

농업용 저수지의 유형분류 및 수질관리

Classification and Water Quality Management of Agricultural Reservoirs

윤 경 섭* · 이 광 식* · 김 형 중** · 김 호 일*

Yoon, Kyung Sup · Lee, Kwang Sik · Kim, Hyung Joong · Kim, Ho Il

Abstract

Monitoring data from agricultural reservoirs throughout the country were analyzed to classify agricultural reservoirs according to physical characteristics and COD concentrations, and evaluate the relationships between water quality items. The physical and chemical data of total 498 reservoirs were analyzed from 1990 to 2001. Average COD, TP, TN, Chl-a, SS concentrations for the reservoirs and pollutant loadings from their watersheds were used for the analysis. It was possible that reservoirs were classified to 4 types using the relationships between the ratios of effective storage per water surface (ST/WS ratio) and COD concentrations. It is recommended that the improvement measures of polluted reservoirs should be performed as following order : integrated consolidation type (complex mechanism type) → watershed consolidation type → integrated consolidation type (external mechanism type) → in-lake consolidation type → conservation type and the depth (ST/WS ratio) of reservoir maintained over 5~6 m for water quality improvement. The decision coefficients (r^2) between Chl-a and other items (COD, T-P, SS, T-N) were 0.6915, 0.6732, 0.5327, 0.3352, respectively. Therefore, reservoir managers could evaluate the trophic state of reservoirs by COD concentrations.

Keywords : Classification, Reservoir type, Relationship, ST/WS ratio, Improvement order

I. 서 론

우리 나라의 연간 수자원 총량은 1998년 현재 1,276억 m^3 인데, 이 중 74%가 바다로 유실되거나 증발 등으로 손실되고 26%인 331억 m^3 만이 유효 이용되고 있으며, 수자원 이용량 중에서 농업용수가 48%인 158억 m^3 으로서 가장 많은 비중을 차지하고 있다(수자원공사, 2003). 농업용수 중에서 농업수리시설에 의해 공급되는 양은 101억 m^3 /년인

* 농업기반공사 농어촌연구원
** Corresponding author. Tel.: +82-31-400-1828
fax: +82-31-400-1889
E-mail address: imawater@karico.co.kr

데, 이 중 저수지 및 담수호에 의해서 공급되는 양이 각각 47억 m^3 , 20억 m^3 으로서 67%를 점하고 있어 우리 나라의 농업용수는 저수지와 담수호, 특히 저수지에 대한 의존성이 대단히 높다(김성기, 2002).

최근 농업용수의 수질오염이 심화되어 농업용수원의 수질관리에 대한 필요성이 높아짐에 따라 농림부, 농업기반공사, 환경부에서는 농업용수 수질관리의 일환으로 주 농업용수원인 저수지와 담수호를 대상으로 농업용수 수질측정망을 운영하고 있다. 우리 나라 농업용수 수질측정망은 1990년에 30지점이 지정되어 관리되기 시작하였으며, 2002년 현재 500지점이 지정·운영되고 있다. 농업용수 수질측정망 조사자료에 의하면 1996년 이후 농업용수 수질기준(COD 기준) 초과율이 지속적으로 감소하였으나, 2002년에는 23.2%로서 다소 상승한 것으로 보고하고 있다(농림부, 2002). 따라서 보다 적극적으로 지속적으로 농업용수의 수질을 관리해야 할 것이다.

환경부와 농림부의 수질측정망 조사를 통하여 10여년 이상 축적된 귀중한 자료를 호소의 수질개선에 활용하기 위해서는 자료를 면밀히 분석하고, 이에 따른 관리방안을 제시해야 할 것이다. 김상진(1999)은 1990년부터 1999년까지의 농업용수 수질측정망 자료를 분석하여 BOD와 COD의 상관성이 높다는 것을 확인한바 있다. 전지홍 등(2002)은 우리 나라의 저수지는 외국의 자연호소에 비해 체류시간이 작고, 유역면적이 상대적으로 크기 때문에 영양염류의 유입가능성이 크다고 보고하고 있다. 김호일(2002)은 농업용 저수지의 수질항목사이의 상관성을 분석하여 Chl-a와 COD가 상관성이 높다고 보고하는 등 농업용수 수질측정망 자료를 분석한 연구가 이루어지고 있다. 전지홍 등(2002a, b)과 황순진 등(2002)은 우리 나라의 저수지를 대상으로 물리적인 인자가 호소의 수질에 미치는 영향을 분석한 결과, 유역으로부터 동일한 인부하가 발생한다 할지라도 수심이 얕을 수록 높

은 Chl-a 농도를 나타내었으며, 수심이 얕고 수표면적이 클수록 총인과 Chl-a와의 상관성이 높았으며, 총인 농도당 Chl-a 생산성이 높았다고 보고한바 있다. 우리 나라 대부분의 호소가 수심 10 m 이하라는 것을 감안해 볼 때 호소의 부영양화 가능성은 높을 것으로 생각된다. 기타 김좌관 등(1992)은 국내 인공호소는 외국의 자연호소에 비해 낮은 수심과 작은 저수용량으로 높은 생산성을 유발할 수리·수문학적 특성을 가지고 있다고 기술하였고, 안광국 등(2002)은 대형호소인 대청호는 문순기간에 비해 문순 전후에 TP와 Chl-a의 상관관계가 높다고 보고하고 있다. 외국에서는 Vollenweider(1968)는 Rawson's(1955)의 깊은 호소는 낮은 호소에 비하여 부영양화에 덜 민감하다는 이론에 기초하여 인부하량과 평균수심사이의 관계를 유도하였으며, Vollenweider(1975)는 수심만이 아니라 체류시간도 부영양화에 영향을 미치는 제한인자라고 보고하였다. 또한 C. D. Brown et. al. (2000), D. M. Soballe et. al. (1978) 등은 TP와 Chl-a의 상관성에 대하여 심층적으로 분석한바 있다.

농업용수원으로 이용되고 있는 저수지와 담수호의 효과적인 수질관리를 위해서는 축적된 자료를 이용하여 호소를 유형화하고, 각 유형의 특성을 고려하여 관리할 필요가 있다. 김좌관 등(1992)은 국내 인공호소를 호소의 형태적 특성에 따라 결가지형, 하천형, 하구형, 저수지형으로 분류하고 각 호소형태에 따른 지형적, 수문학적 특성을 기술한바 있다. 농림부(2000)는 농업용 저수지를 오염원 분포에 따라 도시형, 도농복합형, 농촌형, 산간지형으로 분류하고 유형별 수질특성을 분석한바 있다. 이와 같이 수질측정망 조사결과를 활용한 연구가 이루어지고 있으나 조사결과의 활용이 충분하지 못하므로 자료의 활용성을 높이기 위해서는 다각적인 면에서의 분석이 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 우리 나라 농업용 저수지를 수질 및 형태에 따라 유형을 분류하고, 각 유형별 특성

에 대한 고찰을 통하여 수질관리방안을 제시함으로써 효율적인 농업용수 수질관리에 필요한 기초자료를 제공할 목적으로 498개 농업용수 수질측정망 대상 저수지에 대한 1990년부터 2001년까지의 조사자료를 분석하였다.

II. 재료 및 방법

1990~2001년 사이에 실시된 농업용수 수질측정망조사 대상인 498개(7개 담수호와 중간에 조사대상에서 제외된 6개 저수지 포함)의 모든 저수지에 대하여 취득할 수 있는 수질에 영향을 미치는 인자에 대한 자료로서는 유역면적, 유효저수량, 만수면적 정도였다. 모든 저수지에 대한 평균수심, 체류시간 등에 대한 자료의 제한성 때문에 본 연구에서는 저수지의 수질에 영향을 미치는 인자로서 유효저수량/만수면적비(ST/WS비, ST: Effective storage, m³; WS: Water surface, m²)를 이용하였다. ST/WS비는 저수지 유효수심의 개념이지만, 단순히 저수지의 깊이만이 아니라 저수지의 부영양화와 깊은 관계가 있는 수표면적, 저수량도 포함하고 있기 때문에 나름대로 의미가 있을 것으로 판단된다. 즉, ST/WS비가 큰 것은 상대적으로 저수용량이 크고, 저수지가 깊은 형상으로서 내부생산을 억제할 수 있는 형태인 것으로 판단할 수 있다. 반대로 ST/WS비가 작은 것은 수표면적이 크기 때문에 상대적으로 수광량이 많고, 저수지의 깊이가 얇으며, 저수용량이 적어 부영양화현상이 발생하기 쉬운 형태인 것으로 볼 수 있다.

각 저수지에 대한 ST/WS비와 COD 농도를 도시하고, 농업용수의 COD 수질 기준인 8 mg/L를 기준으로 오염된 저수지와 오염되지 않은 저수지로 구분하였다. 다음으로 ST/WS비를 이용하여 저수지의 수질이 오염되기 쉬운 형태와 오염을 억제할 수 있는 형태로 구분하였다. 이렇게 하여 분류된 각 저수지군에 대하여 유효저수량(ST), 만수면적(WS), 유역면적(DA), 총유역면적(TA), 유역면적/

만수면적비(DA/WS), 총면적/유효저수량비(TA/ST), 각 수질지표, 유역의 단위면적당 오염부하 발생량, 저수지의 단위 수표면적 및 유량당 오염부하 발생량 등을 이용하여 각각의 특징을 고찰하였다. 또한 수질항목사이의 회귀분석을 통하여 부영양화에 영향을 미치는 주 수질항목을 도출하였다. 이를 토대로 각 유형별 수질관리 방안 및 수질개선사업 우선순위(안)를 제시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 유형분류

농업용수 수질측정망조사 자료를 이용하여 측정기간 동안의 평균 COD 농도대 ST/WS비 그래프를 이용하여 저수지의 유형을 분류하였다 (Fig. 1). 호소수질환경기준 IV등급(농업용수 수질기준)에는 COD 농도가 8 mg/L 이하로 규정되어 있으므로 본 연구에서는 먼저 Fig. 1, Table 1과 같이 평균 COD 농도 8 mg/L를 기준으로 분류하였다. 다음으로 ST/WS비는 그림과 같이 ST/WS비가 10 m보다 큰 저수지는 호소수질기준인 COD 8 mg/L를 초과하는 곳은 1개이고, ST/WS비가 10~8 m 사이의 저수지는 수질기준을 초과하는 곳이 없는 것으로 나타났다. ST/WS비가 8 m 이하가 되면서 수질기준을 초과한 저수지가 증가되기 시작하고, 5 m 이하가 되면서 수질기준을 초과하는 저수지가 급격히 증가하는 경향을 나타내고 있다. 또한 ST/WS비가 10 m 이상인 저수지를 제외한 모든 저수지의 평균 ST/WS비가 5.2 m인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 ST/WS비 5 m를 기준으로 저수지를 분류하고, 편의상 각 그룹을 크게 구조개선유형과 유역환경개선유형으로 구분하고, 구조개선유형은 다시 C-I형(종합정비형), C-II형(호내정비형)으로, 유역환경개선유형은 C-III형(유역정비형), C-IV형(보전형)으로 세분하였다.

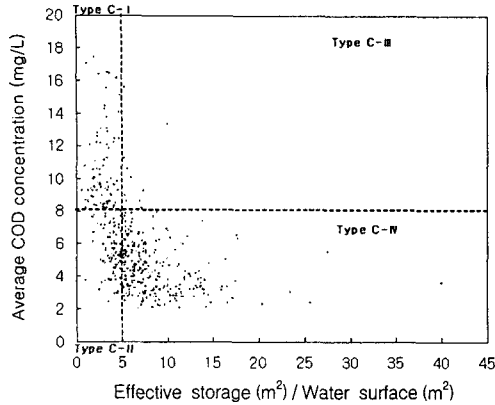


Fig. 1 Classification of agricultural reservoirs using COD and effective storage/water surface ratio

Table 1 Criteria for classification of agricultural reservoirs using COD and effective storage/water surface ratio, and number by type

Classification	Classification criteria		Number
	ST/WS ratio	Average COD	
Type C-I	≤ 5m	> 8mg/L	96(19.3%)
Type C-II	≤ 5m	≤ 8mg/L	100(20.1%)
Type C-III	> 5m	> 8mg/L	11(2.2%)
Type C-IV	> 5m	≤ 8mg/L	291(58.4%)
Total			498

2. 수질인자간의 상관성

최근 저수지의 부영양화 문제가 대두되고 있으나 농업용수 수질기준에는 부영양화지표에 대한 기준이 설정되어 있지 않아 수질개선 사업을 추진하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 저수지의 부영양화정도를 나타내는 척도인 Chl-a농도와 가장 상관성이 높은 수질인자를 도출하고자 회귀분석을 실시하였다.

Chl-a농도와 상관성을 살펴보기 위하여 회귀분석을 실시한 결과 Fig. 2~5와 같이 Chl-a와 COD가 결정계수(r^2)=0.6915로 상관성이 가장 높았고, Chl-a와 T-P가 r^2 =0.6732로 비슷한 값을

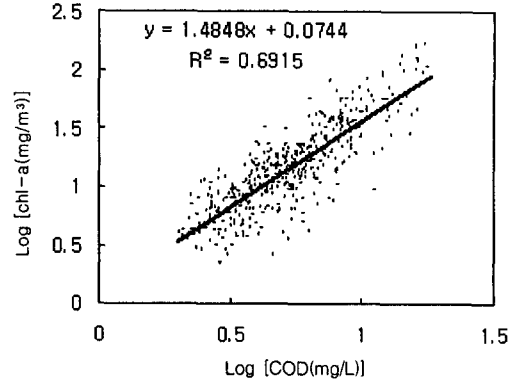


Fig. 2 Relationships between Chl-a and COD

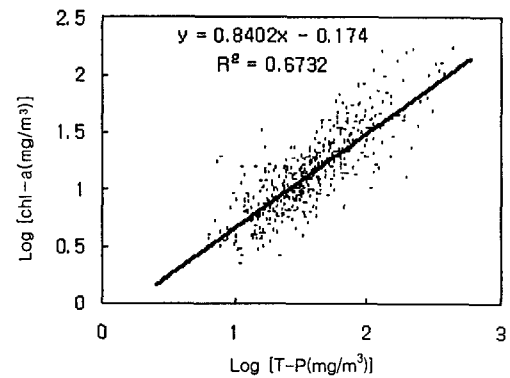


Fig. 3 Relationships between Chl-a and T-P

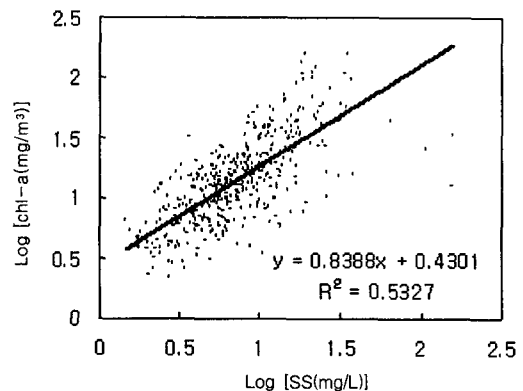


Fig. 4 Relationships between Chl-a and SS

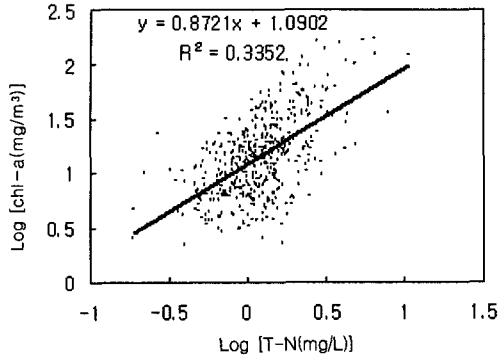


Fig. 5 Relationships between Chl-a and T-N

Table 2 Number of sites which were higher than agricultural water quality criteria

Classification	Water quality item		
	Chl-a	COD	T-P
Number of sites	118 (23.7%)	107 (21.5%)	63 (12.7%)

나타냈고, 다음으로 Chl-a와 SS가 $r^2=0.5327$, Chl-a와 T-N이 $r^2=0.3352$ 의 순으로 나타났다. 이들 값은 김중기(1996) 등이 우리나라 대형 인공호소에 대해 분석한 Chl-a와 T-P, Chl-a와 SS의 $r^2=0.62$, $r^2=0.60$ 과 비슷한 값을 보이고 있

다. 유기물 지표인 COD와 부영양화도 지표인 Chl-a가 상관성이 높게 나타난 것은 호수에서 식물플랑크톤의 광합성에 의해서 유기물이 증가되었기 때문이다. 즉 식물플랑크톤이 활발히 광합성작용을 일으키면 Chl-a 농도가 증가되고, 이 광합성작용에 의하여 이산화탄소와 물로부터 유기물이 생산되므로 COD농도가 증가되기 때문이다.

Chl-a와 COD, T-P사이에는 상관성이 비슷한 것으로 나타났기 때문에 Chl-a 농도를 잘 반영하고 있는 수질항목을 찾아보기 위하여 각 수질항목의 수질기준 초과율을 살펴본 결과 Table 2와 같았다. 즉 총 498개 대상 저수지 중에서 평균 Chl-a 농도가 25 mg/m³을 초과하여 부영양화된 것으로 분류되는 저수지는 23.7%인 118개이고, 평균 COD 농도가 8 mg/L를 초과하여 호수수질기준 IV등급을 상회하는 저수지는 21.5%인 107개로서 큰 차이가 없었다. 그러나 평균 T-P농도가 0.1 mg/L를 초과하여 수질기준을 초과하는 저수지는 12.7%로서 63개에 지나지 않는 것으로 나타났다. 이와 같이 수질기준초과율이 Chl-a와 COD는 비슷한 반면 T-P는 약 절반정도 밖에 되지 않는 것을 볼 때 T-P보다는 COD가 Chl-a 농도를 잘 반영하고 있으므로 COD농도로 분류한 각 유형은 부

Table 3 Comparison of decision coefficient and slope between regression equations on water quality

Korea				Foreign country		
	Model	r^2	Slope	Model (TP - Chl-a)	r^2	Slope
Type C- I	COD - Chl-a	0.4000	1.7401	Florida LAKEWATCH(1988) ²⁾	0.7600	1.0530
	TP - Chl-a	0.3438	0.6281	Baker et. al.(1981) ²⁾	0.7600	0.7900
Type C- II	COD - Chl-a	0.4736	1.5330	Huber et. al.(1982) ²⁾	0.7600	1.5200
	TP - Chl-a	0.4100	0.7145	Canfield(1983) ²⁾	0.7600	0.7440
Type C- III	COD - Chl-a	0.4797	1.4615	Dillon and Rigler(1974) ²⁾	0.7600	1.4490
	TP - Chl-a	0.3986	0.5599	Jones and Bachmann(1976) ²⁾	0.9800	1.4600
Type C- IV	COD - Chl-a	0.4186	1.2121	Hoyer(1981) ²⁾	0.7600	1.2400
	TP - Chl-a	0.4649	0.6910	Soballe and Kimmel(1978) ¹⁵⁾	0.3800	0.6000
An and Park ¹⁾	TP - Chl-a	0.7800	0.8300	Argentina, Quiros(1990) ¹⁵⁾	0.7800	1.0800

영양화현상도 잘 반영하므로 수질개선사업을 위한 자료로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

각 유형별 회귀식의 기울기를 살펴보면 Table 3과 같이 모든 유형에서 COD-Chl-a 회귀식의 기울기가 TP-Chl-a 회귀식의 기울기보다 크게 나타나 우리 나라 농업용 저수지의 Chl-a는 T-P보다는 COD와 민감하게 반응하는 것으로 보인다. 따라서 우리 나라의 농업용 저수지는 내부생산성이 높아 조류가 많이 증식하고 이에 따라 유기물이 증가하는 취약한 구조를 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 유형별로 볼 때 C-II형보다는 C-I형이, C-IV형보다는 C-III형이 기울기가 급한 것으로 보아 이들이 구조적으로 보다 취약한 것으로 판단된다. 우리 나라 농업용 저수지의 TP-Chl-a 회귀식의 결정계수 및 기울기가 각각 0.3438~0.4649, 0.5599~0.7145로서 대형호소인 대청호(안과 박, 2002)의 0.7800, 0.8300, 외국 호소의 0.3800~0.9800, 0.6000~1.5200에 비해 작으나, COD-Chl-a 회귀식의 기울기는 큰 것으로 보아 우리 나라 농업용 저수지는 T-P보다는 구조적 취약성의 영향으로 부영양화가 발생하는 것으로 판단된다.

3. 유형별 특성 및 수질관리 방안

가. 구조개선유형

C-I형(종합정비형)은 ST/WS비 ≤ 5 m, COD 농도 > 8 mg/L에 해당되는 저수지로서 농업용수 수질측정망 대상 저수지 총 498개 중 96개 (19.3%)가 C-I형으로 분류되었다. C-I형 저수

지는 Chl-a 농도에 따라 다시 복합원인형과 외부원인형으로 분류하였다. 즉, C-I형 저수지들 중 Chl-a 농도가 OECD에서 제시한 부영양등급 기준인 25 mg/m³보다 높은 저수지를 복합원인형, 그보다 낮은 것을 외부원인형으로 분류하였다.

복합원인형에 해당되는 저수지는 81개(C-I형의 84.4%)인데, 이 저수지들은 ST/WS비가 평균 3.0 m로서 부영양화에 취약한 구조를 갖고 있어 활발한 광합성에 의해 Chl-a 농도가 증가되고, 이에 따라 유기물이 증가되어 COD 농도도 증가된 것으로 생각할 수 있다. 뿐만 아니라 Table 4와 같이 유역에서 발생하는 오염부하량이 외부원인형에 비해 크기 때문에 저수지에 유입하는 부하량도 클 것으로 판단되는 등 내적인 원인과 외적인 원인의 복합작용에 의해 Chl-a 농도가 증가되고, 이에 따라 COD 농도도 높아져 농업용수 수질기준을 초과하고 있는 것으로 판단되어 복합원인형으로 분류하였다.

COD 농도는 수질기준인 8 mg/L보다 높으나 Chl-a 농도는 25 mg/m³보다 낮아 아직 부영양화까지는 이르지 않은 저수지들을 외부원인형으로 세부분류하였다. 외부원인형은 15개(15.6%)인데, ST/WS비가 2.6 m로 부영양화에 취약한 구조이지만 Chl-a 농도가 25 mg/m³ 이하로서 부영양화되지 않은 것으로 보아 내부생산에 의한 유기물보다는 유역에서 유입된 유기물의 영향으로 COD가 높아진 것으로 판단되어 외부원인형으로 분류하였다.

복합원인형 저수지들은 Fig. 6과 같이 외부원인형 저수지들에 비해 Chl-a와의 상관성이 높게 나

Table 4 Generated pollutant loading in the drainage area of C-I type reservoirs

Type	Storgae ($\times 10^3 m^3$)	ST/WS ratio (m)	Pollutant loading per unit water volume ($g/m^3 \cdot day$)			Pollutant loading per unit water surface ($g/m^2 \cdot day$)		
			BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
Total	3,716	2.9	0.221	0.102	0.012	0.672	0.294	0.035
Complex mechanism type	4,021	3.0	0.239	0.108	0.013	0.740	0.315	0.037
External mechanism type	2,067	2.6	0.122	0.071	0.008	0.304	0.178	0.021

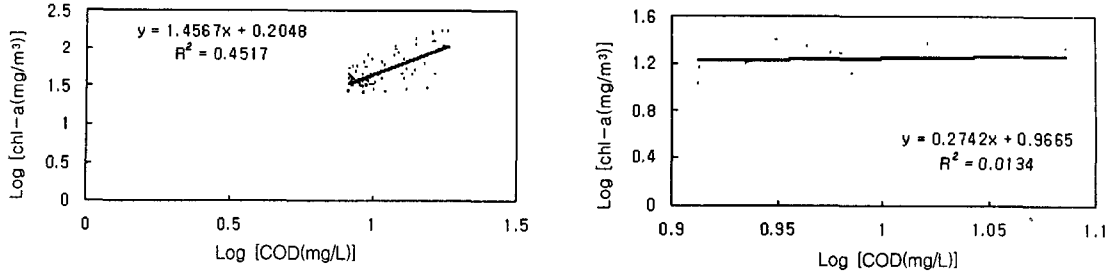


Fig. 6 Relationships between Chl-a and COD in C-I type reservoirs

타난 것으로부터도 복합원인형 저수지들의 COD 농도는 외부원인형 저수지들에 비해 내부생산에 의한 Chl-a 농도의 영향을 많이 받고 있다는 것을 알 수 있다.

외부원인형 저수지들은 Fig. 6과 같이 Chl-a와 COD의 상관성이 매우 낮은 것을 알 수 있는데, 이는 이들 저수지들의 COD는 Chl-a의 변화와 거의 관련이 없다는 것을 나타낸다. 즉 이들 저수지들의 COD는 내부적인 원인보다는 외부적인 원인의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다.

이상의 C-I형 저수지는 COD 농도가 호소수질 기준 IV등급(농업용수 수질기준)을 상회하고, 많은 저수지가 Chl-a 농도도 25 mg/m³보다 높아 부영양화가 진행되고 녹조현상이 발생하기도 하는 저수지(복합원인형)이므로 조속한 수질개선사업이 필요한 것으로 판단된다. 이들 저수지의 경우 수질개선 사업을 시행할 때에는 유입수 대책, 호내 대책에 앞서 저수지의 형태를 부영양화를 제어할 수 있는 형태로 바꾸는 것을 먼저 고려하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 즉, 우선 ST/WS비가 5 m 이상, 가능하면 8 m 이상이 되도록 저수지 바닥을 깊이 준설하거나, 또는 저수지 체체를 손상하여 ST/WS비를 크게 하여 부영양화에 의한 COD 농도 증가에 안전한 구조로 개선하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 저수지를 준설하거나 손상하면 저수용량이 증대되어 농업용수의 안정적인 양적확보 면에서도 유리할 것으로 판단된다.

또한 저수지에 따라서는 구조적인 문제 외에 유

역에서의 유입부하가 커서 수질이 악화(외부원인형)되는 경우도 있으므로 C-I형 저수지의 경우에는 보다 세밀한 현장조사를 통하여 저수지를 수심이 깊은 형태로 개선하는 사업에 병행하여 호내대책 및 유입수 대책도 도입하는 등 종합적인 수질개선대책을 세우고, 시행해 나가는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 앞으로 저수지를 축조할 경우에는 토목적인 경제성만이 아니라 부영양화 등의 수질문제도 고려하여 ST/WS비가 5 m~6 m 이상(가능하면 8 m 이상)이 되게 즉, 수표면적에 비해 수심을 깊게 계획하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 이 결과는 호소의 Chl-a 농도가 12 mg/m³ 이상인 호소를 부영양호라 한다면 일본의 경우 평균수심 약 8m 이하이면 호소가 부영양화될 소지가 있다고 한 대한환경공학회(1999)의 지적과 표현항목이 달라 직접 비교는 곤란하지만 유사성 있는 결과라 할 수 있다.

C-II형(호내정비형) 저수지는 ST/WS비가 5 m 이하이고, COD 농도는 8 mg/L 이하로서 농업용수 수질기준을 만족하는 저수지로서 100개(20.1%) 저수지가 이에 해당된다. 이 저수지들은 농업용수 수질기준을 만족하기는 하지만 일부 저수지(14개)는 Chl-a 농도가 25 mg/m³ 이상으로 부영양화가 진행되었다. 또한 이 14개 저수지 이외의 저수지들도 ST/WS비가 5 m 이하로서 구조상 부영양화에 취약한 구조이기 때문에 수질이 악화될 가능성이 높다. 따라서 가능하면 체체를 손상하거나 깊이 준설하여 ST/WS비를 크게 하여 구조를 개선하는 것

이 좋을 것으로 판단된다. 주위 환경상 저수지의 수질이 악화되는 경우라면 호내 또는 유입수 대책을 수립하여 수질을 개선해 나가는 것이 좋을 것으로 판단된다.

이상과 같이 ST/WS비가 5 m 이하인 저수지들을 COD 농도에 따라 C-I, C-II형으로 분류하였는데, 이들 저수지의 COD 농도에 영향을 미치는 원인을 찾아보기 위하여 Table 5와 같이 유형별 저수지의 유역 및 영양염류 특성을 살펴보았다. C-I형과 C-II형 저수지들은 평균 ST/WS비가 각각 2.9 m와 3.9 m로서 C-I형 저수지들이 1.0 m 작게 나타나 수질오염에 매우 취약한 것으로 나타났다. 또한 저수지의 수질에 영향을 미치는 것으로 알려진 DA/WS비, TA/ST비의 경우는 C-I형 저수지의 평균값은 각각 80.8, 39.3으로서 C-II형 저수지의 47.3, 12.8에 비해 높게 나타나 C-I형 저수지들이 유역으로부터의 유입부하의 영향도 많

이 받을 수 있는 유역특성을 갖고 있다(김 등, 1992). 영양염류의 특성을 살펴보면 TN/TP비가 각각 19.2, 32.6으로서 두 유형 모두 인이 제한인자인 것으로 나타났다. 또한 평균 T-P농도는 각각 131.6, 50.1 mg/m³로서 농업용수의 COD 기준을 초과한 C-I형은 T-P농도도 농업용수 수질기준인 100 mg/m³를 초과하는 것으로 나타났다.

유역의 오염부하발생량도 Table 6과 같이 C-I형이 C-II형에 비해 높게 나타났다. 즉, 유역에서 저수지의 단위유량당 평균 BOD, T-N, T-P 발생부하량은 C-I형 저수지가 각각 0.221, 0.102, 0.012 g/m³·day로서 C-II형 저수지의 0.085, 0.066, 0.006 g/m³·day에 비해 높았다. 그리고 저수지 단위수면적당 발생부하량도 C-I형 저수지의 경우 BOD, T-N, T-P가 각각 0.672, 0.294, 0.035 g/m²·day로서 C-II형 저수지의 0.303, 0.232, 0.021 g/m²·day에 비해 높았다. 또한 유

Table 5 Characteristics of drainage area and nutrient according to reservoir type

Type	Average storage (ST, ×10 ³ m ³)	Average water surface (WS, ha)	Average drainage area (DA, ha)	Average total area* (TA, ha)	DA/WS ratio (ha/ha)	TA/ST ratio (m ² /m ³)	ST/WS ratio (m ³ /m ²)	Average T-P con. (mg/m ³)	Average TN/TP ratio
Type C-I	3715.8	141.9	4953.5	5095.4	80.8	39.3	2.9	131.6	19.2
Type C-II	3371.9	100.7	4115.6	4216.3	47.3	12.8	3.9	50.1	32.6
Type C-III	1533.5	25.9	1085.5	1111.4	48.0	7.6	6.4	104.1	21.5
Type C-IV	4919.6	55.3	2893.9	2949.2	54.0	6.9	8.7	30.2	45.7

* : Average total area = Average water surface + Average drainage area

Table 6 Generated pollutant loading in drainage area according to reservoir type

Type	Pollutant loading per unit water volume (g/m ³ ·day)			Pollutant loading per unit water surface (g/m ² ·day)			Pollutant loading per unit drainage area (g/m ² ·day)		
	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
Type C-I	0.221	0.102	0.012	0.672	0.294	0.035	0.031	0.016	0.002
Type C-II	0.085	0.066	0.006	0.303	0.232	0.021	0.008	0.006	0.001
Type C-III	0.179	0.101	0.017	1.529	0.839	0.147	0.023	0.013	0.002
Type C-IV	0.033	0.027	0.003	0.253	0.211	0.019	0.006	0.004	0.0004

역의 단위 면적당 오염부하발생량도 C-I형이 각각 0.031, 0.016, 0.002 $g/m^2 \cdot day$ 로서 C-II형의 0.008, 0.006, 0.001 $g/m^2 \cdot day$ 에 비해 높았다. 이는 C-I형 저수지가 C-II형 저수지에 비해 유역으로부터 발생하는 오염부하량이 많고, 이의 유입으로 C-I형 저수지가 수질이 나빠질 가능성이 높다는 것을 보여주는 것이라 할 수 있다.

이상과 같이 C-I형 저수지들은 C-II형 저수지들에 비해 유역면적이 넓고, 또한 오염부하 발생량도 많아 오염되기 쉬울 뿐만 아니라 수심에 비해 수표면적이 넓어 구조적으로도 부영양화에 취약한 저수지들이므로 나타났다. 따라서 C-I형 저수지는 종합적으로 정비하고, C-II형 저수지들은 수심이 깊은 형태로 개선해야 할 것으로 판단된다.

나. 유역환경개선유형

C-III형(유역정비형) 저수지는 ST/WS비 > 5 m, COD 농도 > 8 mg/L로 농업용수 수질기준을 초과하는 저수지로서 11개(2.2%) 저수지가 여기에 포함된다. 이 C-III형 저수지들은 Table 5와 같이 저수량, 수표면적, 유역면적이 다른 유형에 비해 매우 작은 소형저수지인 반면, Table 6과 같이 저수지 수면적당 유역의 BOD, T-N, T-P 오염부하 발생량이 각각 1.529, 0.839, 0.147 $g/m^2 \cdot day$ 로서 다른 3가지 유형에 비해 상당히 높은 것을 알 수 있다. 또한 유역의 단위면적당, 저수지의 단위수면적당 및 단위유량당 BOD, T-N, T-P 발생부하가 C-III형은 각각 0.023, 0.013, 0.002, 1.529, 0.839, 0.147 $g/m^2 \cdot day$, 0.179, 0.101, 0.017 $g/m^3 \cdot day$ 로서 C-IV형의 0.006, 0.004, 0.0004, 0.253, 0.211, 0.019 $g/m^2 \cdot day$, 0.033, 0.027, 0.003 $g/m^3 \cdot day$ 에 비해 높은 것으로 나타났다. 따라서 C-III형 저수지는 구조적으로는 비교적 안전한 반면, 대부분 소형저수지이고 C-IV형에 비해 유역으로부터 오염부하가 많이 발생하고, 발생된 부하가 저수지로 유입할 조건에 있는 것으로 볼 수 있으며, 이는 이들 저수지의 COD 농도를

높이는 원인으로 작용하는 것으로 판단된다. 따라서 이들 저수지들의 수질을 개선하기 위해서는 발생부하가 저수지의 유입부하로 작용하지 않도록 점 및 비점 오염원 대책을 세우는 등 유역을 정비하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

C-IV형(보전형) 저수지는 ST/WS비 > 5 m, COD 농도 ≤ 8 mg/L에 해당되는 저수지로서 수표면에 비해 수심이 깊어 구조적으로도 안전하고, 수질도 양호하여 농업용수 수질기준을 만족하는 저수지로서 291개소(58.4%)가 이에 해당된다. 이들 저수지들은 오염배출부하가 증가되지 않도록 오염원을 적절히 관리하는 것만으로도 현재의 양호한 수질상태를 보전할 수 있을 것으로 판단된다.

COD 농도가 농업용수 수질기준을 초과하는 C-III형 저수지들은 Table 5와 같이 T-P 농도도 수질기준을 초과하는 것으로 나타났으나, C-IV형은 COD, T-P 모두 수질기준을 만족하는 것으로 나타났다. TN/TP비는 C-III형과 C-IV형이 각각 21.5와 45.7로서 제한 영양염류는 모두 인인 것으로 나타났다.

이상과 같이 농업용수 수질측정망 조사 대상 저수지 498개 중 COD 농도가 농업용수 수질기준을 초과하여 수질개선사업이 필요한 C-I, C-III형 저수지는 107개인 것으로 나타났다. 수질개선을 위해서는 C-I형의 경우는 종합적인 수질개선대책을, C-III의 경우는 유역정비를 중심으로 한 수질개선대책을 수립하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 또한 저수지의 형태가 부영양화에 취약하여 내부생산에 의해 저수지의 수질이 악화될 가능성이 매우 높은 C-II형 저수지도 100개에 이르는 것으로 나타났다. 구조가 취약한 것으로 분류된 C-I형 저수지의 수질을 개선하고, C-II형 저수지의 수질악화를 방지하기 위해서는 ST/WS비를 5~6 m 이상, 가능하면 8 m 이상이 되도록 저수지를 깊이 준설하거나 제체를 승상하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

4. 수질개선사업 우선순위(안)

수질개선사업을 추진할 경우 어느 유형에 우선순위를 두어야 하는가에 대한 문제에 부닥치게 되는데, 우선은 수질이 기준을 초과하는 C-I형과 C-III형이 수질개선사업대상이 된다. Table 5와 같이 C-I형에 비해 C-III형은 저수량, 수표면적, 유역면적이 작기 때문에 유역 및 저수지를 정비하고 관리하기에 용이할 것으로 판단된다. 반면 Table 6과 같이 작은 유역에서 많은 부하가 발생되고 있으므로 발생한 부하를 관리하기도 쉬울 것으로 판단된다. 따라서 C-III 저수지들을 우선 정비하는 것이 유리할 것으로 판단되고, C-III형은 주 오염원인이 유역으로부터 유입된 부하인 것으로 판단되기 때문에 유역을 중심으로 정비하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 그러나 유역을 정비하기 위해서는 저수지관리주체(농업기반공사)만이 아니라 환경부, 지자체, 지역주민들과의 협의 과정이 필요하다. 따라서 수질개선사업의 진행속도가 늦어질 수밖에 없는 단점이 있다. 반면 C-I형의 대부분을 차지하고 있는 복합원인형(84.4%)의 경우 저수지관리주체(농업기반공사)만으로 준설, 송상 등의 수질개선사업을 시행할 수 있기 때문에 사업을 신속히 진행할 수 있다는 장점이 있다. 이상과 같은 내용을 종합할 때 저수지관리주체(농업기반공사)가 수질개선사업을 추진할 경우에는 C-I형(복합원인형)을 우선 정비하면서 한편으로 관련기관과 협의하면서 C-III형 및 C-I형(외부원인형)의 순으로 정비해 나가는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 즉 C-I형[종합정비형(복합원인형)] → C-III형[유역정비형] → C-I형[종합정비형(외부원인형)] → C-II형(호내정비형) → C-IV형(보전형)의 순으로 정비해 나가는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

저수지의 효율적인 수질개선과 관리를 위한 기초 자료를 제공하기 위하여 498(현재 492)개 저수지의 농업용수 수질측정망 자료를 분석하여 유형분류를 시도하고, 각 유형별 수질개선방안, 관리방안을

제시하였다. 측정회수(현 연 2회)와 자료의 제약(예를 들면 저수지의 내용적, 평균수심, 유역특성 등) 때문에 미비한 부분이 있지만 수질개선사업계획을 수립하고, 시행하는 데에 이용될 수 있을 것으로 생각된다. 앞으로 농업용수 수질측정망 자료의 활용성을 높이기 위해서는 측정빈도의 증대(적어도 연 4회 이상), 투명도, 수심과 기타 내용적자료, 평균수심, 유역특성 등에 대한 조사도 이루어지는 것이 좋을 것으로 판단된다. 또한 앞으로 더 많은 현장조사 및 자료수집을 통해 세밀한 분석과 검증절차를 거쳐 보다 과학적으로 유형화해야겠지만, 이상의 결과는 저수지를 신속하거나 수질개선대책을 수립하는 데에는 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

효율적인 농업용수의 수질관리에 필요한 기초자료를 제공하고자 498개 농업용수 수질측정망 대상 저수지에 대한 1990년부터 2001년까지의 조사자료를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

우리 나라 농업용 저수지의 수질은 유효저수량/만수면적비(ST/WS비)의 영향을 많이 받는 것으로 나타났는데, ST/WS비가 5 m 이하인 많은 저수지가 농업용수 수질기준을 초과한 것으로 나타난 것으로 보아 저수지의 수질관리를 위해서는 ST/WS비를 5~6 m 이상, 가능하면 8 m 이상으로 축조 또는 개수하는 것이 좋은 것으로 나타났다.

Chl-a와 COD 및 T-P의 관계를 회귀분석한 결과 결정계수(r^2)는 각각 0.6915, 0.6732로 COD가 높고, 회귀식의 기울기도 COD가 큰 것으로 나타났으며, 수질기준 초과율도 T-P보다 COD가 Chl-a와 비슷한 결과를 나타내는 등 COD 농도가 Chl-a 농도를 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 부영양화 지표인 Chl-a는 호소수질기준 적용항목에 포함되지 않아 법적인 근거가 없으므로 참고자료로 이용하고, 호수수질기준 항목에 포함되어 있을 뿐만 아니라 우리 나라 농업용 저수지의 특성상

Chl-a와의 상관성이 높은 COD를 대표수질항목으로 하여 유형을 분류하고 수질개선사업을 추진하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

COD와 ST/WS비를 이용하여 저수지의 유형을 분류한 결과 복합적 대책이 요구되는 종합정비형, 호내정비만으로 수질개선이 가능한 호내정비형, 유역으로부터의 유입부하를 억제함으로써 수질개선이 가능한 유역관리형, 수질 및 구조가 양호한 보전형으로 분류할 수 있었다. 유형별 수질개선우선순위는 저수지관리주체(농업기반공사)가 시행하는 경우 종합정비형(복합원인형) → 유역정비형 → 종합정비형(외부원인형) → 호내정비형 → 보전형의 순으로 실시하는 것이 좋을 것으로 판단되었다.

이상의 결과는 제한된 자료를 분석한 결과이므로 앞으로 보다 많은 자료의 축적과 이의 분석을 통하여 보다 효과적인 농업용수 수질관리방안을 수립해 나가야 할 것이다.

본 연구는 농업기반공사 자체자금에 의해 수행된 연구결과의 일부임

References

1. An, K. G. and S. S. Park. 2002. Indirect influence of the summer monsoon on chlorophyll-total phosphorus models in reservoirs: a case study. *Ecological modelling*. 152(2-3). 191-203.
2. Brown C. D., M. V. Hoyer, R. W. Bachmann, and D. E. Canfield. 2000. Nutrient-chlorophyll relationships : an evaluation of empirical nutrient-chlorophyll models using Florida and north-temperate lake data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* Vol. 57. 1574-1583.
3. Hwang, S. J., J. H. Jeon, J. H. Ham and H. S. Kim. 2002. Effect of physical characteristics on a nutrient-Chlorophyll Relationship in Korean Reservoirs, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 44(7). 64-73. (in Korean)
4. Jeon, J. H., C. G. Yoon, J. H. Ham and S. J. Hwang. 2002a. Effects of physical parameters on water quality in agricultural reservoirs. *Korean Journal of Limnology*. 35(1). 28-35.
5. Jeon, J. H., C. G. Yoon, H. I. Kim and S. J. Hwang. 2002b. Study on the relationships among water quality parameters in agricultural reservoirs, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 44(3). 136-145. (in Korean)
6. Kim, H. I. 2002. A study on the water quality and physical characteristics of agricultural reservoirs. M.S. diss. Seoul. Konkuk University. (in Korean)
7. Kim, J. K. and W. H. Hong. 1992. Studies on the physical environmental factor analysis for water quality management in Man-made lake of Korea, *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*. 1(2). 49-57. (in Korean)
8. Kim, S. J. 1999. The variations of water quality in agricultural reservoirs. MS diss. Cheonnam. Wonkwang University. (in Korean)
9. Kim, S. K. 2002. Effective use and Management of Agricultural Water. *Rural and Environmental Engineering Journal*. No. 75. 14-21.
10. Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation. 2002. A program for the restoration and improvement of reservoir water quality(final). Uiwang. Kyeonggi. KARICO. (in Korean)
11. Korea water resources corporation. 2003. Water Resources in Korea. <http://www.kowaco.or.kr>.
12. Ministry of Agriculture and Forestry, Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation. 2000. Report on the water quality

- survey network for agricultural water. Uiwang. Kyeonggi. KARICO. (in Korean)
13. Ministry of Agriculture and Forestry, Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation. 2001. Report on the water quality survey network for agricultural water. Uiwang. Kyeonggi. KARICO. (in Korean)
 14. Ministry of Agriculture and Forestry, Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation. 2002. Report on the water quality survey network for agricultural water. Uiwang. Kyeonggi. KARICO. (in Korean)
 15. Soballe, D. M. and B. L. Kimmel. 1987. A Large-Scale Comparison of Factors Influencing Phytoplankton Abundance in Rivers, Lakes, and Impoundments. *Ecology*. 68(6). 1943-1954.
 16. The Korean society of environmental engineering. 1999. Water quality management in lakes. Seoul. Pungnam. 349. (in Korean)
 17. Vollenweider, R. A. 1968. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. Technical Report DAS/CSI/68.27. Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, France.
 18. Vollenweider, R. A. 1975. Input-output Models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology, *Schweiz. A. Hydrol.* 37. 53-84.