

한강수계 농업용저수지 관리방안

김호섭[†] · 공동수 · 정동일 · 황순진*

국립환경과학원
*건국대학교 환경학과

Management Measures for the Control of Agricultural Reservoirs in Han River Watershed

Ho-Sub Kim[†] · Dong-Soo Kong · Dong-Il Jung · Soon-Jin Hwang*

National Institute of Environmental Research
*Department of Environmental Science, Konkuk University
(Received 3 March 2009, Revised 23 March 2009, Accepted 1 April 2009)

Abstract

This study was carried out to assess water quality and to introduce the management measures for water quality improvement with the collected data from 87 agricultural reservoirs in Han river watershed. According to the water quality criteria (WQC) for lake based on the COD, TP, TN and chl.a concentration, 18, 16, 4 and 19 of 87 reservoirs exceed class IV, respectively. Based on the trophic state index (TSI) with chl.a concentration, 51 of selected reservoirs appeared to be eutrophic. Phosphorus was limiting nutrient on algal growth in 58 reservoirs. TP, chl.a and COD concentration in 23 of 49 agricultural reservoirs with chl.a concentration $\geq 25 \mu\text{g/L}$ and eutrophic exceed class IV by WQC. Also, the mean depth in 21 of 23 reservoirs was below 5m. Our results suggest that advanced wastewater treatment and crop land control in watershed of reservoirs with TP concentration $\geq 0.1 \text{ mg/L}$ would be a effective tool to improve water quality. Dredging would to be effective measure in reservoirs with mean depth $< 5 \text{ m}$ and relatively old age. In reservoirs with chl.a concentration $\geq 50 \mu\text{g/L}$, application of technique such dissolved air flotation (DAF) and P inactivation be effective to improve water quality by removing particulate matters in water column. The management measure to control inflow such as sedimentation basin, Pre-dam and diversion would to be application in reservoirs with shallow depth, while large watershed and surface area.

keywords : Agricultural reservoirs, Han river watershed, Limiting nutrient, Trophic state index (TSI), Water quality criteria (WQC)

1. 서론

저수지의 수질은 기후, 오염발생원, 지형, 저수지 규모 등과 같은 다양한 요인들에 대한 반응의 결과로 이해되고 있다(Carmack et al., 1979; EPA, 1974; William et al., 1987). 수질관리는 수 환경에서 나타나는 여러 가지 문제들의 해결을 목적으로 하며, 이를 위해서는 현재 수질에 대한 정확한 진단과 문제점을 야기한 가장 중요한 원인을 규명하는 것이 중요하다. 수질과 관련된 문제의 원인이 규명되면 수질관리를 위한 적용기술은 수질관리의 목표를 달성할 수 있는 가에 초점을 두고 선택될 수 있을 것이다.

수질보전이나 개선을 위한 목표는 사람의 건강, 생활환경의 보전 및 부영양화 정도, 생물보전 등 목적에 부합될 수 있도록 설정될 필요가 있다. 즉 수체의 이용목적별로 여러 가지 안전성 등을 고려하고 대상수역의 현재 및 미래의 수

질을 경제적, 사회적인 측면에서 종합적으로 검토한 후 달성 가능한 목표를 설정할 필요가 있다. 수질관리 정책수립에 있어 단기적인 목표는 그 효과에 대한 불확실성으로 방법상의 원칙이 바뀌므로 인해 노력과 경비가 중복적으로 투자될 수 있는 가능성이 있기 때문에 장기적인 목표설정 및 방향설정 등이 필요하다. 이를 위해서는 지속적인 모니터링을 통해 수생태계 건강성에 대한 정확한 진단과 수질문제의 원인을 파악하는 것이 중요하며 수질과 관련된 문제들을 세부적으로 정량화하거나 예측하여 효과가 가장 큰 문제의 해결을 목적으로 한 수질개선대책을 마련하는 것이 바람직할 것이다.

국내에는 18,000여개의 저수지가 분포하고 있으며, 1990년대 이후 부영양화를 경험하고 있는 저수지가 증가하고 있다(농림부 농업기반공사, 2001). 대형 댐호에 비해 농업용 저수지의 수 환경 및 유역환경을 이해하기에 활용 가능한 자료는 전체 저수지 중 일부에 국한되어 있을 뿐만 아니라 수질도 연 2회 측정에 불과하다. 수질이 다양한 요인에 의해 결정된다는 점을 고려할 때, 농업용 저수지 수생태계에 대한 총체적 평가는 어려운 것이 현실이다. 이러한

[†] To whom correspondence should be addressed.
skylike@korea.kr

현실에서 기 활용 가능한 자료를 토대로 수질이 유사한 유형의 저수지를 분류하고 가장 수질이 악화된 저수지를 중심으로 관리의 목표와 수질개선의 대안을 마련하는 것은 농업용 저수지를 관리함에 있어 매우 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 한강수계 분포하고 있는 농업용 저수지를 대상으로 수질 및 영양상태를 평가하여 증점관리가 필요한

저수지를 선별하고, 이들 저수지의 관리대상물질과 저수지별 환경특성을 고려한 수질개선방안을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 대상저수지

본 연구는 한강수계 내 환경부 수질측정망이 운영되고

Table 1. Location, reservoir surface area (SA), drainage area (DA) and completion of reservoir (CR) in 87 agriculture reservoirs

Category	Location (province)	Name (Reservoir)	SA (km ²)	DA (km ²)	CR (year)	Category	Location (province)	Name (Reservoir)	SA (km ²)	DA (km ²)	CR (year)
1	Cheolwon	Hak	1.8	26.0	1945	45	Gunpo	Banweol	0.5	12.2	1957
2	Hoengseong	Wochun	0.3	30.4	1961	46	Yangju	Hyochoon	0.4	7.0	1982
3	Wonju	Heungup	0.3	17.5	1962	47	Gwangju	Hongjung	0.2	7.1	1957
4	Gangneung	Okgye	0.4	23.4	1978	48	Pyeongtaek	Pyeongtaek	24.3	1,634.0	1973
5	Hongcheon	Gaewoon	0.2	4.9	1975	49	Hwaseong	Duckwo	1.1	22.7	1949
6	Gangneung	Hyang	0.2	3.2	1987	50	Yangpyeong	Hyangri	0.1	3.6	1945
7	Gangneung	Changhyun	0.4	11.5	1947	51	Yeoju	Samhap	0.1	1.7	1945
8	Yanggu	Weolwoon	0.2	10.4	1962	52	Pocheon	Wokeum	0.2	5.2	1958
9	Gangneung	Sinwang	0.2	26.8	1961	53	Yeoju	Heungaso	0.2	6.3	1945
10	Wonju	Sonkok	0.2	9.9	1984	54	Paju	Yeunpung	0.2	8.9	1960
11	Wonju	Gungchon	0.2	13.4	1971	55	Hwaseong	Namyang	7.7	209.0	1973
12	Samcheok	Chodang	0.2	4.4	1969	56	Anseong	Chilkok	0.2	3.9	1958
13	Gangneung	Kyungpo	0.2	11.8	1972	57	Yongin	Yongduck	0.2	12.5	1959
14	Wonju	Bangye	0.3	25.0	1958	58	Suwon	Wonchun	0.5	9.3	1929
15	Pyeongchang	Gyechon	0.0	19.0	1994	59	Suwon	Sindae	0.3	6.5	1929
16	Chuncheon	Joyeun	0.2	14.7	1949	60	Pocheon	Keumju	0.2	8.2	1981
17	Wonju	Chwibyeong	0.1	7.3	1971	61	Yongin	Giheung	2.3	53.0	1964
18	Goseong	Songkang	0.3	12.5	1975	62	Yangpyeong	Daepyeong	0.1	7.0	1962
19	Wonju	Daeon	0.1	5.7	1998	63	Hwaseong	Bangkyo	0.1	4.0	1945
20	Cheorwon	Yonghwa	0.3	14.0	1960	64	Yongin	Idong	3.3	93.0	1972
21	Hongcheon	Daeryong	0.2	11.3	1957	65	Anseong	Gosam	2.8	71.0	1963
22	Gangneung	Dongmak	0.1	18.0	1961	66	Anseong	Ducksan	0.3	4.9	1991
23	Hongcheon	Gurun	0.2	9.9	1977	67	Paju	Balrang	0.2	18.8	1976
24	Hoengseong	Owon	0.1	15.0	1977	68	Gwangju	Docheok	0.1	9.8	1975
25	Hongcheon	Sangan	0.1	5.0	1982	69	Anseong	Yongseol	0.5	7.9	1985
26	Hongcheon	Saengkok	0.2	13.1	1985	70	Namyangju	Onam	0.6	15.5	1985
27	Goseong	Hakpyeong	0.1	14.2	1963	71	Yangju	Bongam	0.2	3.4	1979
28	Goseong	Dowon	0.3	26.1	1969	72	Yongin	Duchang	0.2	2.8	1992
29	Chuncheon	Sinmae	0.2	10.6	1985	73	Yangju	Gisan	0.1	8.7	1979
30	Gangneung	Sachun	0.2	22.8	1985	74	Pocheon	Gomo	0.2	4.0	1984
31	Chuncheon	Wonchang	0.2	13.0	1998	75	Anseong	Keumgwang	1.5	48.3	1961
32	Yangyang	Seolrak	0.1	15.6	1980	76	Yeoncheon	Baekhak	0.2	10.0	1969
33	Gangneung	Obong	0.9	109.0	1983	77	Anseong	Changgye	0.1	2.3	1986
34	Hwaseong	Dongbang	0.6	6.3	1939	78	Yangju	Wondang	0.2	3.4	1979
35	Hwaseong	Myeokwo	0.5	8.3	1945	79	Yangju	Duckgye	0.1	2.4	1979
36	Paju	Gongneung	0.4	16.4	1966	80	Pocheon	Gisan	0.1	8.7	1979
37	Uiwang	Wangsong	1.0	15.6	1948	81	Anseong	Cheongyong	0.2	7.3	1974
38	Icheon	Seolsung	0.5	6.2	1958	82	Anseong	Gwanghye	0.4	10.4	1988
39	Anseong	Mansu	0.2	3.8	1945	83	Anseong	Misan	0.2	4.4	1985
40	Hwaseong	Botong	0.5	7.2	1955	84	Anseong	Madun	0.4	12.4	1975
41	Hwaseong	Eochun	0.2	3.8	1956	85	Paju	Maji	0.5	14.2	1980
42	Icheon	Yongpung	0.3	5.0	1946	86	Pocheon	Sanjung	0.3	15.4	1945
43	Yongin	Yongdam	0.4	7.7	1978	87	Yeoju	Changheung	0.2	7.9	1995
44	Siheung	Heungbu	0.6	13.2	1944						

있는 농업용저수지 중 강원도 33개소(category 1~33), 경기도 54개소 저수지(category 34~87)를 대상으로 하였다(Table 1). 대상저수지에서 1998년부터 2003년까지 측정된 수질자료를 활용하였고 평균수심은 저수용량대비 수표면적의 비로 산정하였으며, 토지이용현황은 2003년 자료를 활용하였다(농림부 농업기반공사, 2003).

2.2. 수질평가

수질평가는 수질측정 자료(TP, chl.a, COD)의 평균값을 호소생활환경기준에 따라 평가하였다. 본 연구에서 목표수질은 농업용수 사용기준인 호소 생활환경기준 IV등급으로 하였다. 부영양화도 평가는 엽록소 *a* 농도를 이용하여 Carlson(1977)이 제시한 방법에 따라 부영양화도지수(Trophic State Index: TSI)를 계산한 후(식 (1)) Kratzer와 Brezonik(1981)가 제시한 기준에 따라 평가하였다(TSI \geq 53 부영양화, 40<TSI<53 중영양화, TSI \leq 40 빈영양화).

$$TSI(chl.a)=10x[6-(2.04-0.68 \ln chl.a)/\ln 2] \quad (1)$$

2.3. 관리대상저수지 및 대상물질 선정

관리대상저수지선정을 위해 조사대상저수지를 수심(5 m)과 엽록소 *a* 농도의 OECD 기준(년 중 최대 엽록소 *a* 농도가 25 μ g/L 이상이면 부영양화)을 적용하여 유형을 구분하였다. 수심이 5 m 미만이고 엽록소 *a* 농도가 25 μ g/L 미만인 저수지는 유형 I, 수심 5 m 미만이고 엽록소 *a* 농도가 25 μ g/L 이상 인 저수지는 유형 II, 수심 5 m 이상이며 엽록소 *a* 농도가 25 μ g/L 이상인 저수지는 유형 III 그리고 수심 5 m 이상이며 엽록소 *a* 농도가 25 μ g/L 미만인 저수지는 유형 IV로 구분하였다.

대상물질은 식물플랑크톤의 성장에 제한영양염으로 알려진 인과 질소 중 해당저수지의 TP농도, TN농도 및 엽록소 *a* 농도로 계산된 TSI지수간의 편차분석을 통해 제한가능성이 있는 영양염을 선정하였다. TP와 TN 농도를 이용한 TSI 지수는 각각 Carlson (1977)(식 (2))과 Kratzer와 Brezonik (1981) (식 (3))가 제시한 방법에 계산하였다. TSI 편차분석 방법은 수질 항목별 지수값의 차이로부터 조류성장을 제한하는 요인들을 간접적으로 평가하는 방법으로(Havens, 2000), 본 연구에서는 엽록소 *a* 농도로부터 계산된 부영양지수가 총인과 총질소로 산정된 지수보다 큰 경우 식물플랑크톤 성장이 영양염에 의해 제한되는 것으로 판단하였다.

$$TSI(TP)=10x[6-(\ln(48/TP))/\ln 2] \quad (2)$$

$$TSI(TN)=10x[6-(\ln(1.47/TN))\times \ln 2] \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 수질현황

조사 대상 저수지 수질항목별 호소 생활환경기준 4등급 달성도 평가에서는 TN농도의 경우 TN/TP 비가 16이하인

5개 저수지(6, 34, 39, 50, 65) 중 4개소가 초과하였으며, 엽록소 *a* 농도, COD, TP 순으로 초과율이 높았다(Table 2). 호소 생활환경기준 4등급 초과 저수지는 COD기준 18개소(20.7%), TP기준 16개소(18.4%), 엽록소 *a*기준 19개소(21.8%)였으며 68개(78.2%)저수지에서 TN 농도는 4등급 이상의 수준을 나타냈다.

엽록소 *a* 농도의 TSI 지수에 의한 영양상태 평가에서는 조사대상 저수지 중 51개소가 부영양 상태였으며 빈영양 상태의 저수지는 1개소였다(Fig. 1). 부영양저수지의 지역별 분포는 경기도 42개소, 강원도 9개소였다. 경기도 관내 저수지의 평균 수심은 강원도 내 평균수심은 7.4 m 보다 얕은 5.1 m이며, 유역 내 농경지 면적비가 강원도 평균 6.0, 경기도 평균 17.6으로 3배 정도 컸다(Fig. 2). 수심은 퇴적물로부터 용출된 영양염의 이용율과 생산층의 넓이를 결정하는 형태학적 요소로 낮을수록 유기물생산력은 증가될 수 있다(Ryder et al., 1974; Sakamoto, 1966). 또한 유역 내에서 농경활동 등은 유역 내 오염물질 발생량을 결정할 수 있으므로, 상대적으로 얕은 수심과 농경지 면적이 넓은 유역특성은 집수역의 부영양화 가능성을 높이는 요인이 될 수 있을 것이다(김호섭 등, 2007; 김호섭과 황순진, 2004; 윤준경 등, 2007; 이새봄 등, 2007). 국내 분포하고 있는 480개 농업용저수지를 대상으로 한 선행 연구에서도 수심이 얕고(5 m 이하) 유역 내 논과 밭으로의 이용면적 넓을수록 부영양화 가능성이 높은 것으로 평가된 바 있다(김호섭 등, 2007). 이는 농업용저수지의 부영양화가 얕은 수심의 형태학적 특성과 유역 내 상대적으로 넓은 농경지면적과 관련이 있음을 시사한다.

3.2. 관리대상저수지 및 대상물질

TSI 편차분석을 통한 제한영양염 평가에서 식물플랑크톤 성장의 주요 제한영양염은 인으로 평가되었다. 대상저수지 중 총 58개소에서 인 제한 가능성이 제시되었으며, 인과 질소 모두가 제한가능성이 있는 저수지는 15개 저수지였다(Table 3). 단지 질소만이 식물플랑크톤 성장을 제한하는 것으로 평가된 저수지는 없었다. 연구대상저수지중 TN/TP 농도비가 16 미만으로 TN 농도를 수질환경기준으로 평가할 수 있는 저수지 5곳(6, 34, 39, 50, 65) 모두에서도 인과 질소 모두가 제한가능성이 있는 것으로 평가되었다. 이는 대부분 부영양화된 저수지에서 TN은 TP에 비해 상대적으로 많은 양이 존재하고 있어 식물플랑크톤 성장에 있어 질소의 제한가능성은 매우 낮음을 의미한다. 김범철 등(2007)은 국내 대부분의 호소에서 수중 내 질소는 자연배경농도가 높기 때문에 인위적인 질소 발생원을 제거 한다고 해도 식물플랑크톤 성장을 억제하는 효과는 미비함을 시사한 바 있다. 국내 호소에서 질소의 자연배경 농도가 높은 원인은 불분명 하지만 유역으로부터 집수역으로 유입되는 질소의 양도 인에 비해 상대적으로 많은 것으로 보고된 바 있다(김호섭 등, 2008; 김호섭과 황순진, 2004). 본 연구에서도 유역 내 농경지가 없고 대부분이 임야인(96%이상) 저수지(5, 8, 18, 27, 31, 32, 80)의 평균 TN농도가 0.468~2.06 mg/L

Table 2. The water quality state depend on environmental criteria of water quality (ECWQ)

ECWQ class*	COD**	TN**	TP**	Chl.a**
Ia				9, 18, 19, 27, 28, 30, 32, 33, 57, 60, 79, 83 (12)
Ib	12, 15, 27, 28, 31, 33, 60 (7)	22 (1)	18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 60, 70, 79 (19)	5, 6, 8, 12, 14, 16, 20, 21, 23, 24, 25, 29, 31, 52, 68, 70, 73, 74, 80, 86 (20)
II	2, 4, 5, 8, 9, 14, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 29, 30, 32, 52, 57, 68, 70, 73, 79, 80, 83, 86 (28)		2, 10, 12, 14, 16, 17, 21, 26, 27, 68, 73, 80, 81, 83, 86 (15)	2, 10, 15, 17, 22, 26, 64, 66, 81, 84, 87 (11)
III	10, 17, 64, 67, 74, 81, 87 (7)	9, 12, 18, 30, 32 (5)	4, 8, 11, 15, 51, 52, 53, 62, 64, 66, 74, 75, 76, 77, 82, 84, 87 (17)	1, 11, 13, 53, 69, 75, 77, 82, 85 (9)
IV	1, 3, 6, 7, 11, 13, 41, 45, 46, 47, 49, 51, 53, 54, 62, 65, 66, 69, 71, 72, 75, 76, 77, 78, 82, 84, 85 (27)	4, 5, 6, 21, 23, 27, 28, 29, 31, 33, 51, 76, 81 (13)	1, 3, 6, 7, 13, 35, 41, 42, 45, 47, 49, 50, 54, 56, 67, 69, 71, 72, 78, 85 (20)	4, 7, 47, 48, 49, 51, 54, 55, 56, 62, 65, 67, 71, 72, 76, 78 (16)
V	35, 36, 42, 43, 48, 50, 55, 56, 58, 59 (10)	1, 2, 7, 8, 10, 16, 20, 25, 50, 52, 53, 56, 66, 69, 72, 73, 74, 75, 77, 79, 82, 83, 84, 86, 87 (25)	34, 36, 38, 40, 43, 46, 55, 58, 59, 63, 65 (11)	3, 35, 36, 38, 40, 41, 42, 43, 45, 46, 50, 58, 59, 61, 63 (15)
VI	34, 37, 38, 39, 40, 44, 61, 63 (8)	3, 11, 13, 14, 15, 17, 19, 24, 26, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 54, 55, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 67, 68, 70, 71, 78, 80, 85 (43)	37, 39, 44, 48, 61 (5)	34, 37, 39, 44 (4)

* ECWQ denote environmental criteria of water quality.

** Numerics in parenthesis indicate reservoir number.

Table 3. Classification of 87 reservoirs based limiting nutrient (P and N) and trophic state

Limiting nutrient	Trophic state*	Category
not	Oligotrophic (1)	27
	Mesotrophic (20)	6, 8, 9, 12, 16, 18, 19, 28, 30, 32, 33, 52, 57, 60, 64, 73, 74, 79, 80, 83
	Eutrotrophic (8)	1, 13, 48, 55, 61, 65, 66, 85
P	Mesotrophic (14)	5, 14, 17, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 29, 31, 68, 70, 86
	Eutrophic (29)	2, 7, 10, 11, 15, 36, 37, 38, 40, 42, 46, 47, 49, 53, 54, 58, 59, 62, 67, 69, 71, 72, 75, 77, 78, 81, 82, 84, 87
P, N	Mesotrophic (1)	22
	Eutrophic (14)	3, 4, 34, 35, 39, 41, 43, 44, 45, 50, 51, 56, 63, 76

* Numerics in parenthesis indicate reservoir number.

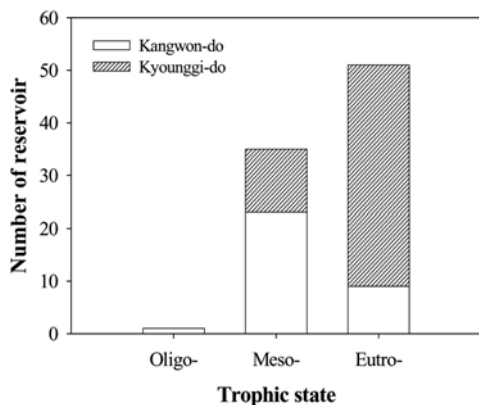


Fig. 1. Trophic state of study reservoirs by TSI based on chl.a concentration.

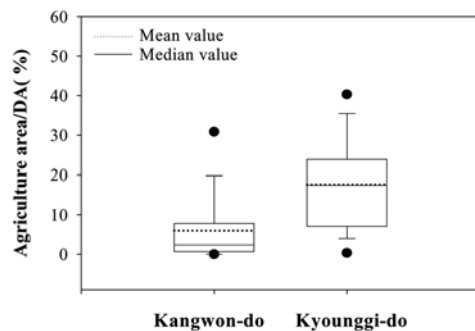


Fig. 2. Comparison of agriculture area/drainage area (DA).

범위로 TP농도(0.013~0.034 mg/L)와 비교해 20배 이상 높은 수준이었다. 이러한 결과들을 토대로 할 때 부영양 저

Table 4. Classification of 87 reservoirs based on mean depth (5 m) and OECD criteria by chl.a concentration (25 µg/L)

Type	Category	Trophic state*	ECWQ*
I	5, 6, 8, 52, 57, 60	Mesotrophic (6)	
II	3, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 48, 50, 55, 56, 58, 59, 61	Eutrophic (30)	Excess (21)
	1, 2, 4, 7, 47, 49, 51, 53, 54		Achievement (9)
III	14, 21, 26, 86	Mesotrophic (4)	
	63, 65	Eutrophic (19)	Excess (2)
	10, 11, 13, 15, 62, 67, 69, 71, 72, 75, 76, 77, 78, 81, 84, 85, 87		Achievement (17)
IV	27	Oligotrophic (1)	
	9, 12, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 28, 29, 30, 31, 33, 64, 68, 70, 73, 74, 79, 80, 83	Mesotrophic (25)	
	62, 82	Eutrophic (2)	Achievement (2)

Table 5. Classification of 51 eutrophic reservoirs based limiting nutrient (P and N), mean depth (5 m) and environmental criteria of water quality (ECWQ)

ECWQ (class IV)	Depth (m)	Limiting nutrient ()*	Reservoir no.
Excess (23)	< 5	P (8)	36, 37, 38, 40, 42, 46, 58, 59
		P, N (10)	3, 34, 35, 39, 41, 43, 44, 45, 50, 56
		not (3)	48, 55, 61
	≥ 5	P (0)	
		P, N (1)	63
		not (1)	65
Achievement (28)	< 5	P (6)	2, 7, 47, 49, 53,54
		P, N (2)	4, 51
		not (1)	1
	≥ 5	P (15)	10, 11, 15, 62, 67, 69, 71, 72, 75, 77, 78, 81, 82, 84, 87
		P, N (1)	76
		not (3)	13, 65, 85

* Numerics in parenthesis indicate reservoir number.

수지의 수질개선을 위한 호 내·외 대책은 유역 내 인 발생원에 대한 제어와 수체 내 인 농도 저감을 목표로 하는 것이 타당할 것이다.

본 연구에서 중점관리대상 저수지 선정하기에 앞서 엽록소 a 농도 최대값이 25 µg/L 이상(유형II와 III)이며 부영양상태로 평가된 49 개 저수지를 후보저수지로 선정하였다(Table 4). 49개 저수지가 후보저수지 중 TN를 제외하고 TP, chl.a 및 COD농도 모두가 호소환경기준 4등급을 초과하는 23개 저수지를 최종적으로 중점관리가 필요한 저수지로 선정하였다. 중점관리가 필요한 23개 저수지는 두 곳을(63, 65) 제외하고는 유형 II에 포함되는 수심이 5 m 미만의 저수지들이었다(Table 5).

3.3. 수질개선방안

본 연구에서 중점관리대상저수지의 수질오염방지 혹은 복원을 위한 방법은 외부 즉 발생원에 대한 관리와 저수지 내 즉 오염물질의 유입으로 오염된 저수지를 복원 기술로 구분할 수 있다. 생활하수에 기인하는 인의 고도처리, 인공습지나 자연형 하천을 통한 영양염류의 제거, 환경친화적인 농업활동의 장려 등은 유역에서 발생한 오염물질의 배출, 발생부하를 삭감하는 일반적인 외적방법이며, 이외에도 유로전환에 의한 호외배출등과 같은 방법이 있다(Cooke et al., 2005).

본 연구에서 유형 II와 III에 포함되며 수질환경기준을 초

과하고 있는 23개 저수지 중 수체 내 TP 농도가 0.1 mg/L 이상이며 유역 내 총 TP 발생부하량 중 생활계에 기인한 부하량이 40%이상인 저수지(37, 48, 55, 58, 59)들은 생활하수에 기인한 인 유입가능성이 높을 것으로 추정되므로 기존 하수처리장의 질소, 인 고도처리를 위한 성능개선이 우선적으로 검토될 필요가 있다(Table 6). 장기적으로는 호소환경기준 및 질소, 인등의 영양염 배출기준을 현실화하거나 총량규제를 함으로써 실제 유입오염물질의 절대량을 저감하는 대책이 필요할 것으로 판단된다. 그러나 김호섭 등(2007)은 유역내 농경지의 이용면적이 30% 이상인 경우 수체 내 TP농도가 0.1 mg/L 이상이라는 경험적 결과를 제시한 바 있다. 이는 하수처리장의 성능개선이 필요할 것으로 제시된 저수지(37, 48, 55, 58, 59)에서 수체 내 TP 농도가 반드시 생활계에 기인한 것이라 단정할 수 없음을 시사하며 오염발생원별 절대량 평가의 중요성을 강조한다. 따라서 수체 내 TP농도가 0.1 mg/L 이상이며 전체 유역면적 중 농경지 면적이 30% 이상 차지하는 저수지들은(34, 37, 38, 39, 40, 48, 55) 농경지 관리의 필요성이 제기될 수 있다. 농경지에 살포된 퇴비와 화학비료가 집수역으로 유입되는 것을 최소화하기 위해서는 시비량 및 시비방법 등의 발생원 관리나 발생한 오염물질의 저감을 목적으로 한 수변식생대 조성 등의 방법이 적용될 수 있다. 하천이나 발사이의 배수로 중 토사침식이 많이 발생하고 있는 곳에 식생여과대를 조성은 침식 억제 뿐만 아니라 지표유출수의 오

염물질을 침전, 여과, 흡착하고 유입수를 일시 저지하여 지하침투를 촉진하는 완충지 기능 효과를 기대할 수 있다 (Peterjohn and Correll, 1984). 유역 내 비료와 토사의 유출이 평지에 비하여 클 것으로 우려되는 급경사지의 농경지에 대해서는 경제적 인센티브와 규제 등 삼림환원을 위한 유인책을 마련하는 것도 대안이 될 수 있을 것이다.

저수지로 유입된 부영양화물질의 제거와 식물플랑크톤발생과 관련된 호수 내 제반현상의 개선을 위한 관리방법으로는 산화지 혹은 안정지, 저층수배수, 저니준설, 인불활성화, 생물제어 등의 호소 내 오염부하를 삭감시키는 방법과 희석이나 폭기, 화학약품 사용 등 호소 내 조건의 변경을 통해 수질을 개선방법이 있다. 본 연구대상저수지 중 유형 II에 포함된 저수지 중 수질환경기준을 초과하고 있으며 상대적으로 노후된 저수지들은(3, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 50, 56, 58, 59) 퇴적물에 기인한 내부부하가 클 가능성이 있다(Sommer et al., 1986)(Table 6). 준설은 호소 내부부하 감소 및 저층환경 개선 효과를 기대할 수 있는 효과적인 방법이기도 하나 준설 과정 중 생태계교란 및 오염도가 심한 퇴적층이 노출되어 수질이 오히려 악화될 수 있으므로 충분한 사전검토가 필요하다(전상호와 김휘중, 1990; Cooke et al., 2005; Nayar et al., 2003; Nayar et al., 2007).

준설이 오염된 퇴적토의 제거를 목적으로 한다면 가압부상이나 인불활성화 방법은 식물플랑크톤 발생량(엽록소 *a*

농도 50 µg/L 이상)이 많은 저수지(34, 35, 36, 37, 38, 39, 44)에서 수층 내 유기물을 직접 제거하기 위한 목적으로 적용가능하다. 인 불활성화 방법은 수층 내 식물플랑크톤을 퇴적층으로 침전시켜 제거할 뿐만 아니라 수층 내 인이 식물플랑크톤 성장에 이용되지 않도록 억제시키는 방법이다. 외국에서 보고되고 있는 인 불활성화 공법이 성공한 호소는 모두 체류시간이 길며 수심이 얇고 지속적으로 수층이 혼합되며 외부에서 유입되는 인부하량보다 호소 내 저질로부터의 용출에 의한 내부 부하량이 더 큰 자연호수들이다 (Cooke et al., 2005). 이들 자연호의 수리적 환경은 체류시간이 짧고 강우시에 다량의 인이 매년 유입되는 국내 농업용저수지와 다르므로 미국과 유럽의 자연호에서 사용하는 기술을 그대로 사용한다면 우리나라의 육수학적 환경의 차이로 인해 그 효과가 적을 수 있다(농림부, 2004). 오히려 침전된 인이 바람이라 인위적 교란으로 인해 수층으로 재부유하지 않도록 충분한 수심이 확보되는 저수지에서 그 효과가 크게 나타날 가능성도 있다(63, 65). 무엇보다 중요한 것은 호 내에서의 직접적인 유기물 처리와 관련된 국내 외 연구에서 공통적으로 시사한 바와 같이 오염발생원에 대한 관리대책과 병행하여 적용해야 한다는 점이다(농림부, 2004; Cook et al., 2005).

수심이 얕더라도 규모가 크고 넓은 유역면적을 가지는 저수지(48, 55, 61)에서 준설이나 수체 내 유기물의 직접적인 제거방법을 적용하는 것은 한계가 있을 수 있다. 인불

Table 6. Applicable conservation practices of 23 eutrophic reservoirs

Category	Dredging*	Land use control*	Advanced wastewater treatment*	P inactivation*	Sedimentation basin/Pre-dam/diversion*	Physical harvesting (etc. DAF)*
3	++		+			
34	++	++				++
35	++	+				++
36	++					++
37	++	++	++			++
38	++	++	+			++
39	++	++				++
40	++	++	+			
41	++					
42	++	+				
43	+	+				
44	++	+				++
45	++		+			
46	+	+				
48		++	++		++	
50	++	+	+			
55		++	++		++	
56	++					
58	++		++			
59	++		++			
61			+		++	
63				++		
65				++	++	

* ++ Beneficial effects expected, + : positive effects expected

활성화 공법은 많은 양의 화학약품 사용에 따른 독성과 효과의 지속성 등의 문제가 제기될 수 있고, 가압부상은 식물플랑크톤의 재성장으로, 준설은 유역에서 집수역으로 유입되는 토사유출을 억제하지 못하는 한 집중 강우 시 재 축적되어 수질개선효과를 기대하기 어려울 수 있기 때문이다. 따라서 이러한 저수지에서는 강우 시 오염발생원으로부터 집수역으로 유입되는 오염물질을 저감하기 위한 대안으로 유입구에 침전지나 pre-dam 건설, 유입수의 호외 배제 등의 방법이 검토 될 수 있을 것이다.

3.4. 농업용저수지 관리를 위한 제언

첫째, 수질을 정확하게 평가하고 원인을 진단할 수 있도록 수질 및 유역환경에 대한 충분한 자료를 확보하여야 한다. 저수지별 연2회 측정 자료는 저수지의 수질을 정확히 파악하기에 충분하지 않다. 국내 분포하고 있는 모든 농업용저수지를 정기대상조사 호소로 지정하는 것은 비용, 인력, 시간 등 여러 가지 측면에서 어려움이 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서 시도된 바와 같이 농업용 저수지 중 중점관리가 필요한 저수지를 선별하여 장기적인 수질자료 확보방안을 모색하고 유역 내 오염원현황 과 오염물질 발생량 뿐 만 아니라 수체로 배출되는 양을 정량화하는 것이 필요하다.

둘째, 관리대상물질은 수체 및 유역특성을 고려하여 다양화하여야 한다. 농업용저수지는 상수원으로의 용수이용목적 을 가지는 댐호와 비교하여 상대적으로 수체 내 중금속, 유기화학물질 등에 의한 위해성에 인식이 적은 반면, 유역에 농경지가 분포하고 있는 저수지는 농경지에 사용된 화학비료, 농약 등이 집수역으로 유입되어 유해물질의 오염 가능성도 제시될 수 있다. 따라서 유해물질에 의한 오염이 우려되는 저수지를 우선 선정하고 기초 자료를 확보하는 것이 필요할 것이다.

셋째, 수질개선 공법별 효과 검증 및 적용에 있어 참고가 될 수 있는 가이드라인이 마련되어야 한다. 유역면적이 넓고 규모가 큰 댐호의 수질개선은 오염발생원 저감에 국한 될 수 밖에 없는 반면 농업용 저수지는 대부분이 규모가 작아 수질 복원기술의 적용 시 수질개선효과 가능성은 매우 높다. 따라서 현장에 다양한 공법 적용을 통해 수질개선효과를 검증하고 이를 토대로 가이드라인을 마련하는 것이 필요할 것이다.

마지막으로 본 연구에서 중점관리대상저수지로 구분되지 않았으나 강원도에 위치한 자연적으로 형성된 자연호수(6, 13)들의 관광자원으로서의 가치는 날로 증대할 것으로 예상된다. 따라서 호소의 가치가 하락하지 않도록 관리할 필요하므로 수질관리 뿐 아니라 제방건설, 수초대 경작, 주변 도로 건설 등에 의해 호수가 수초대가 소멸되지 않도록 하는 등 호수 원형 유지하는데 관리목표를 두어야 할 것이다.

4. 결론

본 연구는 한강수계 분포하고 있는 농업용 저수지에서

수질개선이 필요한 저수지를 선별하고, 이들 저수지의 관리 대상물질과 수질개선방안을 제시하고자 시도하였다. 호소 생활환경기준 4등급 초과 저수지는 COD기준 18개소(20.7%), TP기준 16개소(18.4%), 엽록소 *a* 기준 19개소(21.8%)였다. TN 농도는 TP농도에 대한 TN 농도비율은 16 미만인 5곳 중 4곳에서 수질환경기준 IV등급을 초과하였다. 엽록소 *a* 농도의 TSI 지수에 의한 영양상태 평가에서는 조사대상 저수지 중 51개소가 부영양 상태였다. TSI 편차분석을 통한 제한영양염 평가에서 대상저수지 중 총 58개소에서 인 제한 가능성이 제시되었다. 엽록소 *a* 농도 최대값이 25 µg/L 이상(유형II와 III)이며 부영양상태로 평가된 저수지 중 TP, 엽록소 *a* 및 COD농도 모두 호소환경기준 4등급을 초과하는 저수지는 23개였고 이중 21개 저수지의 평균수심은 5 m 미만이었다. 23개 저수지에 대한 발생원 관리방안으로 수체 내 TP 농도가 0.1 mg/L 이상인 저수지들은 하수처리장의 성능개선과 농경지관리의 필요성이 제시되었다. 수심이 5 m 미만인 저수지 중 수질환경기준을 초과하고 있으며 상대적으로 노후된 저수지들은 준설 등 내부오염원을 제거하기 위한 방법, 엽록소 *a* 농도가 50 µg/L 이상인 저수지는 가압부상이나 인불활성화 방법 등을 통한 유기물의 직접적인 제거방법이 고려될 수 있음이 제시되었다. 반면 수심이 얕더라도 규모가 크고 넓은 유역면적을 가지는 저수지에서는 침전지나 pre-dam 건설, 유입수의 호외 배제 등 유입수에 대한 관리방법들의 적용 가능성을 제시하였다.

참고문헌

- 김범철, 사승환, 김문숙, 이윤경, 김재구(2007). 국내 호수의 제한영양소와 하수처리장 방류수 인 기준 강화의 필요성. *한국물환경학회지*, **23**(4), pp. 512-517.
- 김호섭, 최은미, 김동우, 공동수, 김경만, 김범철(2007). 농업용저수지 유역환경특성에 따른 수질경향 분석. *한국육수학회지*, **40**(2), pp. 214-222.
- 김호섭, 최은미, 박주현, 황하선, 김범철, 공동수, 황순진(2008). 농업용 저수지 수질과 경험적 인자들과의 관계. *한국물환경학회지*, **24**(3), pp. 333-339.
- 김호섭, 황순진(2004). 얕은 부영양저수지의 육수학적 특성-계절에 따른 수질변화. *한국육수학회지*, **37**(2), pp. 180-192.
- 농림부 농업기반공사(2001). 농업용수 수질측정망 조사 보고서.
- 농림부 농업기반공사(2003). 농업용수 수질측정망 조사 보고서.
- 농림부(2004). 농업용 저수지의 녹조제어기법개발 연구.
- 윤춘경, 이새봄, 정광욱, 한정윤(2007). 농업용저수지 유역의 토지이용과 수질항목 간의 상관관계 분석. *한국육수학회지*, **41**(1), pp. 31-39.
- 이새봄, 윤춘경, 정광욱, 장재호, 전지홍 (2007). 토지이용의 공간적 분포와 농업용저수지 수질간의 상관분석. *한국육수학회지*, **40**(3), pp. 481-488.
- 전상호, 김휘중(1990). 경포호의 준설에 의한 수질개선가능성에 대하여. *Journal of Korean Earth Science Society*, **11**(2), pp. 174-180.
- Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.*, **22**, pp. 361-369.
- Carmack, E. C., Gray, C. B. J., Pharo, C. H., and Daley, R. J.

- (1979). Importance of lake-river interactions on seasonal patterns in the general circulation of Kamloops Lake. British Columbia. *Limnol. Oceanogr.*, **24**, pp. 634-644.
- Cooke, G. D., Welch, E. B., Peterson, S. A., and Newroth, P. R. (2005). *Restoration and management of lakes and reservoirs*. Taylor & Francis Publishers and CRC Press, Boca Raton, FL.
- EPA (1974). *Lake restoration*. US Environmental Protection Agency, Minneapolis, Minnesota.
- Havens, K. E. (2000). Using Trophic state index (TSI) values to draw inferences regarding phytoplankton limiting factors and seston composition from routine water quality monitoring data. *한국육수학회지*, **33**(3), pp. 187-196.
- Kratzer, C. R. and Brezonik, P. L. (1981). A carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Wat. Res. Bull.*, **17**, pp. 713-717.
- Nayar, S., Goh, B. P. L., Chou, L. M., and Reddy, S. (2003). In Situ microcosm to study the impact of heavy metals resuspended by dredging on periphyton in a tropical estuary. *Aquatic Toxicology*, **64**, pp. 293-306.
- Nayar, S., Miller, D. J., Hunt, A., and Goh, B. P. L. (2007). Environmental effects of dredging on sediment nutrients, carbon and granulometry in a tropical estuary. *Environ. Monit. Assess.*, **127**, pp. 1-13.
- Peterjohn, W. T. and Correll, D. L. (1984). Nutrient dynamics in an agricultural watershed: observations on the role of a riparian forest. *Ecology*, **65**, pp. 1466-1475.
- Sommer, U., Gliwicz, Z. M., Lampert, W., and Duncan, A. (1986). The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Arch. Hydrobiol.*, **106**, pp. 433-471.
- Sakamoto, M. (1966). Primary production by the phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence upon lake depth. *Arch. Hydrobiol.*, **62**, pp. 1-28.
- Ryder, R. A., Kerr, S. R., Loftus, K. H., and Regier, H. A. (1974). The morphoedaphic index, a fish yield estimator-review and evaluation. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, **38**, pp. 663-688.
- William, F. J., Kennedy, R. H., and Montgomery, R. H. (1987). Seasonal and longitudinal variations in apparent deposition rates within an Arkansas reservoir. *Limnol. Oceanogr.*, **32**, pp. 1169-1176.