

총인부하량을 이용한 인공호의 부영양화 평가

김 재 윤

한국수자원공사 수자원연구소

(2002년 8월 3일 접수; 2003년 6월 23일 채택)

The evaluation of the eutrophication for the lakes by phosphorus loading

Jae-Yun Kim

Korea Water Resources Corporation, Water Resources Research Institute, Daejeon 306-711, Korea

(Manuscript received 3 August, 2002; accepted 23 June, 2003)

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 1993~2001. The results of study were as follows.

The annual total phosphorus loading from the watershed was calculated to be 55~195tP/yr at lake Soyang, 221~466tP/yr at lake Taechong, 123~278tP/yr at lake Andong, 57~109tP/yr at lake Seomjin. 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, 2.34gP/m²/yr, 1.78gP/m²/yr, 0.91gP/m²/yr, 0.89gP/m²/yr, 0.86gP/m²/yr, lake Taechong was 6.71gP/m²/yr, 7.25gP/m²/yr, 7.24gP/m²/yr, 6.53gP/m²/yr, 6.50gP/m²/yr, 7.06gP/m²/yr, 7.04gP/m²/yr, 4.05gP/m²/yr, 3.44gP/m²/yr and TP loading on the surface area of lake Andong, lake Seomjin were 5.39gP/m²/yr, 4.47gP/m²/yr, 4.56gP/m²/yr, 4.45gP/m²/yr, 3.33gP/m²/yr, 2.38gP/m²/yr, 2.53gP/m²/yr, 2.46gP/m²/yr, 2.54gP/m²/yr, 4.09gP/m²/yr, 4.10gP/m²/yr, 3.98gP/m²/yr, 3.73gP/m²/yr, 2.80gP/m²/yr, 3.46gP/m²/yr, 3.22gP/m²/yr, 2.19gP/m²/yr, 2.13gP/m²/yr respectively.

The trophic states of four 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, Critical phosphorus loading

1. 서 론

산업의 고도화 및 인구의 증가에 따라 용수수요가 급격히 증가하고 있으나 우리나라는 강수량의 6~9월에 집중되고 있으며, 또한 연간 총강수량 1,276억m³ 중 평균 이용량은 331억m³으로 총강수량의 26%만을 이용(건설교통부, 2001)하고 있는 실정으로 용수의 이용을 높이기 위해 댐이나 하구언을 건설하여 정제된 수계인 인공호를 조성하고 있다.

우리나라 호소는 대부분이 70년대에 축조된 인공

댐이다. 이러한 인공호는 자연호와는 형성과정이 근본적으로 다른 인위적인 과정을 거쳐 형성되었다. 따라서 천연적 호수와는 생태적 특성이 현저히 다른 저수지로서의 특성을 지니고 있다.

그런데 이제까지는 호소의 조성에 있어서 주요 양적인 면에 치중하여 수질관리 측면의 구체적인 목표와 시행계획이 없었던 관계로 수자원의 질적인 저하가 심화되고 있고 대부분의 수자원은 이미 심각한 오염정도를 나타내고 있다.

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

호소의 부영양화란 수계, 특히 정제된 수계의 영

Corresponding Author : Jae-Yun Kim, Korea Water Resources Corporation, Water Resources Research Institute, Daejeon 306-711, Korea
Phone : +82-42-860-0377
E-mail : jykim@kowaco.or.kr

양수준이 높게 되고 질소, 인 등과 같은 조류번식 양분농도가 높아져서 조류가 대량으로 증식되어 생태계의 생산과 소비사이의 균형이 파괴된다. 이와 같이 생산된 수생식물이 유기오염물질로 작용하여 수계의 수질이 악화되는 현상으로 호소 수질저하의 가장 일반적인 형태이다. 또한 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, 질소, 인에 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 인자로 작용한다. 호소의 생산력은 대부분 인에 의하여 조절되는 것이 일반적이다. 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-OECD, 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. 유역오염원으로는 점오염원과 비점오염원으로 구별할 수 있다. 점오염원은 생활하수, 산업폐수, 축산폐수 등에 의한 오염을 말하며, 비점오염원은 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 총인의 농도를 예측하고자 한다. 또한 호소로 유입되는 연간 인부하량과 호소의 평균수심의 관계로부터 호소의 영양상태를 규명한 인부하량 모델인 Vollenweider-OECD 모델을 이용하여 유역으로부터의 총인부하량에 따른 부영양화도를 판정하고자 한다. 장래 호소의 영양상태 수준

을 예측하여 댐저수지의 효과적인 수질관리와 수질 예측 및 부영양화 방지대책 수립의 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

본 연구는 각 수계별로 대표적인 다목적댐 저수지인 한강수계의 소양강댐과 낙동강수계의 안동댐 금강수계의 대청댐 그리고 섬진강수계의 섬진강댐을 대상으로 하였으며 대상지점의 현황도는 그림 1과 같다.

본 연구에 사용된 자료는 한국수자원공사에서 관리하고 있는 주요 다목적댐 저수지에 대한 1993년부터 2001년까지 9년간의 수질 및 유량자료를 이용하였다. 대상 인공호의 총인 농도는 월 1회 측정된 자료이며 유입 유량은 호소로 유입되는 월평균 유량을 사용하였다. 또한 각 댐호로 유입되는 총인부하량은 인구, 가축, 산업, 가두리양식장 및 토지별 오염부하량을 오염부하량 원단위(환경처, 1992)를 이용하여 산정하였다.

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

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

여기서, L_c 는 임계인부하량(critical phosphorus

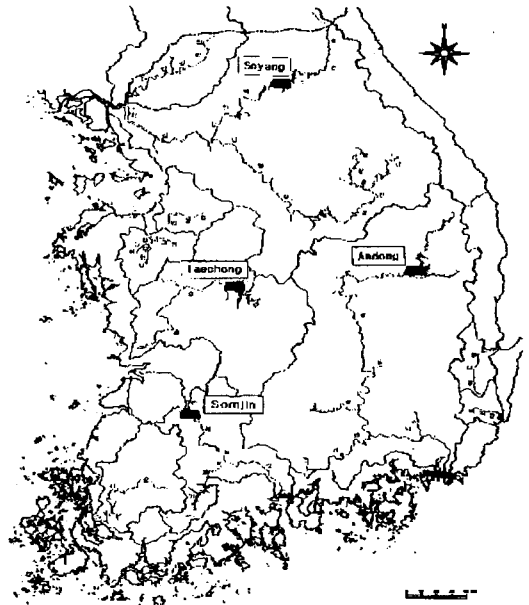


Fig 1. Map of study lakes.

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. 결과 및 고찰

3.1. 총인농도 변화 및 총인부하량 산정

1993년부터 2001년까지 9년간 호소별 총인농도의 변화를 살펴보면, 한강수계 소양호의 인농도는 0.013 mg/l에서 0.021mg/l로 다른 수계의 호소보다는 연도별 인농도의 변화의 폭이 크지 않은 것으로 분석되었다. 금강수계의 대청댐 저수지의 인농도는 0.020 mg/l에서 0.044mg/l로 변화의 폭도 크고 인농도도 가장 높은 것으로 분석되었다.

낙동강수계의 안동댐 저수지의 인농도는 1997년까지 0.020mg/l에서 0.026mg/l로 증가하다 이후 감소하는 추세에 있는 것으로 분석되었다. 섬진강댐 저수지의 경우는 1995년 0.37mg/l로 가장 높게 나타나다 이후 0.028mg/l에서 0.019mg/l로 다소 인농도가 감소되는 추세로 나타났다.

각 댐호로 유입되는 총인부하량은 수질보전장기 종합계획(환경처, 1992) 보고서의 오염부하량 원단위를 채용하여 인구, 가축, 토지, 산업, 가두리양식장으로 나누어 산정하였다. 인구에 의한 인부하량은 시가지와 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 총인부

하량을 산정하였다.

각 호소별, 오염원별로 발생하는 총인부하량을 분석한 결과를 살펴보면, 소양호는 연도별로 1996년까지 각각 193tP/yr, 181tP/yr, 183tP/yr, 195tP/yr로 인부하량이 증가하는 추세를 보이다가 1997년 이후는 150tP/yr에서 2001년 55tP/yr로 크게 감소하는 것으로 나타났다. 대청호도 1999년까지는 431tP/yr에서 453tP/yr로 나타났지만 2000년과 2001년은 각각 261tP/yr, 221tP/yr로 감소하는 추세로 분석되었다. 낙동강수계의 안동호는 1993년 278tP/yr에서 2001년 131tP/yr로 감소하는 경향으로 분석되었으며, 섬진강다목적댐 저수지도 235tP/yr에서 57tP/yr로 크게 감소되는 것으로 분석되었다.

총인부하량을 분석한 결과, 소양호, 대청호, 안동호 및 섬진강 저수지 모두 2000년을 기점으로 크게 감소되는 것으로 분석되었다. 또한 각 호소별로 오염원별 인부하 기여율은 가두리양식장이 철거되기 전에는 대부분 가두리 양식장에 의한 인부하 기여율이 대청댐을 제외한 소양호, 안동호, 섬진강 저수지에서 각각 평균 47.4%, 41.8%, 41.4%로 높게 나타났다으며, 대청호는 인구에 의한 인부하 기여율이 약 50%로 가장 높게 나타난 것으로 분석되었다.

오염원별 인부하량을 분석해 보면, 소양호, 안동호에서의 인부하량 중 양식장에 의한 인부하율이 가장 높게 나타났다. 양식장에서 사용하는 사료량은 소양호에서 년평균 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 인부하율이 높게 나타나 생활하수에 의한 오염부하량이 과다하게 유입됨을 알 수 있었다.

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 2001년까지 9년간 4개의 다목적댐 저수지를 대상으로 Vollenweider-OECD 모형을 이용하여 각 호소별로 임계인부하량을 분석한 결과는 다음과 같다.

소양호는 수리적 표면부하량(Q_s)의 범위가 17.36 m/yr에서 47.00m/yr로 계산되었고, 허용인부하량은

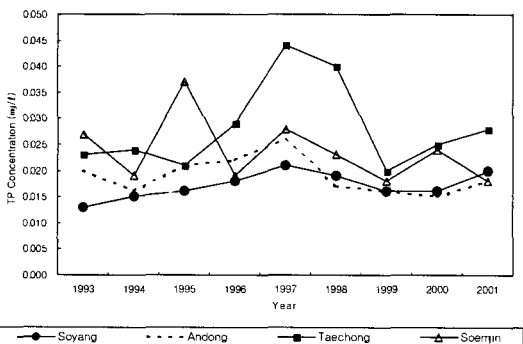


Fig. 2. Annual variation of Total phosphorus concentration at Soyang, Andong, Taechong and Soemjin lakes.

Table 1. Pollutant sources and annual total phosphorus loading at each lake

lake	year	Source (kg/day), (%)					
		Total	population	livestock	land	industry	fishfarm
Soyang	1993	530	76(14.3)	24(4.5)	59(11.1)	1(0.2)	370(69.8)
	1994	496	73(14.7)	24(4.8)	60(12.1)	3(0.6)	336(67.7)
	1995	501	73(14.6)	25(5.0)	60(12.0)	7(1.4)	336(67.1)
	1996	534	66(12.4)	24(4.5)	60(11.2)	14(2.6)	370(69.3)
	1997	412	71(17.2)	26(6.3)	59(14.3)	25(6.1)	231(56.1)
	1998	313	69(22.0)	26(8.3)	60(19.2)	5(1.6)	153(48.9)
	1999	160	69(43.1)	24(15.0)	62(38.8)	5(3.1)	-
	2000	156	53(34.0)	5(3.2)	94(60.3)	4(2.6)	-
Taechong	1993	1,182	585(49.5)	239(20.2)	159(13.5)	12(1.0)	187(15.8)
	1994	1,278	570(44.6)	326(25.5)	168(13.1)	61(4.8)	153(12.0)
	1995	1,276	580(45.5)	333(26.1)	168(13.2)	61(4.8)	134(10.5)
	1996	1,151	571(49.6)	318(27.6)	165(14.3)	35(3.0)	62(5.4)
	1997	1,145	526(45.9)	424(37.0)	167(14.6)	28(2.4)	-
	1998	1,243	550(44.2)	468(37.7)	165(13.3)	60(4.8)	-
	1999	1,240	546(44.0)	486(39.2)	170(13.7)	38(3.1)	-
	2000	714	355(49.7)	120(16.8)	209(29.3)	30(4.2)	-
Andong	1993	606	357(58.9)	55(9.1)	165(27.2)	29(4.8)	-
	1994	761	224(29.4)	56(7.4)	46(6.0)	137(18.0)	298(39.2)
	1994	630	178(28.3)	50(7.9)	45(7.1)	59(9.4)	298(47.3)
	1995	643	158(24.6)	83(12.9)	45(7.0)	59(9.2)	298(46.3)
	1996	628	152(24.2)	80(12.7)	44(7.0)	54(8.6)	298(47.5)
	1997	470	152(32.3)	80(17.0)	44(9.4)	59(12.6)	135(28.7)
	1998	336	137(40.8)	96(28.6)	45(13.4)	58(17.3)	-
	1999	357	141(39.5)	88(24.6)	45(12.6)	83(23.2)	-
Seomjin	2000	347	111(32.0)	23(6.6)	64(18.4)	14(42.9)	-
	2001	358	107(29.9)	11(3.1)	64(17.9)	17(49.2)	-
	1993	297	78(26.3)	41(13.8)	30(10.1)	10(3.4)	138(46.5)
	1994	298	80(26.8)	50(16.8)	29(9.7)	10(3.4)	129(43.3)
	1995	289	76(26.3)	53(18.3)	30(10.4)	10(3.5)	120(41.5)
	1996	271	73(26.9)	60(22.1)	29(10.7)	16(5.9)	93(34.3)
	1997	203	66(32.5)	92(45.3)	32(15.8)	13(6.4)	-
	1998	251	78(31.1)	132(52.6)	29(11.6)	12(4.8)	-
1999	234	63(26.9)	129(55.1)	30(12.8)	12(5.1)	-	
2000	159	61(38.4)	40(25.2)	36(22.6)	22(13.8)	-	
2001	155	54(34.8)	31(20.0)	38(24.5)	32(20.6)	-	

Table 2. Hydrological characteristics and critical phosphorus loading according to Vollenweider-OECD model at Soyang lake

Year	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Water capacity($10^6 m^3$)	2,900	2,900	2,900	2,900	2,900	2,900	2,900	2,900	2,900
Surface area(km^2)	64.3	64.3	64.3	64.3	64.3	64.3	64.3	64.3	64.3
Annual inflow rate($10^6 m^3/yr$)	2,211	1,117	3,022	1,451	2,064	2,922	3,045	1,871	1,438
Mean depth(m)	45.1	45.1	45.1	45.1	45.1	45.1	45.1	45.1	45.1
Flushing rate(1/yr)	0.76	0.39	1.04	0.50	0.71	1.01	1.05	0.65	0.50
Hydraulic resident time(yr)	1.31	2.60	0.96	2.00	1.41	0.99	0.95	1.55	2.02
Hydraulic surface loading, $Q_s(m/yr)$	34.38	17.36	47.00	22.56	32.10	45.44	47.36	29.10	22.36
Annual TP loading(tP/yr)	193.45	181.04	182.87	194.91	150.38	114.25	58.40	56.94	55.48
$Q_s \cdot [1+(Z/Q_s)^{0.5}]$	73.76	45.35	93.04	54.46	70.15	90.72	93.57	65.32	54.12
Permissible TP loading(gP/ m^2/yr)	0.74	0.45	0.93	0.54	0.70	0.91	0.94	0.65	0.54
Dangerous TP loading(gP/ m^2/yr)	1.48	0.91	1.86	1.09	1.40	1.81	1.87	1.31	1.08
P loading, $L_p(gP/m^2/yr)$	3.01	2.82	2.84	3.03	2.34	1.78	0.91	0.89	0.86

총인부하량을 이용한 인공호의 부영양화 평가

Table 3. Hydrological characteristics and critical phosphorus loading according to Vollenweider-OECD model at Taechong lake

Year	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Water capacity(10^6 m ³)	1,490	1,490	1,490	1,490	1,490	1,490	1,490	1,490	1,490
Surface area(km ²)	64.3	64.3	64.3	64.3	64.3	64.3	64.3	64.3	64.3
Annual inflow rate(10^6 m ³ /yr)	3,607	827	1,629	2,247	3,042	4,522	2,747	3,583	1,090
Mean depth(m)	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2	23.2
Flushing rate(1/yr)	2.42	0.55	1.09	1.51	2.04	3.03	1.84	2.40	0.73
Hydraulic resident time(yr)	0.41	1.80	0.91	0.66	0.49	0.33	0.54	0.42	1.37
Hydraulic surface loading, Qs(m ³ /yr)	56.09	12.86	25.34	34.94	47.31	70.33	42.72	55.72	16.95
Annual TP loading(tP/yr)	431.43	466.11	465.38	420.12	417.93	453.70	452.60	260.61	221.19
Qs · [1+(Z/Qs) ^{0.5}]	92.16	30.12	49.57	63.39	80.42	110.70	74.19	91.66	36.77
Permissible TP loading(gP/m ³ /yr)	0.92	0.30	0.50	0.63	0.80	1.11	0.74	0.92	0.37
Dangerous TP loading(gP/m ³ /yr)	1.84	0.60	0.99	1.27	1.61	2.21	1.48	1.83	0.74
P loading, Lp(gP/m ³ /yr)	6.71	7.25	7.24	6.53	6.50	7.06	7.04	4.05	3.44

Table 4. Hydrological characteristics and critical phosphorus loading according to Vollenweider-OECD model at Andong lake

Year	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Water capacity(10^6 m ³)	1,248	1,248	1,248	1,248	1,248	1,248	1,248	1,248	1,248
Surface area(km ²)	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5	51.5
Annual inflow rate(10^6 m ³ /yr)	1,382	536	577	571	1,069	1,388	1,542	875	561
Mean depth(m)	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2	24.2
Flushing rate(1/yr)	1.11	0.43	0.46	0.46	0.86	1.11	1.24	0.70	0.45
Hydraulic resident time(yr)	0.90	2.33	2.16	2.19	1.17	0.90	0.81	1.43	2.22
Hydraulic surface loading, Qs(m ³ /yr)	26.83	10.40	11.20	11.09	20.76	26.95	29.94	16.99	10.89
Annual TP loading(tP/yr)	277.77	229.95	234.70	229.22	171.55	122.64	130.31	126.66	130.67
Qs · [1+(Z/Qs) ^{0.5}]	52.32	26.27	27.67	27.48	43.19	52.51	56.88	37.28	27.14
Permissible TP loading(gP/m ³ /yr)	0.52	0.26	0.28	0.27	0.43	0.53	0.57	0.37	0.27
Dangerous TP loading(gP/m ³ /yr)	1.05	0.53	0.55	0.55	0.86	1.05	1.14	0.75	0.54
P loading, Lp(gP/m ³ /yr)	5.39	4.47	4.56	4.45	3.33	2.38	2.53	2.46	2.54

Table 5. Hydrological characteristics and critical phosphorus loading according to Vollenweider-OECD model at Seomjin lake

Year	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Water capacity(10^6 m ³)	466	466	466	466	466	466	466	466	466
Surface area(km ²)	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5
Annual inflow rate(10^6 m ³ /yr)	678	157	310	428	623	873	521	632	356
Mean depth(m)	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6	17.6
Flushing rate(1/yr)	1.46	0.34	0.66	0.92	1.34	1.87	1.12	1.36	0.76
Hydraulic resident time(yr)	0.69	2.96	1.50	1.09	0.75	0.53	0.89	0.74	1.31
Hydraulic surface loading, Qs(m ³ /yr)	25.60	5.94	11.69	16.15	23.51	32.94	19.66	23.85	13.43
Annual TP loading(tP/yr)	108.41	108.77	105.49	98.92	74.10	91.62	85.41	58.04	56.58
Qs · [1+(Z/Qs) ^{0.5}]	46.81	16.15	26.03	33.01	43.84	57.01	38.25	44.33	28.80
Permissible TP loading(gP/m ³ /yr)	0.47	0.16	0.26	0.33	0.44	0.57	0.38	0.44	0.29
Dangerous TP loading(gP/m ³ /yr)	0.94	0.32	0.52	0.66	0.88	1.14	0.77	0.89	0.58
P loading, Lp(gP/m ³ /yr)	4.09	4.10	3.98	3.73	2.80	3.46	3.22	2.19	2.13

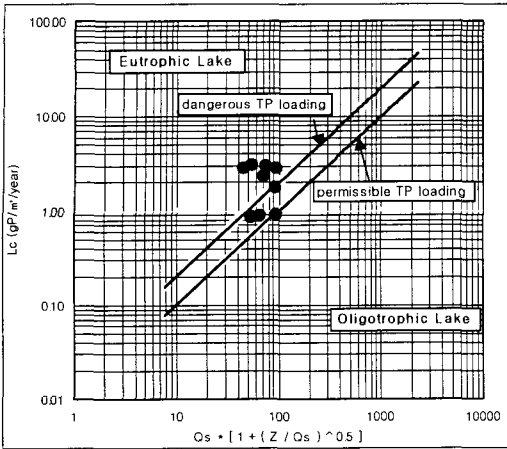


Fig. 3. Plot of Annual Total Phosphorus Loading into Lake Soyang and Critical Loading of Vollenweider-OECD Model.

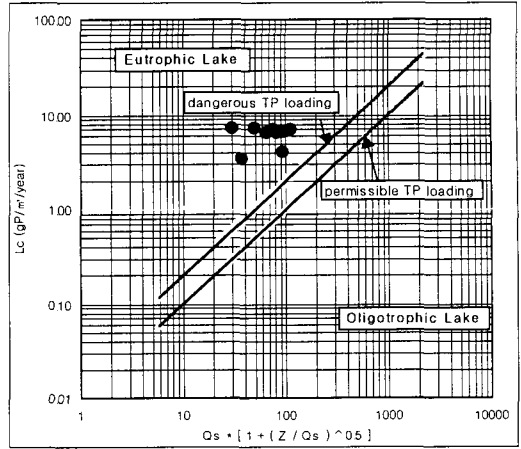


Fig. 4. Plot of Annual Total Phosphorus Loading into Lake Taechong and Critical Loading of Vollenweider-OECD Model.

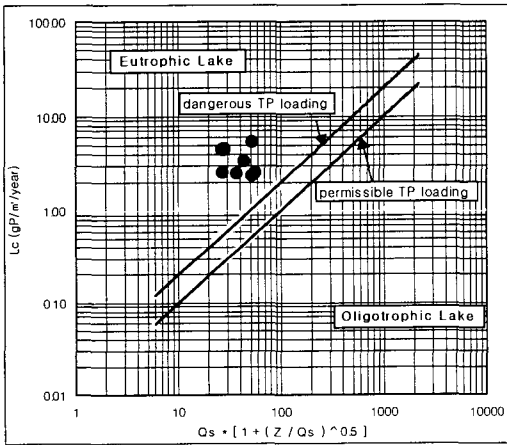


Fig. 5. Plot of Annual Total Phosphorus Loading into Lake Andong and Critical Loading of Vollenweider-OECD Model.

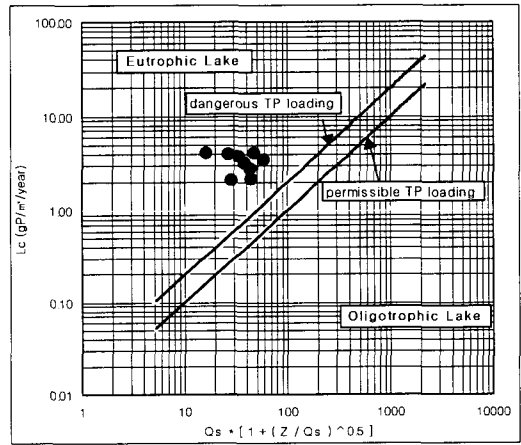


Fig. 6. Plot of Annual Total Phosphorus Loading into Lake Seomjin and Critical Loading of Vollenweider-OECD Model.

0.45gP/m²/yr에서 0.94gP/m²/yr, 위험인부하량은 0.91gP/m²/yr에서 1.87gP/m²/yr로 산정되었다. 그리고 수표면인부하량(Lp)은 연도별로 각각 3.01gP/m²/yr, 2.82gP/m²/yr, 2.84gP/m²/yr, 3.03gP/m²/yr, 2.34gP/m²/yr, 1.78gP/m²/yr, 0.91gP/m²/yr, 0.89gP/m²/yr, 0.86gP/m²/yr로 분석되어 1998년까지는 부영양상태이었지만 그 이후는 다소 영양상태가 개선된 것으로 분석되었다.

대청호는 수리적 표면부하량(Qs)이 12.86m²/yr에서 70.33m²/yr, 허용인부하량은 0.30gP/m²/yr에서 1.11gP/m²/yr, 위험인부하량은 0.60gP/m²/yr에서 2.31gP/m²/yr로 산정되었고, 수표면인부하량(Lp)은 연도별로 각각 6.71gP/m²/yr, 7.25gP/m²/yr, 7.24gP/m²/yr,

6.53gP/m²/yr, 6.50gP/m²/yr, 7.06gP/m²/yr, 7.04gP/m²/yr, 4.05gP/m²/yr, 3.44gP/m²/yr로 분석되어 부영양호로 나타났다.

낙동강수계의 안동호는 수리적 표면부하량(Qs)의 범위가 10.40m²/yr에서 29.94m²/yr로 계산되었고, 허용인부하량은 0.26gP/m²/yr에서 0.57gP/m²/yr, 위험인부하량은 0.53gP/m²/yr에서 1.14gP/m²/yr로 산정되었다. 그리고 수표면인부하량(Lp)은 연도별로 각각 5.39gP/m²/yr, 4.47gP/m²/yr, 4.56gP/m²/yr, 4.45gP/m²/yr, 3.33gP/m²/yr, 2.38gP/m²/yr, 2.53gP/m²/yr, 2.46gP/m²/yr, 2.54gP/m²/yr로 분석되어 부영양상태인 것으로 분석되었다.

또한 섬진강수계의 섬진강 다목적댐 저수지는 수리적 표면부하량(Qs)의 범위가 5.94m/yr에서 32.94m/yr로 계산되었고, 허용인부하량은 0.16gP/m²/yr에서 0.57gP/m²/yr, 위험인부하량은 0.32gP/m²/yr에서 1.14gP/m²/yr로 산정되었다. 그리고 수표면인부하량(Lp)은 연도별로 각각 4.09gP/m²/yr, 4.10gP/m²/yr, 3.98gP/m²/yr, 3.73gP/m²/yr, 2.80gP/m²/yr, 3.46gP/m²/yr, 3.22gP/m²/yr, 2.19gP/m²/yr, 2.13gP/m²/yr로 분석되어 부영양호로 나타났다.

이상의 결과를 종합해 보면, 본 연구의 대상지점인 인공호 모두는 호소의 환경용량이라 할 수 있는 위험임계부하량을 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 있으리라 사료된다.

4. 결 론

우리나라 수계별 대표적 저수지를 대상으로 1993년부터 2001년까지 9년간의 수질 및 유량자료를 이용하여 인농도 변화, 총인부하량 산정과 Vollenweider-OECD 모델을 통한 부영양화도를 판정하고 장래 호소의 영양상태 수준을 예측한 결과는 다음과 같다.

- 1) 한강수계의 소양호의 인농도는 0.013mg/l에서 0.021mg/l로 다른 수계의 호소보다는 연도별 인농도의 변화의 폭이 크지 않은 것으로 나타났으며, 대청호의 인농도는 0.020mg/l에서 0.044mg/l로 변화의 폭도 크고 인농도도 가장 높은 것으로 분석되었다. 또한 안동호는 1997년까지 증가하다 이후 감소하는 추세에 있는 것으로 분석되었다. 섬진강댐 저수지의 경우는 1995년 0.37mg/l로 가장 높게 나타나다 이후 0.019mg/l에서 0.028mg/l로 다소 인농도가 감소되는 추세로 나타났다.
- 2) 오염원별 인부하량은 소양호, 안동호에서의 인부하량 중 양식장에 의한 인부하율이 가장 높게 나타났다. 그 외의 호소에서는 인구에 의한 인부하율이 높게 나타나 생활하수에 의한 오염부하

량이 과다하게 유입됨을 알 수 있다. 또한 다목적댐 저수지 유역에서 댐호로 유입되는 인부하량은 점오염원이 크게 기여하는 것으로 나타나 하수, 축산 및 산업폐수처리시설 등을 통한 점오염원에 대한 관리가 필요한 것으로 판단된다.

- 3) Vollenweider-OECD 모델을 이용하여 각 연도별, 호소별로 임계인부하량을 분석한 결과, 수리적 표면부하량(Qs)의 범위는 소양호가 17.36m/yr에서 47.00m/yr, 대청호는 12.86m/yr에서 70.33m/yr, 안동호는 10.40m/yr에서 29.94m/yr, 섬진강다목적댐 저수지는 5.94m/yr에서 32.94m/yr로 계산되었다. 소양호, 대청호, 안동호, 섬진강다목적댐 저수지의 위험인부하량은 각각 0.91gP/m²/yr에서 1.87gP/m²/yr, 0.60gP/m²/yr에서 2.31gP/m²/yr, 0.53gP/m²/yr에서 1.14gP/m²/yr, 0.32gP/m²/yr에서 1.14gP/m²/yr로 산정되어 모두 부영양호로 나타났다.

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

참 고 문 헌

- 1) 건설교통부, 2001, 수자원장기종합계획, 64-65pp.
- 2) 김동섭, 김범철, 황길순, 박주현, 1995, 팔당호의 부영양화 경향(1988-1994), 한국수질보전학회지, 11(4), 295-302.
- 3) 허우명, 김범철, 안태석, 이기종, 1992, 소양호 유역과 가두리로부터의 인부하량 및 인수지(Phosphorus Budget), 한국육수학회지, 25(4), 207-212.
- 4) 한국수자원공사, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 다목적댐 수질환경 연감.
- 5) 환경처, 1992, 수질보전장기종합계획수립보고서, 174-213pp.
- 6) Schindler, D. W., 1974, Experimental Lakes Area: Whole lake experiments in eutrophication, J. Fish Res. Bd. Can., 31, 953-973.
- 7) Vollenweider, R. A., 1976, Advanced in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication, Mem. Inst. Ital. Idrobiol., 33, 53-83.
- 8) Vollenweider, R. A. and J. Kerekes, 1980, The phosphorus loading concept and great lakes eutrophication, Proc. 11th. Ann. Corn. Univ. Con, Ann Arbor science, 237-234pp.