

댐 하류하천의 수질 · 수생태계를 고려한 수중폭기장치 적용방안 고찰



염 경 택 |

한국수자원공사수자원사업본부 본부장
yumkt@kwater.or.kr



반 양 진 |

한국수자원공사 댐·유역관리처 팀장
banyang@kwater.or.kr



송 상 진 |

한국수자원공사 수자원사업처 팀장
sjsong@kwater.or.kr



사 성 오 |

한국수자원공사 수자원사업처 차장
sosgo@kwater.or.kr

1. 서론

최근 개발중인 다목적댐은 기존댐과 비교하여 중·소규모로 개발되고 있으며, 상수원수를 댐내 취수하지 않고 방류후 하류하천에서 취수, 공급하

는 방식이다. 주로 상류 지류하천에 위치하여 평시 하천수량이 적은 특성으로 인해 수질이 안정되기 까지 담수초기 3~4년이 소요되고 비점오염원과 호소내부 생산에 대응하여 하수처리시설의 설치 등 상류유역 수질보전 대책과 함께 댐 저수지내 대책도 강구되고 있다. 저수지내 수질보전 대책의 시설방안으로는 인공습지, 조류유입 방지막과 수중폭기장치의 설치 등이 있다. 본 고에서는 최근 연구되고 있는 수중폭기장치(물순환장치) 설치·운영 표준화 Process를 소개하고, 댐 하류하천의 수질 및 수생태계를 고려한 중·소규모 댐의 수중폭기장치 설치 타당성과 장치 형식별 용량(대수)의 산정, 중첩효과를 고려한 배치방안을 검토하였다. 또한, 담수초기 수문 운영자료의 부족에 대응하는 수문데이터의 활용방안을 제시하였다.

2. 수중폭기장치(물순환시스템)의 개요 및 연구동향

수중폭기장치는 수체의 연직방향 수온차가 커짐에 따라 밀도차로 인해 발생하는 수질문제를 개선하기 위한 장치로 물순환을 목적으로 탈성층 효과에 중점을 두어 설치하는 대류식과 간헐식 장치가 있으며, 수중에 용존산소를 직접 공급하는 산기식 등 3가지 형식이 주로 적용되고 있다. 국내에서는

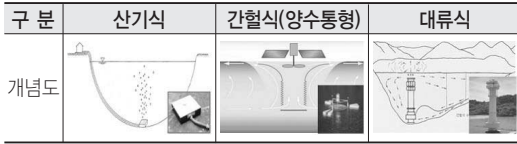


그림 1. 수중폭기장치 형식별 개념도

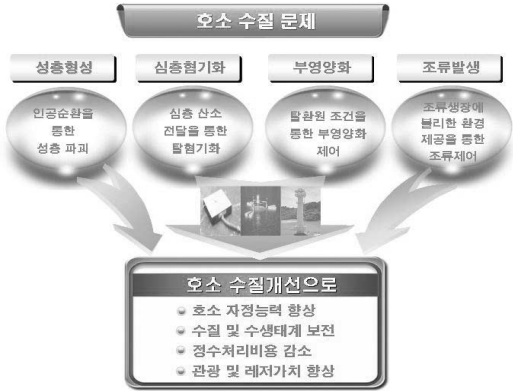


그림 2. 수중폭기장치 운영목표

약 10여년 전부터 적용되고 있으며, 수체의 물순환과 용존산소 공급을 최적화 하기 위한 형식별 설계요소 연구와 운영시 수질개선효과 및 수생태 변화에 대한 연구가 수행되고 있다. 최근에는 전산유체역학(CFD)를 통한 모의와 적용으로 설계요소를 검증하고 있어 기존의 경험식과 안전율에 의존한 한계성을 보완하고 있다. 연구가 활발히 진행되고 있는 산기식장치는 적정 폭기량과 기포의 크기에 따른 효과 등 많은 분야에서 진전이 있었다. 염경택 등(2004)은 Lab실험과 CFD모형으로 기포 크기와 연행 및 성층강도와 버블플룸의 거동 특성을 연계한 분석을 통하여 무차원변수 DN (Destratification Number)을 제시하였으며, 신상민 등(2011)은 설계요소들의 현장 적용성에 중점을 두어 최대 탈성층효율 등 인자를 제시하였다. 또한, 박한영 등(2006)은 에너지 효율적 수중폭기장치의 물순환 기능과 효과를 적용하기 위한 연구를 수행하였다.

3. 수중폭기장치(물순환시스템) 설치·운영 표준화 Process

수중폭기장치(물순환시스템) 설치·운영 표준화 Process는 댐의 물리적 환경과 수질특성을 분석하여 형식별 적용성을 단계별로 비교·검토한 후 경제성이 고려된 적용방안을 선정하기 위한 절차이다. 댐 저수지 수체의 특성에 적합한 수질개선 목표를 달성하기 위해 효율적으로 적용가능한 물순환시스템 적용절차를 제시하였다. 표 1은 수중폭기장치 적용시 고려사항을 보여준다.

표 1. 수중폭기장치 적용시 고려사항

<p>▶ 댐 규모별 적용성</p> <ul style="list-style-type: none"> 소규모 댐의 경우 수면적 전체를 대상 수면적으로 선정 중·대규모 댐의 경우 개선이 필요한 일부 지역을 대상수면적으로 선정
<p>▶ 수중폭기장치(물순환시스템) 설치 위치 및 배치</p> <ul style="list-style-type: none"> 취수탑으로부터 100m이상 이격된 상태로 상류쪽에 설치 호내 수심분포를 고려하여 강한 성층 발생 예상지역 선정 댐 가장자리의 정체구역 선정 조류 집중 발생지역 및 영양염류 농축 지역 선정
<p>▶ 설비 시공성 및 유지관리 용이성</p> <ul style="list-style-type: none"> 물순환장치 설치 및 컴프레서와의 연결성 고려

환경분석	수체 설정	형식별 특성	적용성 분석
<ul style="list-style-type: none"> 성층형기성 사류수역 조류발생수역 	<ul style="list-style-type: none"> 대상수체구역 (위치 선정) 수심 결정 	<ul style="list-style-type: none"> 형식별 장단점 등 특성파악 	<ul style="list-style-type: none"> 경제성 분석 형식적용 설치대수-배치

그림 3. 수중폭기장치 적용성 분석 절차

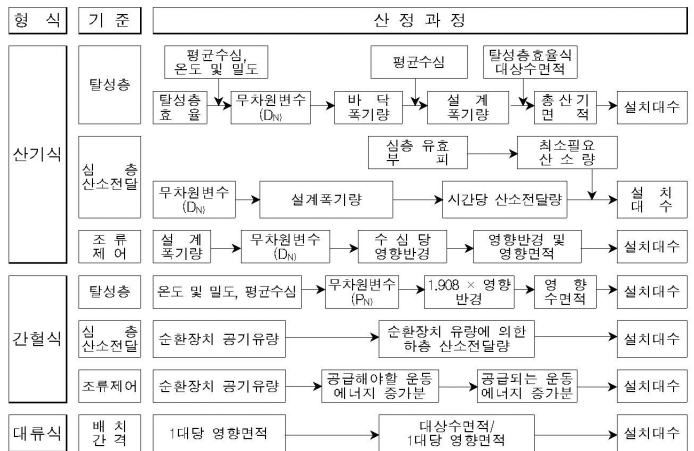


그림 4. 수중폭기장치 설계 표준화 절차 예(형식별 설치대수 산정 분야)

4. 설치 타당성 검토 및 연구방법

1) 적용대상 댐 현황

K댐은 경상북도 중부권 및 낙동강 본류지역에 예상되는 용수를 안정적으로 공급하고 홍수조절을 통한 댐 하류의 홍수피해 경감 및 수력발전을 이용한 청정에너지 생산 등을 목적으로 경상북도 위천수역에 건설되었다. 총 저수용량은 48.7백만톤이며, 유역면적은 87.5km², 저수면적은 2.65km²이다. K댐 이후 건설되는 댐은 주로 중·소규모 댐으로 전량 방류후 하류 하천에서 취수하는 시스템으로 개발되었다. 따라서 K댐에 대한 수중폭기장치의 설치 타당성 및 방향 설정이 향후 건설되는 댐에 대한 중요한 기초자료가 될 것으로 판단된다.

구분	내용
저수면적	2.65km ²
총저수량	48.7백만 m ³
유효저수량	40.1백만 m ³
용수공급량	38.25백만 m ³ /년
홍수조절량	3.1백만 m ³ /년
상시만수위	EL.204.0m
홍수위	EL.205.1m
저수위	EL.181.0m
연평균 유입량	50.8백만 m ³

그림 5. K댐 유역도 및 제원

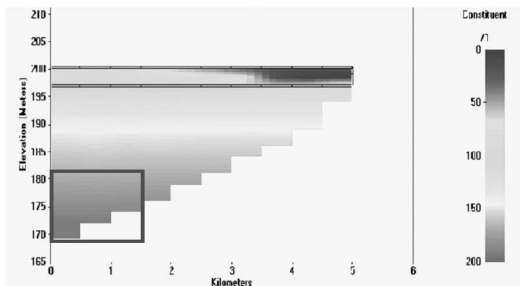
2) 수중폭기장치 설치 타당성 검토

수중폭기장치의 K댐에 대한 적용성을 평가하기 위하여 CE-QUAL-W2모형을 적용한 수질모의를 수행하여 다항목 수질측정기(모델명 : YSI-6600) 측정결과를 비교·검증하였다. 저수지 하층의 저산소화는 저수지 내부 영양염류의 용출을 일으키고, 저수지 내부 및 하류하천의 어류 생태계에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있기 때문에 수체의 체류시간이 길고, 사류수역의 생성, 수체 하층의 용존산소가 낮아져 저산소화 현상이 발생하는 것으로 확인되는 경우, 설치의 타당성이 큰 것으로 판단하였다.

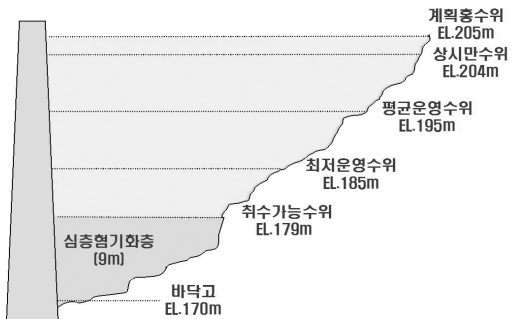
표 2. 수질모델 적용

▶ 적용모델	<ul style="list-style-type: none"> 적용 모델 : CE-QUAL-W2 v3.2
▶ 입력자료 구성	<ul style="list-style-type: none"> 지형 조건 : CAD 지형도를 활용 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 유입 본류 및 4개의 지류 포함 - 종방향 격자(500m 간격) 35개, 연직방향격자(1m 간격) 42개 구성 유입·방류량 조건 : K댐 실시설계 자료 기상 조건 : 대구기상대(기상청)

모의 결과, 수체의 체류시간이 200일 이상 상당히 긴 것으로 나타났으며, 구간별 사류수역이 발생하는 것으로 모의되었다. 또한, 실시간 측정을 통해 사류수역이 심층 혐기화되어 저산소화 현상이 발생하는 것으로 확인되었으며, 저수지의 조류발생 정도가 조류예보기준을 초과하는 농도구간이 사류수역과 일치하여 수중폭기장치가 설치되어야 하는 것으로 판단하였다. 사류수역은 주로 취수탑의 구조에 기인하는 것으로 확인되었으며 최저 취수수위 이하에서 발생하는 것으로 관측되었다.



체류시간 모의결과, 댐내 사류수역(□)



심층 혐기화층

그림 6. 댐 수체의 사류수역 및 혐기화층

3) 설치 위치, 용량 및 대수 선정

수질모의 및 실시간 측정을 통해 관측된 사류수역을 수증폭기장치의 적용을 위한 대상위치로 선정하였다. 저수지 전체 수체를 대상으로 장치를 설치하는 것이 수질관리를 위한 최선의 방안이나 이는 비효율적이며, 지형 및 저수지의 안정적 관리를 위해서도 가능성이 어려울 것으로 판단하였다. 따라서, 대상 댐의 환경분석을 통해 적절한 설치 용량, 형식 및 대수를 산정하였다. 환경인자는 기초조사 항목과 수면특성 항목으로 구분하여 분석하였다.

표 3. 댐 환경분석 주요내용

<p>▶ 기초조사</p> <ul style="list-style-type: none"> • 평균운영수심, 운영수위체적, 표층수심, 심층유효체적, 수심별 온도 및 밀도, 성층강도 <p>▶ 수면특성</p> <ul style="list-style-type: none"> • 대상수면적, 심층혐기화층, 사류수역, 조류발생수역

산기식은 염경택 등(2004)이 제시한 무차원수 D_N (산소전달 효율이 상승하는 700,000을 최적값으로 적용)과 적정 폭기량을 비교하여 산정하였으며, 김성훈 등(2005)이 제시한 산기식 물순환장치의 설계방안과 신상민 등(2011)이 제시한 설계요소를 고려하였다. 간헐식은 성층특성을 파악한 후 양수통에서 유량을 산정하여 공급하여야 할 운동에너지의 증가분을 통해 설치대수를 산정하였으며, 대류식은 물순환 영향범위의 중복효과를 고려하여 검토하였다.

표 4. 산기식 수증폭기장치 설치대수 산정시 적용 설계요소

<ul style="list-style-type: none"> • 설계된 폭기량을 통해 무차원수 D_N값 산정 ($D_N = N^0 H^7 / 4\pi \alpha^2 Q_B g u_s^3$) * N : 성층강도(수심 고려한 표심층 밀도차), H : 설계수심, α : 연행계수(0.083), Q_B : 바닥 폭기량, g : 중력가속도, u_s : 기포 슬립속도 (기포경 3mm일 때 0.23) • 무차원수 D_N에 따른 단위시간당 심층산소전달량 산정 (용존산소 3mg/L 적용) • 산소소모율 이용, 심층부 최소 필요산소량 산정 (최대산소소모율 0.5g/m³ · 일 적용)
--

5. 적용방안

적용 형식은 사류수역에 직접적인 용존산소를 공급할 수 있는 장치와 저에너지로 수체를 순환하여 표층수온을 낮추면서 조류성장을 억제할 수 있도록 복합식 방안으로 산기식과 대류식을 적용하였다. 산기식은 심층혐기화 방지를 위해 수체용량 산정식을 적용하였으며, 대류식은 CFD로 중복효과가 검증된 이격거리를 적용하였다. 2개의 형식(산기식과 대류식)을 댐축 및 취수탑 인접 수면에 설치하되, 취수탑주변은 용존산소 공급목적, 이격된 저수지 중앙부는 저에너지로 지속적인 수체를 순환할 수 있도록 적용하고 설치시 이격거리와 배치간격을 고려하였다.

표 5. 설치 위치 및 배치를 위한 고려사항

<ul style="list-style-type: none"> • 취수탑으로부터 일정거리(100m) 이상 이격하여 설치 • 배치간격 <ul style="list-style-type: none"> - 산기식 : 1.5×H(수심) - 대류식 : 80m(지형특성 및 중첩효과)
--



구분	산 기 식	대 류 식
적용 형식	댐축 및 취수탑 주변 (산소전달을 양호 (수질·하류 생태계 보전))	저수지 중앙부 (저에너지 수체 순환 (심층혐기화 방지))
수면적	20,000m ² 하류하천 기본공급량 적용	40,000m ² 저수지 중앙부 (기존 하천지형)
배치 간격	1.5H(수심) 	80m 

그림 7. 적용방안 모식도

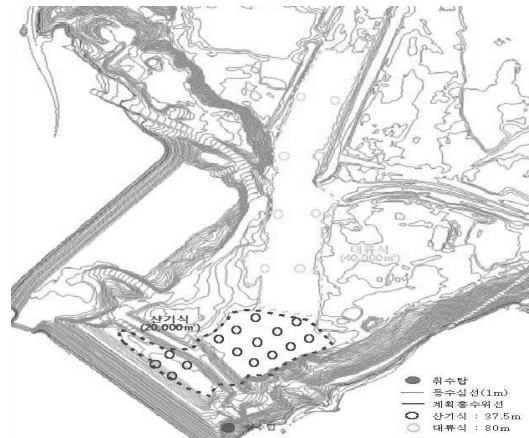


그림 8. 수증폭기장치 배치형태

6. 결론

기존의 수중폭기장치(물순환장치) 설계방법은 경험식과 보조 예측인자, 안전율로 산정하여 설치간격, 산소전달효과, 산소소모율 예측, 중첩효과 등을 고려할 수 없었다. 금번 적용방안은 수체 모의결과와 실측된 수질조사 결과를 바탕으로 환경요소를 분석하고 운영댐의 수리·수질환경에 대한 CFD 모델을 통해 모의, 검·보정된 산출식을 적용하였으며, 중첩효과를 고려한 공간배치 방안을 제시하였다. 이를 통해 향후 개발되는 중소규모 댐저수지의

수중폭기장치 설치타당성 검토방법을 제시하여 금번 적용된 K댐과 하류하천의 수질 및 수생태 보존을 위한 설치 타당성을 확인하였다. 또한, 형식 및 용량산정을 위한 수문운영 자료의 활용방안과 복합형식 적용시 수질목표별 대상수체의 분할 적용성 등을 제시하여 동일조건 수중폭기장치 설치·운영을 위한 설계, 연구 등에 가이드 역할을 할 수 있을 것으로 사료된다. 향후 댐 수질개선 효과분석과 하류하천에 미치는 수생태 영향에 대해 모니터링하고 추가적인 연구과제를 발굴하여 연계수행할 계획이다. 🍷

참고문헌

1. 염경택 등 (2004). 성층유체의 밀도분포 변화 및 유동장 분석을 통한 Bubble Plume의 수리동력학적 거동평가, 대한토목학회논문집 24(4b) pp.347-355
2. 염경택 등 (2004). Bubble Plume의 중첩효과가 저수지 성층파괴 효율에 미치는영향에 대한 수리동력학적 2상-3차원 평가, 대한수자원학회논문집 37(2) pp.219-231
3. 김성훈 등 (2005). 버블플룸을 이용한 탈성층의 평가:차원해석 및 설계방법론의 제시, 대한상하수도학회지 제19권 제6호, pp.827-837
4. 박한영 등 (2006). 신개념 대류식 호소수 순환장치개발, 2006 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp.520-525
5. 신상민 등 (2011). 산기식 물순환장치 설계인자 연구:현장 댐 조건을 고려한 CFD 해석 중심, 상하수도학회지 25(2) pp.161-169