진강댐 저수지의 인농도는 95년도에 각각 0.042mg/l, 0.036mg/l, 0.037mg/l로 가장 높게 나타나다 감소하는 경향을 보였다.

- 2) 총인부하량 산정 결과, 소양호는 181~195tP/yr로 연도별로 증가하는 추세를 보였으며, 충주호는 591~680tP/yr로 대상 호소 중 가장 높은 수치를 나타내었다. 또한 대청호는 420~466tP/yr로 충주호 다음으로 높은 총인부하량을 보였지만 최근에는 감소하는 추세이다. 안동호는 229~278tP/yr, 합천호 103~106tP/yr, 임하호 57~59tP/yr로 인부하량이 가장 낮았으며, 남강호는 194~244tP/yr로, 그리고 주암호는 83~86tP/yr, 섬진강호는 99~109tP/yr로 산정되어 낙동강수계 및 섬진강수계의 인공호는 연도별로 총인부하량의 변화가 크게 나타나고 있지는 않은 것으로 분석되었다.

- 3) 또한 각 호소별로 오염원별 인부하 기여율을 분석한 결과, 인구에 의한 인부하율이 가장 높게 나타난 호소는 충주호, 대청호, 임하호, 합천호, 남강호 및 주암호로 각각 총인부하량의 30.9%, 47.2%, 55.9%, 45.8%, 45.7%, 47.4%로 나타났으며, 소양호, 안동호 및 섬진강호는 가두리양식장에서 발생하는 인부하량이 68.

5%, 45.1%, 41.5%로 총인부하량에 기여도가 높은 것으로 분석되었다.

4) Vollenweider-OECD 모델을 이용하여 각 연도별, 호소별로 임계인부하량을 분석한 결과 수표면 인부하량은, 소양호가 3.01gP/m²/yr, 2.82gP/m²/yr, 2.84gP/m²/yr, 3.03gP/m²/yr, 충주호 7.91gP/m²/yr, 6.87gP/m²/yr, 7.38gP/m²/yr, 7.18gP/m²/yr, 대청호 6.71gP/m²/yr, 7.25gP/m²/yr, 7.24gP/m²/yr, 6.53gP/m²/yr, 안동호는 5.39gP/m²/yr, 4.47gP/m²/yr, 4.56gP/m²/yr, 4.45gP/m²/yr, 합천호 4.50gP/m²/yr, 4.50gP/m²/yr, 4.54gP/m²/yr, 4.43gP/m²/yr, 임하호 2.20gP/m²/yr, 2.23gP/m²/yr, 2.24gP/m²/yr, 2.17gP/m²/yr, 남강호 8.25gP/m²/yr, 8.48gP/m²/yr, 8.48gP/m²/yr, 10.39gP/m²/yr, 주암호 2.51gP/m²/yr, 2.61gP/m²/yr, 2.52gP/m²/yr, 2.54gP/m²/yr, 섬진강댐호 4.09gP/m²/yr, 4.10gP/m²/yr, 3.98gP/m²/yr, 3.73gP/m²/yr로 분석되었다.

본 연구의 대상 호소 전체는 부영양화 단계에 있어 가두리양식이나 인구에 의한 인부하량 즉 점오염원에 대한 적절한 관리를 하지 않는다면 앞으로 더욱 그 정도는 심화될 전망이므로 이에 대한 대책 마련이 시급한 실정이다.

참 고 문 헌

- 건설교통부, 1996, 수자원장기종합계획
 국립환경연구원보, 1996, 수도권 주요 상수원의 오염실태 및 관리방안에 관한 연구(II), Vol.18
 김동섭, 김범철, 황길순, 박주현, 1995, 팔당호의 부영양화 경향(1988-1994), 한국수질보전학회지, 제11권, 제4호
 김범철, 조규송, 허우명, 김동섭, 1989, 소양호 부영양화의 연변화 추이, 한국육수학회지, Vol.22, No.3
 김범철, 안태석, 조규송, 1988, 한강수계 인공호의 부영양화에 관한 비교 연구, 한국육수학회지, Vol.21, No.3
 허우명, 김범철, 안태석, 이기종, 1992, 소양호 유역과 가두리로부터의 인부하량 및 인수지(Phosphorus Budget), 한국육수학회지, Vol.25, No.4
 한국과학기술원, 1981, 수계 수자원 오염관리에 관한 연구 2차
 한국수자원공사, 1997, 다목적댐 수질환경 연감
 환경처, 1992, 수질보전장기종합계획수립보고서
 환경처, 1994, 호소편람
 환경처, 1995, 전국 호소환경현황조사 및 주요 호소영향권역설정(2차) 보고서
 Effer, S.W., Field, S.D., Depinto., Owens, E.M., Dobi, J.S. and Preda, M.A., 1982. Predicting Phosphorus levels on a future reservoir, Journal of the American Society of Civil Engineers, 108, EE4
 Kirchner, W.B. and Dillon, P.J., 1975, An Empirical methods of estimating the retention of phosphorus in lakes, Water Resources Reserch, 11, 1
 Krazer, C.R. and Brezonik, P.L., 1984. Application of nutrient loading models to the analysis of trophic conditions in Lake Okeechobee, Florida, Environmental Management, 8, 2.
 Schindler, D.W., 1977. Evolution of phosphorus limitation in lakes, Science, 21
 Sonzogni, W.C., Uttormark. and Lee, G.F., 1976. A Phosphorus resident time model: Theory and application, Water Resources Reserch, 10, 5
 Thornton, K.W., 1990. Reservoir Limnology: Ecological perspectives, Wiley interscience, New York
 Vollenweider, R.A., 1976. Advanced in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. Mem. Inst. Ital. Idrobiol. 33
 Vollenweider, R.A. 1975. Input-Output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. Schweigen fur hydrobiologie, 37
 Vollenweider, R.A. and J. Kerekes, 1980. OECD cooperative programme on monitoring of inland waters. Synthesis Report
 Wetzel, R.G., 1990. Reservoir ecosystems: conclusions and speculations. In Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne, Reservoir Limnology; Ecological perspectives, Wiley interscience, New York