



안동시 저수지에서의 대량 어류 폐사에 대한 원인과 대책에 관한 연구

배수호¹, 황선진², 김연정³, 정철호⁴, 김성윤⁵, 유건상^{5*}

¹국립안동대학교 공과대학 건설시스템공학과, ²경희대학교 공과대학 환경학 및 환경공학과, ³국립안동대학교 공동실험실습관,

⁴국립안동대학교 사회과학대학 법학과, ⁵국립안동대학교 과학기술대학 화학생명과학과

Study on Causes and Countermeasures for the Mass Death of Fish in Reservoirs in Andong-si

Su Ho Bae¹, Sun Jin Hwang², Youn Jung Kim³, Cheol Ho Jeong⁴, Seong Yun Kim⁵ and Keon Sang Ryoo^{5*} (¹Department of Civil Systems Engineering, College of Engineering, Andong National University, Andong 36729, Korea, ²Environmental Science & Environmental Engineering, College of Engineering, Kyung Hee University, Yongin 17104, Korea, ³Center for Instrumental Analysis, Andong National University, Andong 36729, Korea, ⁴Department of Law, College of Social Sciences, Andong National University, Andong 36729, Korea, ⁵Department of Chemical and Biological Engineering, College of Science and Technology, Andong National University, Andong 36729, Korea)

Received: 30 January 2023/ Revised: 8 March 2023/ Accepted: 26 March 2023

Copyright © 2023 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Su Ho Bae

<https://orcid.org/0000-0002-9042-1284>

Sun Jin Hwang

<https://orcid.org/0000-0001-8262-5904>

Youn Jung Kim

<https://orcid.org/0000-0001-8262-5909>

Cheol Ho Jeong

<https://orcid.org/0000-0002-5266-1586>

Seong Yun Kim

<https://orcid.org/0000-0003-2122-5494>

Keon Sang Ryoo

<https://orcid.org/0000-0001-8262-5909>

Abstract

This study focused on determining the specific causes and prevention methods of mass fish deaths occurred in five reservoirs (Gagugi, Neupgokgi, Danggokgi, Sagokji, and Hangokji) in Andong-si. For this purpose, a survey of agricultural land and livestock in the upper part of the reservoirs and analysis of water quality in the reservoir irrespective of whether it rains or not were conducted. We attempted to examine the changes in dissolved oxygen (DO) in the surface and bottom layers of reservoirs and changes in DO depending on the amount of livestock compost and time. Based on the above investigations, treatment plans

were established to efficiently control the inflow of contaminated water into reservoirs. The rainfall and farmland areas in the upper part of the reservoir were investigated using Google and aviation data provided by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. The current status of livestock farms distributed around the reservoirs was also examined because compost from these farms can flow into the reservoir when it rains. Various water quality parameters, such as phosphate phosphorus (PO_4-P) and ammonium nitrogen (NH_3-N), were analyzed and compared for each reservoir during the rainy season. Changes in the DO concentration and electrical conductivity (EC) were also observed at the inlet of the reservoir during raining using an automated instrument. In addition, DO was measured until the concentration reached 0 ppm in 10 min by adding livestock compost at various concentrations (0.05%,

* Corresponding author: Keon Sang Ryoo
Phone: +82-54-820-5453; Fax: +82-54-822-5452;
E-mail: ksr@andong.ac.kr

0.1%, 0.3%, and 0.5% by wt.), where the concentration of the livestock compost represents the relative weight of rainwater. The DO concentration in the surface layer of reservoirs was 3.7 to 5.3 ppm, which is sufficient for fish survival. However, the fish could not survive at the bottom layer with DO concentration of 0.0-2.1 ppm. When the livestock compost was 0.3%, DO required 10-19 h to reach 0 ppm. Considering these results, it was confirmed that the DO in the bottom layer of the reservoir could easily change to an anaerobic state within 24 h when the livestock compost in the rainwater exceeds 0.3%. The results show that the direct cause of fish mortality is the inflow of excessive livestock compost into reservoirs during the first rainfall in spring. All the surveyed reservoirs had relatively good topographical features for the inflow of compost generated from livestock farms. This keeps the bottom layer of the reservoir free of oxygen. Therefore, to prevent fish death due to insufficient DO in the reservoir, measures should be undertaken to limit the amount of livestock compost flowing into the reservoir within 0.3%, which has been experimentally determined. As a basic countermeasure, minerals such as limestone, dolomite, and magnesia containing calcium and magnesium should be added to the compost of livestock farms around the reservoir. These minerals have excellent pollutant removal capabilities when sprayed onto the compost. In addition, measures should be taken to prevent fish death according to the characteristics of each reservoir.

Key words: Compost, Dissolved oxygen, Fish death, Livestock, Reservoir

서 론

안동지역에 위치해 있는 농사 목적용 저수지 중 봄철에만 5개 저수지에서 바닥 층에 주로 서식하는 큰 붕어류의 집단 폐사가 가끔 발생하였다. 그리하여 안동시에서는 그 원인을 파악하기 위해 어류, 수질, 독성물질 등을 전공하는 각각의 전문가를 동원하여 위의 원인을 밝히려는 연구를 다방면으로 시행하였으나 수많은 노력에도 불구하고 어류폐사의 직접적인 원인을 정확히 규명할 수 없어 이를 해결하기 위한 근본적인 대책을 세우지 못하고 있는 실정이다. 어류폐사의 원인으로는 수온의 갑작스런 변화[1], 용존산소의 고갈[2], 암모니아성 질소[3], 생활하수와 중금속의 유입[4], 식물성 플랑크톤의 독소 및 병원균에 의한 감염[5], 강우의 발생 패턴[6] 등의 다양한 원인들이 보고되어 왔다. 그러나 현장에서 어류폐사가 발생했을 때 어류폐사의 발생을 즉시 규명하거나 예측할 수 있는 시스템 구축이 미흡한 상태이기 때문에 어류폐사의 직접적인 원인을

찾는 것은 매우 어려운 상황이다. 국외의 경우, 호주의 노던(Northern) 주에서는 어류폐사가 일어났을 때 어류폐사 조사 매뉴얼을 작성하여 어류폐사 사고에 대한 기록, 자료 수집, 평가 및 보고 등을 제공하여 신속한 원인규명이 이루어지도록 하고 있다[6]. 이외에도 호주의 퀸즈랜드(Queensland) 주의 환경유산학과(Department of Environment and Heritage)에서는 어류폐사 보고 및 조사 매뉴얼을 제작하여 어류 폐사의 보고 조사 및 원인 분석과정에 대한 지침을 제시하고 있다[6].

과거 국내의 농사용 저수지에서 발생된 어류의 집단 폐사 사례는 다음과 같다. 강원도 춘천시 의암호(2004. 07. 17.)에서 메기, 붕어 등 300여 마리가 집단폐사 한 사례가 발생하였으며, 발생 원인에 대한 분석결과 인근 농경지에서 유입된 농약으로 인해 집단 폐사가 발생한 것으로 확인하였다. 경기도 시흥시 물왕저수지(2006. 05. 27.)에서 붕어 등 수백여 마리의 어류 폐사 사례는 농번기 저수지용수의 이용에 따른 수량감소와 이로 인한 수표면적의 급감으로 용존산소가 부족해지고, 적어진 수량으로 인한 빠른 수온 증가로 미생물 및 조류 등의 활성이 증가함에 따라 용존산소가 고갈되어 어류가 폐사로 이어진 것으로 추정하였다. 전남 무안군 영산호(2006. 06. 06.)에서의 어류 폐사는 상류에서 장기간에 걸쳐 유입되고 있는 영양염류와 이미 영산호 내 상당량 침적되어 있던 퇴적물로 인하여 수온상승에 따른 부영양화가 나타남에 따라 국지적 산소 고갈로 인해 수천여 마리의 어류가 폐사한 것으로 파악하였다. 경북 구미시 안곡저수지(2008. 07. 30.)에서 붕어 등의 폐사 사례는 저수지의 규모가 대체로 작고 당시 수심이 낮았던 당시 상황으로 인해 여름철 불볕더위에 따른 저수지 내 수온 급증으로 인해 용존산소가 고갈됨에 따라 집단폐사가 발생한 것으로 판단하고 있으며, 본 사고로 인해 붕어 등이 약 5-10톤 가량 폐사한 것으로 보고하였다. 강원도 영월군 장릉저수지(2009. 08. 20.)에서의 붕어, 잉어 등에 대한 폐사는 대체로 규모가 작은 저수지 내로 생활하수가 직접적으로 유입되고 있어 수질오염 및 유기오염물 등의 퇴적으로 인해 어류 폐사가 발생한 것으로 추정하였다. 경남 김해시 안동유수지(2009. 09. 30.)에서는 붕어, 잉어 등의 어류 폐사 발생 전 상당기간 가뭄으로 수량이 감소해 있었으며, 강우로 인해 주변 농경지로부터 다량의 영양염류와 오염물질이 일시적으로 유입됨에 따라 급격한 부영양화로 집단폐사가 발생한 것으로 추정하였다. 경기도 시흥시 과림저수지(2013. 03. 07.)에서는 떡붕어 등이 수만 마리가 폐사하였으며, 폐사에 따른 원인을 분석한 결과 동절기에 저수지가 전반적으로 결빙됨에 따라 용존산소의 부족과 얕은 저수지의 특성으로 바닥까지 결빙되어 어류가 동사하였을 가능성이 있다고 판단하였다. 해외의 경우에도 강, 호수, 어귀, 그리고 해안가에서 물고기의 대량 폐사의 원인은 예를 들어, 염분, 온도, 용존산소, 독성 화학물질, 그리고 조류 증식과 같은 환경적 인자에 의해서 발생된다고 보고되고 있다[7].

본 연구의 대상 저수지는 안동에 위치한 가구지, 늘곡지, 당곡지, 사곡지, 한곡지로서, 각각의 제원을 파악하고 주변 환경을 조사하여 어류 폐사의 원인과 그 연관성을 알아보았다. 이를 위해 우선적으로 저수지 상부의 강우영향권의 면적과 농

지가 차지하는 면적을 측정하였고, 이후 저수지 상부를 중심으로 주변에 분포되어 있는 축산농가 현황을 파악하여 강우 시 농지에 살포된 가축분뇨비가 오염원으로 작용하는 비중을 조사하였다. 비가 오기 전, 후의 저수지 수질 상태를 비교해 보기 위하여 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC; electrical conductivity), 총유기탄소(TOC; total organic carbon), 부유물질(SS; suspended solids), 총질소(T-N; total nitrogen), 총인(T-P; total phosphorous), 인산성인($\text{PO}_4\text{-P}$), 암모니아성질소($\text{NH}_4\text{-N}$), 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$)를 비교 분석하여, 강우 시 이들의 오염농도 증가에 의해 어류가 폐사되는지 확인하였다. 또한, 비 강우시 5개 저수지의 바닥층의 온도대비 용존산소를 분석하여 바닥층의 상태를 관찰하였다. 특히, 사과지 대상으로 강우 시 15시간 동안 전기전도도와 용존산소량의 변화를 관찰하여 오염원의 증가에 따른 용존산소 변화량을 알아보았다. 그리고 가축분뇨비의 유입농도 별로 시간에 따른 수중의 전기전도도와 용존산소량의 변화를 실험하여 농지에 살포된 퇴비가 저수지로 유입 시 저수지 내에서 일시적으로 용존산소량에 미치는 영향을 알아보았다. 최종적으로 각각의 저수지 특성을 고려한 실질적인 대책안을 마련하고자 하였다.

재료 및 방법

조사대상 저수지의 제원

어류 폐사가 일어났던 경상북도 안동시 인근 주변에 있는

5개 저수지의 위치(Fig. 1)와 제원(Fig. 2)을 측정하였다. 제원으로는 배수면적(Drainage area), 관개면적(Irrigation area), 총저수량(Total storage), 유효저수량(Effective storage)이다. 5개 저수지 상부지역 일대 강우권의 전체면적과 농지면적은 구글(Google)과 국토부에서 제공하는 항공 자료를 활용하여 조사하였다. 기상청의 전국 연간 강수량 통계자료를 이용하여, 5개 저수지 상부지역의 강우권 면적 대비 강우량을 조사한 후 저수지에 실질적으로 유입된 강우량을 산출하였다. 이외에도 강우 시 농지에 살포한 가축분뇨비가 저수지로 유입될 가능성으로 인해 저수지 상부와 주위에 있는 축산농가 현황을 파악하였다.

조사 저수지의 수질 분석

저수지 수질의 분석은 수질오염공정시험법에 의거하여 시행하였다. pH와 EC는 pH 미터와 EC meter로 현장에서 각각 측정하였으며, TOC는 TOC 측정기(Vario TOC cube, Elementar, Germany)로 분석하였다. SS는 유리섬유 여지(GF/C)를 여과지에 부착한 후 시료를 여과하고 향량으로 건조하여 무게를 달아 여과 전과 후의 무게의 차이로 구하였다. T-N과 T-P는 자외선 흡광법과 아스크로빈산환원법으로 처리 후 UV/Vis 분광광도기(Scinco, S-3100, Korea)를 이용하여 각각 파장이 215 nm와 880 nm에서 측정하였다. $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{NH}_3\text{-N}$, 그리고 $\text{NO}_3\text{-N}$ 는 이온크로마토그래피법을 이용하여 분석하였다(940 Professional IC Vario, Swiss, Metrohm).

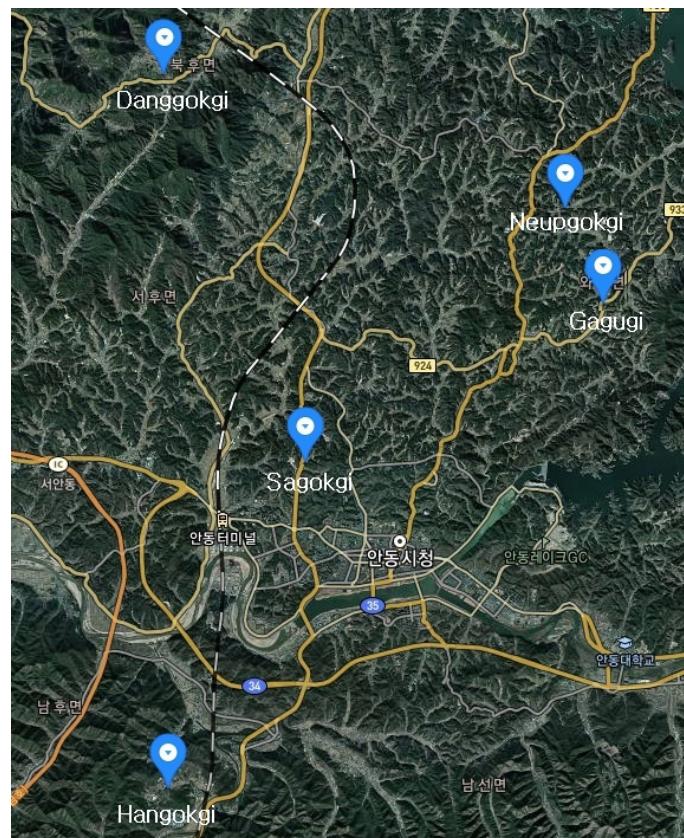


Fig. 1. Map of reservoirs subject to survey in Andong-city.

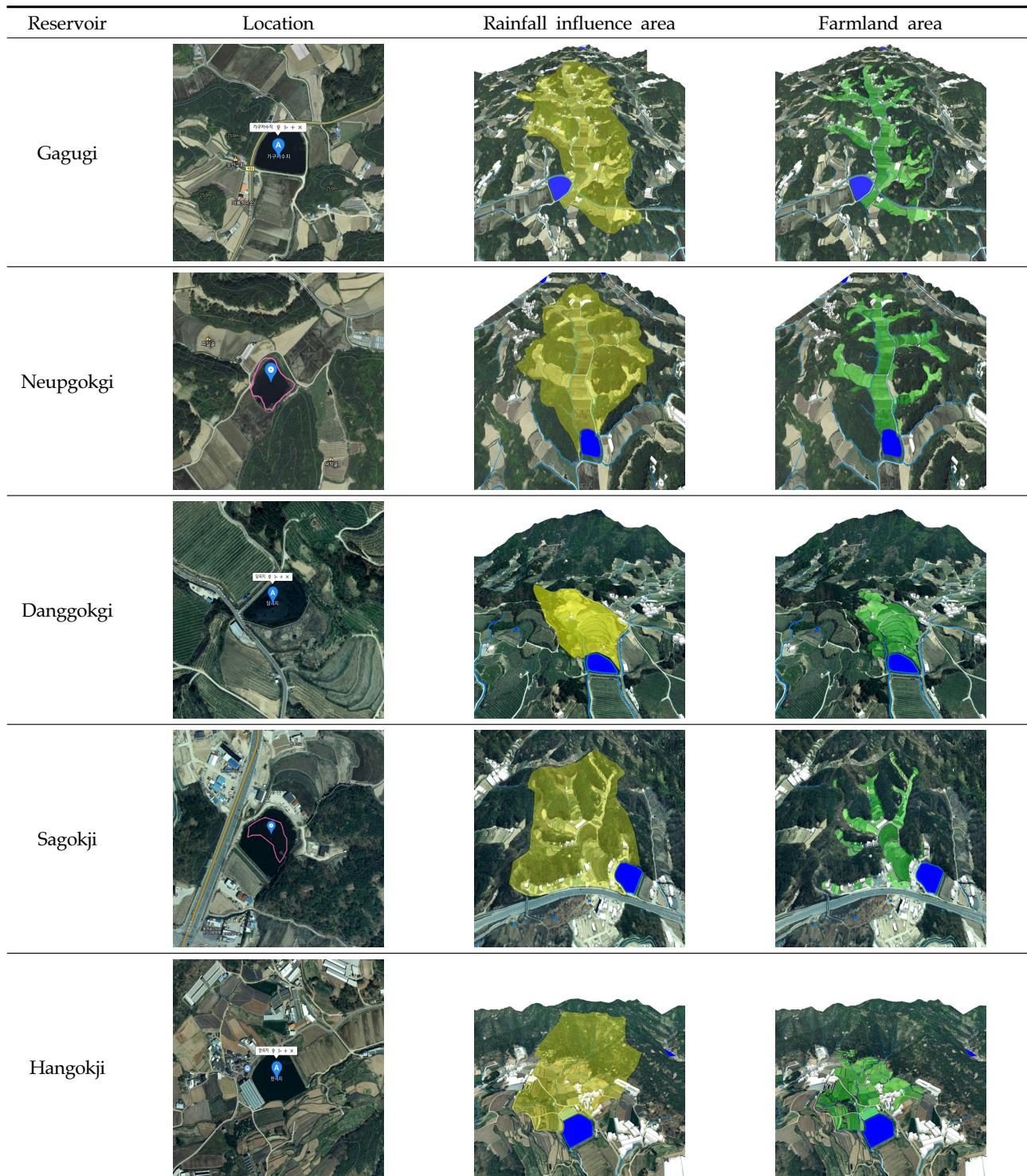


Fig. 2. Rainfall Influence area and farmland area of reservoirs taken by aerial photographs.

용존산소(DO) 측정

각 저수지마다 저수지의 상층부와 하층부의 DO 농도를 측정하였다. DO의 측정위치는 우수가 저수지 내로 유입되는 장소였으며 표층수는 저수지의 표층으로부터 30 cm 아래에서, 바닥 층은 깊이가 2 m 이상 되는 지점에서 채취하였다. 특히, 봄철 퇴비 살포 후 첫 비가 내렸을 때 사과지 대상으로 EC와

DO 자동 측정기를 설치하여, 15시간 동안 시간에 따른 수중의 EC와 DO가 실시간으로 변화되는 양을 측정하였다. 이외에도 실험실 내에서 가축분 퇴비 농도에 따른 DO 농도의 변화량을 알아보기 위해서 종류수에 가축분 퇴비를 농도별(0.05%, 0.1%, 0.3%, 0.5 wt.%)로 첨가하여 DO의 변화를 10분 단위로 0 ppm까지 도달할 때까지 측정하였다.

결과 및 고찰

저수지의 제원

조사대상 저수지는 안동에 위치한 가구지, 늘곡지, 당곡지, 사곡지, 한곡지 5곳이다. 각각의 저수지 제원에 대한 현황을 Table 1에 나타내었다. 가구지는 와룡면 지내리 164에 위치해 있으며 배수면적은 107 ha 규모이고 2014년과 2018년 2차례 어류 집단폐사가 발생한 저수지이다. 와룡면 가야리 706에 위치한 늘곡지의 배수면적은 55 ha이며 2021년 어류의 집단폐사가 발생하였다. 당곡지는 북후면 월전리 62-2에 위치해 있으며 11 ha 규모의 배수면적을 가지고 있고 2021년에 어류의 집단폐사가 일어났다. 송현동 105에 위치한 사곡지는 배수면적은 32 ha 규모이며 2015년과 2021년 2차례에 걸쳐 어류의 집단폐사가 일어난 저수지이다. 남후면 광음리 810에 위치한 한곡지의 배수면적은 46 ha 규모로서 2021년 폐사가 발생하였다.

저수지의 주변 현황

Fig. 2에 저수지 위치, 강우영향권 면적, 그리고 농지 면적을 항공사진으로 나타내었다. 가구지의 강우영향권 면적은 1,043,160 m²이며, 강우영향권 내의 면적 대비 농지 면적은 377,065 m²으로서 강우영향권의 36.2%가 농지로 이루어져 있었다. 이 저수지는 전반적으로 수로 양방향으로 농지가 흘러져 퍼져있었고 저수지 상부에는 우사들이 분포되어 있었으며 경사도는 완만하였다. 늘곡지는 강우영향권의 면적은 524,423 m²이고, 강우영향권 내의 농지면적은 190,295 m²으로서 농지가 차지하는 면적은 강우영향권의 36.3%이었다. 이 저수지는 대부분 수로 양방향으로 농지가 배치되어 있었고, 저수지의 상부에는 대규모 우사들이 분포되어 있었으며 경사도가 완만하게 이루어져 있었다. 당곡지의 강우영향권 면적은 84,462 m²이었으며, 강우영향권 내의 농지면적은 44,701 m²으로서 강우영향권의 52.9%가 농지로 되어 있었다. 당곡지는 대부분이 농지 양방향으로 수로가 분포되어 있었으며 저수지 상부에는 우사들이 그다지 많지 않았으나 과수원이 많이 분포되어 있었고 경사도는 상당히 각도를 이루었다. 사곡지는 강우영향권의 면적은 269,065 m²이며, 강우영향권 내의 농지면적은 60,161 m²으로서 강우영향권의 22.3%가 농지이었다. 사곡지는 대체로 농지 양방향으로 수로가 위치되어 있었고 저수지 상부에는 우사들이 분포되어 있었으며 경사도가 완만한 상태였다. 한곡지는 강우영향권의 면적은 530,229 m²이며, 강우영향권 내의 농

지 면적은 133,690 m²으로서 강우영향권의 25.1%가 농지로 이루어져 있었다. 이 저수지는 대부분이 농지 중앙과 양방향으로 수로가 고르게 배치되어 있었고, 저수지 상부에는 대규모 우사들이 분포되어 있었으며, 산이 높고 경사도가 일반 저수지에 비하여 급격하게 되어 있었다.

저수지 오염도 분석

2022년 5월 22일 비강우시와 6월 6일 강우 직후 2회에 걸쳐 저수지에서 시료를 채취하여 분석한 결과를 Table 2와 3에 나타내었고, 이를 바탕으로 각각의 저수지의 수질 상태를 비교하여 오염도와 어류폐사의 상관성을 알아보았다. 비강우시 각 저수지의 pH는 7.0-7.6 범위였으며 강우시와 비교하였을 때 큰 차이점을 보이지 않았다. EC의 경우 비강우시는 258-449 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 강우 시는 304-439 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로서 커다란 차이가 없었다. TOC는 비강우시 5.38-8.25 mg/L이었으며, 강우 시는 6.48-11.77 mg/L로서 다소 약간의 차이를 보였다. TOC의 값은 비강우시 한곡지에서, 강우시에는 당곡지에서 가장 높게 나타났다. SS는 비강우시 7.6-21.8 mg/L이었으며, 강우 시는 2.1-16.7 mg/L로서 다소 차이가 있었다. 비강우시 당곡지에서는 SS가 7.6 mg/L에서 강우시 14.6 mg/L로 2배 정도 증가하였으나, 한곡지에서는 3배 정도 감소된 경향을 나타내었다. 각 저수지에서 측정된 T-N은 비강우시 19.5-32.67 mg/L이었고, 강우 시에는 0.63-22.28 mg/L로서 저수지마다 큰 차이점을 보였다. 특히 가구지에서의 T-N 농도는 비강우시에 21.96 mg/L이었으나 강우시에는 0.63 mg/L로서 매우 낮게 측정되었다. T-P의 경우, 가우지를 제외하고는 비강우시 0.73-0.89 mg/L이었으며, 강우 시는 0.79-1.04 mg/L로서 비교적 유사한 수준의 농도를 보였다. PO₄-P도 가우지를 제외하고는 각 저수지에 대하여 비강우시 0.61-0.75 mg/L, 강우 시는 0.61-0.64 mg/L로서 농도의 차이가 거의 없었다. NH₄-N은 비강우시 1.47-6.41 mg/L이었고 강우 시에는 0.47-4.61 mg/L로서 저수지마다 농도의 큰 차이를 나타내었다. 다른 저수지와 비교했을 때 가우지의 NH₄-N의 함량은 가장 낮게 나타났다. 저수지마다 NO₃-N을 측정하였을 때, 비강우시는 0.34-4.22 mg/L였으며, 강우 시는 0.23-0.72 mg/L로서 커다란 농도의 차이점을 보였다. 특히, 비강우시 당곡지의 NO₃-N의 농도가 비강우시 4.22 mg/L였으나 강우 시에는 0.53 mg/L로 8배 정도 감소되었다. 비강우시에 비하여 강우 시 오염원 농도가 현저히 적은 가구지의 경우, 저수지 바닥에 오염이 거의 존재하지 않은 상태에서 깨끗한 빗물의 유입된 것으로 사료된다.

Table 1. Specifications of reservoir

Reservoir	Drainage area (ha)	Irrigation area (ha)	Total storage (천m ³)	Effective storage (천m ³)	Height (m)	Length (m)	Width (m)
Gagugi	107	13.7	13.7	13.4	6.0	127	3.0
Neupgokgi	55	10.0	18.0	17.4	4.2	85.0	3.0
Danggokgi	11	14.2	11.8	11.6	5.7	86.0	3.0
Sagokji	32	10.4	21.6	21.0	4.8	91.0	3.0
Hangokji	46	14.6	33.1	32.2	5.0	105	3.0

Table 2. Analysis of water quality by reservoir when no rainfall (May 22nd, 2022)

Reservoir	pH	EC (μ S/cm)	TOC (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)
Gagugi	7.6	449	7.35	11.2	21.96	0.74	0.61	1.47	2.70
Neupgokgi	7.1	258	7.42	15.7	22.44	0.89	0.66	3.18	0.34
Danggokgi	7.4	307	6.03	7.60	19.50	0.93	0.75	6.41	4.22
Sagokji	7.2	402	5.38	17.4	26.04	0.73	0.62	5.42	0.47
Hangokji	7.0	359	8.25	21.8	32.67	0.85	0.61	2.74	0.27

Table 3. Analysis of water quality by reservoir when rainfall (June 6th, 2022)

Reservoir	pH	EC (μ S)	TOC (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)
Gagugi	7.9	339	6.84	2.1	0.63	0.02	0.02	0.47	0.71
Neupgokgi	7.9	304	8.75	9.8	21.16	0.79	0.63	1.54	0.72
Danggokgi	7.1	400	11.77	14.6	20.32	1.04	0.64	2.46	0.53
Sagokji	7.1	439	6.48	16.7	22.28	0.82	0.62	4.61	0.23
Hangokji	7.1	430	8.22	8.4	17.08	0.86	0.61	3.47	0.25

안동시에 문의한 바, 2021년에 가구지는 이미 바닥준설작업을 마친 것으로 확인되었다. pH는 대부분의 저수지가 중성을 나타냄으로써 외부로부터 산성이나 알칼리성 물질들의 유입이 없음을 확인할 수 있었으며, EC는 250 μ S/cm 이상이면서 450 μ S/cm 이하로서 퇴비와 같은 고농도의 오염원이 대량 유입되어 저수지가 오염되어 있는 상태는 아니었다. 또한 저수지마다 SS도 크게 높지 않았다.

위의 조사 항목들을 종합적으로 고찰해 보았을 때, 비강우시와 강우시의 각 항목에 대해 분석한 농도가 큰 차이를 보이지 않아, 안동에 위치한 저수지에서 조사 항목에 의해 어류가 직접적으로 폐사할 수 있는 원인은 아니라고 판단된다. Lee et al.[2]의 자료에 의하면, 어류 폐사 연구대상 지역에서의 조사 항목별 수질 변화의 추이를 관찰한 바 이러한 방법의 수질 조사가 어류 폐사의 원인을 직접적으로 규명하기는 어렵고 한계를 지니고 있다고 서술하였다[2]. 2021년에 발표한 수질오염 물질의 배출 허용기준에 의하면 청정지역, 가지역, 나지역, 특례지역의 총질소(T-N)의 농도는 각각 40 ppm 이하이고, 총인(T-P)의 경우에는 4, 8, 8, 8 ppm 이하를 나타낸다. 이를 근거로, 본 연구에서 대량의 어류 폐사가 일어났던 저수지의 총질소의 농도를 살펴본 바, 비강우시와 강우시의 총질소의 농도범위는 최소 0.67 ppm이고 최대 32.67 ppm이었다. 이를 고찰해보면 총질소가 각 저수지마다 배출 오염 허용기준보다는 비록 약간 낮은 수치를 보인다 하더라도 상대적으로 높은 농도를 유지하고 있다는 것을 알 수 있었다. 이와는 반대로 총인의 경우에는 비강우시와 강우시 총인의 농도 범위는 0.01-1.04 ppm을 나타내어 배출오염기준보다는 매우 낮은 수치를 나타내었다. 그러나 각 저수지마다 일반적인 부영양화의 총인(0.02-0.03 mg/L) 보다 P의 농도가 비교적 높기 때문에 녹조가 발생할 여지가 높다고 판단된다. 각 저수지의 총부유물질(TSS)의 농도는 비강우시와 강우시 7.60-21.8 ppm을 나타내

었고 이의 값은 수질오염배출허용 기준인 3, 6, 8, 3 ppm보다도 매우 높은 상태를 나타내고 있어 각 저수지 모두 수질이 매우 탁한 상태를 유지하고 있었다.

저수지 내 DO 변화

2022년 4월 달에 각 저수지의 표층과 바닥 층의 DO 측정 값을 Table 4에 나타내었다. DO의 측정위치는 저수지 내로 우수가 유입되는 부분에서 실시하였으며, 표층수는 표층으로부터 30 cm 지점에서, 바닥 층은 깊이 2 m 이상 되는 지점의 바닥 층에서 측정하였다. 가구지는 표층 DO가 5.3 ppm이었고, 바닥 층은 2.1 ppm으로 나타났다. 가구지의 바닥은 준설 이후라 대부분 마사토로 이루어져 있었고, 바닥에 오염물들은 관찰되지 않았다. 늪곡지, 당곡지, 사곡지, 한곡지의 경우에 표층의 DO는 3.7-4.9 ppm으로 다소 높은 것에 비하여 바닥 층은 늪곡지만 0.7 ppm이었으며 나머지 저수지 바닥 층은 모두 0 ppm으로 무산소 상태였다. 이외에도 바닥 층에 뱀(mud)과 같은 퇴적물들이 침전되어 있는 것이 관찰되었다. 당곡지는 바닥 층에 다량의 수초가 분포되어 있었으나 바닥 층의 DO는 0 ppm으로서 수초가 바닥 층의 DO를 높여주는 역할을 실질적으로 하지 않는 것으로 나타났다.

일반적으로 어류의 생존에 가장 큰 영향을 끼치는 DO 농도는 수중에 존재하는 유기물질의 양, 수초 및 플랑크톤의 양, 수온 등의 여러 가지 환경적인 요소에 의해 결정된다. DO가 2 mg/L 미만 시 나타나는 현상은 큰 어류가 우선적으로 폐사되며, 폐사 시간은 아침 또는 밤이고, 조류가 거의 없으며 소량의 동물성 플랑크톤이 존재한다고 알려져 있다[9]. 결론적으로, 본 연구대상 저수지에서 큰 봉어가 대량 폐사되었던 원인은 초기 집중 강우 때 저수지 상부의 축사에서 배출되는 기축분 퇴비의 존재로 인해 저수지 내부에 유기물질의 양이 급속도로 증가되어 DO가 고갈됨으로서 비롯되었다고 판단된다. 최근에

Table 4. Comparison of dissolved oxygen in surface layer and bottom layer of reservoir during rainfall (April 2022)

	Gagugi	Neupgokgi	Danggokgi	Sagokji	Hangokji
Surface layer	DO (ppm)	5.3	3.7	3.9	4.8
	Tem. (°C)	12.5	11.1	11.7	11.5
Bottom layer	DO (ppm)	2.1	0.7	0.0	0.0
	Tem. (°C)	12.2	11.7	11.4	11.2

Mishra et al.[8]에 의하면 인디아에 있는 남부해안에서의 물고기의 대량 폐사의 원인은 상당히 높은 질소(61.4×10^{-3} M)와 인(6.2×10^{-3} M)의 함량으로 인한 조류의 증식과 용존산소의 부족으로 인해 발생되었다고 보고하였다[8].

강우시 사곡지 유입부의 DO와 EC의 변화

봄철 퇴비 살포 후, 첫 비가 오는 2022년 4월 13일 밤부터 14일 아침까지 사곡지 우수 유입부에 DO와 EC 자동측정기를 설치하여 15시간 동안 실시간 변화량을 측정하였다(Fig. 3). 측정 초기에는 비가 오고 있었으나 유입수가 거의 없는 상태에서 측정이 시작되었으며, 우수유량이 모두 유입되고 더 이상 유입되지 않는 상태까지 자동으로 측정하였다. 측정 간격은 10분 단위로 자동 측정되도록 하였다. 비가 오기 시작한 시점에서 2시간 이후부터 우수관로에 오염도가 높은 빗물이 유입되기 시작하였으며, 오염수가 유입되면서 EC의 값이 상승하면서 DO 농도가 급격하게 감소하기 시작하였다. 오염수가 유입되기 전에는 DO가 6-7 ppm, EC는 약 100 uS/cm이었으나, 오염된 빗물이 유입되기 시작한 후 13시간이 지나서 DO는 1-2 ppm, EC는 600-700 uS/cm까지 상승하였다. 13시간 이후에는 유입유량 없이 물이 정체되어 있는 상태에서 DO는 0 ppm으로 내려갔으며, EC는 최고 900 uS/cm 가까이 상승하

였다. 이와 같은 결과는 저수지에 오염된 빗물이 유입 중에는 물의 흐름에 의해 어류가 폐사할 정도의 DO가 떨어지지 않았으나, 물의 흐름이 멈추고 정체할 경우 오염물에 의해서 2-3시간 내에 DO가 0 ppm까지 감소하여 바닥 층은 무산소 상태의 환경을 만든다는 것을 알 수 있었다. 저수지 상부의 오염원 여부를 살펴본 결과 가장 큰 오염원은 가축분뇨비의 유입으로 조사되었다.

가축분 퇴비 농도별 용존산소 변화

가축분 퇴비가 저수지 오염원의 가장 큰 원인으로 조사됨에 따라, 부숙이 완료되고 방선균이 잘 퍼져있는 가축분 퇴비를 선정하여 빗물과 유사한 종류수에 가축분 퇴비를 농도별로 첨가하여 DO의 변화를 10분 단위로 0 ppm에 도달할 때까지 측정하였다. 본 실험에서 사용한 가축분 퇴비는 안동시 남선면의 남선농장에서 채취한 우분으로서, 부숙도는 우분 퇴비를 손으로 만져서 수분이 흘러나오지 않을 정도의 수분 상태로 만들고 부숙도 측정 용기에서 24시간 보관하고 암모니아 가스에 반응하는 부숙도 측정 키트를 삽입하여 30분간 정치시킨 후, 퇴비 부숙도 판정기(콤백, CoMMe-100)를 이용하여 분석하였다. 4주 경과 후, 농장에서 뒤집기하는 동안 수증기가 다량 발생하였으며, 우분 내부(50 cm 지점 기준) 온도가 모두 40°C 이상을 유지하면서 부숙이 정상적으로 진행되고 있었다. 부숙

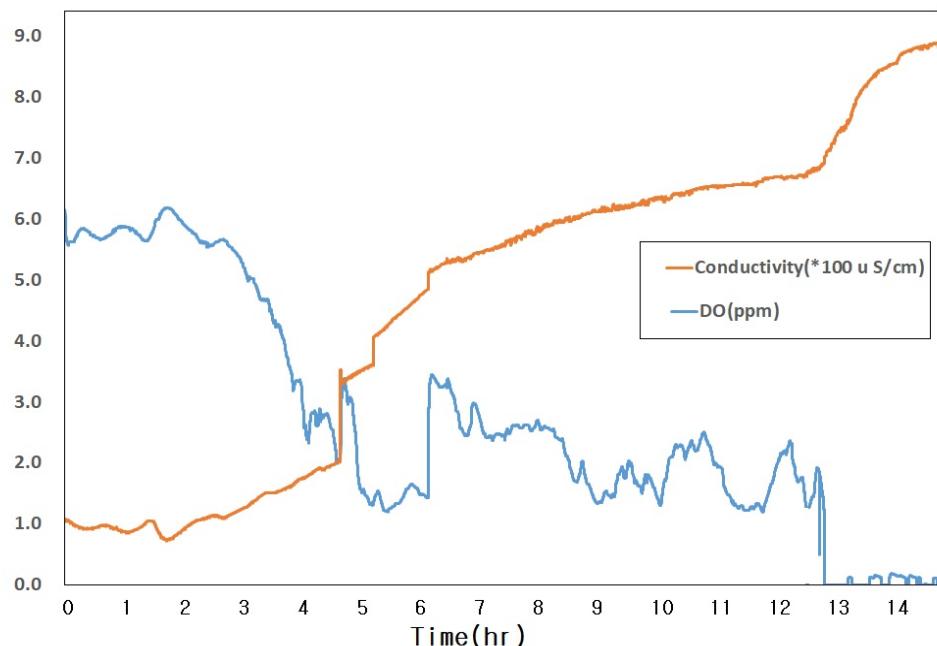


Fig. 3. Change in dissolved oxygen and electrical conductivity at an inlet of Sagokji during rainfall (2022. 4. 13~14).

도 측정기로 부숙도를 측정한 결과 모두 부숙 중기의 결과를 얻었다.

증류수 5 L에 가축분 퇴비를 0.05%, 0.1%, 0.3%, 0.5%를 첨가하고 DO와 EC를 동시에 측정하였으며, 가축분 퇴비를 증류수에 첨가하여 혼합 후에는 정체된 상태에서 자동 측정하였다. 특히, 가축분 퇴비 0.3% 첨가 실험은 재현성을 알아보기 위하여 별도로 3회 측정하여 실험상의 편차를 알아보았다. Fig. 4에서 나타낸 바와 같이, 가축분 퇴비 0.05% 첨가와 0.1% 첨가 시에는 2일이 지나도 용존산소가 1 ppm 이하로 떨어지지 않았으나, 0.3%와 0.5% 첨가 시에는 12시간 이내에 DO가 0 ppm으로 떨어졌다. EC는 가축분 퇴비 첨가 직후가 가장 높았으며, 시간이 경과됨에 따라 완만하게 증가하는 경향성을 보였다.

가축분 퇴비 첨가량 0.3% 실험을 3회 반복 재현한 결과 (Fig. 5), DO가 0 ppm까지 떨어지는데 10-19시간 정도 걸렸으며, 1일 24시간 이내에 저수지 바닥 충의 DO가 무산소 상태로 쉽게 변화됨을 알 수 있었다. 이와 같은 결과로 보아 저

수지의 DO 부족에 의한 어류 폐사를 예방하기 위해서는 저수지 취수용량 대비 가축분 퇴비의 유입량이 0.3% 이내를 유지하여야 함을 알 수 있었다. 따라서 강우량, 우수 영향권 면적과 이 지역에 분포된 농지면적, 농지면적당 살포되는 가축분 퇴비량, 우수 시 저수지로 유입되는 가축분 퇴비비율, 저수지 취수용량 등의 변수들을 고려하여 저수지 내에 유입되는 가축분 퇴비량이 0.3% 이내로 유지될 수 있는 대책방안을 고려할 필요가 있다.

저수지별 어류폐사 방지방안

종합적인 대책

조사 대상인 5개 저수지 상부와 주변에는 대단위의 축산농가가 분포하고 있으며, 이들 축산농가에서 발생되는 대부분의 축분이 인근 농토에 살포되어 처리되고 있었다. 이와 같이 살포된 축분이 봄철에 100 mm 이상 강우 발생 시 농토 지표수로 흘러 저수지로 바로 유입되고 있었다. 농토에 살포되는 축

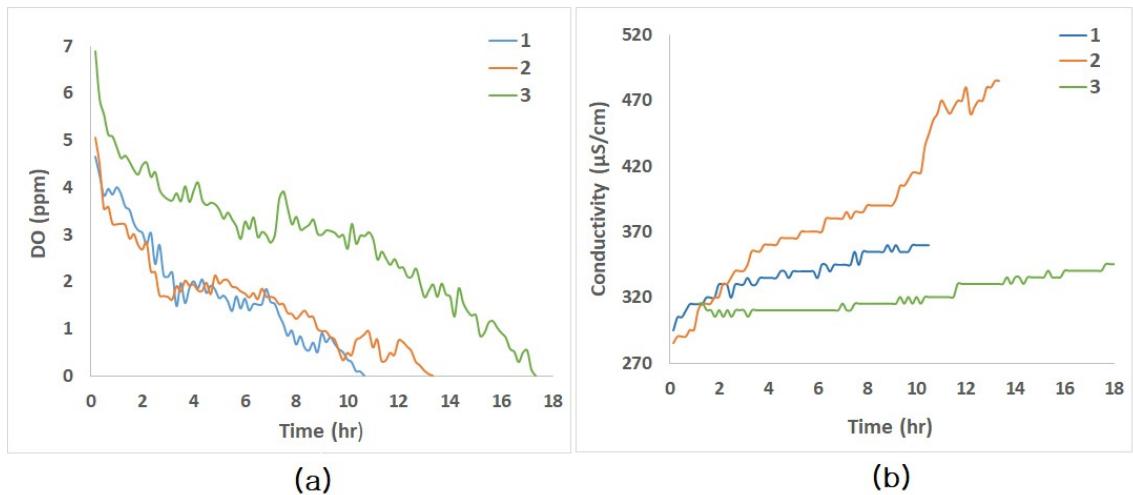


Fig. 4. Change in (a) dissolved oxygen and (b) electrical conductivity with time by livestock compost concentration.

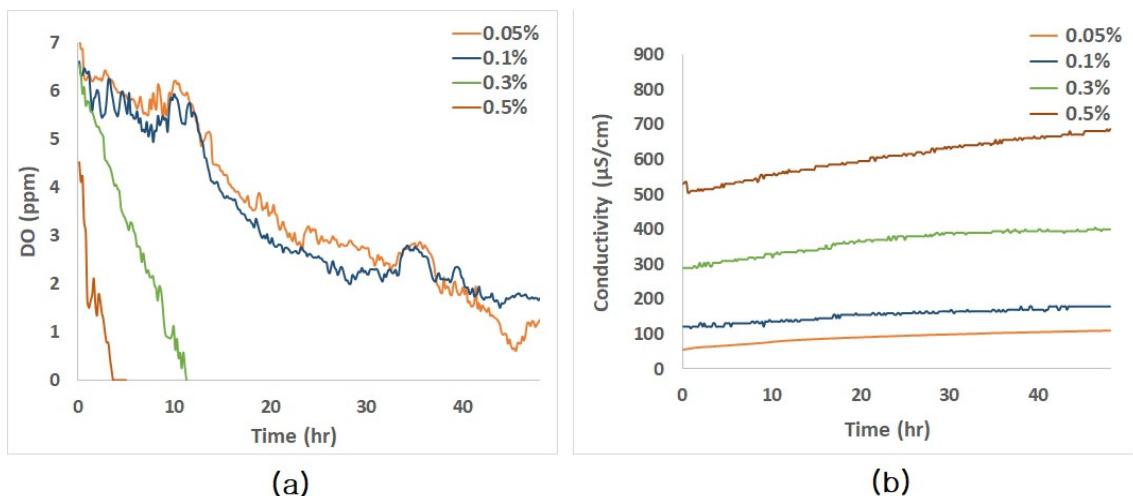


Fig. 5. Change in (a) dissolved oxygen and (b) electrical conductivity at concentration of livestock compost (0.3%).

분 퇴비는 작물 수확량과 직접적으로 연계되는 것으로서 살포량을 감소시키는 방법은 현장에서 적용하기에는 실질적인 어려움이 있다. 5개 저수지 상부의 대부분의 축산 농가는 한우를 사육하는 농가로서 축사 바닥층의 수분이 증가하여 소 사육에 영향을 주는 시점에 축분을 제거하고 새로 깔집을 깔아주었다. 축분이 누적되어도 수분함량이 낮은 경우에는 별도로 축분을 제거하지 않고 있었으며. 또한 악취나 수분을 조절하기 위하여 축사 상부에 환풍기를 가동시키는 것 외에는 별도의 조치를 취하지 않고 있었다. 그러므로 축산농가의 퇴비에 칼슘이나 마그네슘을 포함한 광물질을 보급하여 원천적으로 축분으로부터 유출되는 오염원의 양을 감소시키는 방법을 취할 수 있다. 특히, 마그네시아(MgO)의 경우 수분을 다량 함유한 축사바닥에 살포시 수분흡수나 오염물의 제거 기능이 탁월하다고 알려져 있어 본 저수지 유역에도 적용할 수 있다고 본다[9-14]. 결과적으로 축사에서 유출되는 오염원을 근본적으로 제거한 상태에서 농토로 살포되도록 할 필요성이 있으며, 추가적으로 각 저수지의 특성을 고려하여 저수지의 오염원을 감소시킬 수 있는 방안을 검토해 볼 수 있다.

가구지

가구지는 상부의 우수 영향권 면적이 1,043,160 m²인 것에 비하여 농지면적은 377,065 m²으로서 36.2%가 농지로 되어 있고 대부분 수로 양방향으로 농지가 분포되어 있었다. 농지의 지형 특성을 살펴보면 경사면이 완만하여 오염원의 이동속도가 빠르지 않아 퇴비의 살포 후에라도 오염원들이 누적되어, 장기간에 걸쳐 오염원이 저수지 내부로 유입될 수 있는 지형으로 이루어져 있었다. 저수지 상부에는 축산농가 3곳이 분포하고 있었으며, 약 500마리의 소를 사육하고 있었다. 많은 축산농가와 높은 농지면적 분포에 비하여 저수지 용량은 13.4 천 m³인 것을 고려해 볼 때, 가구지의 어류 폐사를 예방하기 위해서는 우수를 우회시키는 방법이 효율적이다. 기존에 우수를 우회시키기 위한 수로가 설치되어 있기 때문에 추가적인 공사비용 없이 우수 유입 시 자동개폐장치를 설치함으로써 쉽게 운영될 수가 있다. 가구지의 유입지점인 상부 개폐지점과 유출지점인 하부 개폐지점 간의 높이 편차가 낮아 초기 우수를 우회시킬 때는 상부와 하부를 동시에 폐쇄하여 우수를 우회시킬 필요가 있다. 개폐여부는 전기전도도 장치를 설치하여 높은 전도도 값이 측정되는 동안은 상부, 하부 개폐장치를 자동으로 가동시켜 폐쇄시키고, 전도도 값이 낮게 측정되는 동안에는 상부는 개방하고 하부는 폐쇄하여 저수지 내의 우수를 모아두는 방식으로 운전하면 된다. 2년 전 저수지 바닥의 오염원 방지를 위한 장치가 준설되어 있어 현재 수질이 타 저수지에 비하여 깨끗한 상태로서 개폐장치 설치만으로도 향후 어류 폐사 문제를 쉽게 예방할 수 있다고 본다. 설치 방법과 운전은 기존의 우수 수로를 그대로 이용할 수 있으며, 상부와 하부 2지점에 개폐 장치를 설치하고 봄철에 100 mm 이상 우수 시만 상부와 하부를 밀폐시켜 저수지 내부로 우수가 유입되지 않도록 한다. 대부분 어류 폐사 원인이 되는 퇴비는 봄철의 초기 우수에 의한 것으로서 일시적 저수지 유입수의 개폐만으로도

저수지 내의 집단 어류 폐사를 방지할 수 있다. 또한, 가구지는 농업용수 저장을 주목적으로 하고 있으나 장기간 토사의 유입을 방지하기 위해 준설 작업을 했음에도 불구하고 그다지 유효수심이 깊지 않아 담수할 수 있는 물량이 적다. 또한 담수된 물 역시 마사도 지역의 특성으로 인해 자연 유실량이 높다. 따라서 이를 보완하면서 수질을 보호하기 위하여 저수지 바닥에 탄산칼슘(CaCO₃)이나 마그네시아(MgO)를 까는 것을 고려해 볼 필요가 있다[15].

늪곡지

늪곡지의 경우, 상부 우수 영향권의 면적은 524,423 m²이고 농지면적은 190,295 m²으로서 36.3%가 농지로 이루어져 있으며 대부분의 농지가 수로 양방향으로 분포되어 있다. 저수지의 상부에는 약 300마리의 소를 사육하는 대규모 축산농가가 위치하고 있으며, 저수지 옆에 약 50마리 규모의 축산농가가 분포하고 있어 가축에서 발생되는 오염원 유입요인이 크게 작용하고 있었다. 늪곡지의 저수량이 17.4 천 m³인 것을 고려하였을 때, 어류 폐사를 예방하기 위해서는 우수를 우회시키는 방법이 효율적이라고 판단된다. 늪곡지는 우수 유입지점과 유출지점의 높이 편차가 커서 저수지 유입지점을 폐쇄하여 우회시켰을 경우 오염수가 유출지점에서 역류되지 않은 구조를 갖고 있어 유출지점에는 별도의 개폐장치 설치가 필요 없다고 판단된다. 이외에도 현재 늪곡지는 바닥에 모래가 누적되어 담수량이 낮아 준설작업이 필요한 시점이며, 준설 이후에는 유입수의 정화를 위해 석회석과 마그네시아 혼합 층으로 이루어진 여과 장치를 설치할 필요가 있다. 여과 장치는 우수 유입시 여과층을 통과한 우수만 저수지로 유입시키는 것으로서, 석회석의 칼슘 이온과 마그네시아의 마그네슘 이온의 용출을 유도시켜 저수지 내의 인을 침전시켜 녹조류의 오염 발생율을 효율적으로 감소시킬 수 있다[16].

당곡지

당곡지는 상부의 우수 영향권 면적은 84,462 m²인 것에 비하여 농지면적은 44,701 m²으로서 52.9%가 농지로 이루어져 있으며 수로 양방향으로는 농지가 분포되어 있다. 당곡지 상부의 축산농가는 2곳으로서 약 100마리의 소를 사육하고 있었다. 당곡지의 유효저수량이 11.8 천 m³인 것을 고려해 보았을 때, 저수지의 용량에 비해 축산농가와 같은 오염원의 비율은 높았다. 또한 저수지 인근에 대량으로 농지가 분포하고 있어 농지에 살포되는 퇴비와 같은 오염원이 바로 당곡지로 유입될 수 있는 구조로 이루어져 있다. 당곡지는 접전 상부에 높지대가 조성되어 있어 오염부하량을 낮추는 효과를 보이고 있고, 바닥에는 수초들이 대량으로 번식하여 수질 오염도를 저감시키는 역할도 수행하고 있었다. 당곡지는 우회 수로가 없으며, 저수지 상부의 모든 우수가 당곡지 내부로 유입되는 구조로 되어 있었다. 따라서 당곡지에서의 어류 폐사를 방지하기 위해서는 오염부하량이 높은 초기 우수 유입시 우수 유입부에 수면 폭기조를 설치하여 국부적인 오염부하량이 상승하는 것을 막을 필요가 있다.

사곡지

사곡지는 상부 우수 영향권 면적이 269,065 m²인 것에 비해 농지면적은 60,161 m²으로서 22.3%가 농지로 이루어져 있고, 농지와 축산에 의한 오염 발생 부하량은 낮은데 비하여 유효저수량은 21.0 천 m³으로서 깊이가 깊고 우회 수로가 없어 자정작용의 효율이 낮은 특성을 보이고 있다. 이 저수지는 농지에 의한 오염부하량은 낮지만 인근 생활폐수의 유입은 큰 구조로 되어 있었다. 이에 따라 생활폐수의 유입을 차단할 수 있도록 우선적 조치가 필요하다고 판단된다. 사곡지는 하부의 장기간 누적된 퇴적물로 인해 무산소 상태를 유지하고 있었으며, 저수지의 깊이가 깊어 바닥층에 공기 유입이 원활하지 못하였다. 따라서 심층수 내부까지 공기를 유입시켜 줄 수 있는 폭기조를 설치하여 저수지 전체의 물을 와류시켜 주는 시스템과 저수지 중심부에 분수대를 설치하여 공기 중의 산소를 수중에 분산시켜 줄 필요가 있다.

한곡지

한곡지는 상부 우수 영향권 면적 530,229 m²의 면적 대비 농지면적은 133,690 m²으로서 25.1%가 농지로 되어 있고, 대부분의 농지가 수로 양방향으로 위치하고 있다. 저수지 상부에는 3곳의 축산농가가 분포하고 있었으며, 저수지 주변을 포함하여 10여 곳의 축산농가에서 약 1,000마리 이상의 대규모 사육이 이루어지고 있었다. 한곡지는 우회 수로가 없었으며, 상부에서 발생된 우수는 대부분 한곡지로 유입되는 구조로 되어 있었다. 또한, 위치 특성상 주변에서 발생되는 오염원을 저장하여 하부 하천으로 유출되지 못하게 하는 역할을 하고 있었다. 그러므로 자체적으로 정화하는 방식으로 운영될 필요가 있다고 판단된다. 이를 위해서 저수지와 접해있는 상부의 토지에 우수를 일시적으로 저장시킬 수 있는 완충지대를 만들고, 저수지 표층수의 표면에 폭기조를 설치하고, 심층부에도 공기를 유입시켜 자정작용을 보강할 필요가 있다.

Note

The authors declare no conflict of interest

Acknowledgment

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2022R1F1A1060823).

References

1. Durhan BW, Wilds GR, Pope LL (2006) Temperature-caused fish kill in a flowing great plains river. *The Southwestern Naturalist*, 51(3), 397-401. [https://doi.org/10.1894/0038-4909\(2006\)51\[397:TFKIAF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1894/0038-4909(2006)51[397:TFKIAF]2.0.CO;2)
2. Lee JY, Lee KY, Lee SRM, Choi, JS, Lee SJ, Jeong SM, Jeong MS, Kim BC (2013) Recovery of fish community and water quality in streams where fish kills have occurred. *Korean Journal of Environment of Ecology*, 46(2), 154-165. <https://doi.org/10.11614/KSL.2013.46.2.154>.
3. Alosairi Y, Al-Ragum A, Al-Houti D (2021) Environmental mechanisms associated with fish kill in a semi-enclosed water body: An intergrated numerical modeling approach. *Ecotoxicolgy and Environmental Safety*, 217, 112238-112250. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112238>.
4. van Hoof F, van San M (1981) Analysis of copper, zinc, cadmium and chromium in fish tisssues, A tool for directing metal caused fish kills. *Chemosphere*, 10, 1127-1135. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(81\)90183-1](https://doi.org/10.1016/0045-6535(81)90183-1).
5. Imai I, Kimura S (2008) Resistance of the fish-killing dinoflagellate *Cochlodonium polykrikoides* against algicidal bacteria isolated from the coastal sea of Japan. *Harmful Algae*, 7, 360-367. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2007.12.010>.
6. Patricio AD, Ivan P, Leila B, Rene G, Elias P, Facundo B, Alferedo T, Camila S, Sara A (2023) The impact of local and climate change drivers on the formation, dynamics, and potential recurrence of a massive-fish killing micro algal bloom in Patagonian fjord. *Science of The Total Environment*, 865, 161288-161307. <https://doi.org/j.scitotenv.2022.161288>.
7. Francisco NC, Pedro S, Adolfo F, Paulo, P, Joao P, Rui R, Paula R (2019) Factors related to fish kill events in Mediterranean reservoirs. *Water Research*, 158, 280-290. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.027>.
8. Mishra P, Naik, S, Vipin Babu P, Pradhan U, Begum M, Kaviarasan T, Vashi A, Brandyopadhyay D, Ezhilarasan P et al. (2022) Algal bloom, hypoxia, and mass fish kill events in the blackwaters of Puducherry, Southeast coast of India. *Oceanogia*, 64, 396-403. <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2021.11.003>.
9. Jonas SS, Theis K, Kaj SJ, Kenneth TM (2022) Environmental drivers and sources of stream oxygen consumption in an agricultural lake catchment. *Ecological Engineering*, 176, 106516-106526. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106516>.
10. Kim YJ, Ryoo KS (2021) Study on the morphological change and reduction plan of nitrogen and phosphorous in litter and manure of cow house. *Journal of the Korean Chemical Society*, 65(4), 249-253. <https://doi.org/10.5012/jkcs.2021.65.4.249>.
11. Bae SH, Kim E, Ryoo KS (2022) Influence of a chem-

- ical additive on the reduction of highly concentrated ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) in pig wastewater. *Korean Journal of Environmental Biology*, 40(3), 267-274. <https://doi.org/10.11626/KJEB.2022.40.3.267>.
12. Tansel B, Lunn G, Monje O (2018) Struvite formation and decomposition characteristics for ammonia and phosphorus recovery: A review of magnesium-ammonia-phosphate interactions. *Chemosphere*, 194, 504-514. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.004>.
13. Shu J, Wu H, Chen M, Peng H, Li B, Liu R, Liu Z, Wang B, Huang T et al. (2019) Fractional removal of manganese and ammonia nitrogen from electrolytic metal manganese residue leachate using carbonate and struvite precipitation. *Water Research*, 153, 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.044>.
14. Krishnamoorthy N, Arunachalam T, Paramasivan B (2021) A comparative study of phosphorus recovery as struvite from cow and human urine. *MaterialsToday: Proceedings*, 47, 391-395. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.587>.
15. Huang H, Xiao D, Zhang Q, Ding L (2014) Removal of ammonia from landfill leachate by struvite precipitation with the use of low-cost phosphate and magnesium sources. *Journal of Environmental Management*, 145, 191-198. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.06.021>.
16. Ogata F, Uematsu Y, Fukuda M, Saenjum C, Kabayama M, Nakamura T, Kawasaki N (2020) Changes in the mechanism of the reaction between phosphate and magnesium ions: Effect of initial concentration and contact time on removal of phosphate ions from aqueous media. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8, 104385. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104385>.