

Research Paper

수심이 얇은 저수지에서 용존산소 동적 모니터링을 통한 인 내부부하 평가

박형석* · 최선화** · 정세웅* · 지현서*** · 오정국* · 전항배*

충북대학교 환경공학과*, 한국농어촌공사**, 서울대학교 그린에코공학연구소***

Evaluation of Internal Phosphorus Loading through the Dynamic Monitoring of Dissolved Oxygen in a Shallow Reservoir

Hyungseok Park* · Sunhwa Choi** · Sewoong Chung* · Hyunseo Ji*** ·
Jungkuk Oh* · Hangbae Jun*

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University*
Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation**
Green Eco Engineering, Seoul National University***

요약 : 최근 농업용 저수지는 용수공급과 함께 지역의 관광, 문화, 위락시설 등으로 활용되고 있다. 그러나 많은 농업용 저수지들은 부영양화로 분류되며 높은 유기물 오염도를 보이고 있다. 특히, 1945년 이전에 준공된 노후화된 농업용 저수지의 44.7%는 농업용수 수질 환경기준을 초과하고 있다. 노후화된 저수지의 경우 외부기원 오염부하 이외에 누적된 퇴적물로부터 발생하는 내부부하는 영양염류 공급에 중요한 역할을 한다. 본 연구의 목적은 수심이 얇은 M 저수지(평균 수심 약 1.7 m)를 대상으로 2015년과 2016년에 수심별 수온과 저층 용존산소(DO) 농도를 연속 측정하여 저층 수환경의 동적변화를 모니터링함으로써 영양염류의 내부 부하 가능성을 조사하는데 있다. 또한, 물질수지해석을 통해 내부 인부하가 저수지 전체 인부하량에 미치는 영향에 대해 평가하였다. 연구결과 수심이 얇은 M 저수지에서 약한 수온상승과 강한 DO 성층 현상이 나타났다. 그리고, 저수지 저층에서 DO의 동적변화를 관찰한 결과, 여름철 무강우 기간 동안 지속적인 저산소 (DO 2 mg/L 미만) 상태가 2015년과 2016년에 각각 87일과 98일간 발생하였다. DO 농도는 대기온도 강화와 강우발생 기간 동안 간헐적으로 증가하였다. 물질수지분석결과, 수온상승과 함께 조류성장이 촉진되는 8월에는 PO_4-P 내부 부하량이 무강우시 전체 부하량 대비 2015년과 2016년

First Author: Hyungseok Park, Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University 28644, Korea, Tel: +82-43-231-6375, E-mail: qwrs07@gmail.com

Corresponding Author: Sewoong Chung, Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University 28644, Korea, Tel: +82-43-261-3370, E-mail: chung@chungbuk.ac.kr

Co-Author: Sunhwa Choi, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation 15634, Korea, E-mail: csh@ekr.or.kr
Hyunseo Ji, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University Pyeongchang-gun Gangwon-do 25354, Korea, E-mail: warislaw@snu.ac.kr

Jungkuk Oh, Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University 28644, Korea, E-mail: ohjungkuk77@gmail.com
Hangbae Jun, Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University 28644, Korea, E-mail: jhbcbe@cbnu.ac.kr

Received: 8 November, 2017. Revised: 20 December, 2017. Accepted: 28 December, 2017.

에 각각 37.9%와 39.7%로써 큰 비중을 차지하였다. 따라서 지속적인 저층 저산소 상태가 유지되는 경우에는, 퇴적층의 영양염류 용출을 억제하기 위한 DO 공급 대책이 유효 할 것으로 판단된다.

주요어 : 저수지 내부부하, 연속 모니터링, 저산소 상태, 성층 현상

Abstract : In these days, agricultural reservoirs are considered as a useful resource for recreational purposes, tour and cultural amenity for vicinity communities as well as irrigation water supply. However, many of the agricultural reservoirs are showing a eutrophic or hyper-eutrophic state and high level of organic contamination. In particular, about 44.7% of the aged agricultural reservoirs that constructed before 1945 exceed the water quality criteria for irrigational water use. In addition to external loading, internal nutrient loading from bottom sediment may play an important role in the nutrient budget of the aged reservoirs. The objectives of this study were to characterize variations of thermal structure of a shallow M reservoir (mean depth 1.7 m) and examine the potential of internal nutrient loading by continuous monitoring of vertical water temperature and dissolved oxygen (DO) concentration profiles in 2015 and 2016. The effect of internal loading on the total loading of the reservoir was evaluated by mass balance analysis. Results showed that a weak thermal stratification and a strong DO stratification were developed in the shallow M Reservoir. And, dynamic temporal variation in DO was observed at the bottom of the reservoir. Persistent hypoxic conditions (DO concentrations less than 2 mg/L) were established for 87 days and 98 days in 2015 and 2016, respectively, during the no-rainy summer periods. The DO concentrations intermittently increased during several events of atmospheric temperature drop and rainfall. According to the mass balance analysis, the amount of internal $\text{PO}_4\text{-P}$ loading from sediment to the overlying water were 37.9% and 39.7% of total loading during no-rainy season in 2015 and 2016, respectively on August when algae growth is enhanced with increasing water temperature. Consequently, supply of DO to the lower layer of the reservoir could be effective countermeasure to reduce nutrient release under the condition of persistent DO depletion in the bottom of the reservoir.

Keywords: reservoir internal load, continuous monitoring, persistent hypoxia, thermal stratification

I. 서론

최근 도시 인근에 위치하고 있는 농업용 저수지는 용수 공급과 함께 지역의 관광, 문화, 위락시설 등으로 활용되고 있다. 그러나 대부분의 저수지는 친수공간으로 적합하지 않은 부영양화로써 높은 유기물 오염도를 보이고 있다. 특히, 우리나라 농업용 저수지의 50% 이상이 1945년 이전에 준공된 노후화된 시설로써 평균 COD 농도가 8.3 mg/L에 달하고 있다(Kim 2011a). 또한, 노후화된 저수지는 농촌지역의 가뭄 및 홍수관리기능 저하, 구조적 안정성 문제가 발생 할 수 있다(Kang & Lee 2015).

농업용수는 국내 수자원 총 이용량(337억 m^3)의 약 47%(160억 m^3)를 차지하며 국민의 먹거리를 생산하

는 중요한 수자원임에도 불구하고 수질관리 측면에서는 관리가 소홀한 측면이 있다(Kim 2011b). 농업용수는 타 용수와 달리 6~8월에 집중적으로 사용되며, 이는 가뭄과 함께 여름철의 수자원 보유량의 감소로 인한 수질악화로 이어질 수 있다(MOLIT 2011).

강우시 저수지 내로 유입하는 비점오염 물질과 오랫동안 침전되어 누적된 퇴적물의 내부부하가 장기적으로 수질오염원으로 작용한다. 저수지 내 퇴적물은 다양한 유기오염물질과 저수지 내에서 성장한 식물플랑크톤의 사체가 포함되어 있으며, 수체-퇴적물 경계에서의 pH, 용존산소(DO), 산화-환원전위(ORP) 등 수환경 변화에 따라 내부부하의 원인으로 작용한다(Wetzel 2001). 특히, 수심이 얇은 저수지에서는 수온성층이 형성되지 않거나 성층강도가 약

해 퇴적층으로부터 연속적이거나 주기적인 영양염류 용출이 발생 할 수 있다(Cooke et al., 2005). 국내 노후 저수지에서도 퇴적물에 의한 내부부하가 중요한 영향을 미치는 것으로 추측되고 있으나, 이에 대한 조사연구는 미진한 상태이다.

저수지 퇴적층 표면에서 DO가 1~2 mg/L이하로 떨어진 경우 환원상태와 함께 극심한 산소결핍을 나타낸다(Mortimer 1971). 이러한 환원 조건에서는 퇴적물 내 영양염류와 중금속의 용출이 쉽게 일어나는 것으로 알려져 있다. 또한, Manahan(2011)의 연구 결과에 따르면 성층화된 수체에서는 산화-환원반응을 나타내며, 수체의 산화환원 상태에 따라 수생태계와 수질에 중대한 영향을 미친다. 저층이 혐기성 상태가 되면 C계열은 CH_4 , N계열은 NH_4^+ , S계열은 H_2S , Fe계열은 $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ 로 환원반응이 일어나고, 대기로부터 산소포화가 일어나 표층이 산화상태가 되면 C계열은 CO_2 , N계열은 NO_3^- , Fe계열은 $\text{Fe}(\text{OH})_3$, S계열은 SO_4^{2-} 로 산화반응이 일어난다.

다목적댐 저수지와 같이 수심이 깊은 수체는 여름철 수온성층이 지속되며, 이 기간동안 환원상태의 저층에는 퇴적물에서 용출된 영양염류가 누적되는 반면, 수심이 얇은 저수지는 일반적으로 잘 혼합되어 있고 수체 전체에 DO 농도가 풍부한 것으로 알려져 있다(Sondergarrrd et al., 2003). 그러나, 일부 연구에서는 수심이 얇은 호소의 퇴적층에서 조류 성장의 필수 영양염인 인의 용출이 종종 보고 된 바 있다(Lee et al., 1977; Bostrom et al., 1982; Jensen & Anderson 1992). 일반적으로 호소 수체 내 포함된 인의 양보다 퇴적물 내 포함된 인이 100배 이상 높으며, 강우-유출에 의한 인 부하가 적은 기간에 수체 내 인 농도는 퇴적물-수체의 상호 물질 교환에 큰 영향을 받을 수 있다(Sondergarrrd et al., 2003). 수심이 얇은 부영양 호소에서 여름철에 인 농도의 증가 현상이 종종 관찰 되었으며 (Phillip et al., 1994; Ekholm et al., 1997), 대부분 퇴적물 용출의 결과로 설명되었다 (Jeppensen et al., 1997; Ramm & Scheps 1997; Kozerski & Kleeberg 1998).

저수지 퇴적층-수체 경계면을 통한 물질교환을 정확히 해석하기 위해서는 저층의 pH, DO, ORP 등 수

환경의 동적인 변화에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다. 따라서 본 연구의 목적은 그 동안 조사 연구가 부족했던 수심이 얇은 저수지의 수온 성층 구조와 수심별 DO의 동적인 변동특성을 연속 모니터링하고, 저층의 DO 고갈 지속기간을 확인함으로써 퇴적물에 의한 내부부하의 잠재성을 파악하는 것이다. 본 연구목적을 위해 2015년과 2016년 2개년도에 걸쳐 국내 M 저수지를 대상으로 연속모니터링을 수행하였으며, 각각의 연도별로 구분하여 수환경의 동적변화 특성을 해석하였다. 본 연구의 결과는 도시 인근 도시민의 휴식처로 자리 잡아 가는 소규모 저수지의 수질관리 방안 수립의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 연구방법

1. 연구대상지역

본 연구의 대상지역인 M 저수지는 경기도 시흥시에 위치하고 있으며, 1941년도에 준공한 노후화된 저수지로 농업용수 공급을 목적으로 조성되었다. 유역면적은 260 ha, 유효 저수량 227,000 m^3 , 만수위 4.0 m, 만수위의 평균수심이 1.7 m이며, 유역으로부터 유출된 유량이 2개의 소규모 지류하천을 통해 직접 유입한다. 유역 내 토지이용은 임지 47.2%, 농지 33.6%, 도시 및 주거지가 15.5%로 농지와 주거지가 차지하는 비중이 49.1%로 생활계 및 토지계로부터 상당한 오염부하 발생이 예상된다. 유역 내 총 T-P 배출 부하량은 4.8 kg/day이며, 이중 생활계가 66.1%, 토지계가 30%내외의 배출부하를 나타냈다. 지류로부터 유입하는 유량은 작지만, 2015-2016년 조사기간(월 1~2회 조사)동안 평균수질농도는 COD 9.6 mg/L, T-N 7.01 mg/L, T-P 0.556 mg/L로 높은 오염도를 나타내고 있어 개선이 필요한 상황이다.

또한, 한국농어촌공사에서 분기별(4회/년) 조사한 2015-2016년 호 내 평균 수질 농도는 COD 8.8 mg/L, T-N 7.5 mg/L, T-P 0.46 mg/L로 호소수질환경기준 IV(약간나쁨)~V(나쁨) 수준으로 나타났다. 현재 농업용수 공급의 목적 이외에 수면 낚시터로 사용되고 있으며, 간헐적으로 여름철 수표면 대부



Figure 1. Monitoring site in the M reservoir

분이 수생식물인 마름으로 덮이는 현상이 발생한다.

2. 수환경 연속 모니터링

M 저수지의 수환경의 동적변화 파악을 위해 2개년(2015~2016)에 걸쳐 기상, 수온, 수질 등에 대해 Figure 1 표시 지점에서 연속 모니터링을 실시하였다. 모니터링 기간은 2015년 5월 20일~10월 28일까지 총 161일, 2016년은 5월 4일~10월 10일 까지 총 158일간이며, 수체의 상·하 층간 수온성층이 형성되기 시작하는 5월 초순부터 해소시기인 10월 중순까지 시행하였다.

기상은 Davis WS-Pro2_plus를 활용하여 수면으로부터 2 m 위에서 기온, 습도, 대기압, 풍향, 풍속 등의 항목을 10분 간격으로 측정하였다. 강우 데이터는 연구 대상지역 인근에 위치한 기상청의 시흥AWS 자료를 수집하여 사용하였다. 저수지의 수심별 수온은 바닥으로부터 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m 높이에 HOBO Water Temp Pro onset(USA)을 설치하여 10분 간격으로 연속 측정하였다(Figure 2). 저수지 바닥으로부터 20 cm상부에 수질 다항목 측정장치

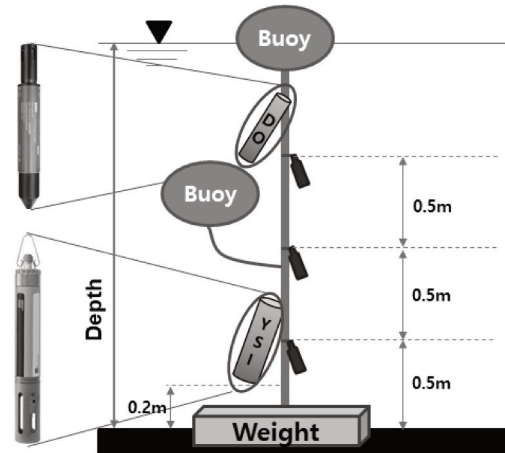


Figure 2. Schematic diagram of installed thermistor chain and multi parameter water quality probe

(YSI6920)를 설치하였으며, 30분 간격으로 수온($^{\circ}\text{C}$), DO(mg/L), 전기전도도($\mu\text{S/cm}$) 등의 수질 항목에 대해서 연속 측정하였다(Figure 2). 2차년도(2016)에는 상하층간 DO농도 차이 비교를 위해 저수지 바닥으로부터 1.5 m 지점에 HOBO DO data logger를 설치하여 모니터링을 수행하였다.

3. 내부 부하량 평가

2015년, 2016년도 모니터링 결과를 바탕으로 간단한 물질수지 모델을 개발하여 인의 연간 내부부하 발생량을 평가하였다. 대상저수지의 유량 실측자료가 부재하여 HEC-HMS모델을 이용한 강우 유출 해석을 통해 저수지 유입량을 생산하였으며, 모델의 강우 입력자료는 연구대상지역에서 약 4.5 km 서쪽에 위치한 시흥 AWS(기상청)의 2015~2016년도 강우관측 자료를 사용하였다. 농어촌공사로부터 연구대상 저수지의 저수율(%)자료를 제공받아 저수용량으로 변환하였다. HEC-HMS를 이용해 산정한 유역유출량 자료를 유입(Inflow)으로 하고, 저수용량변화에 따른 물질수지 해석을 통해 저수지 유출량을 계산하였다. 또한, 유입량과 저수지의 일별저수용량자료를 기반으로 물수지 분석을 통해 방류량 자료를 산정하였다. 외부 유입 수질은 본 연구에서 실측한 값을 사용, 내부부하의 발생은 저수지 바닥층의 DO가 2 mg/L 이하로 유지되는 기간에 발생하는 것으로 하였

으며, 인의 침강속도 ν 는 0.017 m/d, 인의 용출 플럭스(J_R)는 3.1 mg/m²/day로(RRI 2016) 본 연구를 통해 산정한 값을 입력하였다. 그리고, PO₄-P 용출 플럭스는 2.1 mg/m²/day로 T-P의 약 67%에 해당하는 값을 적용해 결과해석을 수행하였다.

시간변화에 따른 호내 수질변화는 외부유입($Q_{in} \cdot C_{in}$), 내부부하(S_r), 침강속도($\nu_s A_r C_r$), 유출($Q_{out} \cdot C_r$) 변화에 따라 계산되며, 내부부하(S_r)는 인용 플럭스(J_R)와 수체면적(A_r)으로 계산된다(식1).

$$\frac{d(C_r V_r)}{dt} = Q_{in} \cdot C_{in} + S_r - \nu_s A_r C_r - Q_{out} \cdot C_r \quad (\text{식 1})$$

$$S_r = J_R A_r$$

여기서, V_r = 수체의 체적, A_r = 수체의 면적, Q_{in} = 유입유량, C_{in} = 유입수질, S_r = 내부부하, C_r = 호 내수질, Q_{out} = 유출량

III. 연구결과

1. 수환경 동적변화 모니터링

(1) 기상변동 특성

모니터링 기간동안 측정한 기온, 풍속, 풍향의 시계열 변화를 Figure 3에 나타내었다. 기온은 2015년과 2016년에 각각 6.1 ~ 33.9 °C와 8.2 ~ 35.4 °C의 범위를 보였다. 풍속은 2015년에는 평균 1.2(±1.07) m/s, 최대 5.4 m/s, 2016년에는 평균 1.8(±1.60) m/s, 최대 8.2 m/s의 값을 나타냈다. 풍향은 2015

년과 2016년도 모두 주로 북서풍이 관측되었고, 이는 서해 바다 인근에 위치한 지리적인 영향으로 판단된다. 연도별 총강수량은 가뭄의 영향으로 2015년 682.5 mm, 2016년 884 mm로 국내 연평균 강수량인 1,277 mm에 비해 상당히 낮은 수치를 보였다. 일 최대 강수량은 2015년 44.5 mm, 2016년 108 mm가 관측되었으며, 무강우지속일수는 2015, 2016년도 각각 19일, 23일로 나타났다. 분석에 사용한 강우자료의 신뢰성을 확인하기 위해 인근위치한 부평AWS(남동쪽 11.3 km), 안산AWS(북쪽 13.3 km)의 2015, 2016년도 연간 강수량 자료를 비교해 보았으며, 2015년도 연간 강수량은 각각 751mm, 679.5mm, 2016년도 연간강수량은 930 mm, 918.5 mm로 시흥 AWS와 유사한 값을 보였다.

(2) 2015년 조사기간 동적 변화 특성

수환경 동적 변화 파악을 위해 대기기온, 수온, DO 등의 연속 모니터링 결과를 Figure 4에 제시하였다. 수심별 수온 연속모니터링 결과, 일주기로 수온성층 형성과 대류혼합이 반복되었으며, 상층과 하층간 평균 1.4°C, 최대 5.0°C의 수온차이를 나타냈다(Figure 4(a)). 또한 강우 발생 이후에는 일시적으로 수체가 완전 혼합되어 상·하 층간 수온의 차이가 거의 발생하지 않았으며, 이는 강우가 저수지의 수직방향의 물질 순환에 큰 영향을 주는 것을 의미한다.

DO 계측 자료의 신뢰도 검정을 위해 연속 모니터링 자료와 정기 수질조사(OBS-CBNU, OBS-RRI)

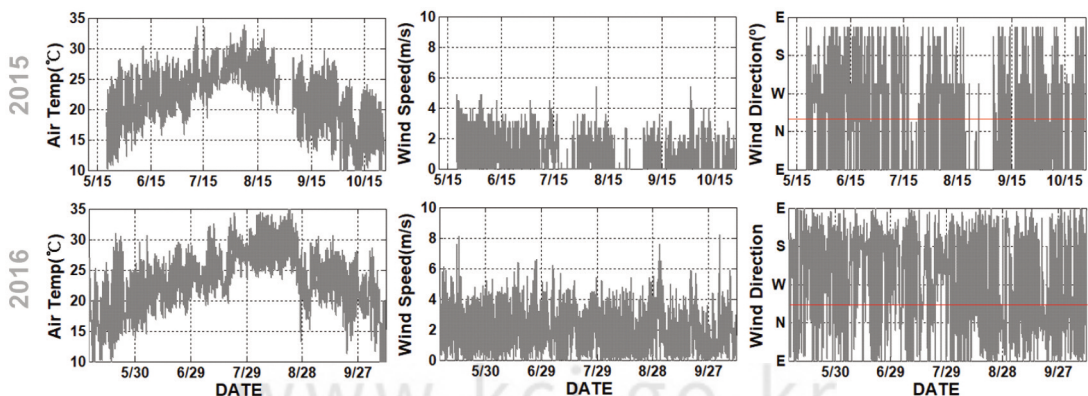


Figure 3. Temporal variations of meteorological data during the monitoring periods in 2015 and 2016

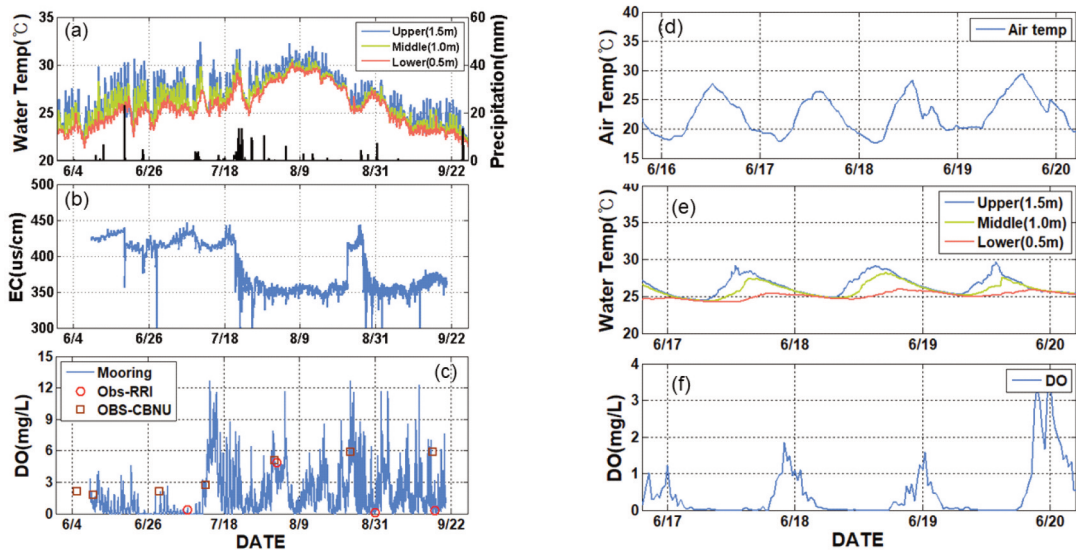


Figure 4. Temporal variations of (a) water temperature, (b) electric conductivity, (c) DO for whole monitoring period in 2015, and (d) air temperature, (e) water temperature, (f) DO during a short-term (3 days) of rainless period.

자료를 비교하였으며, 연속 모니터링 자료는 정기 수질조사자료의 추세를 적절히 재현하였다(Figure 4(c)). 저수지 내 DO 농도는 동적인 변동 특성을 보였으며, 여름철 무강우 기간 동안 저수지 저층의 평균 DO 농도는 0.448 mg/L로 매우 낮았으며, 고갈된 상태가 지속되었다. 2015년 모니터링 기간 중 DO 2.0 mg/L 이하의 저산소상태(hypoxia condition)가 약 87일 동안 지속되는 것으로 관측되었다. 기온 강하 및 강수가 발생할 때 대류에 의한 수직혼합에 의해 간헐적으로 저층의 DO 농도가 회복되는 경향을 보였다. 전기전도도(EC)는 강우 이후 하층 DO가 회복되면서 개선되는 것으로 나타났으며, 이는 영양염류 용출이 감소했음을 의미한다(Figure 4(b)).

일 중 수온성층 형성 및 소멸 기작과 저수지 저층의 산소환경 변화를 확인하기 위해 무강우 기간 3일의 실측자료를 비교하여 기온자료와 함께 Figure 4(d-f)에 제시하였다. 대기기온의 상승과 함께 표층 및 중층의 수온이 상승하였으나, 하층부의 수온변화는 거의 없어 상층의 열이 하층으로 전달되지 않는 것으로 나타났다(Figure 4(e)). 또한 낮 동안 저수지 저층에서 DO가 고갈되었다가 상·하 층간 수온차이가 감소하는 일몰 이후에 DO가 주기적으로 일부 회

복되는 것으로 나타났다(Figure 4(f)). 이는 낮에는 수온성층이 형성 되면서 대기로부터 저층으로 DO 공급이 제한되며, 일몰 이후 대류혼합에 의해 표층 DO가 저층으로 일시 공급된 것으로 판단된다. 조사결과를 종합해보면 일주기로 수체의 상·하층간의 혼합이 발생하며, 하층의 DO가 고갈되는 동안 용출된 영양염류는 혼합이 발생하는 시점에 상층부로 전달될 수 있음을 확인 할 수 있다.

(3) 2016년 조사기간 동적 변화 특성

2016년 조사결과도 2015년과 같이 수심별 수온 연속모니터링 결과, 일주기로 수온성층 형성과 대류혼합이 반복되는 것으로 확인되었으며, 상층과 하층 간 평균 1.0℃, 최대 6.3℃의 수온차이를 보였다(Figure 5(a)). DO 연속측정결과 저수지 내 DO 농도의 동적 변화는 크게 나타났으며, 6월 22일부터 9월 14일까지 약 84일간 연속해서 저수지 저층에서 DO가 고갈되는 것으로 나타났다. 이 기간의 저수지 저층의 평균 DO 농도는 0.57 mg/L로 예측되었으며, 강우시 일시적으로 회복되었다가 1~2일 이내에 다시 DO가 고갈되는 현상을 보였다. DO 2.0 mg/L 이하의 저산소상태(hypoxia condition)는 약 98일간 관측되었

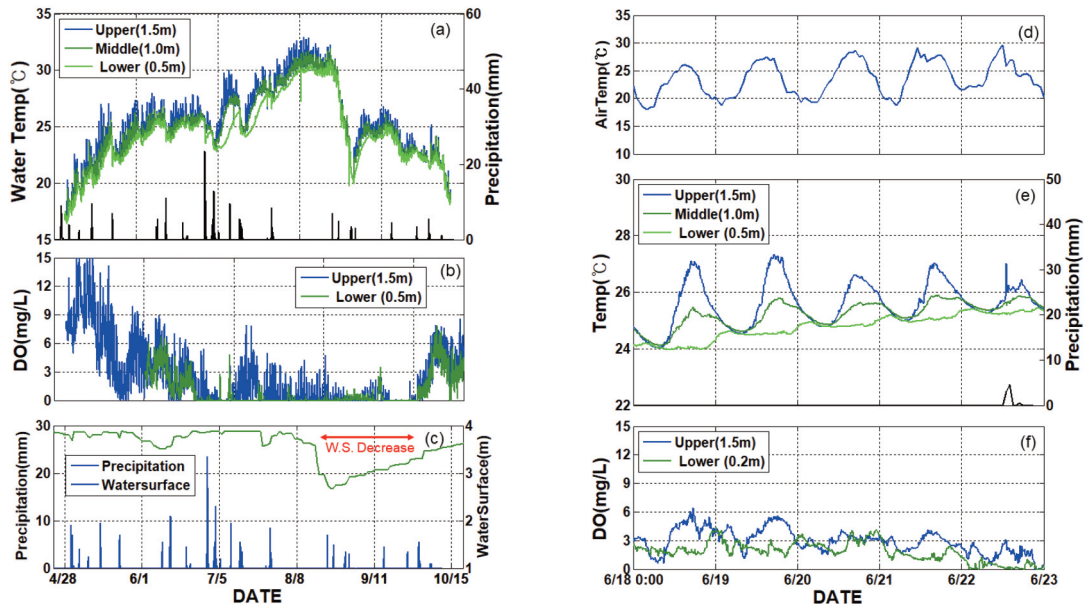


Figure 5. Temporal variations of (a) water temperature, (b) DO and (c) precipitation and water surface elevation for whole monitoring period in 2016, and (d) air temperature, (e) water temperature, (f) DO during a short-term (5 days) of rainless period.

다. 또한 낮 동안 저층에서 DO가 고갈 되었다가 상·하층간 수온차이가 감소하는 일몰 이후에 DO가 일부 회복되는 것으로 나타났다. 비록 수심이 얇은 저수지에서도 수온성층이 형성되어 대기로부터 저층 DO 공급을 제한하는 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이는 수질관리 측면에서 중요한 고려 사항이다. 반면 저수지 상층에서는 일몰이 후 대류혼합과 함께 저층의 낮은 DO 농도를 갖는 물과 혼합되면서 DO농도가 급격히 떨어지는 현상을 보이며, 낮 동안 다시 DO를 회복하는 경향을 보였다(Figure 5(e)). 일강우량 102 mm의 대형 강우사상이 발생한 이후에 상층의 DO가 고갈되는 현상이 발생하였으며, 이는 강우와 함께 외부로부터 유입한 비점오염원의 유기물이 분해되면서 발생된 것으로 판단된다. 2016년 모니터링 기간 중에는 농업용수 공급과 장기간의 가뭄이 지속되면서 저수위가 급격히 감소하는 상황이 발생하였다(Figure 5(c)). 이로 인해 저수지 상층부까지 DO가 고갈되었으며, 고갈된 상태가 12일 가량 지속되었다. 이는 저수면적 감소로 인해 대기-수체 경계면에서 포기에 의한 산소공급량보다 높은 퇴적물산소요

구량(SOD) 때문으로 판단된다.

2. 저수지 T-P 부하량 평가

T-P 부하량 평가를 위해 산정한 유입 유출량 자료와 연구대상 저수지의 저수용량 변화를 Figure 6에 나타내었다. 물질수지 해석결과 2015년 저수지 외부로부터 유입하는 총 인의 부하는 766.9 kg, 내부부하는 28.7 kg이며, 외부 유입부하중 강우시에 420.5 kg, 무강우시에 346.4 kg이 유입하는 것으로 나타났다(Figure 7). 이중 조류가 직접 사용할 수 있는 PO₄-P부하는 T-P 부하의 약 55%에 해당하는 421.8 kg으로 나타났다. 내부부하는 무기인인 PO₄-P형태로 용출되는 것을 감안할 때, 무강우시 PO₄-P 부하대비는 15.1%를 차지하는 것으로 평가되었다. 특히, 조류성장이 활발한 6월~8월을 기준으로 보면 최대 37.9%(8월)를 차지하여, 내부부하가 저수지 수질과 조류성장에 상당히 큰 기여를 하는 것으로 나타났다. 2016년도의 T-P외부부하는 895.7 kg, 내부부하는 31.4 kg이며, 외부 유입부하중 강우시에 580.5 kg, 무강우시는 315.1 kg이 유입하는 것으로

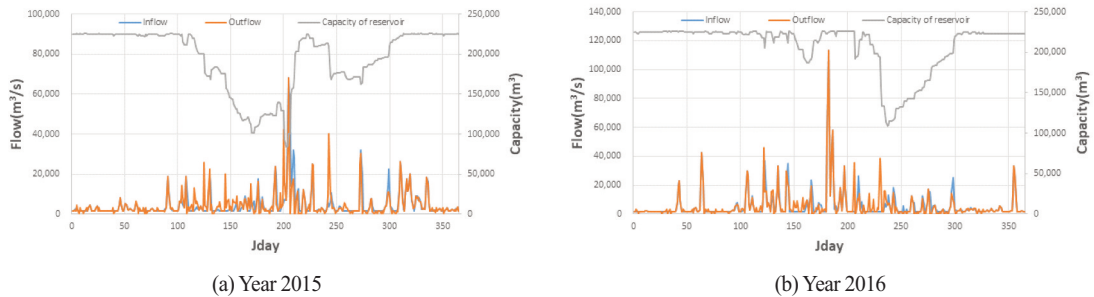


Figure 6. Estimated value of Inflow, outflow, Capacity at M reservoir in 2015(a), 2016(b)

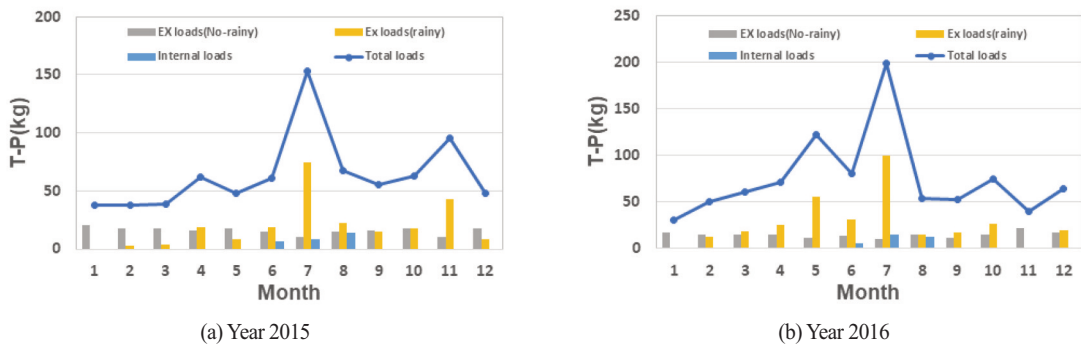


Figure 7. Comparison of the total, external and internal loads at M reservoir in 2015(a), 2016(b)

나타났다. 이중 $\text{PO}_4\text{-P}$ 부하는 492.6 kg으로 나타났으며, 내부 $\text{PO}_4\text{-P}$ 부하는 무강우시 부하 대비 18.1%를 차지하는 것으로 나타났다. 또한 수온이 높아 조류성장이 촉진되는 8월에는 최대 39.7%까지 차지하여, 내부부하가 상당히 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 이는 여름철 무강우가 지속될 경우 퇴적층에서 용출하는 내부 인 부하로 인해 녹조현상이 발생하고 저수지 수질이 급격히 악화 될 수 있는 가능성을 내포하고 있다. 따라서 저수지 수질관리를 위해 외부 유입부하 관리와 함께 내부부하를 방지할 수 있는 관리 대책 마련이 필요하다.

IV. 결론

본 연구에서는 수심이 얇은 저수지를 대상으로 기상, 수온 성층 구조와 수심별 DO 농도의 연속 모니터링을 실시하고, 저수지 저층의 DO 농도의 동적인 변동 특성과 저산소 상태의 지속기간을 확인하였다. 또한 물질수지해석을 통해 퇴적층 용출에 의한 T-P

의 내부 부하량의 기여정도를 평가하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 기존의 수질모니터링은 월·주간 단위로 이루어지고 있어 자료의 연속성 측면에서 한계를 가지고 있다. 본 연구에서 제시한 기상, 수온, DO 등 수환경의 연속모니터링은 고해상도 자료 수집을 가능하게 하며, 수체와 퇴적층 경계면에서의 물질교환 해석에 유용하게 활용될 수 있다.
- 2) 평균 수심이 1.7 m인 얇은 저수지에서도 수온 성층과 DO 성층 현상이 발생하였다. 여름철 무강우 기간에는 낮 시간 동안 수온성층을 형성하고 일몰이후 대류혼합으로 인해 수온성층이 해소되는 현상이 반복되었다. 저수지 수온의 성층형성과 해소 주기와 같이 저층의 DO 농도도 일주기 변동 특성을 보였으며, 수온성층이 해소되는 시기에 상층의 DO가 저층으로 공급되는 것으로 나타났다.
- 3) 저수지 저층 DO 연속 모니터링 결과 DO 2.0 mg/L 이하의 저산소상태(hypoxia condition)

가 2015년과 2016년에 각각 87일과 98일 동안 발생하였으며, 기온 강하 및 강수가 발생하는 시기에 간헐적으로 회복되는 것으로 나타났다. 이 기간 동안 바닥층의 전기전도도는 높은 수준을 유지하여 영양염류가 용출되고 있음을 간접적으로 확인하였다.

- 4) 2016년 대규모 강우 (일강우량 102 mm) 발생 이후와 저수위가 저하되는 시기에는 저수지 상층에서도 DO 고갈 현상이 발생하였다. 이는 각각 강우시 유입한 비점오염원에 의한 영향과 저수지 퇴적층의 유기물 산화에 필요한 산소요구량 영향으로 판단된다.
- 5) 수온이 높아 조류성장이 촉진되는 8월에는 PO₄-P 내부 부하량은 무강우시 전체부하 대비 2015년과 2016년에 각각 37.9%와 39.7%로써 상당히 큰 비중을 차지하는 것으로 평가되었다.
- 6) 본 연구결과에서 제시된, 수심이 얇은 저수지에서 여름철 지속적인 수온성층 형성과 저층의 DO 고갈, 그리고 주기적인 상·하층 대류혼합은 퇴적물과 수체간의 물질교환에 중요한 기작으로 판단되므로 향후 저수지 내부 퇴적 오염물질 용출에 의한 오염부하 기여율에 대한 정밀한 조사가 필요한 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국농어촌공사 농어촌연구원의 “양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리 기술개발 및 적용” 과제의 연구비지원으로 수행되었으며, 관계자분들께 감사 را 전합니다.

References

- Boström B, Jansson M, Forsberg C. 1982. Phosphorus release from lake sediments. Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol 18: 5-59.
- Cooke GD, Welch EB, Peterson S, Nichols SA. 2005. Restoration and Management of Lakes and Reservoirs. CRC Press.
- Ekholm P, Malve O, Kirkkala T. 1997. Internal and external loading as regulators of nutrient concentrations in the agriculturally loaded Lake Pyhajärvi, southwest Finland. Hydrobiologia 345: 3-14.
- Jensen, HS, Andersen FØ. 1992. Importance of temperature, nitrate, and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes. Limnol. Oceanogr. 37: 577-589.
- Jeppesen E, Jensen JP, Søndergaard M, Lauridsen TL, Pedersen LJ, Jensen L. 1997. Top-down control in freshwater lakes: the role of nutrient state, submerged macrophytes and water depth. Hydrobiologia 342/343: 151-164.
- Kang HM, Lee HS. 2015. Analysis of Design Flood at Buyeon Reservoir by using FCSR Method. Korean Review of Crisis and Emergency Management. 11(1): 279-297. [Korean Literature]
- Kim HI. 2011a. Water quality status and improvement plan in agricultural reservoir. Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers. 52(2): 10-22. [Korean Literature]
- Kim IH. 2011b. The policy of water quality management in agricultural reservoir. Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers. 52(2): 2-9. [Korean Literature]
- Kozerski HP, Kleeberg A. 1998. The sediments and benthicpelagic exchange in the shallow lake Muggelsee (Berlin, Germany). Int. Rev. gesamt. Hydrobiol. 83: 77-112.
- Lee GF, Sonzogni WC, Spear RD. 1977. Significance of oxicvs anoxic conditions for Lake Mendota sediment phosphorus

- release. In Golterman, H. L. (ed.), Interactions Between Sediments and Freshwater: 294-306.
- Manahan, SE. 2011. Fundamentals of Environmental Chemistry, CRC press.
- Ministry of land, infrastructure and transport(MOLIT). 2011. The report of long term master plan of water resource. [Korean Literature]
- Mortimer CH. 1971. Chemical Exchanges Between Sediments and Water in the Great Lakes-speculations on Probable Regulatory Mechanisms, Limnology and Oceanography 16(2): 387-404.
- Phillips G, Jackson R, Bennet C, Chilvers A. 1994. The importance of sediment phosphorus release in the restoration of very shallow lakes (The Norfolk Broads, England) and implications for biomanipulation. Hydrobiologia. 275/276: 445-456.
- Ramm K, Scheps V. 1997. Phosphorus balance of a polytrophic shallow lake with the consideration of phosphorus release. Hydrobiologia 342: 43-53.
- Rural Research Institute(RRI). 2016. Convergence technologies development and application for agricultural water treatment. [Korean Literature]
- Søndergaard M, Jensen JP, Jeppesen E. 2003. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes, Hydrobiologia 506/509: 135-145.
- Wetzel RG. 2001. Limnology: Lake and River Ecosystems, Gulf Professional Publishing.