

충북지역 농업용 저수지의 오염실태 조사연구

Pollution Status for Agricultural Reservoir in Chungbuk Province

오광영*, 김진수**, 송창섭***, 권성일****, 송철민*****

Kwang Young Oh, Jin Soo Kim, Chang Sub Song, Sung Ill Kwon, Chul Min Song

요 지

충청북도 내의 농업용 저수지중 26개소를 선정하여 관개초기, 홍수기 및 비관개기의 연 3회에 걸쳐 저수율을 파악하고 채수를 실시하였다. 또한, 현장(수온, pH, DO, EC)과 실내 수질분석(Cd, As, Cn, Hg, 유기인, Pb, Cr⁶⁺ PCB, ABS, COD, SS, TP, TN)을 실시하여 저수지의 오염도를 평가하였다.

저수율 측정결과, 홍수기(97%)가 관개초기(72%)나 비관개기(66%)보다 높게 나타났다. pH 값의 측정결과, 수질기준(6.0 ~ 8.5)을 만족하고 있는 저수지의 비율은 35%(9개소)의 낮은 값을 보였다. EC와 DO 및 SS농도의 측정결과, 거의 모든 저수지에서 수질기준을 만족하고 있었으며, COD, TN, TP농도 측정결과, 수질기준 만족도는 관개초기 100%, 홍수기 81%, 비관개기 65%로 나타나, 저수량이 많은 관개초기보다 저수량이 적은 비관개기에 질소와 인의 관리가 필요한 것으로 판단된다. 또한, 사람의 건강항목(CN, Hg, 유기인, PCB, Cd, 비소As, Pb, Cr⁶⁺, ABS)은 모든 저수지에서 관개 초기, 홍수기 및 비관개기에 모두 수질기준을 만족하였다.

점오염원을 관리하기 위해서는 저수지 상류유역에 있는 마을하수도를 정비하고, 축산분뇨처리시설 등을 설치하여 저수지로의 유입부하량을 저감할 필요가 있다. 또한, 비점원오염을 관리하기 위한 대책으로서, 질소농도를 저감시키기 위해서는 용존성 성분을 제공하는 비료의 사용량을 줄여야하며, TP농도를 저감시키기 위해서는 강우시 입자성 인의 유출을 제어할 필요가 있으며, 이를 위해서는 비가 많이 오는 여름철에 나지(裸地)나 밭에 식생이나 멀칭(mulching) 등으로 토양침식을 방지할 필요가 있다.

핵심용어 : 농업용 저수지, 오염실태, 점오염원, 비점오염원, 수온, pH, DO, EC, Cd, As, Cn, Hg, 유기인, Pb, Cr⁶⁺, PCB, COD, SS, TP, TN

1. 서 론

지금까지 농업용 저수지는 농업 생산성 증대를 위해 저수량 확보에 전념해 왔으며, 농지에 투입되는 화학비료와 함께 농지의 단위면적당 생산량을 크게 높일 수 있었다. 그러나, 농촌의 산업화에 따른 공장폐수, 축산폐수의 유입 혹은 농촌의 과소화에 따른 관리 소홀로 인한 토양침식의 증대 등으로 수질오염이 급격히 악화되고 있다. 최근에는 생활수준의 향상에 따라 수량뿐만 아니라 수질에 대한 기대치가 높아지면서 합리적인 수질오염관리의 필요성이 강조되고 있다. 전지홍 등(2002)은 농업용 저수지에 있어서 저수지의 물리적 인자가 저수지의 수질에 미치는 영향에 대한 연구를 실시하였으며, 이광식 등(2003)은 농업용수 수질 측정망 조사자료를 분석하고, Chl-a 농도와 유효저수량/만수면적비를 이용하여 498개 저수지에 대하여 유형을 분류하고, 각 유형에 대한 수질개선방안을 제시하였다. 또한, 김호섭과 황순진(2004)는 수심이 얕은 부영양상태의 저수지에서 계절에 따른 수질변화와 이에 대한 유입 부하량의 영향을 평가하는 연구를 수행하였다. 이와 같이, 최근에는 저수지의 오염관리 및 활용성에 관한 연구가 수행되어지고 있지만 아직까지 명확한 개선방안은 수립되지 않고 있다.

* 정희원 · 충북대학교 농업과학기술연구소 특별연구원 · E-mail : dreams01@nate.com

** 정희원 · 충북대학교 농업생명환경대학 교수 · E-mail : jskim@cbnu.ac.kr

*** 정희원 · 충북대학교 농업생명환경대학 교수 · E-mail : cssong@cbnu.ac.kr

**** 정희원 · 충북대학교 농업생명환경대학 특별연구원 · E-mail : xing2@hanmail.net

***** 정희원 · 충북대학교 대학원 석사과정 · E-mail : kaii4@nate.com

이에, 본 장에서는 충북에 산재된 농업용 저수지를 대상으로 오염실태와 경향을 파악하여 수질기초자료를 제공하고 수질개선방안을 제시하고자 한다.

2. 조사 대상자수지의 개요 및 조사방법

2.1 조사 대상저수지의 개요

충청북도 내의 농업용 저수지중 26개소를 선정하여 현장 측정 및 채수를 실시하였다(Fig. 1).

유효저수량은 $209.0 \sim 1,492.0 \times 10^3 \text{m}^3$ 으로 충주의 모점저수지가 가장 크게 나타났으며 단양의 적성저수지가 가장 작게 나타났다. 또한, 가장 오래된 저수지는 1945년에 준공된 충주의 호암저수지와 대제저수지이며 1998년에 준공된 보은의 노티저수지가 가장 최근에 준공되었다.

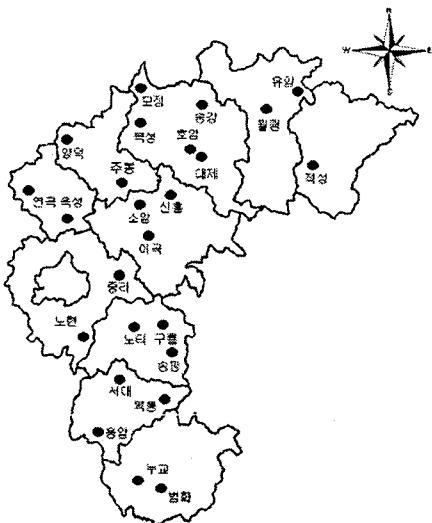


Fig. 1 조사대상 저수지의 위치

2.2 조사방법

저수지의 오염현황을 파악하기 위해 관개 초기, 홍수기 및 비관개기의 3회에 걸쳐 측정을 실시하였다. 1차 측정은 6월 6일부터 8일까지 관개 초기에 실시하였고, 2차 측정은 7월 26일부터 28일까지 홍수기에 실시하였다. 또한, 3차 측정은 관개가 모두 끝난 10월 12일부터 14일까지 실시하였다. 충청북도 내의 농업용 저수지를 관개 초기와 홍수기 및 비관개기의 3회에 걸쳐 저수율을 파악하였고, 채수 및 수질분석(수온, pH, DO, EC, Cd, As, CN, Hg, 유기인, Pb, Cr⁺⁶, PCB, ABS, COD, SS, TP, TN)을 통하여 오염실태를 파악하고자 한다. 수질분석은 수질오염공정시험방법(환경부, 1997)에 의했으며 오염도의 판단기준은 환경정책기본법 제10조 동시행령 제2조에 규정된 호소수질환경기준 "IV등급"을 농업용수원 수질관리의 목표치로 설정 그 기준치를 적용하였다(Table 1).

Table 1 농업용수 수질환경기준

수 역	구 분	등 급	기준(mg/L)						
			수 소 이온농도 (pH)	화 학 적 산소요구량 (COD)	생물화학적 산소요구량 (BOD)	부 유 물질량 (SS)	용 존 산소량 (DO)	총 인 (T-P)	총 질소 (T-N)
호 소	생 활 환 경	IV	6.0~8.5	8이하	-	15이하	2이상	0.1이하	1.0이하
전수역	사람의 건 강 보 호		카드뮴(Cd): 0.01mg/L이하, 비소(AS): 0.05mg/L이하, 시안(CN): 검출되어서는 안됨, 수은(Hg): 검출되어서는 안됨, 유기인: 검출되어서는 안됨, 연(Pb): 0.1 mg/L이하, 6가크롬(Cr+ 6): 0.05 mg/L이하, 포리크로리네이티드비페닐(PCB): 검출되어서는 안됨, 음이온 계면활성제(ABS): 0.5 mg/L이하						

3. 결과 및 고찰

3.1 저수율, 수온, pH

충청북도 내의 조사대상 저수지의 저수율은 관개 초기에는 50~89%로 평균 72%를, 흥수기에는 80~100%로 평균 97%를, 비관개기에는 46~84%로 평균 66%를 보여 강우가 많은 흥수기에 가장 높게 나타났고, 용수률이 끝난 비관개기에 가장 낮게 나타났다(Fig. 2).

관개초기의 수온은 평균 26.2°C, 홍수기는 20.1 ~ 26.8°C로 평균 수온은 23.0°C, 비관개기는 20.7°C로 나타나 관개 초기 홍수기 비관개기 순을 보였다. 홍수기가 관개 초기보다 3.2 °C 낮게 나타난 원인은 장마의 영

향으로 수표면이 일사량을 받지 않았기 때문으로 생각된다.

관개 초기의 평균 pH값은 8.7, 홍수기는 8.5, 비관개기 8.7을 나타내 거의 변동이 없었다(Fig. 3).

농업용수 수질기준인 6.0~8.5를 만족하는 저수지는 관개 초기에 10개, 홍수기에는 9개, 비관개기에는 9개로 나타나, 농업용수 수질기준을 만족하고 있는 저수지의 비율은 각각 38%, 35%, 35%로 나타났고, 나머지 저수지에서는 모두 상한치를 넘는 것으로 나타났다. 또한, 각 저수지의 pH값을 평균한 결과, 수질기준을 만족하는 비율은 35%로 비교적 낮은 값을 보였다.

3.2 EC, DO, COD 및 SS

수체 내 이온의 농도를 나타내는 EC(전기전도도)의 기준은 2000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 이다. 관개 초기의 값은 평균 123.8 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 를, 홍수기는 86.1 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 비관개기는 104.8 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 를 나타내, 세 시기에서 모든 저수지가 수질기준을 만족하고 있는 것으로 나타났고, 관개 초기가 홍수기나 비관개기보다 약간 높은 값을 나타냈다(Fig. 4).

환경부에서 정하는 DO(용존산소량)의 농업용수 수질기준(호소)은 2.0 mg/L 이상이다. 관개 초기에 측정된 DO농도값은 평균 8.6 mg/L로 나타났고, 홍수기에는 12.8 mg/L, 비관개기는 6.4 mg/L로 나타나, 모든 저수지가 농업용수 수질기준을 만족하였다. 또한, 홍수기가 관개 초기보다 4.2 mg/L, 비관개기보다 6.4 mg/L가량 높은 값을 나타냈다(Fig. 5).

COD(화학적 산소요구량)의 수질기준은 8 mg/L 이하이다. 관개 초기의 COD농도의 평균값은 5.0 mg/L, 홍수기는 4.7 mg/L, 비관개기는 7.4 mg/L를 보여, 비관개기에 가장 높은 것으로 나타났고, 조사대상 저수지중 수질기준을 만족하고 있는 비율은 각각 92%, 85%, 73%의 값을 보였다(Fig. 6). 본 연구에서의 3회 평균값은 5.7 mg/L로 나타났고, 조사저수지중 22개 저수지가 수질기준값보다 낮은 값을 보여 85%의 만족도를 보였다.

SS(부유물질량)의 평균농도값은 관개초기에 9.4 mg/L, 홍수기에 5.5 mg/L, 비관개기에 4.2 mg/L로 나타났으며, 수질기준을 만족하고 있는 저수지의 비율은 각각 77%, 92%, 96%로 나타났다(Fig. 7).

조사지역의 3회 평균값은 6.4 mg/L로 나타났으며, 26개 저수지중 옥천군의 서대저수지를 제외하고는 25개의 저수지가 모두 수질기준값을 만족하여 96%의 만족도를 보였다.

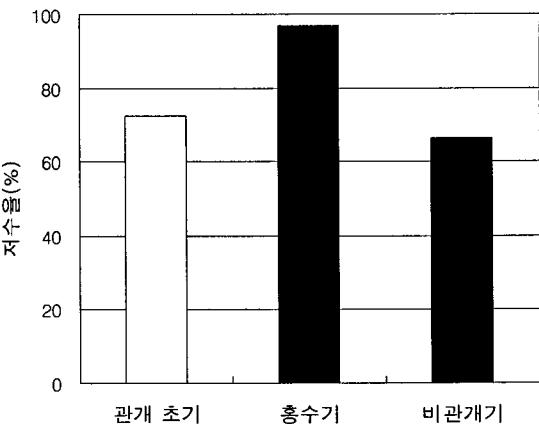


Fig. 2 저수율 비교

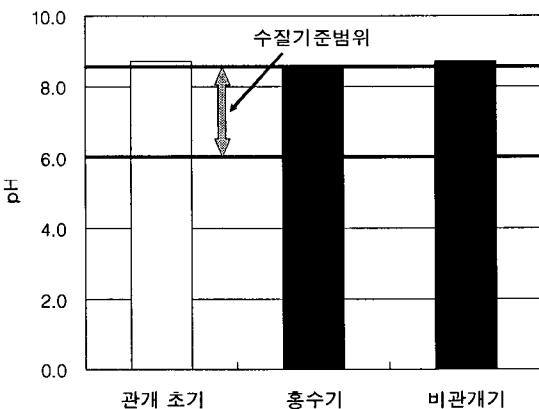


Fig. 3 pH값의 비교

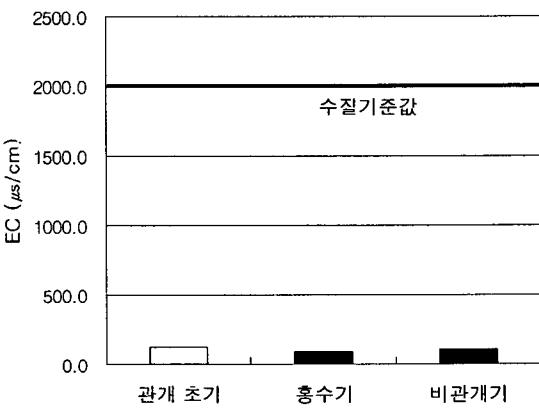


Fig. 4 EC 비교

3.3 TN(총질소), TP(총인)

3.3.1. TN농도의 변화

관개 초기 TN(총질소)의 평균농도값은 1.5 mg/L, 홍수기는 2.3 mg/L, 비관개기는 1.4 mg/L로 나타나, 홍수기에 가장 높은 상승을 보였고, 수질기준을 만족하는 저수지의 비율은 각각 38%, 19%, 42%를 보였다. 그러나 우리나라의 수질기준은 TN/TP의 비율이 16이상일 경우 TN 기준의 적용을 배제하고 있어, TN/TP비를 고려하여 수질기준을 판단할 필요가 있다. 또한, 본 연구에서의 3회 평균값은 1.7 mg/L로 나타났으며, 모두 농업용수 수질기준 값을 초과하는 것으로 나타났다.

3.3.2. TP농도의 변화

TP(총인)의 평균농도값은 관개 초기 0.02 mg/L, 홍수기 0.07 mg/L, 비관개기 0.10 mg/L으로 비관개기가 가장 높은 값을 보였으며, 수질기준을 만족하고 있는 저수지의 비율은 각각 96%, 81%, 65%로 나타났다.

본 연구에서 3회의 TP 평균 농도는 0.06 mg/L로 나타났고, 이는 농업용수 수질기준(0.1 mg/L)을 하회하는 값이다.

3.3.3. TN/TP비를 고려한 수질기준 만족도

생물성장은 가장 결핍되는 성분에 의하여 지배된다는 Leibig의 최소량의 법칙(Leibig's law of minimum)에 의하면 이론적으로는 N/P비가 7.2보다 크면 인이 성장제한인자가 되어 인농도에 따라 조류의 성장속도가 달라진다. 한편, N/P비가 7.2보다 작으면 질소농도에 따라 조류의 성장속도가 달라진다. 실제로는 N/P비가 20이상일 때 인성분이 제한인자가 되고, N/P비가 5이하일 때 질소성분이 제한인자가 되며, N/P비는 5~20에서 부영양화가 일어나기 쉬운 조건이 되는 것으로 알려져 있다(Thomann & Mueller, 1987).

국내의 환경정책 기본법상 총인과 총질소의 경우, 총인에 대한 총질소의 농도비율(N/P비)이 7미만일 경우에는 총인의 기준(0.1 mg/L이하)은 적용하지 아니하며, 16이상일 경우에는 총질소의 기준(1.0 mg/L이하)은 적용하지 않는다.

관개 초기에는 모든 저수지의 N/P비가 16이상으로 나타나, 모든 저수지(100%)가 수질기준을 만족하고 있는 것으로 나타났다.
홍수기에는 질소와 인을 동시에 관리해야 하는 저수지가 3개, 인만의 관리가 필요한 것이 2개로 나타나, 수질기준을 만족하고 있는 저수지의 비율은 81%로 나타났다.
비관개기에는 질소와 인을 동시에 관리해야 하는 저수지는 6개, 질소만의 관리가 필요한 것은 1개, 인만

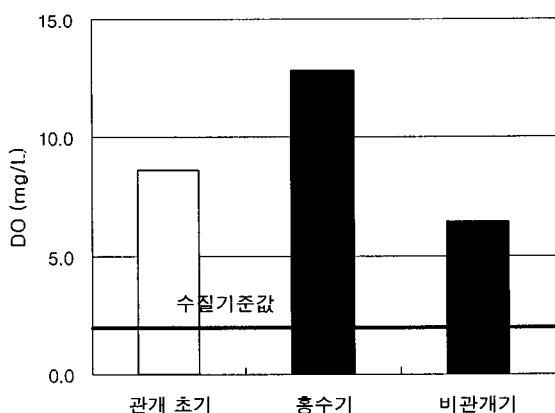


Fig. 5 DO농도 비교

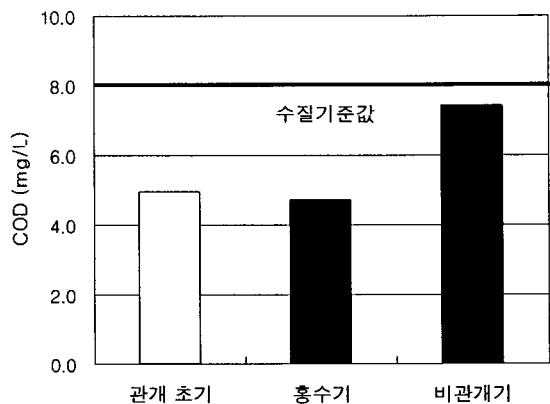


Fig. 6 COD농도 비교

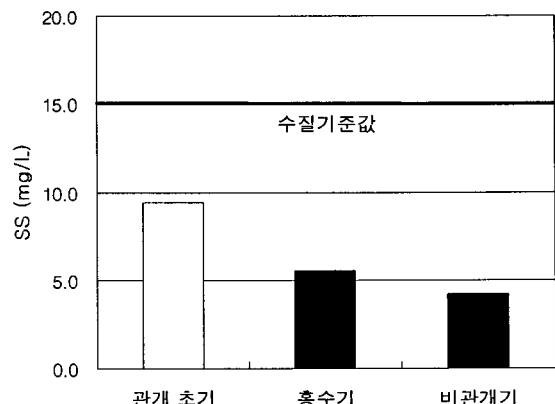


Fig. 7 SS농도 비교

의 관리가 필요한 것은 2개로 나타나, 수질기준을 만족하고 있는 저수지의 비율은 65%로 나타났다. 따라서, 저수량이 많은 관개초기보다 저수량이 적은 비관개기에 질소와 인의 관리가 필요한 것으로 판단된다.

관개초기, 홍수기, 비관개기의 3회 평균한 결과, 질소와 인을 동시에 관리해야 하는 저수지는 1개, 인만의 관리가 필요한 것은 3개로 나타나, 수질기준을 만족하고 있는 저수지의 비율이 85%로 나타났다.

(Fig. 8).

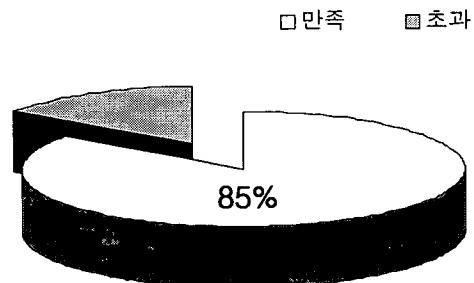


Fig. 8 N/P비에 의한 TN과 TP의 수질기준만족도

3.4 Cr, Cd, As, Pb, Hg, CN, 유기인, PCB, ABS

환경부에서 정하는 사람의 건강항목으로 수질기준은 시안(CN), 수은(Hg), 유기인, 폴리크로리네이티드비페닐(PCB)은 검출되어서는 안되며, 카드뮴(Cd)은 0.01 mg/L이하, 비소(As)는 0.05 mg/L이하, 납(Pb)은 0.1 mg/L이하, 6가크롬(Cr^{6+})은 0.05 mg/L이하, 음이온계면활성제(ABS)는 0.5 mg/L이하를 만족해야만 한다. 본 연구의 조사대상 저수지에서는 수질분석 결과, 모든 저수지가 관개 초기, 홍수기, 비관개기 모두에서 상기 항목의 수질기준을 만족하는 것으로 나타났다.

우리나라 농업용 수리시설은 대부분 유효저수량 500만 m^3 이하의 소규모이며, 저수지의 위치가 대부분 수계의 상류지류와 계곡에 위치해 있어 수질관리에 어려움이 있다. 대부분의 하수처리장이 대도시 중심으로 건설되어 농어촌지역의 하수발생량의 소량만이 마을하수처리장에서 처리되고 있는 실정이며, 농어촌지역의 생활수준 향상 등으로 수세식화장실 등 물의 수요량은 계속 증가하고 있어 호수 유입 오염량은 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. 또한, 축산농가가 점점 대형화되는 추세에 있고, 축산농가 대부분 상수원 보호구역 등 수질이 양호하게 유지되어야 하는 하천이나 호소의 상류지역 등 하수미처리 구역에 위치하고 있으며, 농민들의 환경의식 부족 등으로 처리시설을 갖추고도 제대로 관리되지 않아 하천이나 호소에 대한 오염 기여율이 다른 오·폐수에 비해 상당히 높은 편이다.

이러한 오염원은 크게 점오염원과 비점오염원의 측면에서 관리가 이루어져야 할 것이며, 점오염원을 관리하기 위해서는 저수지 상류유역에 있는 마을하수도를 정비하고, 축산분뇨처리시설 등을 설치하여 저수지로의 유입부하량을 저감할 필요가 있다. 또한, 비점원오염을 관리하기 위한 대책으로서 질소농도를 저감시키기 위해서는 용존성 성분을 제공하는 비료의 사용량을 줄여야한다. 또한, TP농도를 저감시키기 위해서는 강우시 입자성 인의 유출을 제어할 필요가 있으며, 이를 위해서는 비가 많이 오는 여름철에 나지(裸地)나 밭에 식생이나 멀칭(mulching) 등으로 토양침식을 방지하는 대책이나 하천변에 완충역(riparian buffer zone)을 설치하는 대책이 필요하다.

4. 결 론

충청북도 내의 농업용 저수지 중 26개소를 선정하여 관개초기, 홍수기 및 비관개기의 연 3회에 걸쳐 저수율을 파악하고 채수를 실시하였다. 또한, 현장(수온, pH, DO, EC)과 실내 수질분석(Cd, As, Cn, Hg, 유기인, Pb, Cr^{6+} , PCB, ABS, COD, SS, TP, TN)을 실시하여 저수지의 오염도를 평가하였다.

저수지의 평균 저수율은 관개초기에 72%를 보였고, 홍수기는 97%를 보였으며, 비관개기에는 66%를 보여 홍수기가 가장 높게 나타났다. pH 값은 관개 초기에 8.7, 홍수기에 8.5, 비관개기에 8.7로 거의 일정한 값을 나타냈으며 평균 8.6로 나타났다. 3회 측정결과, 수질기준(6.0 ~ 8.5)을 만족하고 있는 저수지는 26개 중 9개로, 그 비율은 35%의 낮은 값을 보였다.

EC와 DO농도의 측정결과, EC의 수질기준 2000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 과 DO농도의 수질기준 2 mg/L 이상의 조건을 관개초기, 홍수기, 비관개기의 모든 저수지에서 만족하였으며, EC는 관개 초기(123.8 $\mu\text{s}/\text{cm}$)가 가장 높게 나타났고 홍수기(86.1 $\mu\text{s}/\text{cm}$)에 감소하는 경향을 보였으며, 비관개기(104.8 $\mu\text{s}/\text{cm}$)에 다시 상승하는 경향을 보였다.

또한, DO농도는 홍수기(12.8 mg/L)에 가장 높은 농도를 보였으며, 관개초기(8.6 mg/L), 비관개기(6.4 mg/L)의 순으로 나타났다. COD의 평균농도는, 관개 초기에 5.0 mg/L, 홍수시에 4.7 mg/L, 비관개기에 7.4 mg/L를 나타내 평균 5.7 mg/L를 보였다. 비관개기가 관개초기와 홍수시보다 높은 농도값을 나타냈지만 수질기준 8.0 mg/L이하의 조건을 만족하였다. 3회의 평균농도는 26개 저수지중 21개 저수지가 수질기준을 만족하고 있어, 수질기준을 만족하고 있는 저수지의 비율은 81%로 나타났다.

TN/TP비에 따른 수질기준 적용결과, 관개 초기에는 저수지가 수질기준을 만족하고 있는 비율은 관개 초기에는 100%, 홍수기에는 81%, 강우시에는 65%로 나타났다. 따라서, 저수량이 많은 관개초기보다 저수량이 적은 비관개기에 질소와 인의 관리가 필요한 것으로 판단된다. 또한, 관개초기, 홍수기, 비관개기의 3회 평균 한 결과, TN과 TP의 관리가 필요한 저수지가 1개, TP만의 관리가 필요한 저수지는 3개를 보여, 수질기준을 만족하고 있는 저수지의 비율은 85%로 나타났다. 사람의 건강항목에 대한 수질기준인 시안(CN), 수은(Hg), 유기인, 폴리크로리네이티드비페닐(PCB), 카드뮴(Cd), 비소(As), 납(Pb), 6가크롬(Cr^{6+}), 음이온계면활성제(ABS)는 모든 저수지에서 관개 초기, 홍수기 및 비관개기에 모두 수질기준을 만족하였다.

저수지의 오염원 관리는 크게 점오염원과 비점원오염의 관리로 구분할 수 있고, 점오염원을 관리하기 위해서는 저수지 상류유역에 있는 마을하수도를 정비하고, 축산분뇨처리시설 등을 설치하여 저수지로의 유입부하량을 저감할 필요가 있다. 또한, 비점원오염을 관리하기 위한 대책으로서, 질소농도를 저감시키기 위해서는 용존성 성분을 제공하는 비료의 사용량을 줄여야하며, TP농도를 저감시키기 위해서는 강우시 입자성 인의 유출을 제어할 필요가 있으며, 이를 위해서는 비가 많이 오는 여름철에 나지(裸地)나 밭에 식생이나 멀칭(mulching) 등으로 토양침식을 방지할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. 김호섭, 황순진(2004). 얇은 부영양 저수지의 육수학적 특성-계절에 따른 수질변화, *Korean J. Limnol.*, 37(2), pp.180~192.
2. 이광식, 윤경섭, 김형중, 김호일(2003). 농업용 저수지의 부영양화와 수질관리방안, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 22(2), pp.166~171.
3. 전지홍, 윤춘경, 함종화, 김호일, 황순진(2002). 농업용 저수지의 물리적 인자가 수질에 미치는 영향, *Korean J. Limnol.*, 35(1), pp.28~35.
4. 환경부(1997). 수질오염공정시험방법.
5. Thoman, R. V., and J. R. Mueller(1987). *Principles of surface water quality modeling and control*, Harper and Row, pp. 399~404.