

# 人工循環에 依한 저수지 水質管理

정상만,\* 임경호,\*\* 이주현,\*\* ○한영성,\*\*\*\* 허강희\*\*\*\*\*

## 1. 서 론

현재 국내에는 수자원공사의 2개 다목적댐과 10개 용수전용댐에 총 266기의 수중폭기장치가 설치되어 있고 일부 지자체의 용수댐에서도 설치하여 가동을 하고 있으나 이에 대한 정확한 자료는 노출되어 있지 않은 실정이다. 수중폭기에 대한 연구보고도 수자원공사에서 수행한 연초댐, 광동·날방댐과 대청댐의 효율성조사 보고서가 있을 뿐, 다양한 연구활동은 미흡한 실정이고 이를 보고서에서는 수중폭기장치의 설치 전과 후의 수질개선과 효과분석을 주로 다루고 있다.

본 연구에서는 건설과 관리에 비교적 부작용이 적고 용이한 중소규모 용수전용댐인 연초댐을 대상으로 국내 여러 호소에서 적용하고 있는 수중폭기장치의 설치목적인 성총해소와 심층 용존산소 공급, 조류발생 억제 등에 대한 연구조사를 수행하고, 이를 근거로 우리나라 실정에 맞는 가동 조건을 설정·제시하며 산기식 수중폭기의 부작용으로 대두되고 있는 원수 탁도상승현상을 개선하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 조사대상 저수지의 개요

표 1. 연초댐 현황

연구 대상지인 연초댐은 경상남도 거제시에 위치하고 있으며 수문이 없는 자연월류식 용수전용댐으로 일반현황은 표 1과 같다. 거제지역의 생공용수 공급을 위해 건설한 연초댐은 총 저수용량 대비 저수지 수면적비가 0.126으로 대암댐, 선암댐의 0.158, 0.130보다는 작으나 국내의 다른 중소규모 용수전용댐이나 충주댐 등 대형 다목적댐에 비하여 크며, 동일지역에 위치한 구천댐의 0.048보다 커서 여름철 고수온기와 갈수기에는 조류 대량발생의 가능성이 크다.

준공년도	1979.12	댐 형식	중앙차수벽형 사력댐
유역면적	11.7km <sup>2</sup>	저수면적	0.625km <sup>2</sup>
총저수량	4.96천 m <sup>3</sup>	댐높이/길이	24.5m/120m
최대수심	16m	평균수심	7.94m
취수형식	취수탑	취수구	4개
정수장	1개소	취수량	16,000 m <sup>3</sup> /일
유역인구	464명	급수인구	40,625명

### 2.2 실험방법

그림 1과 같이 연초댐에 설치되어 운영중인 간헐식 및 산기식 수중폭기장치 16기를 대상으로 수중폭기 영향권인 site 1과 비영향권인 site 2를 조사지점으로 선정하였다.

\*공주대학교 토목환경공학과 부교수

\*\*공주대학교 토목환경공학과 조교수

\*\*\*충북대학교 토목공학과 조교수

\*\*\*\*한국수자원공사 동아댐 수도건설단 단장

\*\*\*\*\*공주대학교 토목환경공학과 석사과정

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 가동시기의 결정

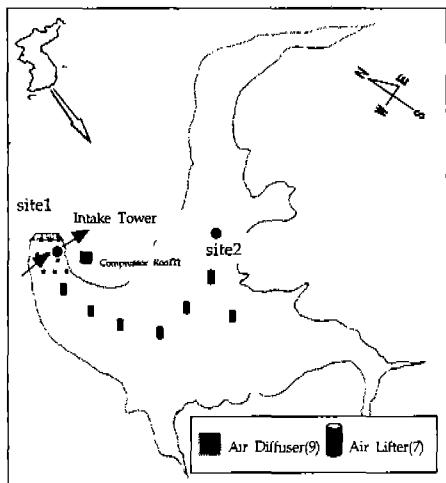


그림 1. 수중폭기 설치 현황도

실험대상 유역인 연초댐의 수온분포는 3월초까지는 자연 전도현상(turn over)에 의해 수심별 수온분포가 균일하므로 수온성층 형성방지를 위한 수중폭기장치의 적정 가동시기는 수층간 수온편차가 커지는 3월말에서 4월초까지는 가동하는 것이 적절하였다. 또한 수체가 호소 바닥과 접하는 상부 1m에서의 DO는 9.3(1월 7일)→11.8→10.8→10.6→8.8→6.1(4월 6일)→4.7→2.6→1.3mg/l(5월 2일)로 변화하여 중층 이하에서의 무(저)산소층 형성억제를 위한 수중폭기 장치의 가동은 DO 농도가 5mg/l 내외로 감소되기 시작하는 4월초 또는 4월 중순까지는 가동하여야 할 것으로 판단된다. 따라서 가동시기의 결정은 유해한 혼기성 분해산물 생성방지를 할수있고 경제적인 전력비 절감과 효율적인 수질악화 억제를 위해 3월 말에서 4월 초가 적정한 것으로 조사되었으며, DO를 우선적으로 고려하여 가동시기를 결정하여야 한다.

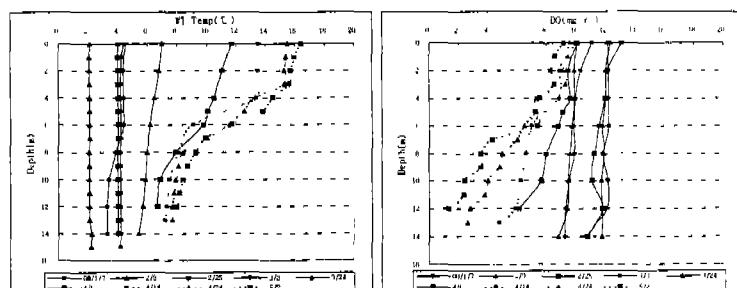


그림 2. 수중폭기 가동전의 수온분포 및 DO분포(2000.1.7~5.2)

#### 3.2 수중폭기 가동시 수질변화

37kW(50HP) 공기압축기 4대를 이용하여 폭기장치 가동 수량에 따라 1, 2대씩 교행 운전되도록 조정하여 가동기간에 따른 수질변화를 조사하였다. 그 결과 연초댐에 설치된 수중폭기장치의 설치 수량과 용량은 현재 적정한 것으로 판단되며 수온성층이 형성되었을 경우 수중폭기 장치의 가동으로 인한 성층해소는 7일 이내에 완료되는 것으로 조사되었다. 수온성층의 형성방지 또는 심수층에서의 무산소 상태를 해소하기 위한 수중폭기장치는 수온성층기에 호소 중층 이하에 형성된 저산소층을 개선할 수 있었으며 가동 초기 표층과 중층의 DO는 감소하는 반면 심수층에서 증가하였고 가동 6일 이후에는 전 수층의 DO가 높은 상태로 균일화되는 것으로 조사되었다.

연구대상지인 연초댐의 2000년 1월부터 10월까지의 월별 수온, DO 분포 변화는 그림 3과 같으며 수중폭기에 의해 여름철 고수온기에 수온성층 형성은 억제되었다. 수중 용존산소도 수중폭기 가동 전에 최대 7.8mg/l의 차이를 보였으나 폭기 실시 후에는 최소 1.2mg/l에서 8월에 최대 5.3mg/l의 차이를 보였으며, 조사지점 최저 수심에서의 DO는 7월과 8월에 각각 3.6, 3.7mg/l로 용존하여 무산소층은 완전히 해소되었으며 중층 이하 수심에서도 5mg/l 이상으로 조사되었다.

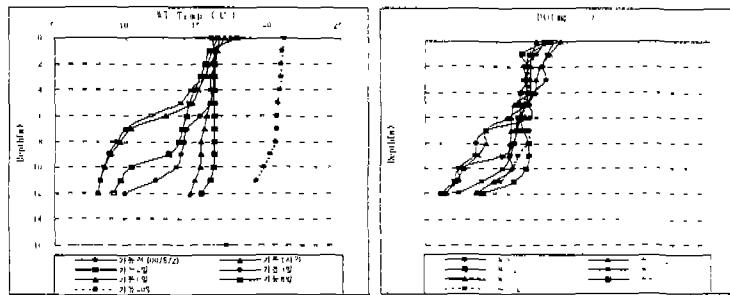


그림 3. 수중폭기 가동 후의 수온 및 DO변화(2000.5.2~5.22)

식물플랑크톤의 경우는 총 출현량이 6월초까지는 큰 증가를 보이지 않다가 6월말 이후 급격히 증가하여 site 1에서는 8월에 최대 출현량을 보였고 site 2에서는 7월에 최대로 출현하였고 수중폭기 영향권에서는 그림 4와 같이 수표면보다 2~6m 수심대의 중층에서 식물플랑크톤 현존량이 최대로 존재하는 것이 확인되었다. 수중폭기로 인하여 조류는 전 수층으로 분산되었으며 이미 번성한 조류가 표면집괴 하는 것을 방해함으로써 조류 대량발생과 표면집괴로 인한 상수원의 수질악화를 방해하였다. 실험 결과를 종합할 때, 연초댐의 수중폭기장치는 수체의 성층해소와 재형성 방지에 적절하였으나 표층에서의 조류 현존량이 10,000 cells /ml 이하에서는 조류를 수층 전체로 분산시킴으로써 표층에 집중 서식하는 현상이 나타나지 않았으나 남조류 특히, *Microcystis spp.*의 강한 우점 현상을 관찰할 수 있었다. 이는 이 시기에 극심한 가뭄으로 댐 준공 아래 최저 수위를 나타냈으며 높은 기온으로 인하여 표층수온이 25°C 이상이었고, 전 수층의 수온이 남조류의 생육이 왕성한 온도인 21°C 이상의 조건이 형성되었기 때문으로 사료된다.

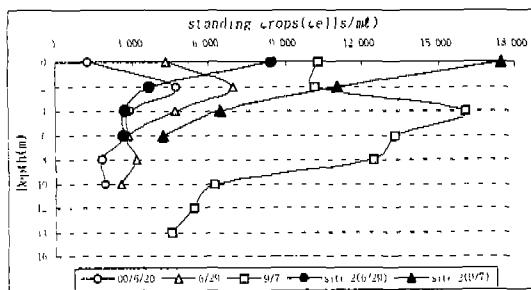


그림 4. 수중폭기장치 가동중의 수심별 조류 현존량 변화

### 3.3 수중폭기 가동의 부작용 및 개선방안

인공순환으로 투명도가 악화되는 사례는 장치의 과소설계에 따른 미소성층 형성으로 조류 발생량 증가의 경우와, 반대로 장치의 순환강도가 너무 커서 바닥의 입자상 물질들을 포획하여 부유시켜 투명도가 감소하는 경우가 있다. 연초댐의 수중폭기장치를 가동하면 그림 5와 같이 이러한 현상이 지속적으로 관찰되며 폭기장치 영향권에서는 탁도가 상승하여 이를 원수로 사용하는 연초정수장의 약품 주입량과 슬러지 발생량을 증가시키는 원인이 되고 있으므로 수중폭기장치 가동으로 인한 원수 탁도상승의 정도와 원인, 이의 개선방안을 연구하였다. 간헐식장치의 경우 양수통 하부에 공기실을 두어 육상 compressor로 공급한 압축공기로 생성된 공기탄이 수면으로 부상할 때 삼총수를 흡입하는 구조상 호소 바닥에서 약 1m를 이격시켜 설치하므로써 간헐식 폭기장치의 가동으로 인한 원수 탁도상승은 미미하거나 없었고 설치지점이 산기식보다 취수탑 외곽에 있어 본 연구에서는 연초정수장 원수 탁도에 직접 영향을 미치는 산기식에 대해서만 조사를 수행하였다. 그 결과 수중폭기 전·후의 원수 탁도변화는 그림 5와 같으며 수중폭기 가동으로 인한 부작용인 호저 침전물 부상에 따른 원수 탁도상승을 확인할 수 있었으며, 이는 두께 5.54cm의 산기식 수중폭기장치 산기판이 호소 바닥에 설치되어 압축공기에 의한 미세기포를 연속 분출시 공기가 상승하면서 주변에 불안정한 상태로 존재하던 침전물을 포획하여 수중에 분산시키는 결과라 사료된다. 이의 개

선을 위해 2차에 걸친 실험을 그림 6과 같이 산기판의 위치를 조절하여 수행하였으며, 개선 전후의 결과는 그림 7과 같다.

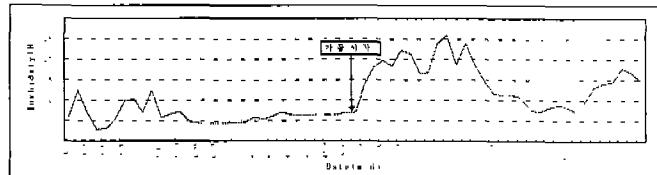


그림 5. 수중폭기 가동 전·후 원수 탁도변화

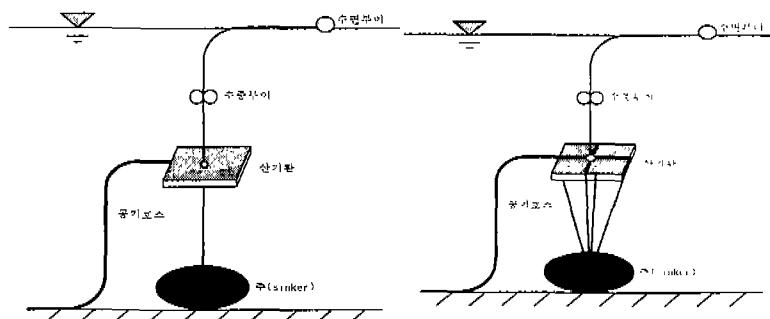


그림 6. 1차 및 2차 개선 모식도

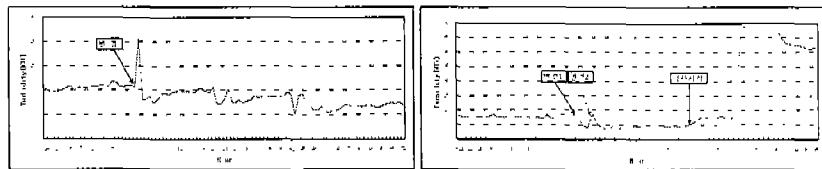


그림 7. 1차 및 2차 개선시의 원수 탁도변화

산기판을 대상으로 2차 개선을 수행한 결과, 1차 개선에서 나타났던 산기판의 수중회전에 의한 간헐적인 탁도 상승현상은 제어가 되었으며 원수 탁도는 개선 후 1일 동안 17.76NTU에서 18%가 감소하였다.

### 3.4 가동중지 및 재가동시의 수질변화

원수 수질개선과 악화억제를 위한 수중폭기장치의 효율적인 운영으로 비용절감 방안을 제시하고자 인공순환을 중지할 경우에 대한 수질변화 연구를 수행하였으며, 가동중지 시기는 site 1의 수온이 하강하고 조류 현존량이 감소하는 9월로 선정하였으며, 제14호 태풍의 영향으로 4일간 204mm의 연속 강우가 있는 직후인 2000년 9월 16일부터 가동을 중지하였다. 조사연구는 가동중지 후 7일간 3회, 가동 재개 후 5일간 3회를 수행하였고 비교자료는 동일 지점(site 1의 취수탑)의 수중폭기 연속가동 시기인 2000년 9월 7일로 하였으며 그 결과는 그림 8과 같다.

기존에 설치된 인공순환장치의 효율적 운전을 통한 전력비 등 경비절감은 여름철 고수온기에 조류가 집중적으로 발생하는 시기에는 연속가동함이 바람직하고 가동을 중지할 경우에도 적기에 재가동을 실시하여야 하므로 이 시기에는 적용하지 않음이 좋을 것이다.

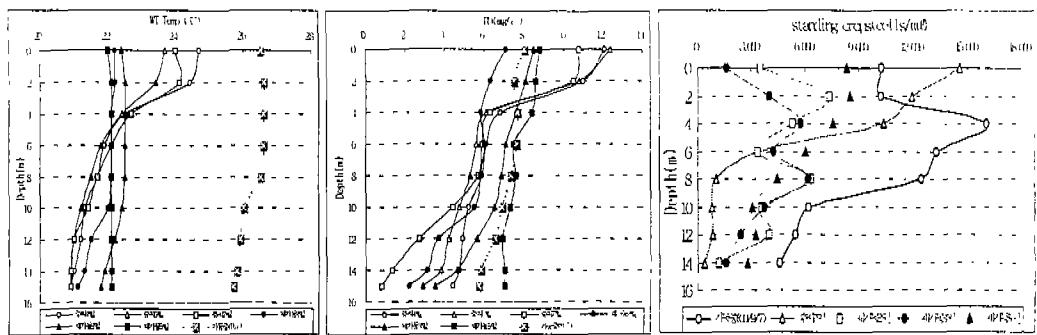


그림 8. 수중폭기장치 가동중지, 재가동시의 수온변화, DO변화 및 수심별 식물플랑크톤 현존량 분포

최적의 유지비 절감방안은 봄철에 초기 가동을 위한 최적의 가동시점 결정으로 연간 가동일수를 단축하고, 기온이 내려가는 가을철에는 주간에만 가동하고 야간에는 운휴하거나 수중폭기장치가 설치된 수량과 위치에 따라 교대로 운전하는 방안 등을 강구함이 바람직하다고 본다.

### 3.5 가동중지 시기의 결정

동일지역에 위치한 구천댐의 연중 수온변화(그림 9) 양상을 기초로 한 연초댐 수중폭기장치의 적정 가동중지 시기는 10월부터 수온, DO변화를 관찰하면서 앞서 언급한 가동중지 · 재가동 실험과

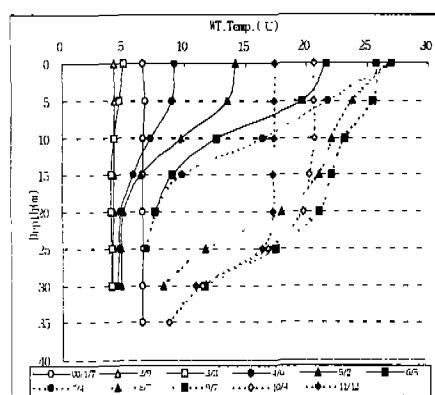


그림 9. 구천댐의 수온변화(2000.1~11)

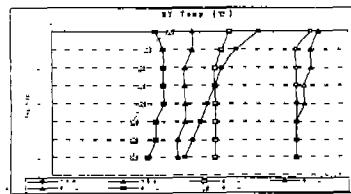


그림 10. 가동중지시의 수온 분포변화

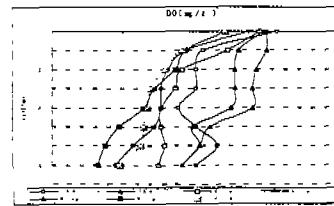


그림 11. 가동중지시의 DO 분포변화

같은 조사를 병행하여야 하며 11월 이후에 가동중지함이 바람직할 것으로 보인다. 이러한 결과를 바탕으로 11월 7일부터 가동을 중지하였다. 가동중지 전과 후의 전수층에 걸친 수온, DO 조사 결과는 그림 10 및 그림 11과 같다. 경제적인 가동을 위한 수중폭기장치의 가동중지는 11월이 적정하며 이 시기의 자연 전도현상에 의해 수체는 순환을 하게 되며 수체의 순환에 의해 DO도 균일해지고 익년 2월까지의 수온하강에 의해 대기로부터 수중으로의 산소전달도 용이해질 것이다.

수중폭기장치의 연간 가동중지, 선택적 가동과 연속가동 시기는 대상지의 위도상 위치와 연변화가 큰 기온, 강우량 등의 인자를 고려하여 결정하여야 하나, 본 연구 결과 그림 12와 같이 표준화 할 수 있다.

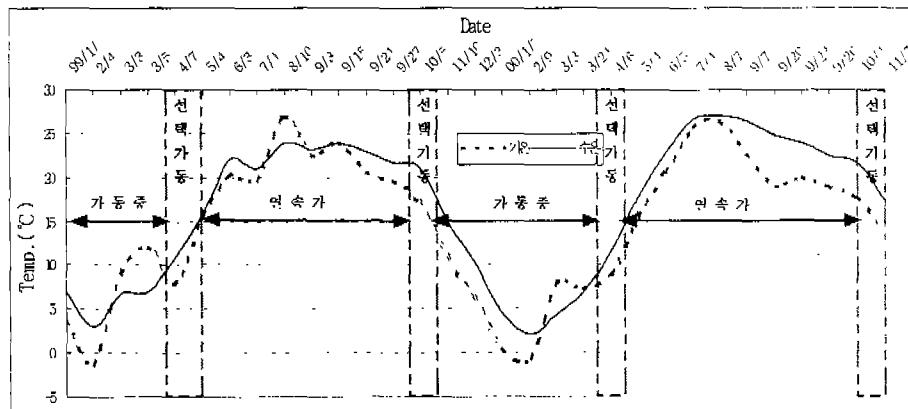


그림 12. 수중폭기장치의 시기별 가동조건

#### 4. 결 론

여름철 조류발생 억제와 수온성층 형성방지를 위하여 국내에서 광범위하게 적용되고 있는 인공순환 수중폭기장치의 최적 가동과 부작용 해소방안을 연구하여 상수원으로 이용되는 중소규모 용수전용댐의 효율적인 수질관리 방안을 제시하고자 2000년 1월부터 9개월간 수행한 결과는 다음과 같다. 첫째, 인공순환을 실시하지 않을 경우 3월초까지는 자연전도 현상에 의해 수심별 수온분포가 균일하게 유지되나 기온상승에 따라 4월부터 성층형성이 관찰되므로 호소 등온화를 위한 인공폭기가동시기는 3월말에서 4월초가 적정하였다. 둘째, 수온상승에 따른 심수층에서의 DO감소는 4월초부터 시작되어 층층으로 빠르게 확산되므로 심층 무산소층 형성방지를 위해서는 심수층 DO가 5mg/l 이하로 감소하는 4월 중순까지는 인공폭기장치를 가동하여야 한다. 셋째, 본 연구 대상지인 연초댐의 수중폭기장치 가동에 의한 수온성층의 해소는 7일 이내에 완료되어 현재의 설치 수량과 용량은 적합한 것으로 판단되며 표층과 층층의 수온은 낮아지고 심수층에서는 높아졌다. 넷째, 심수층에 형성된 무산소층은 수중폭기 가동으로 개선할 수 있었으며 가동 초기 표층의 DO는 감소하고 중, 하층은 증가하여 수온변화와 같은 경향을 보였으며 7일 이내에 전 수층에서 높은 상태로 균일해졌다. 다섯째, 수중폭기장치의 연속가동 시기의 지속적인 수온상승과 조류 발생량 증가에도 수온성층의 재형성과 심층 무산소층은 관찰되지 않았고 식물플랑크톤의 수표면 집괴현상은 비영향권에 비해 미약하였으나 조류 발생량의 증감은 기온, 강우 등 환경요인에 영향을 받으므로 지속적인 연구가 필요하였다.

#### 참고문헌

- 낙동강환경관리청(1998), 상수도에서의 조류장애 및 저감대책, pp. 159~193
- 한국수자원공사(1993), 대청용수내 이취미 및 THM제거를 위한 고도정수처리적용 방안(I),
- 한국수자원공사(1996), 댐저수지 유기퇴적물 분포 및 처리방안 연구(1차년도), pp. 87~90
- Bernard, J. M.(1971), Phytoplankton sampling with the Sedgwick-Rafter Cell., Limnol. Oceano-gr., 16:19~28
- Freedman, P. L.(1977), and R. P. Canale, Nutrient release from anaerobic sediments., J. Envir. Engrg. Div., ASCE, Vol.103, pp. 233~244
- Horne, A. J., and C. R. Goldman, Limnology, McGraw-Hill, Inc., Tokyo, Japan.

15. Hutchinson, G. E.(1975), A Treatise on Limnology. I. Geography, Physics and Chemistry., John Wiley and Sons, Inc., New york, 1015pp
- 16.
17. Kortmann, R. W.(1994), G. W. Knoecklein and C. H. Bonnell, Aeration of Stratified : Theory and Practice., Lake and Reserv. Manage. 8(2):99~120
18. Kortmann, R. W.(1988), M. E. Conners, G. W. Knoecklein and C. H. Bonnell, Utility of Layer Aeration for Reservoir and Lake Management., Lake and Reserv. Manage. 4(2):35~50
20. Odum, E. P.(1983), Basic Ecology., Saunders college publishing, pp.319~328
21. Oskam. G.(1978), Light and zooplankton as algae regulating factors in eutrophic Biesbosch reservoirs., Verh. Int. Verein. Limnol., Vol.20, pp.1612~1618