

농업용 저수지의 부영양화와 수질관리방안

이광식 · 윤경섭 · 김형중* · 김호일

농업기반공사 농어촌연구원

(2003년 3월 16일 접수, 2003년 5월 26일 수리)

A Program of Water Quality Management for Agricultural Reservoirs by Trophic State

Kwang-Sik Lee, Kyung-Sup Yoon, Hyung-Joong Kim* and Ho-Il Kim (Rural Research Institute, Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation, Ansan 425-170, Korea)

ABSTRACT : A total of 498 agricultural reservoirs ranging from $164 \times 10^3 \text{ m}^3$ to $253 \times 10^6 \text{ m}^3$ in storage volume were investigated from 1990 to 2001 with respect to Chl-*a*, COD concentration and pollutant loading of BOD, TN, and TP. The lakes and reservoirs could be classified to 4 types using the relationships between the ratio of storage volume per water surface area(ST/WS) and Chl-*a* concentration. It is recommended that the improvement of polluted lakes should be performed in the order of integrated consolidation type → watershed consolidation type → in-lake consolidation type → management type and reservoir should be constructed to be over 5~6 m in depth(ST/WS ratio) for preventing the eutrophication of agricultural reservoirs. We propose that water quality criteria for agricultural water is changed from less than 8 mg/L to less than 6 mg/L for safety value, 6~10 mg/L for concern value, and more than 10 mg/L for countermeasure value in COD concentration, respectively.

Key words : classification, reservoir type, ST/WS ratio, improvement order, water quality criteria.

서론

저수지의 수질에 영향을 미치는 인자로서는 체류시간, 수심, 유역면적, 유역의 형상, 유역 경사, 토지이용상황, 수표면적, 저류량 등 여러 가지가 있다. 이와 같이 호소의 수질은 다양한 내적인 요인과 외적인 요인에 의해서 결정되는데, 1차 생산활동의 결과인 내생유기물질량은 호소의 수광량에 따라서 좌우되며, 이 수광량은 수표면적에 따라 달라진다. 또한 호소의 수심에 따라서 분해량이 규정된다. 일반적으로 1차 생산활동성이 높은 생산층을 유평층 또는 보상심도라고 부르는데, 투명도의 약 2.5배의 수심에 해당된다¹⁾.

일반적으로 얇은 수심의 호소는 쉽게 부영양화가 이루어진다^{2,3)}. 이는 호소의 저질층으로부터 용출되는 오염물질 특히, 인은 바람에 의하여 수직적으로 혼합되어 조류의 번성을 일으키며 사멸된 조류는 침전되어 내부부하를 증가시킨다. 이 경우 부영양화의 조절을 위하여 외부유입수의 수질을 개선한다 할지라도 높은 내부부하에 의해 호소내의 수질은 개선되

지 못하는 경우가 발생할 가능성이 높다³⁾. 일본에서의 조사결과를 보면 호소의 수심이 알아짐에 따라 클로로필 *a*(Chl-*a*)의 농도는 지수적으로 증가하며, 호소의 Chl-*a* 농도가 12 mg/m^3 이상인 호소를 부영양호라 한다면 일본의 경우 평균수심 약 8 m 이하이면 호소가 부영양화될 소지가 있다고 본다⁴⁾. Jeon 등^{5,6)}과 Hwang 등⁷⁾은 우리 나라의 저수지를 대상으로 하여 물리적인 인자가 호소의 수질에 미치는 영향을 분석한 결과, 유역으로부터 동일한 인부하가 발생한다 할지라도 수심이 얇을 수록 높은 Chl-*a* 농도를 나타내었으며, 수심이 얇고 수표면적이 클 수록 총인과 Chl-*a*와의 상관성이 높았으며, 총인 농도당 Chl-*a*의 생산성이 높았다고 보고된 바 있다. 우리 나라 대부분의 호소가 수심 10 m 이하^{3,4)}라는 것을 감안해 볼 때 호소의 부영양화 가능성은 높을 것으로 생각된다. 김과 홍⁸⁾은 국내 인공호소는 외국의 자연호수에 비해 낮은 수심과 작은 저수용량으로 높은 생산성을 유발할 수리·수문학적 특성을 가지고 있다고 기술하고 있는데, 이와 같이 저수지의 생산성을 나타내는 지표로서 저수용량도 중요한 인자이다.

한편, 여러 가지 복합작용에 의해 부영양화현상이 발생하게 되는데, 이 때 증식되는 남조류는 수돗물의 냄새를 유발시키고, 정수과정의 침전을 방해하며, 특히 남조류의 독소는 간

*연락처:

Tel: +82-31-400-1828 Fax: +82-31-400-1889

E-mail : iamwater@karico.co.kr

을 손상시키고, 구토, 복통을 일으키며, 간암을 유발시킬 수 있다. 미국의 펜실바니아주에서는 남조류가 번식한 상수원의 정수과정이 부적절하여 이 수도물을 마신 주민의 62%가 설사, 위장염의 증상을 보이는 집단발병 사례가 있는 등 부영양화에 의한 피해가 증가되고 있다⁴⁹⁾.

부영양화 현상을 일으키는 식물플랑크톤의 현존량을 알기 위한 가장 실용적인 방법은 식물의 광합성에서 가장 기본적인 역할을 하고 있는 Chl-a의 양을 측정하는 것이다⁴⁾. 그러나 우리 나라 농업용수 수질기준에는 Chl-a 농도에 대한 규제가 없기 때문에 부영양화도를 판단하고, 이에 근거하여 수질개선 사업을 시행할 법적 근거가 없는 것이 현실이다.

본 연구는 농업용 저수지를 유형화하고 각각에 대한 수질관리 방안과 부영양화를 고려한 호소수 부영양화 기준(안)의 제시를 목적으로 우리 나라 농업용수 수질측정망 조사결과를 이용하여 물리적 인자와 수질 인자 등을 평가하였다.

재료 및 방법

본 연구에서는 우리 나라 농업용 저수지 중 농업용수 수질측정망 조사대상 저수지에 대한 1990년부터 2001년까지의 조사자료¹⁰⁻¹²⁾를 분석하였다. 농업용 저수지의 유형을 분류하기 위하여 저수지의 형상을 나타내는 물리적 인자로서 유효저수량/면적(ST/WS)비를 이용¹³⁾하였고, 수질항목으로는 부영양화지표의 하나인 Chl-a 농도를 이용하였다. ST/WS비는 저수지의 유효수심의 개념이지만, 단순히 저수지의 깊이만이 아니라 저수지의 부영양화와 깊은 관계가 있는 수표면적, 유효저수량도 포함하고 있기 때문에 나름대로 의미가 있을 것으로 판단되어 저수지를 유형화하기 위한 인자의 하나로서 ST/WS비를 이용하였다. 저수지를 유형화하기 위해 또 하나의 인자로서 Chl-a 농도를 이용하였는데, 이는 저수지의 부영양화 정도를 잘 표현해주는 인자이기 때문이다. Chl-a 농도를 이용하여 부영양화도를 나타내기 위한 여러 가지 방법이 제

시되었다. OECD¹⁴⁾에서는 Chl-a 농도가 25 mg/m³ 이상이면 부영양화단계로 분류하고 있다. 또한 U.S. EPA에서는 10 mg/m³보다 높으면 부영양단계로 분류하고 있으나, 우리 현실에서는 비교적 엄격한 U.S. EPA방법을 당장 적용하기에 어려움이 있을 것으로 판단되므로¹⁵⁾ 본 연구에서는 OECD기준을 적용하여 유형화하였다.

호소수 부영양화 기준(안)을 제시하기 위하여 COD 농도 변화에 따른 Chl-a 농도를 도시하였다. OECD 부영양화 기준의 하나인 Chl-a 농도를 기준으로 하여 Chl-a 농도가 25 mg/m³ 이상에 해당되는 COD 농도를 수질대책기준, 25 mg/m³ 이하의 농도에 해당되는 COD 농도를 수질오염 안전기준, 수질대책기준과 수질오염 안전기준 사이에 해당되는 COD 농도를 수질오염 우려기준으로 세분화하였다.

결과 및 고찰

유형분류

농업용수 수질측정망조사 자료를 이용하여 도시한 측정기간 동안의 평균 Chl-a 농도에 대한 ST/WS비 그래프는 Fig. 1과 같다. Chl-a 농도는 ST/WS비에 매우 민감하게 반응하였으며, ST/WS비가 작을수록, 즉 상대적으로 저류용량이 작고, 수표면적이 클수록 높은 Chl-a 농도를 나타내었다. OECD의 부영양화 단계(Chl-a 25 mg/m³)를 기준으로 할 때 ST/WS비가 15 m 이상인 저수지는 부영양화된 곳이 전혀 없었으며, 10 m 이상인 저수지는 단지 3개 저수지만이 부영양화된 것으로 나타났으며, 5 m 이하가 되면서 부영양화된 저수지가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 Chl-a 농도 25 mg/m³, ST/WS비 5 m를 기준으로 하여 저수지를 분류하였으며, 편의상 각 그룹을 I형(종합정비형), II형(호내정비형), III형(유역정비형), IV형(관리형)으로 구분하였다.

I형(종합정비형)

I형(종합정비형)은 ST/WS비가 5 m 이하, Chl-a 농도가 25 mg/m³ 이상에 해당되는 저수지로서 담수호를 포함한 농업용수 수질측정망 대상 저수지 총 498개 중 95개가 I형으로 분류되었다. 특히 농업용수 수질측정망에 포함된 담수호는 7개 중 ST/WS비가 5 m 이하인 6개 담수호는 모두 부영양상태인 I형으로 분류되었다. ST/WS비가 7.3 m인 영산호를 제외하고 우리나라 담수호의 경우는 호소의 형태면에서 부영양화에 취약한 구조인 것으로 판단된다.

I형 저수지는 부영양화가 진행되고 녹조현상이 발생하는 저수지로서 조속한 수질개선사업이 필요한 것으로 판단된다. 이들 저수지의 경우 수질개선사업을 시행할 때에는 유입수 대책, 호내 대책에 앞서 저수지의 형태를 부영양화에 안전한 형태로 바꾸는 것을 먼저 고려하여야 한다. 즉, 우선 ST/WS비가 5~6 m 이상, 가능하면 10 m 이상이 되도록 저수지 바닥을 깊이 준설하거나, 저수지 체체를 높여 ST/WS비를 크게 함으로써 부영양화에 안전한 구조로 개선하는 것이 좋을 것

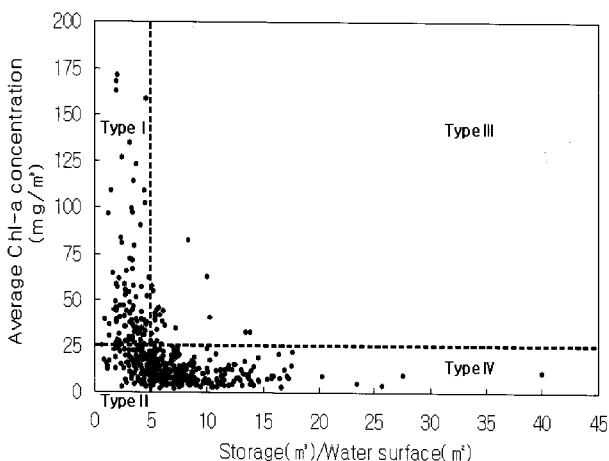


Fig. 1. Classification of agricultural reservoirs with Chl-a concentration and ST/WS ratio.

으로 판단된다. 또한 저수지에 따라서는 구조적인 문제 외에 유역에서의 유입부하가 커서 수질이 악화되는 경우도 있으므로 I형 저수지의 경우에는 보다 세밀한 현장조사를 통하여 구조개선사업에 병행하여 호내대책 및 유입수 대책을 도입하는 등 종합적인 수질개선대책을 세우고 시행해 나가는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 앞으로 저수지를 축조할 경우에는 토목적인 경제성만이 아니라 수질문제도 고려하여 ST/WS비가 최소 5~6 m 이상, 가능하면 10 m 이상이 되도록 수표면적에 비해 수심을 깊게 계획하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

II형(호내정비형)

II형(호내정비형) 저수지는 ST/WS비가 5 m 이하, Chl-a 농도가 25 mg/m³ 미만에 해당되는 저수지로서 101개 저수지가 이에 해당된다. 이 저수지들은 ST/WS비가 5 m 이하로서 구조상 부영양화에 취약한 구조이기 때문에 수질이 악화될 가능성이 높다. 따라서 제체를 높이거나 깊이 준설하여 ST/WS비를 크게 하여 구조를 개선함과 아울러 주위 환경상 저수지의 수질이 악화되는 경우라면 호내 또는 유입수 대책을 수립하여 수질을 개선해 나가는 것이 좋을 것으로 판단된다.

이상과 같이 ST/WS비가 5 m 이하로서 구조적으로 취약한 저수지들을 Chl-a 농도에 따라서 I, II형으로 분류하였는데, 이들 저수지의 Chl-a 농도에 영향을 미치는 또 다른 원인을 찾아보기 위하여 Table 1과 같이 유형별 저수지의 유역특성을 살펴보았다. 먼저 I형과 II형 저수지들은 평균 ST/WS비가 각각 3.1 m와 3.7 m로서 큰 차이가 없는 것으로 보아, I과 II형의 분류기준인 Chl-a 농도에는 ST/WS비가 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 그러나 저수지의 수질에 영향을 미치는 것으로 알려진 유역면적/만수면적(DA/WS)비, 총면적/유효저수량(TA/ST)비¹⁵⁾를 살펴본 결과 Table 1과 같이 I형 저수지의 평균값은 각각 80.9, 38.2로서 II형 저수지의 47.4, 14.2에 비해 높게 나타났다. 이는 김 등⁸⁾의 보고처럼 I형 저수지는 호소면적에 비해 비교적 넓은 유역면적을 갖고 있고, 이에 따라 넓은 유역면적으로부터 높은 영양염류부하량이 일어나고, 더불어 높은 호수생산성이 유발될 환경특성

을 지니고 있다는 것을 보여주고 있다.

DA/WS비, TA/ST비, ST/WS비와 같은 각 물리적인자가 유형별로 차이가 있는지를 살펴보기 위하여 분산분석을 실시하였다. 분석결과 5% 유의수준에서 DA/WS비와 TA/ST비는 유형별 차이가 없으나, ST/WS비는 같은 유의수준에서 유형별로 차이가 있는 것으로 나타났다.

또한 유역에서 발생하는 오염부하량이 저수지의 수질에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 유역의 BOD, T-N, T-P 발생부하량을 저수지의 유효저수량 및 만수면적으로 나눈 값 즉, 저수지 단위유량당 발생부하량, 저수지 단위수면적당 발생부하량을 살펴본 결과 Table 2와 같았다. 유역에서 저수지의 단위유량당 평균 BOD, T-N, T-P 발생부하량은 I형 저수지가 각각 0.225, 0.108, 0.012 g/m³·day로서 II형 저수지의 0.080, 0.061, 0.006 g/m³·day에 비해 높았다. 그리고 저수지 단위수면적당 발생부하량은 I형 저수지의 경우 BOD, T-N, T-P가 각각 0.703, 0.317, 0.036 g/m²·day으로서 II형 저수지의 0.275, 0.211, 0.020 g/m²·day에 비해 높았다. 이는 I형 저수지가 II형 저수지에 비해 유역으로부터 발생하는 오염부하량이 많고, 이의 유입으로 I형 저수지가 수질이 나빠질 가능성이 높다는 것을 보여주는 것이라 할 수 있다.

이상과 같이 I형 저수지들은 II형 저수지들에 비해 유역면적이 넓고, 또한 오염부하 발생량도 많은 것으로 나타났다. 따라서 I형 저수지들은 ST/WS비를 크게 하여 저수지의 구조를 개선할 뿐만 아니라 유역에서 유입되는 오염부하도 고려한 호내·외 수질개선대책 등 종합적인 수질개선대책을 세워야 할 것으로 판단된다.

III형(유역정비형)

III형(유역정비형) 저수지는 ST/WS비가 5 m보다 크고, Chl-a 농도가 25 mg/m³ 이상에 해당되는 저수지로서 전체 조사 대상 중 23개 저수지가 여기에 포함된다. 이들 저수지의 유역특성은 Table 1과 같이 DA/WS비와 TA/ST비가 각각 52.9, 8.1로서 II형 저수지에 비해 DA/WS비는 큰 반면, TA/ST비는 작은 것으로 나타난 것으로 보아 유역특성의 영향을 받는 것으로 판단하기에는 무리가 있는 것으로 판단된다. 그러나 유역의 오염부하 발생량을 보면 Table 2와 같이 저수지의 단위유량당 평균 BOD, T-N, T-P 발생부하량은 각각

Table 1. Characteristics of drainage area according to reservoir type

Type	Average storage (SI, ×10 ³ m ³)	Average surface area (WS, ha)	Average drainage area (DA, ha)	Average total area ^{a)} (TA, ha)	DA/WS ratio (ha/ha)	TA/ST ratio (m ² /m ³)	ST/WS ratio (m ³ /m ²)
Type I	4857.8	180.5	6972.0	7152.5	80.9	38.2	3.1
Type II	2301.1	64.8	2225.3	2290.1	47.4	14.2	3.7
Type III	1695.7	27.4	1109.6	1137.0	52.9	8.1	6.9
Type IV	5051.8	56.5	2969.7	3026.2	53.8	6.9	8.7

^{a)}Average total area = Average water surface + Average drainage area

Table 2. The amounts of pollution load with different reservoir type

Type	Pollutant loading per unit water volume (g/m ³ ·day)			Pollutant loading per unit water surface (g/m ² ·day)		
	BOD	T-N	T-P	BOD	T-N	T-P
Type I	0.225	0.108	0.012	0.703	0.317	0.036
Type II	0.080	0.061	0.006	0.275	0.211	0.020
Type III	0.113	0.069	0.010	0.922	0.541	0.080
Type IV	0.032	0.027	0.002	0.248	0.209	0.019

0.113, 0.069, 0.010 $\text{g/m}^3 \cdot \text{day}$ 로서 II형 저수지의 0.080, 0.061, 0.006 $\text{g/m}^3 \cdot \text{day}$ 에 비해 높았다. 그리고 저수지 단위수면적당 발생부하량은 BOD, T-N, T-P가 각각 0.922, 0.541, 0.080 $\text{g/m}^2 \cdot \text{day}$ 으로서 II형 저수지의 0.275, 0.211, 0.020 $\text{g/m}^2 \cdot \text{day}$ 에 비해 높았다. 이는 III형 저수지의 경우는 II형 저수지들에 비해 유역에서 발생하는 오염부하량의 영향을 많이 받는다는 것을 보여주는 결과인 것으로 판단된다. 이상과 같이 III형 저수지들은 ST/WS비가 5 m 이상으로서 구조면에서는 부영양화 제어기능을 갖고 있으나 수질이 악화되었으므로 유역의 오염원인을 규명하고, 대책을 세우는 등 유역을 정비하여 오염부하의 배출을 최소화하는 것이 바람직하며, 경제성을 비교하여 ST/WS비를 10 m 이상으로 크게 하는 것도 바람직할 것으로 판단된다.

IV형(관리형)

IV형(관리형) 저수지는 ST/WS비가 5 m보다 크고, Chl-a 농도는 25 mg/m^3 보다 작은 저수지로서 구조면에서도 안전하고, 수질도 양호한 저수지로서 279개소가 이에 해당된다. 이들 저수지들은 오염배출부하가 증가되지 않도록 오염원을 적절히 관리하는 것만으로 현재의 양호한 수질상태를 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

이상과 같이 ST/WS비가 5 m 이상으로서 구조면에서 안전한 저수지들을 Chl-a 농도에 의해 오염된 III형과 수질이 양호한 IV형으로 분류하였다. 이들의 수질에 영향을 미치는 원인은 Table 1과 같이 III형 저수지들의 평균 ST/WS비는 6.9 m로서 IV형의 8.7 m에 비해 작은 것으로 보아 구조면에서 III형 저수지가 취약한 것으로 판단된다. 그러나 평균 DA/WS비와 TA/ST비는 III형이 각각 52.9와 8.1이고 IV형은 53.8 및 6.9로서 DA/WS비는 IV형이 큰 반면, TA/ST비는 III형이 큰 것으로 나타나 두 유형간의 Chl-a 농도의 차를 유역의 특성에 기인하는 것으로 판단하기에는 무리가 있는 것으로 판단된다.

III형과 IV형 저수지들의 유역에서의 오염부하 발생량을 보면 Table 2와 같이 저수지의 단위유량당 평균 BOD, T-N, T-P 발생부하량은 III형이 각각 0.113, 0.069, 0.010 $\text{g/m}^3 \cdot \text{day}$ 로서 IV형 저수지의 0.032, 0.027, 0.002 $\text{g/m}^3 \cdot \text{day}$ 에 비해 매우 높았다. 그리고 저수지 단위수면적당 발생부하량도 III형이 BOD, T-N, T-P가 각각 0.922, 0.541, 0.080 $\text{g/m}^2 \cdot \text{day}$ 으로서 IV형 저수지의 0.248, 0.209, 0.019 $\text{g/m}^2 \cdot \text{day}$ 에 비해 매우 높았다. 따라서 III형 저수지들은 IV형 저수지들에 비해 유역에서 발생하는 오염부하량이 많아 수질이 오염되기 쉬운 유역환경을 갖고 있으므로 III형 저수지의 수질을 개선하기 위해서는 우선 유역을 정비하여 오염발생부하를 줄이거나, 발생된 부하가 저수지에 유입되지 않도록 오염원대책을 세우는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

IV형 저수지들은 유입부하가 현재 상태를 유지할 수 있도록 오염원관리를 한다면 수질을 양호한 상태로 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

이상과 같이 농업용수 수질측정망 조사 대상 저수지 498개

중 저수지의 형태가 부영양화에 취약하여 저수지의 구조를 개선하는 것이 바람직한 것으로 판단되는 I, II형 저수지가 196개에 이르고, 수질이 악화되어 수질개선사업을 시행할 필요가 있는 I, III형 저수지도 118개인 것으로 분류되었다.

수질개선방안

수질이 기준을 초과하는 유형은 I형과 III형으로 수질개선사업대상이다. I형의 경우는 수질이 오염되어있기 때문에 신속한 수질개선사업이 필요한 저수지들이다. 이들 저수지는 구조적으로 부영양화에 취약하기 때문에 우선 구조개선을 통해 수질을 개선해 나가고, 그 것만으로는 부족한 경우에는 호내 대책 등을 세우는 것이 바람직하다. 이 저수지들은 저수지 관리주체 자체만으로 수질개선사업을 할 수 있기 때문에 신속히 수질개선사업을 실시할 수 있다.

II형의 경우는 당장 수질개선사업을 실시할 필요는 없지만 구조적으로 부영양화에 취약하기 때문에 저수지의 구조개선 위주로 수질개선사업을 실시하는 것이 좋다. 이 저수지들도 I형과 마찬가지로 관리주체 단독으로 정비가 가능하다.

III형은 유효저수량, 수표면적, 유역면적이 작기 때문에 유역 및 저수지를 정비하고 관리하기에 용이할 것으로 판단된다. 또한 작은 유역에서 많은 부하가 발생되고 있으므로 발생한 부하를 관리하기도 쉬울 것으로 판단된다. 따라서 III 저수지들을 우선 정비하는 것이 유리하며, III형은 저수지가 부영양화를 제어할 수 있는 구조를 갖고 있고 오염원인이 유역으로부터 유입된 부하이기 때문에 호내 대책보다는 유역을 중심으로 정비하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 그러나 III형은 유역을 정비하기 위해서는 저수지관리주체뿐만 아니라 관련부처, 지자체, 지역주민들과의 협의 과정이 필요하므로 수질개선사업의 진행속도가 늦어질 수밖에 없는 단점이 있다.

IV형의 경우는 수질개선사업이 필요하지 않으며, 부영양화의 제어가 가능한 구조를 가지고 있다. 따라서 현재상태로 관리만 잘 한다면 양호한 수질을 유지할 수 있다. 다만 양호한 수질을 유지하기 위해서는 관련기관 및 유역주민들과의 유기적인 공조가 필요하다.

이상의 결과를 종합할 때 수질개선사업을 추진할 경우에는 I형(종합정비형)을 우선 정비하면서 III(유역정비형) → II형(호내정비형) → IV형(관리형)의 순으로 정비해 나가는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

호소수 부영양화 기준(안)

조류의 성장은 호소 내의 오염물질 형태라는 관점에서 볼 때, 무기물질에서 유기물질로의 전환을 의미한다. 따라서 호소내의 COD 농도는 Chl-a 농도와 높은 상관성을 나타낼 것으로 판단된다. 현재 농업용수 수질기준인 호소수질기준 IV등급은 COD가 8 mg/L 로 되어 있으나, COD가 유기오염 지표뿐만 아니라 부영양화의 지표로서 간주될 수 있다면 유기오염과 부영양화를 모두 고려하여 농업용수 수질기준을 탄력적

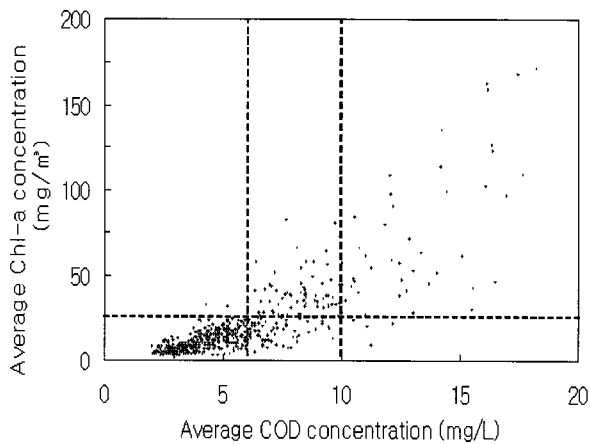


Fig. 2 Distribution of agricultural reservoirs with Chl-a and COD concentration.

으로 운용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 부영양화를 나타내는 지표중의 하나인 Chl-a 농도와 상관성을 고려하여 농업용수 수질기준 중 COD 농도를 세분화했다.

Fig. 2는 COD와 Chl-a와의 관계를 나타내는 그림으로, 평균 COD 농도가 6 mg/L 이하인 312개 저수지 중 Chl-a 농도가 25 mg/m³ 이하로 수질이 양호한 저수지는 310개로서 99.4%의 높은 비율을 차지하므로 COD가 6 mg/L 이하인 저수지는 부영양화가 진행되지 않은 저수지로 판단할 수 있다. 또한 평균 COD 농도가 10 mg/L 이상인 40개 저수지 중 Chl-a 농도가 25 mg/m³ 이상으로 부영양화된 저수지가 36개로 90%를 차지하므로 COD가 10 mg/L 이상인 저수지는 부영양화가 진행된 저수지로 판단하는 기준으로 활용할 수 있을 것이다. 평균 COD 농도가 6~10 mg/L 사이의 저수지 125개 중 Chl-a 농도가 25 mg/m³ 이상인 저수지는 47.2%인 59개, 이하인 저수지는 52.8%인 66개로 서로 비슷하므로 COD 농도가 6~10 mg/L 사이의 저수지는 부영양화 진행 여부를 판단할 때 주의해야 할 것으로 판단된다.

이상의 결과를 고려할 때 농업용수 수질기준을 Table 3과 같이 COD가 10 mg/L 이상이면 수질오염이 심화된 것으로 판단하여 시급히 수질개선대책을 마련해야 하는 저수지인 것으로 판정하여 10 mg/L 이상을 수질대책기준, 6~10 mg/L는 시급하지는 않지만 수질오염이 우려되므로 우려기준, 6 mg/L 이하는 아직 수질오염이 진행되지 않은 저수지로 판단하여 수질오염 안전기준으로 세분하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 따라서 COD가 10 mg/L인 저수지는 부영양화된 저수지로 판단하여 우선 수질개선사업을 실시하고, 다음에 6~10 mg/L인 저수지의 수질개선사업을 실시할 수 있도록 수질기준을 세분화하는 것이 좋을 것으로 판단된다. 본 논문에서 제시한 기준이 수질환경기준에 반영되기 위해서는 보다 정밀한 조사와 분석이 필요하겠지만 일선 실무부서가 저수지의 수질개선사업에 대한 우선순위를 결정하고, 수질개선사업을 추진해 나가는데 좋은 지표가 될 것으로 판단된다.

Table 3. Draft of COD criteria for agricultural water quality with eutrophication in reservoir

Classification	Safety value	Concern value	Countermeasure value
COD concentration (mg/L)	≤ 6	6 ~ 10	≥ 10

요 약

1990년부터 2001년까지의 농업용수 수질측정망 조사자료를 분석하고, Chl-a 농도와 유효저수량/만수면적비를 이용하여 498개 저수지에 대하여 유형을 분류하고, 각 유형에 대한 수질개선방안을 제시하기 위하여 본 연구를 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

우리 나라 농업용 저수지의 Chl-a 농도는 유효저수량/만수면적비(ST/WS)에 민감하게 반응하였으며, ST/WS비가 클수록 Chl-a 농도는 감소하는 경향을 나타내었는데, 저수지의 부영양화를 억제하기 위해서는 ST/WS비를 최소 5~6 m 이상, 가능하면 10 m 이상이 되도록 건설·보수하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

우리 나라 저수지를 Chl-a 농도 25 mg/m³, ST/WS비 5 m를 기준으로 유형을 분류하고 그 특성을 고찰한 결과 ST/WS비가 작고 부영양화가 진행된 종합정비형인 I형 저수지는 호소의 지형학적 특성과 외부에서의 부하가 모두 복합적으로 부영양화에 영향을 준 것으로 판단되며, 동일한 형상이라도 부영양화가 진행되지 않은 호내정비형인 II형 저수지는 상대적으로 외부 유입이 적은 것으로 나타났다. 반면에 지형학적 특성상 수질관리에 유리한 ST/WS비가 큰 관리형인 IV형 저수지는 대부분이 부영양화가 아직 진행되지 않았으며, 유역으로부터 높은 부하량을 나타내는 유역정비형인 III형은 부영양화가 이루어 졌으나 전체 저수지의 약 5% 미만으로 극히 드문 것으로 나타나 ST/WS비가 큰 경우 상대적으로 외부유입으로 인한 부영양화는 작은 것으로 나타났다. 수질개선사업 우선순위(안)는 I형(종합정비형) → III(유역정비형) → II형(호내정비형) → IV형(관리형)의 순으로 정비해 나가는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한 농업용수 수질기준 항목 중 COD 농도를 유기오염 지표뿐 아니라 부영양화를 나타내는 지표로써도 함께 고려하여 세분화한 결과 현행 8 mg/L에서 10 mg/L 이상을 대책기준, 6~10 mg/L을 우려기준, 6 mg/L 이하는 안전기준으로 세분하고, 이에 따라 수질개선사업을 실시하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농업기반공사 자체자금에 의해 수행된 연구결과 의 일부임.

참 고 문 헌

1. Iwasa, Yoshiaki (1990) Engineering limnology, Tokyo, Japan, p.222.
2. 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.
3. Ministry of Environment (2001) A study on development of lake environment survey method in Korea, Seoul, Korea, p.31.
4. The Korean society of environmental engineering (1999) Water quality management in lakes, Seoul, Korea, Pungnam, p.21, p.54-55, p.189, p.349.
5. Jeon, J. H., Yoon, C. G., Kim, H. I. and Hwang, S. J. (2002a) Effect of physical parameters on water quality in agricultural reservoirs. *Korean journal of limnology*, 35(1), 28-35.
6. Jeon, J. H., Yoon, C. G., Kim, H. I. and Hwang, S. J. (2002b) Study on the relationships among water quality parameters in agricultural reservoirs, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 44(3), 136-145.
7. Hwang, S. J., Jeon, J. H., Ham, J. H. and Kim, H. S. (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.
8. Kim, J. K. and Hong, W. H. (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.
9. Kim, B. C., Kim, E. K., Pyo, D. J., Park, H. D. and Heo, W. M. (1995) Toxin from bluegreen algae in Korea lakes. 11(2), 123-128.
10. Ministry of Agriculture and Forestry, Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation (2000) Report on the water quality survey network for agricultural water, Kyeonggi, Korea, KARICO.
11. Ministry of Agriculture and Forestry, Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation (2001) Report on the water quality survey network for agricultural water, Kyeonggi, Korea, KARICO.
12. Ministry of Agriculture and Forestry, Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation (2002) Report on the water quality survey network for agricultural water, Kyeonggi, Korea, KARICO.
13. Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation (2002) A program for the restoration and improvement of reservoir water quality(final), Kyeonggi, Korea, KARICO.
14. Vollenweider, R. A. and Kerekes, J. (1980) OECD cooperative programme on monitoring of inland water, Synthesis Report.
15. Kim, H. I. (2002) A study on the water quality and physical characteristics of agricultural reservoirs, M.S. diss, Seoul, Korea, Konkuk University. p.26.